

การศึกษาเสียงของกีตาร์



นายณภัทร
นายณัฐกร

พจนานุกรม
น้อยธรรมราช

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

รฟ.

ศบ 161 ก สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

๕543

พ.ศ. 2543

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน... 40203
วัน, เดือน, ปี 20 ส.ค. 2544

b. 11092841
i.

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A Study of Guitar Sound

Mr. Napat

Potjanaporn

Mr. Nathakorn

Noithammaraj

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED

IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT

FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE

DEPARTMENT OF APPLIED PHYSICS

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

การศึกษาเสียงของกีตาร์

(A Study of Guitar Sound)

โดย

นายณภัทร พจนานภรณ์

นายณัฐกร น้อยธรรมราช

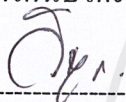
ภาควิชา

ฟิสิกส์ประยุกต์

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ. ดร. ศิริศักดิ์ เตชะทวีกุล

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้นับโครงการพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต



(หัวหน้าภาควิชา)

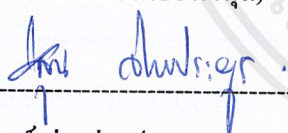
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิชาญ เตชะตรีระ)

คณะกรรมการโครงการพิเศษ



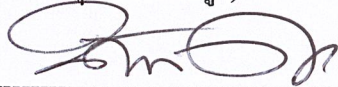
(ประธานกรรมการ)

(ผศ. ดร. ศิริศักดิ์ เตชะทวีกุล)



(กรรมการ)

(อาจารย์ ต้น จ่างประยูร)



(กรรมการ)

(อาจารย์ บดินทร์ คำรงค์ศักดิ์)



(กรรมการ)

(อาจารย์ สุรศักดิ์ พิพัฒน์ศาสตร์)

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title	Study of Guitar Sound
Name	Mr. Napat Potjanaporn Mr.Nathakorn Noithammaraj
Special Project Advisors	Asst.Prof.Dr.Sirisak Techathawiekul
Department	Applied Physics
Acedemic Year	2000

Abstract

The aim of this project is to determine a guitar bandwidth. A 20-fret acoustic guitar was in standard tune for sound production. A condenser microphone used as a sound detector was connected with an oscilloscope for time domain and a spectrum analyzer for frequency domain. Experimental condition was set at sound pressure level of about 64 dB(A) for each note on guitar. It has been found that the bandwidths of each harmonic are in the same range, which is close to 970 Hz, which is in agreement with the standard value (930) Hz.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.ศิริศักดิ์ เตชะทวีกุล ที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ รวมทั้งให้ความช่วยเหลือในการดำเนินงานในโครงการพิเศษนี้มาตลอด

ขอขอบคุณ อ. สุนันท์ จ่างประยูร ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือในการยืมเครื่องมือและอุปกรณ์ที่จำเป็นต่าง ๆ รวมถึงห้องที่ใช้ในการทำโครงการพิเศษนี้

ขอขอบคุณ อ. ธวัชชัย ขาวประเสริฐ ผู้ให้ความสะดวกในการใช้ห้องทำโครงการพิเศษนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อโครงการพิเศษภาษาไทย	ก
บทคัดย่อโครงการพิเศษภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูป	ฉ
สารบัญตาราง	ณ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบข่ายของโครงการ	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	3
2.1 ทฤษฎีทางเสียง	3
2.1.1 ลักษณะสมบัติของเสียง	4
2.1.2 ความเร็วของเสียง	5
2.1.3 การส่งผ่านของพลังงานในคลื่นและความเข้มของคลื่น	6
2.1.4 กำลังอัดของเสียง	9
2.1.5 เดซิเบลเอ	10
2.1.6 การสร้างเสียง	11
2.1.7 ระดับเสียง	12
2.1.8 คุณภาพของเสียง	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.9 การสั้นพ้อง	15
2.1.10 กีตาร์ธรรมชาติ	16
2.1.11 ความกว้างของย่านความถี่	17
2.2 อนุกรมฟูเรียร์	18
2.3 ไมโครโฟน	18
2.3.1 ชนิดของไมโครโฟน	18
2.3.2 คอนเดนเซอร์ไมโครโฟน	
2.3.3	19
บทที่ 3 การดำเนินการทดลอง	20
3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่เกี่ยวข้อง	20
3.2 วงจรที่ใช้ในการทดลองและวงจร Pre-Amplifier	20
3.3 การดำเนินการทดลอง	21
บทที่ 4 ผลการทดลอง	25
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	58
ภาคผนวก	62
บรรณานุกรม	88

สารบัญรูป

รูปที่ 2.1 ก. แสดงบริเวณที่มีการอัดและขยายตัวของโมเลกุลของอากาศ ขณะที่คลื่นเสียงเดินทางผ่านอากาศ	3
ข. แสดงลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างความดันและระยะทาง เมื่อคลื่นเสียงเดินทางผ่าน	
รูปที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ขององค์ประกอบต่างๆ ในคลื่นรูป Sine	4
รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะ โครงสร้างภายในของคอนเดนเซอร์ไมโครโฟน	19
รูปที่ 3.1 แสดงวงจร Preamplifier	20
รูปที่ 3.2 แสดงภาพของคอกีตาร์ขนาด 20 เฟรต	21
รูปที่ 3.3 แสดงภาพการเชื่อมต่ออุปกรณ์	22
รูปที่ 3.4 แสดงค่าของความถี่และค่าแอมพลิจูด สายกีตาร์เส้นที่ 5 จุดที่ 9	23
รูปที่ 3.5 แสดงค่าของความดังและค่าของความถี่สายกีตาร์เส้นที่ 5 จุดที่ 9	24
รูปที่ 4.1 แสดงค่าความถี่และค่าแอมพลิจูด สายกีตาร์เส้นที่ 1 จุดที่ 7	25
รูปที่ 4.2 แสดงค่าความดังและค่าของความถี่สายกีตาร์เส้นที่ 1 จุดที่ 7	25
รูปที่ 4.3 ก. แสดงแผนภูมิแท่งแสดงความถี่กับระดับเสียงของสายกีตาร์เส้นที่ 1 ใน Fundamental mode	28
ข. แสดงแผนภูมิแท่งแสดงความถี่กับระดับเสียงของสายกีตาร์เส้นที่ 1 ใน Fundamental mode	29
รูปที่ 4.4 ก. แสดงแผนภูมิแท่งแสดงความถี่กับระดับเสียงของสายกีตาร์เส้นที่ 2 ใน Fundamental mode	32
ข. แสดงแผนภูมิแท่งแสดงความถี่กับระดับเสียงของสายกีตาร์เส้นที่ 2 ใน Fundamental mode	33
รูปที่ 4.5 ก. แสดงแผนภูมิแท่งแสดงความถี่กับระดับเสียงของสายกีตาร์เส้นที่ 3 ใน Fundamental mode	36
ข. แสดงแผนภูมิแท่งแสดงความถี่กับระดับเสียงของสายกีตาร์เส้นที่ 3 ใน Fundamental mode	37

รูปที่ 4.6 ก. แสดงแผนภูมิแท่งแสดงความถี่กับระดับเสียงของสายกีตาร์เส้นที่ 4 ใน Fundamental mode	40
ข. แสดงแผนภูมิแท่งแสดงความถี่กับระดับเสียงของสายกีตาร์เส้นที่ 4 ใน Fundamental mode	41
รูปที่ 4.7 ก. แสดงแผนภูมิแท่งแสดงความถี่กับระดับเสียงของสายกีตาร์เส้นที่ 5 ใน Fundamental mode	44
ข. แสดงแผนภูมิแท่งแสดงความถี่กับระดับเสียงของสายกีตาร์เส้นที่ 5 ใน Fundamental mode	45
รูปที่ 4.8 ก. แสดงแผนภูมิแท่งแสดงความถี่กับระดับเสียงของสายกีตาร์เส้นที่ 6 ใน Fundamental mode	48
ข. แสดงแผนภูมิแท่งแสดงความถี่กับระดับเสียงของสายกีตาร์เส้นที่ 6 ใน Fundamental mode	49
รูปที่ 4.9 แสดงค่าความถี่และค่าแอมพลิจูดของสายกีตาร์เส้นที่ 2 จุดที่ 1 ใน time domain	51
รูปที่ 4.10 แสดงค่าความถี่และค่าความถี่ของสายกีตาร์เส้นที่ 2 จุดที่ 1 ใน Frequency domain	51
รูปที่ 4.11 แสดงค่าความถี่และค่าแอมพลิจูดของสายกีตาร์เส้นที่ 3 จุดที่ 11 ใน time domain	52
รูปที่ 4.12 แสดงค่าความถี่และค่าความถี่ของสายกีตาร์เส้นที่ 3 จุดที่ 11 ใน Frequency domain	52
รูปที่ 4.13 แสดงค่าความถี่และค่าแอมพลิจูดของสายกีตาร์เส้นที่ 4 จุดที่ 0 ใน time domain	53
รูปที่ 4.14 แสดงค่าความถี่และค่าความถี่ของสายกีตาร์เส้นที่ 4 จุดที่ 0 ใน Frequency domain	53
รูปที่ 4.15 แสดงค่าความถี่และค่าแอมพลิจูดของสายกีตาร์เส้นที่ 5 จุดที่ 9 ใน time domain	54
รูปที่ 4.16 แสดงค่าความถี่และค่าความถี่ของสายกีตาร์เส้นที่ 5 จุดที่ 9 ใน Frequency domain	54
รูปที่ 4.17 แสดงการจับคอร์ด์ A	55
รูปที่ 4.18 แสดงค่าความถี่และค่าแอมพลิจูดของ คอร์ด์ A ใน time domain	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.19 แสดงค่าความถี่และค่าความถี่ของคอร์ด A ใน Frequency domain	55
รูปที่ 4.20 แสดงการจับคอร์ด B	56
รูปที่ 4.21 แสดงค่าความถี่และค่าแอมพลิจูดของ คอร์ด B ใน time domain	56
รูปที่ 4.22 แสดงค่าความถี่และค่าความถี่ของคอร์ด B ใน Frequency domain	56
รูปที่ 4.23 แสดงการจับคอร์ด D	57
รูปที่ 4.24 แสดงค่าความถี่และค่าแอมพลิจูดของ คอร์ด D ใน time domain	57
รูปที่ 4.25 แสดงค่าความถี่และค่าความถี่ของคอร์ด D ใน Frequency domain	57
รูปที่ 5.1 แสดงค่าความถี่การเล่นกีตาร์ออกมาในรูปแบบของคอร์ด	58
รูปที่ 5.2 ก. แสดงแผนภูมิแบบจุดแสดง Bandwidth ของกีตาร์ ใน Fundamental mode	60
ข. แสดงแผนภูมิแบบแท่งแสดง Bandwidth ของกีตาร์ ใน Fundamental mode	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดลองของสายที่ 1	26
ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดลองของสายที่ 2	30
ตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดลองของสายที่ 3	34
ตารางที่ 4.4 แสดงผลการทดลองของสายที่ 4	38
ตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดลองของสายที่ 5	42
ตารางที่ 4.6 แสดงผลการทดลองของสายที่ 6	46
ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดลองของการเล่นคอร์ด	50



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

ปัจจุบัน เราได้นำความรู้ทางด้านเสียงทั้งทางวิทยาศาสตร์และทางวิศวกรรมศาสตร์ มาประยุกต์ใช้กับวิชาการทางด้านดนตรี ซึ่งนำมาปรับปรุงเกี่ยวกับอุปกรณ์และเครื่องมือทางด้านดนตรี

ในโครงการนี้เราได้นำกีตาร์มาศึกษา เพื่อสังเกตรูปลักษณ์ และความถี่ของแต่ละโน้ตที่กีตาร์อะคูสติคมาตรฐาน (ขนาด 20 เฟรต) สามารถผลิตออกมาได้และนำมาวิเคราะห์เพื่อนำไปออกแบบกีตาร์ในภายภาคหน้าต่อไป ซึ่งในโครงการนี้เราได้ใช้อุปกรณ์ ต่างๆ แต่ที่สำคัญ เราใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า สเปกตรัมอนาลิเซอร์ (Spectrum Analyzer) ในการวิเคราะห์แยก รูปลักษณ์ของสัญญาณเสียงจากกีตาร์เป็นสเปกตรัม เพื่อบอกถึงความถี่ และเราสามารถหาแบนด์วิดธ์ของกีตาร์ได้ในฮาร์โมนิกที่ 1-5 ซึ่งสามารถนำไปเป็นมาตรฐานเพื่อศึกษาต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาและเรียนรู้ทฤษฎีทางเสียง
2. ศึกษาทฤษฎีทางดนตรีและเครื่องดนตรี
3. ศึกษาเรียนรู้เรื่องไมโครโฟน
4. ศึกษาเกี่ยวกับเครื่องมือทางการวัด
5. ทดลองเพื่อหาแบนด์วิดธ์ (Bandwidth) ของกีตาร์

1.3 ขอบข่ายการทำงาน

2. ศึกษาทฤษฎีทางดนตรี ทางเสียงให้เกิดความเข้าใจ
3. สร้างวงจรให้สัญญาณเสียงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า
4. ทำการทดลองเพื่อหาค่าแบนด์วิดธ์ (Bandwidth) ของกีตาร์
5. นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์รวมทั้งสรุปผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้จากโครงการ

1. มีความรู้เรื่องเสียง , คนตรีและความสัมพันธ์ทางวิทยาศาสตร์ของเสียงคนตรี
2. สามารถใช้เครื่องมือทางการวัดเครื่อง spectrum analysis
3. สามารถทราบแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ของกีตาร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

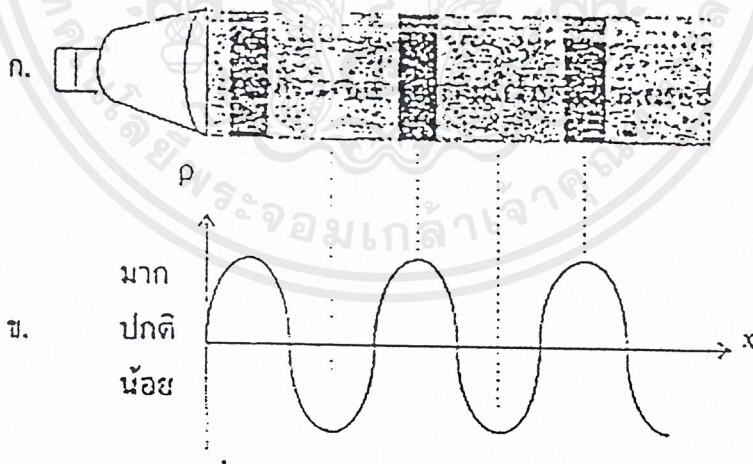
บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 ทฤษฎีทางเสียง

คลื่นเสียงเป็นคลื่นกลตามยาว มีลักษณะเป็นคลื่นฮาร์โมนิก ซึ่งคลื่นนี้จะแผ่ออกไปทุกทิศทาง โดยต้องอาศัยตัวกลางซึ่งอาจเป็นของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซก็ได้

จากการศึกษาพบว่า เมื่อเสียงแผ่ไปในอากาศจะทำให้ความดันเปลี่ยนแปลงแล้วโมเลกุลของอากาศจะสั่นไปมาพร้อมกับถ่ายเทพลังงานให้กับโมเลกุลอื่น ๆ อย่างต่อเนื่องแล้วกลับคืนสู่ตำแหน่งเดิมหลังจากคลื่นเสียงได้แผ่ผ่านไป ดังนั้น เมื่อมีคลื่นเสียงเดินทางไปในตัวกลางจะเกิดจุดที่มีอนุภาคอัดตัวและจุดที่อนุภาคขยายตัวออกจากกันสลับกันไปมาตลอดทาง และจุดเหล่านี้เคลื่อนที่เปลี่ยนตำแหน่งไปเรื่อย ๆ ในแนวทางการเคลื่อนที่ของคลื่น เมื่อมองในแง่ความดันที่จุด ๆ หนึ่งจะมีค่ามากกว่าปกติ และน้อยกว่าปกติสลับกันไป ลักษณะของคลื่นที่โมเลกุลของตัวกลางที่คลื่นนั้นเดินทางผ่านไป มีการสั่นหรือเคลื่อนที่ในแนวการเดินทางของคลื่น เรียกว่า คลื่นตามยาว ซึ่งเป็นลักษณะประจำตัวของคลื่นเสียงทั่วไป



รูปที่ 2.1 ก. แสดงบริเวณที่มีการอัดและขยายตัวของโมเลกุลของอากาศขณะที่คลื่นเสียงเดินทางผ่านอากาศ

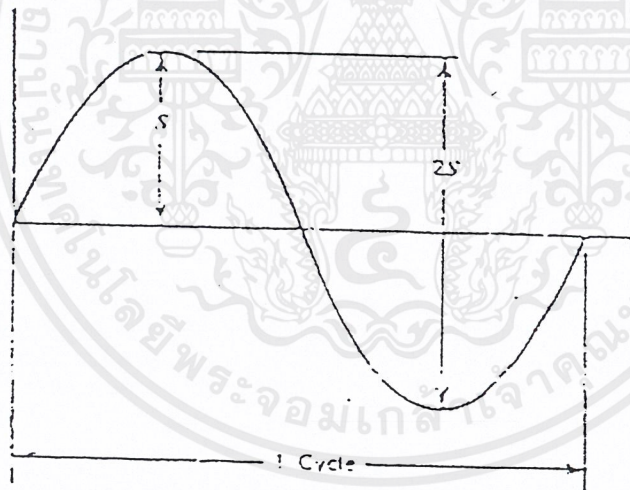
ข. แสดงลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างความดันและระยะทางเมื่อคลื่นเสียงเดินทางผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1 ลักษณะสมบัติของเสียง (Sound Characteristics)

ความถี่ (Frequency)

ในการอธิบายเรื่องของความถี่จะยกตัวอย่างของเรื่องลูกสูบที่เคลื่อนที่จากข้างล่างขึ้นข้างบนภายในกระบอกสูบ ทำให้เกิดเป็นการเคลื่อนที่แบบฮาร์โมนิก ระยะทางจากจุดศูนย์กลางของกระบอกสูบไปยังจุดสุดท้าย จะเรียกว่า แอมพลิจูด ความยาวทั้งหมดของกระบอกจะเรียกว่า Double Amplitude ลูกสูบจะเคลื่อนที่สมบูรณ์ใน 1 รอบ เมื่อเริ่มจากจุดศูนย์กลางของกระบอกสูบไปยังจุดที่ไกลที่สุดและกลับมามาทางเดิม และเคลื่อนที่จากจุดตรงข้ามของกระบอกสูบกลับมาอีกครั้งหนึ่งแล้วจึงกลับไปยังจุดศูนย์กลางของกระบอกสูบจำนวนครั้งที่ต่อวินาทีของลูกสูบจากจุดข้างล่างขึ้นข้างบน เมื่อผ่านครบรอบ 1 Cycle จะเรียกว่า ความถี่ ซึ่งความถี่ของคลื่นของคลื่นเสียงก็คือจำนวน Cycle ต่อวินาที ซึ่งระยะเวลาที่ได้จากการเดินทางครบรอบ 1 Cycle อย่างสมบูรณ์จะเรียกว่า คาบเวลา (Period)



รูปที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ขององค์ประกอบต่างๆ ในคลื่นรูป Sine

จากรูป

S คือ แอมพลิจูด

2S คือ Double Amplitude

f คือ ความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 ความเร็วของเสียง (Velocity of Sound)

การหาค่าของความเร็วของคลื่นเสียงนั้นหาได้หลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีจะได้ค่าความเร็วแตกต่างกันออกไป เช่น ความเร็วของเสียงที่เคลื่อนที่ในตัวกลางเป็นของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ก็จะมีวิธีการหาที่แตกต่างกัน

ค่าความเร็วของคลื่นเสียงอาจหาได้จาก ระยะที่คลื่นเสียงเดินทางครบ 1 Cycle ซึ่งจะได้

$$v = f\lambda \quad 2.1$$

v คือ ความเร็วของเสียง มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที

f คือ ความถี่ มีหน่วยเป็น เฮิรตซ์

λ คือ ความยาวคลื่น

คลื่นเสียงสามารถแพร่เข้าไปในของแข็ง ของเหลว ก๊าซได้ ความเร็วของเสียงในตัวกลางจะขึ้นกับความหนาแน่นของตัวกลาง และคุณสมบัติความยืดหยุ่นของตัวกลาง เราสามารถหาค่าความเร็วของเสียงในของแข็งได้จาก

$$v = \sqrt{\frac{y}{\rho}} \quad 2.2$$

เมื่อ y คือค่า Yong's modulus

ρ คือ ความหนาแน่นของตัวกลาง

ค่าความเร็วของเสียงในของเหลว คือ

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \quad 2.3$$

เมื่อ B คือ Bulk modulus

ρ คือ ความหนาแน่นของตัวกลาง

ค่าความเร็วของเสียงในอากาศ คือ

$$v = \sqrt{\frac{P\gamma}{\rho}} \quad 2.4$$

เมื่อ γ คือ ค่าคงที่ เรียกว่าสัดส่วนของความร้อนจำเพาะของก๊าซมีค่าเท่ากับ 1.40 ในอากาศ

P คือ แรงดันของก๊าซ

ρ คือ ความหนาแน่นของตัวกลาง

จากสมการการหาค่าของความเร็วเสียงของก๊าซ ค่าแรงดันและความหนาแน่นของก๊าซจะเปลี่ยนแปลงไปกับอุณหภูมิของก๊าซ ด้วยเหตุนี้ ความเร็วของก๊าซจะขึ้นกับอุณหภูมิของก๊าซ ดังนั้นความเร็วเสียงในอากาศ คือ

$$v = (331 + 0.606t) \quad \text{m/s} \quad 2.5$$

เมื่อ t คือ อุณหภูมิของอากาศ มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส

2.1.3 การส่งผ่านของพลังงานในคลื่นและความเข้มของคลื่น

เราจำกัดความว่าคลื่นหนึ่งที่แพร่โดยการรบกวนเข้าไปในตัวกลางตัวกลางหนึ่ง สาเหตุของการรบกวนคือ อนุภาคของตัวกลางซึ่งเกิดการเคลื่อนที่ ดังนั้น เราจะเห็นได้ว่าการสั่นของอนุภาคจะทำให้เกิดพลังงาน และพลังงานนี้จะส่งผ่านจากอนุภาคหนึ่งไปยังอนุภาคหนึ่งในตัวกลาง ดังนั้นพลังงานการส่งผ่านคลื่นที่เกิดจากการถ่ายทอระหว่างอนุภาค

ให้เราพิจารณาอนุภาค อนุภาคเคลื่อนที่เป็นซิมเปิลฮาร์โมนิกอย่างง่าย ถ้าไม่มีการสูญเสียของพลังงาน จะได้พลังงานการส่งผ่านทั้งหมดของคลื่นเท่ากับพลังงานรวมของการสั่นของอนุภาค นั่นคือ

$$E_{\text{transmitted}} = (E_{\text{to}})_{\text{Particle}} \quad 2.6$$

พลังงานทั้งหมดจะถูกครอบครอง โดยอนุภาคเดี่ยว ๆ ในการเคลื่อนที่แบบซิมเปิลฮาร์โมนิก ครึ่งมีค่าเท่ากับ

$$E_{tot} = \frac{1}{2} kR^2 \quad 2.7$$

เมื่อ R คือ แอมพลิจูดของการสั่น

K คือ ค่าคงที่ของการหมุน

ค่าความถี่เชิงมุม คือ

$$\omega^2 = \frac{K}{m} \quad 2.8$$

เมื่อ m คือ มวลของอนุภาคที่เคลื่อนที่
ดังนั้นสามารถหาค่าคงที่ของการหมุน (K) ได้คือ

$$K = \omega^2 m \quad 2.9$$

และจากความสัมพันธ์ระหว่างความถี่เชิงมุมกับความถี่การสั่นของอนุภาค คือ

$$\omega = 2\pi f \quad 2.10$$

ดังนั้น สมการ 2.9 จะกลายเป็น

$$K = (2\pi f)^2 m \quad 2.11$$

แทนสมการ 2.11 ในสมการ 2.7 จะได้

$$E_{tot} = 1/2(2\pi f)^2 mR^2 \quad 2.12$$

ดังนั้นจะได้ค่าพลังงานการส่งผ่านของคลื่น คือ

$$E_{transmitted} = 2\pi^2 f^2 mR^2 \quad 2.13$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้ว่าพลังงานการส่งผ่านของคลื่นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่ากำลังสองของความถี่ของคลื่นและค่ากำลังสองของแอมพลิจูดของคลื่นจากการพิสูจน์สมการที่ 2.13 สำหรับการส่งผ่านพลังงานของคลื่นให้อยู่ในรูปทั่วไปได้ ในบางครั้งเราอาจจะกล่าวถึงคลื่นในเทอมของความเข้มข้นของมัน ความเข้มข้นของคลื่นก็คือ ค่าพลังงานของคลื่นนั้นต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ในหนึ่งหน่วยเวลา ดังนี้

$$I = \frac{E}{At} \quad 2.14$$

หน่วยของความเข้ม คือ วัตต์ต่อตารางเมตร แทนค่าพลังงานของคลื่นจากสมการ 2.13 ลงในสมการ 2.14 จะได้

$$I = 2\pi^2 \frac{mf^2 R^2}{At} \quad 2.15$$

เพราะเหตุนี้ความหนาแน่นของตัวกลางหาได้จาก มวลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ดังนั้น มวลของอนุภาคในการเคลื่อนที่แบบซิมเปิลฮาร์โมนิก หาได้โดย

$$m = \rho V \quad 2.16$$

และค่าปริมาตรของตัวกลางหาได้จากผลคูณระหว่าง พื้นที่หน้าตัดของตัวกลางนั้นกับความยาวของตัวกลางที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่าน ดังนั้นค่ามวลจะกลายเป็น

$$m = \rho AL \quad 2.17$$

แทนสมการ 2.17 ลงในสมการ 2.15 จะได้

$$I = 2\pi^2 \frac{\rho ALf^2 R^2}{At} \quad 2.18$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งค่า $\frac{L}{t}$ คือค่าความเร็วของคลื่นดังนั้น

$$I = 2\pi^2 \rho f^2 R^2 v \quad 2.19$$

สมการ 2.19 กล่าวถึง ความเข้มของคลื่นกลที่ความถี่ แอมพลิจูด ซึ่งเคลื่อนที่ ณ ความเร็วหนึ่ง ในความหนาแน่นของตัวกลางหนึ่งหุคนเราสามารถได้ยินเสียงที่มีความเข้มต่ำสุดประมาณ 10^{-12} W/m^2 และสูงสุดคือ 1 W/m^2 จะเห็นว่าช่วงกว้างของความเข้มจากต่ำสุดถึงสูงสุดมีขนาดประมาณ 10^{12} W/m^2 เพื่อความสะดวกในการหาค่าระดับความเข้ม จึงใช้ลอการิทึมมาใช้ในการวัดมีหน่วยเป็น เบล และหน่วยที่นิยมใช้คือ เดซิเบล ซึ่งหาได้จากสมการที่ 2.20

$$\beta = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad 2.20$$

เมื่อ β คือ ระดับความเข้มของเสียง มีหน่วยเป็น dB

I_0 คือ ความเข้มอ้างอิง $= 1 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2$

2.1.4 กำลังอัดของเสียง (Sound Pressure Level)

ในทางไฟฟ้า ถ้าค่าอินทิเกรนซ์คงที่ อัตราส่วนของกำลังไฟฟ้า จะเท่ากับอัตราส่วนของแรงดันยกกำลังสอง ดังสมการ

$$\frac{W_2}{W_1} = \left[\frac{E_2}{E_1} \right]^2 \quad 2.21$$

เมื่อ E_2 และ E_1 คือ แรงดันขาเข้าและแรงดันขาออกตามลำดับ

ดังนั้น ค่าระดับกำลังไฟฟ้าเป็นเดซิเบลจะเท่ากับ 10 คูณกับลอการิทึมของอัตราส่วนกำลังไฟฟ้า

$$\frac{W_2}{W_1} = \left[\frac{P_2}{P_1} \right]^2 \quad 2.22$$

$$SPL = 10 \log \left[\frac{P_2}{P_1} \right]^2 = 20 \log \frac{P_2}{P_1} \quad 2.23$$

เมื่อ SPL คือ กำลังอัดของเสียง มีหน่วยเป็น เดซิเบล

P_2 คือ กำลังของเสียง มีหน่วยเป็น N/m^2 N/m^2

P_1 คือ กำลังของเสียงที่ระดับเปรียบเทียบ มีหน่วยเป็น N/m^2

ในเรื่องอคูสติก ค่าระดับเปรียบเทียบ คือ $2.0 \times 10^{-5} N/m^2$ โดยคิดจากระดับความถี่ที่ 1 kHz บางครั้งจะเขียนเป็น 0.0002 dyne/cm^2 หรือ $0.0002 \mu\text{bar}$ ดังนั้น

$$SPL = 10 \log \left[\frac{P_2}{P_1} \right]^2 = 20 \log \frac{P_2}{P_1} \quad 2.24$$

2.1.5 เดซิเบลหรือ dB เป็นหน่วยพื้นฐานในการวัดระดับสัญญาณเสียง กำเนิดขึ้นในปี ค.ศ. 1928 โดยบริษัทโทรศัพทแห่งหนึ่งเพื่อใช้วัดการลดทอนที่เกิดขึ้นในสายโทรศัพท เดซิเบลมีค่าอ้างอิงแตกย่อยลงไปอีกมากมาย แต่ที่จะกล่าวนี้เป็นเดซิเบลเฉพาะในเรื่องของเครื่องเสียง

เดซิเบลใช้แพร่หลายในงานวัดย่านความถี่เสียง เพราะอัตราของตัวเลขในระบบลอการิทึม นั้นใกล้เคียงกับธรรมชาติการได้ยินของมนุษย์ เสียงที่มนุษย์สามารถได้ยินได้โดยไม่มีอันตรายจะอยู่ในช่วงตั้งแต่ 130 dB ลงมา และเสียงที่เปลี่ยนแปลงความดังอย่างน้อยที่สุด 1 dB หูก็จะจับได้ และเสียงที่เปลี่ยนแปลงความดังไป 10 dB หูจะรู้สึกว่าเป็นไป 2 เท่า

หน่วยพื้นฐานของระบบนี้คือ เบล (bel) เบลคือ ลอการิทึมของอัตราส่วนของพลังงานสองค่า เดซิเบลเป็น 0.1 ของเบลหรือพูดกลับกันคือ เบลเป็น 10 เท่าของเดซิเบล

$$\text{dB} = 10 \log (P_1/P_2) \quad 2.25$$

และเมื่อเราสามารถวัดโวลเตจได้ง่ายกว่าเพาเวอร์ ดังนั้น เมื่อเพาเวอร์เท่ากับโวลเตจยกกำลังสอง (ความต้านทานคงที่) จะได้ว่า

$$\text{dB} = 10 \log (V_1^2 / V_2^2) \quad 2.26$$

$$\text{แต่เนื่องจาก} \quad \log A^2 = 2 \log A \quad 2.27$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น

$$dB = 20 \log (V_1 / V_2)$$

2.28

เมื่อเดซิเบลเป็นอัตราส่วนระหว่างจำนวน 2 จำนวน การเปรียบเทียบจำนวนหนึ่งกับค่าอ้างอิงค่าหนึ่งแล้วแยกชนิดออกไปย่อย ๆ จะเป็นวิธีที่ง่ายขึ้น มีผู้จัดทำตารางเปรียบเทียบเดซิเบลย่อย ๆ นี้ไว้อีกหลายแบบ แล้วต่อท้ายด้วยตัวอักษรอีก 1 - 2 ตัว เพื่อแบ่งแยกดังต่อไปนี้

dBA คือ การวัดสัญญาณทดสอบโดยจัดให้ผ่านวงจรกรองวงจรหนึ่งก่อน เพื่อให้สัญญาณขาออกมีการลดทอนในแต่ละความถี่คล้ายกับธรรมชาติการได้ยินของมนุษย์ (เรียกว่า การ weight) การ weight แบบ A จะลดทอนสัญญาณที่ต่ำกว่า 1 kHz และที่สูงกว่า 6 kHz ลง โดยเปรียบเทียบกับ การ weight แบบ B และ C ที่ ANSI S 1.4 - 1971 ได้กำหนดไว้

2.1.6 การสร้างเสียง คนตรีเป็นเรื่องของเสียง เสียงทุกชนิดเป็นผลจากการสั่นสะเทือน (vibration) การสั่นสะเทือนเป็นการเคลื่อนไหวกลับไปกลับมาอย่างรวดเร็ว อะไรก็ตามที่สั่นสะเทือนจะทำให้เกิดเสียง ลองเอานิ้วมือแตะที่บริเวณลำคอในขณะที่ท่านพูดหรือร้องเพลง เอานิ้วแตะขอบวิทยุ ถ้าโพงสเตอริโอหรือเครื่องรับโทรทัศน์ในขณะที่เปิดอยู่เอานิ้ววางที่เครื่องดนตรีในขณะที่กำลังบรรเลง จะรู้สึกว่ามี การสั่นสะเทือนอยู่ที่ปลายนิ้ว ท่านกำลังสัมผัสการสั่นสะเทือนที่แท้จริง ซึ่งทำให้เกิดเสียงของท่าน เสียงวิทยุ และเสียงเครื่องดนตรี

เมื่อวัตถุสั่นสะเทือน อากาศรอบ ๆ วัตถุก็จะสั่นสะเทือนตามไปด้วย การสั่นสะเทือนนี้แผ่กระจายไปในอากาศในรูปของคลื่นเสียง คลื่นเสียงจะเดินทางไปในทุกทิศทาง บน ล่าง และทุกด้าน

เรามองไม่เห็นเสียง แต่เราสามารถแสดงวิธีที่จะให้เห็นภาพว่าเสียงมีลักษณะอย่างไร เอาไม้เมตรวางบนโต๊ะ ให้ยื่นออกมาจากขอบประมาณครึ่งหนึ่ง เอาฝ่ามือกดไม้เมตรบนโต๊ะให้แน่น เอามือตีที่ปลายไม้ อีกข้างหนึ่ง ไม้จะเริ่มต้น ลองนึกภาพว่าถ้าเอาดินสอดำหนึ่งผูกติดไว้ที่ปลายไม้เมตร ตีที่ปลายไม้เมตรอีกครั้งหนึ่ง ในขณะที่ไม้สั่นสะเทือนขึ้นลง ลองคิดว่าถ้าเอากระดาษลากผ่านปลายดินสอดำแท่งนั้น เส้นดินสอดำที่ปรากฏบนกระดาษแผ่นนั้นจะมีลักษณะเหมือนคลื่นเสียงที่เรามองไม่เห็น

ถึงแม้ว่าเสียงทุกประเภทเกิดจากการสั่นสะเทือน แต่ก็ไม่เหมือนกัน บางเสียงเบา บางเสียงก็ดังเช่นเสียงกระซิบเป็นเสียงเบาในขณะที่เสียงตะโกนเป็นเสียงดัง เสียงยังมีระดับเสียงสูง/ต่ำ ขลุ่ยฟลุ้ตเล่นเสียงสูง แต่ขอเบสเล่นเสียงต่ำ และเสียงก็มีคุณภาพต่างกัน เปียโนมีเสียงที่มีคุณภาพอย่างหนึ่ง กีตาร์ก็มีคุณภาพอีกอย่างหนึ่ง นี่เป็นอีกเหตุผลหนึ่งที่ทำให้เราจำเสียงเครื่องดนตรีได้

เสียงดนตรีทุกเสียงสามารถกำหนดได้จากความดัง ระดับเสียงและคุณภาพเสียง ต่อไปนี้จะได้กล่าวถึงวิทยาศาสตร์ของลักษณะต่าง ๆ ที่ประกอบกันเป็นเสียงที่แต่ละลักษณะ

2.1.7 ระดับเสียง เสียงโซปราโนจะต่างกับเสียงบาริโทน เสียงทรมเป็ตจะไม่เหมือนเสียงทุบา เสียงที่อยู่บนเป็นนิ้วขวาสุดของเปียโนจะแตกต่างไปจากเสียงที่อยู่บนเป็นนิ้วซ้ายสุด

ความแตกต่างก็คือเสียงเหล่านี้มีระดับเสียงต่างกัน บางเสียงมีระดับสูง บางเสียงมีระดับต่ำ เสียงโซปราโน เสียงทรมเป็ต เสียงฟลุ้ต เสียงไวโอลิน และเสียงที่อยู่บนเป็นนิ้วขวาสุดของเปียโนเป็นเสียงสูง ส่วนเสียงบาริโทน เสียงทุบา เสียงบาสซูน เสียงซอเบสและเสียงที่อยู่บนเป็นนิ้วซ้ายสุดของเปียโน เป็นเสียงในระดับต่ำ

ระดับเสียงถูกกำหนดโดยความเร็วที่วัตถุสั่นสะเทือนความเร็วของการสั่นสะเทือนนี้ เรียกว่า ความถี่ ถ้าสั่นสะเทือนด้วยความเร็วสูง ความถี่ก็จะสูง ระดับเสียงก็จะสูง ถ้าสั่นสะเทือนช้า ความถี่ต่ำ ระดับเสียงก็ต่ำ เราพูดถึงความถี่ในรูปของจำนวนครั้งที่วัตถุสั่นสะเทือนต่อวินาที

การทดลองอย่างง่ายโดยใช้ไม้วัดเมตรจะแสดงให้เห็นหลักการขั้นพื้นฐานของระดับเสียงสูงและเสียงต่ำ เอามือกดไม้วัดเมตรบนพื้นโต๊ะให้ส่วนที่อยู่บนโต๊ะยาว 9 นิ้ว ส่วนที่ยื่นออกนอกโต๊ะยาว 27 นิ้ว เอามือคบบที่ปลายไม้ ฟังเสียงพร้อมสังเกตการสั่นของไม้วัดเมตรต่อมาเลื่อนให้เข้ามาอยู่บนโต๊ะ 18 นิ้ว และยื่นออกนอกโต๊ะ 18 นิ้ว คบบที่ปลายอีกครั้งหนึ่ง

คราวนี้ฟังและสังเกตเหมือนครั้งแรก เสียงจะสูงขึ้นหรือต่ำกว่าเดิมหรือไม่อย่างไร การสั่นสะเทือนที่ปลายอิสระนั้นเร็วขึ้นหรือช้าลงกว่าครั้งแรก เนื่องจากส่วนของไม้วัดเมตรที่อยู่บนโต๊ะสั้นลงทำให้สั่นเร็วขึ้น และจะมีความถี่สูงขึ้น ดังนั้นจึงมีระดับเสียงสูงกว่าเส้นที่เกิดขึ้นจากคินสอคาผูกติดกับปลายไม้วัดนี้ จะแสดงยอดแหลมของคลื่นใกล้เคียงกันมากในกรณีที่มีความถี่สูงสำหรับความถี่ต่ำ ระดับเสียงต่ำ ยอดจะอยู่ห่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คนเราสามารถได้ยินเสียงที่มีความถี่จาก 20 ถึง 20,000 รอบต่อวินาที แต่เครื่องดนตรีทั่วไปจะมีช่วงแคบกว่านี้มาก เสียงต่ำสุดบนเปียโนจะมีความถี่ประมาณ 30 รอบต่อวินาที เสียงทุบาลงต่ำสุดได้ต่ำกว่า 40 รอบต่อวินาทีเล็กน้อย ส่วนเสียงสูงสุดของเปียโนสูงกว่า 4,000 รอบต่อวินาที เสียงสูงสุดของไวโอลินอยู่ประมาณ 3,500 รอบ

2.1.8 คุณภาพของเสียง เครื่องดนตรีแต่ละชนิดจะมีเสียงเฉพาะของตนเอง ซึ่งเรียกว่าคุณภาพเสียง คุณภาพเสียงของคลาริเน็ตจะไม่เหมือนคุณภาพเสียงของไวโอลิน ทรัมเป็ต หรือเปียโน ถึงแม้ว่าเครื่องดนตรีทั้งสามจะบรรเลงเสียงระดับเดียวกัน เราก็สามารถจำแนกเสียงได้ เพราะเสียงมีคุณภาพต่างกัน เมื่อเราฟังเครื่องดนตรีบรรเลงเสียง ๆ หนึ่งฟังแล้วเหมือนกับว่ามีระดับเสียงเดียว แต่ในเสียงนั้นจะมีเสียงสูงอีกเป็นจำนวนมาก เสียงที่สูงกว่าเสียงพื้นฐานนี้ เรียกว่า โอเวอร์โทน (Overtone) เสียงโอเวอร์โทนเหล่านี้จะผสมผสานกันเป็นอย่างดีจนเมื่อฟังเสียงพื้นฐานแล้วก็ยังไม่สามารถจำแนกเสียงเหล่านั้นได้

ข้อเท็จจริงที่น่าสนใจสำหรับโอเวอร์โทนก็คือแต่ละเสียงจะสั่นเป็นสอง , สาม , สี่ , ห้า ฯลฯ เท่าของเสียงพื้นฐาน กล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ ความถี่ของโอเวอร์โทนก็คือเลขจำนวนเต็มคูณด้วยความถี่ขั้นพื้นฐานที่ทำให้เกิดเสียงโอเวอร์โทนเหล่านั้น ดังนั้นถ้าเสียงพื้นฐานมีความถี่ 100 รอบต่อวินาที โอเวอร์โทนของโน้ตตัวนี้ก็จะมีความถี่ 200 , 300 , 400 , 500 รอบต่อวินาที

เครื่องดนตรีจะมีเสียงที่มีลักษณะเฉพาะตัว เพราะว่าแต่ละชนิดจะเน้นเสียงโอเวอร์โทนต่างกัน ตัวอย่างเช่น ลักษณะโครงสร้างของขลุ่ยฟู้ดทำให้เกิดกระโดดข้ามโอเวอร์โทนเสียงต่ำดึงเอาโอเวอร์โทนเสียงสูงออกมา ส่วนในคลาริเน็ตจะเน้นโอเวอร์โทนลำดับเลขที่ความแตกต่างนี้ทำให้เครื่องดนตรีแต่ละชนิดมีเสียงหลากหลายไม่เหมือนกัน

เสียงโอเวอร์โทนเกิดขึ้นจากวัตถุที่สั่นสะเทือนได้ เช่น สายไวโอลิน อากาศในท่อของขลุ่ยฟู้ด หรือแตรทรัมเป็ต หรือหน้ากลองที่สั่นสะเทือนเป็นบางส่วนหรือเต็มส่วน ตัวอย่างเช่นเมื่อสายไวโอลินสั่นสะเทือนทั้งสายจะให้เสียงพื้นฐาน แต่สายเดียวกันนั้นก็ยังสั่นสะเทือนในช่วงสั้น ๆ ด้วย ซึ่งจะให้เสียงโอเวอร์โทนจำนวนหนึ่งเช่นเดียวกันอากาศในท่อของเครื่องลมสั้นสะเทือนเต็มท่อให้เสียงพื้นฐานและส่วนที่สั่นสะเทือนช่วงสั้น ๆ จะเกิดเสียงโอเวอร์โทน หน้ากลองทั้งหน้าสั่นสะเทือนให้เสียงพื้นฐาน และเสียงโอเวอร์โทนจะเกิดจากบางส่วนของหน้ากลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลองนึกดูว่า ถ้าเราเอาฝ่ามือเคาะโต๊ะในอัตราหนึ่งเคาะต่อหนึ่งวินาที และลองนึกดูว่า ในขณะที่เดียวกันนั้นถ้าเอานิ้วหนึ่งเคาะโต๊ะด้วยความเร็วสองเคาะต่อหนึ่งวินาที และในขณะที่ใช้ฝ่ามือและนิ้วเคาะโต๊ะนั้น ลองนึกดูว่าเราอาจเติมนิ้วอื่น ๆ ที่ความเร็วสี่เคาะต่อวินาที

นี่เป็นวิธีทำงานของเครื่องดนตรี มันจะสั่นสะเทือน (ฝ่ามือเคาะโต๊ะ) ในความเร็วพื้นฐาน ในขณะที่เดียวกันบางส่วน (นิ้ว) สั่นสะเทือนเร็วกว่า

เราสามารถพิสูจน์ว่าเปียโนก็มีโอเวอร์โทนดังนี้ ให้เอามือขวากดเป็นนิ้ว C, E และ G ให้กดอยู่ตลอดเวลาถึงแม้ว่าเสียงจะเงียบไปแล้ว สายที่ทำให้เกิดเสียงเหล่านี้สามารถสั่นสะเทือนได้โดยเสรีที่นิ้วเอามือซ้ายกระแทกลิ้นนิ้ว C ที่ต่ำลงไป 2 ออกเทฟ แล้วปล่อยทันที ท่านจะได้ยินเสียงเบา ๆ ในระดับสูง ทั้ง ๆ ที่ไม่ได้เล่น เสียง C, E และ G เป็นส่วนหนึ่งของอนุกรมโอเวอร์โทนของเสียงพื้นฐาน C เมื่อท่านเล่นเสียง C ต่ำซึ่งมีเสียง C E และ G เป็นโอเวอร์โทนเสียงพื้นฐาน C นี้จะเป็นตัวชักนำให้เสียงสูงเหล่านั้นสั่นสะเทือนตามทำให้เกิดเสียงดังขึ้น

ลองดูใหม่ คราวนี้กดเป็นนิ้วอื่น ลองกดที่ B D และ F เสียงเหล่านี้ไม่อยู่ในอนุกรมโอเวอร์โทนของ C เคาะแรง ๆ ที่ C ต่ำอีกครั้งหนึ่ง จะไม่ได้ยินเสียง B D และ F เลย เพราะเสียงเหล่านั้น ไม่อยู่ในอนุกรมโอเวอร์โทนของ C

เนื่องจากเครื่องดนตรีแต่ละชนิดจะเน้นเสียงโอเวอร์โทนต่าง ๆ กัน ภาพของคลื่นเสียงของเครื่องดนตรีแต่ละชนิดจะไม่เหมือนภาพจินตนาการที่เกิดขึ้นจากการสั่นสะเทือนของไม้วัดเมตร ในภาพจริงจะมีการเพิ่มเส้นคลื่นที่ขึ้นลงของคลื่น ซึ่งเกิดจากเสียงโอเวอร์โทนทำให้เกิดคลื่นเสียงที่ซับซ้อน

ขณะที่คลื่นเสียงเคลื่อนที่ไปในอากาศ คลื่นจะต้องไปกระทบกับวัตถุบางชนิด บางอย่างก็อ่อนนุ่ม เช่น ม่าน และพรม เครื่องแต่งบ้านที่บุหนังและเสื้อผ้า เมื่อคลื่นไปกระทบสิ่งเหล่านี้ก็ถูกดูดซับเหมือนน้ำที่ถูกฟองน้ำดูด ถ้าหากคลื่นเสียงไปกระทบผิวพื้นแข็ง เช่น พื้นบ้าน กำแพง ฝ้า เพดาน และหน้าต่างที่ปิดอยู่ก็จะสะท้อนกลับเหมือนรังสีของแสงถูกสะท้อนกลับโดยกระจกเงา

คลื่นเสียงที่สะท้อนจากผิวพื้นแข็งนั้นเราได้ยินสองครั้งครั้งแรกจะเป็นตอนที่เกิดคลื่นเสียง และครั้งที่สองเมื่อเสียงสะท้อนกลับเสียงที่ใช้เวลามากกว่าหนึ่งในสิบของวินาทีแล้ว ได้ยินอีกครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนึ่งเรียกว่าเกิดเสียงสะท้อนกลับ ลมโศกโคนเรียกชื่อตัวเองในอาคารกีฬาขนาดใหญ่หรือในถ้ำหรือในหุบเขา หรือระหว่างตึกสูง ๆ เสียงเรียกชื่อที่ได้ยินอีกครั้งหนึ่งนั้นเรียกว่า เสียงสะท้อนกลับ (echo)

ถ้าท่านตะโกนเรียกชื่อตัวเองในอุโมงค์หรือในห้องน้ำที่ถูกระเบียงเคลือบ เสียงที่เกิดขึ้นจะแตกต่างออกไป เสียงจะสะท้อนกลับไปกลับมาระหว่างผนังที่มีพื้นผิวแข็ง และจะฟังได้ไม่ชัดเจน เสียงที่สะท้อนซ้อน ๆ กันนี้เรียกว่า การก้องกังวาน (reverberation)

เราจะรู้สึกไม่สบายใจ ถ้าไปอยู่ในห้องที่มีเสียงสะท้อนกลับหรือเสียงก้องกังวาน เพราะทำให้ฟังดนตรีไม่ได้ศัพท์ เนื่องจากเสียงเก่ายังสะท้อนค้างอยู่ในขณะที่เสียงใหม่เริ่มเข้ามาแล้ว เราไม่สามารถจำแนกเสียงได้ ด้วยเหตุผลเดียวกัน เราฟังคนพูดกันไม่ค่อยรู้เรื่อง วิธีหนึ่งที่จะระงับเสียงก้องกวนนี้ก็คือ เพิ่มเครื่องเรือนที่นุ่มนวล ม่าน หรือพรมในห้องที่มีการก้องกังวานมากเกินไป อีกวิธีหนึ่งก็คือบุเพดานหรือผนังด้วยแผ่นดูดซับเสียง แผ่นเหล่านี้มีพื้นผิวอ่อนนุ่มหรือมีรูพรุนซึ่งจะดูดซับคลื่นเสียงและหยุดการสะท้อนกลับ

2.1.9 การสะท้อน เมื่อเสียงจากตัวทำสั่นสะท้อนตัวหนึ่งทำให้วัตถุอีกตัวหนึ่งสั่นสะท้อนตามเรียกว่า มีการสั่นพ้อง เกิดขึ้น การสั่นสะท้อนนั้นจะผ่านจากวัตถุชิ้นหนึ่งไปอีกชิ้นหนึ่ง

การสั่นพ้องเกิดขึ้นเมื่อวัตถุใกล้เคียงมีความถี่ธรรมชาติเท่ากับความถี่ของวัตถุที่สร้างเสียง เราอาจฟังความถี่ธรรมชาติของวัตถุต่าง ๆ ได้โดยเอาดินสอเคาะวัตถุต่าง ๆ รอบตัวเรา เราสามารถฟังความถี่ธรรมชาติของแก้วน้ำชนิดและขนาดต่าง ๆ อย่างง่ายดาย ถ้านักดนตรีเล่นโน้ตเสียงหนึ่งที่มีความถี่เท่ากับความถี่ธรรมชาติของแก้วน้ำใบหนึ่ง แก้วน้ำนั้นก็สั่นสะท้อนตาม เรียกว่า แก้วสั่นพ้อง กับเสียงที่นักดนตรีสร้างขึ้น เสียงระดับอื่นอาจทำให้แก้วสั่นสะท้อนได้แต่แอมพลิจูดจะมีขนาดเล็กมาก

เราอาจเคยได้ยินเรื่องที่น่าทึ่งสามารถทำให้แก้วแตกได้จากการร้องโน้ตเสียงเดียว เรื่องนี้สามารถเป็นไปได้ ถ้าความถี่ของเสียงนักร้องเท่ากับความถี่ของแก้ว ถ้าแก้วบางและเสียงดังมาก แก้วก็จะแตก

เราอาจใช้เปียโนสร้างเสียงสั้นพ้องได้ด้วยการเล่นกระดิ่งขวามือคงไว้เพื่อให้สายทุกสายสั้นสะเทือนได้โดยเสรี เปิดฝาเปียโน หันหน้าไปทางตำแหน่งของสาย เปดเสียงร้องระดับเสียงสักหนึ่งเสียงให้ดัง แล้วตั้งใจฟังให้ดี จะได้ยินเสียงสั้นพ้องมาจากสายที่มีความถี่เท่ากับเสียงที่เราร้อง ลองร้องเสียงอื่นบ้างทุก ๆ เสียงที่ร้องเราจะได้ยินเสียงสั้นพ้องจากสายที่มีความถี่เดียวกันกับเสียงนั้น เราก็จะได้ยินเสียงจากสายอื่น ๆ ด้วย แต่จะเบามากเสียงเหล่านั้นจะสั้นพ้องกับเสียงโอเวอร์โทนของเสียงเรา

วัตถุบางอย่างสามารถสั้นสะเทือนหรือสั้นพ้องได้ทุกระดับเสียง ถ้าโพงขยายเสียงและส่วนลำตัวของเครื่องดนตรีส่วนใหญ่สั้นพ้องได้ในระดับเสียงช่วงกว้าง ๆ ตัวอย่างเช่น ถ้าเราเอานิ้วมือไปแตะลำตัวของกีตาร์หรือไวโอลินในขณะที่มีการแสดงดนตรี เสียงดังสนั่นในห้องเดียวกันนั้นจะรู้สึกว่าการแสดงดนตรีที่ถืออยู่นั้นจะสั้นพ้องตามทุก ๆ ระดับเสียงทีเดียว

หอยสังข์สั้นสะเทือนโดยวิธีเดียวกัน เมื่อเราเอาหอยสังข์มาฟังที่หู เราอาจคิดว่าเราได้ยินเสียงทะเล ความเป็นจริงแล้วหอยสังข์สั้นพ้องกับเสียงทุกเสียงรอบตัวเรา รวมทั้งเสียงที่เราไม่ได้ยินด้วยผนังโค้งของโพรงหอยสังข์จะสะท้อนเสียงเหล่านี้กลับไปกลับมาจนกระทั่งเสียงเหล่านี้ฟังแล้วเหมือนเสียงคลื่นในมหาสมุทร

เราอาศัยอยู่ในโลกที่เต็มไปด้วยเสียงที่น่าอัศจรรย์ เราไปฟังคอนเสิร์ต ชมอุปกรณ์และงานดนตรีต่าง ๆ เราฟังดนตรีจากแผ่นเสียงแถบบันทึกเสียง วิทยุและโทรทัศน์ เราได้ยินเสียงดนตรีในสำนักงาน โรงงาน และร้านค้า พวกเราหลายคนก็เป็นนักดนตรีหรือเล่นดนตรีได้ด้วย ทั้งหมดนี้นำไปสู่คำถามว่า วิทยาศาสตร์ของเสียงเมื่อร่วมกับศิลปะด้านดนตรี จะสร้างเสียงวิจิตรพิสดารเหล่านี้ได้อย่างไร

2.1.10 **กีตาร์ธรรมชาติ** หรือ กีตาร์โปร่ง มีลักษณะพื้นฐานอย่างเดียวกับเครื่องสายตระกูลไวโอลิน แต่มีความแตกต่างที่สำคัญหลายอย่าง คือ แผ่นบนและล่างของกีตาร์มีลักษณะแบนราบแต่ห้องและหลังของไวโอลินมีลักษณะโค้งนูนออกมา กอถ่วงกีตาร์จะกว้างกว่าและกีตาร์มีความยาวมากกว่าไวโอลินกว่าหนึ่งฟุต นอกจากนี้กีตาร์ยังมีหย่องที่แบน เตี้ย และมี 6 สาย เสียงกีตาร์ออกมาจากรูกลมใหญ่ ซึ่งเจาะกลางตัวกีตาร์แทนที่จะออกมาจากรูรูปตัวเอฟของไวโอลิน

เราไม่ใช่คันชักกีตาร์ แต่จะใช้ปลายนิ้วหรือเล็บ หรือใช้แผ่นพลาสติกหรือแผ่นโลหะ บาง ๆ ที่เรียกว่ากระดิด ดิคบนสายกีตาร์ผู้เล่นสามารถเล่นเสียงเดียวหรือหลาย ๆ เสียงพร้อมกัน หรือดีดกวาดที่เดียวหลาย ๆ สายได้

หลักการของกีตาร์โปร่งเช่นเดียวกับของไวโอลิน ผู้เล่นดีดสายให้เกิดการสั่นสะเทือนซึ่ง หย่องจะส่งผ่านไปยังลำตัวซึ่งจะขยายเสียงต่อไปให้ดังขึ้น และเสียงจะดังเพิ่มขึ้นจากการสะท้อนกลับ ไปมาของคลื่นเสียงภายในลำตัวกีตาร์

ระดับเสียงขั้นพื้นฐานของกีตาร์ถูกกำหนดโดยขนาดและความตึงของสาย ผู้เล่นจะเป็นผู้ สร้างเสียงอื่น ๆ เองโดยการเปลี่ยนความยาวของสายส่วนที่สั่นสะเทือน ซึ่งทำได้โดยกดสายลงไป บนขีดโลหะที่ยกสูงขึ้นมาจากพื้นคอ เรียกว่า เฟร็ต (fret) ซึ่งจะหยุดการสั่นสะเทือน ณ จุดที่กด

2.1.11 Bandwidth (ความกว้างของย่านความถี่) หมายถึงช่วงของความถี่ของสัญญาณหรือช่วง ความถี่ที่อุปกรณ์/ระบบสามารถส่งผ่านได้แบนด์วิดท์ก็คือระยะห่างระหว่างความถี่สูงสุดและต่ำสุด ของแบนด์ที่ระบุไว้ อย่างเช่นแบนด์วิดท์ของการได้ยินของมนุษย์คือ 20 Hz ถึง 20 kHz หรืออีก ชื่อหนึ่งว่าย่านความถี่เสียง ความกว้างของย่านความถี่เสียงคือ 19,980 Hz แต่เพื่อความเข้าใจตรง กันIECหรือInternational Electrotechnical Commission ได้กำหนดช่วงความถี่เสียงไว้ว่าเริ่มตั้งแต่ 22.4 Hz ถึง 22.4 kHz

แบนด์วิดท์ของสัญญาณอาจเปลี่ยนแปลงไปได้ โดยใช้วงจรฟิลเตอร์ที่มีอยู่หลายแบบ เช่น

All - pass คือ ฟิลเตอร์ที่ยอมให้ทุกความถี่ผ่านไปได้ โดยไม่ลดทอนขนาดสัญญาณ แต่ อาจมีการเปลี่ยนแปลงทางเฟสเกิดขึ้นกับบางความถี่

Band - pass คือ ฟิลเตอร์ที่ยอมให้ความถี่ในช่วงที่กำหนดผ่านออกนั้นจะถูกลดทอนขนาด สัญญาณลง

Low - pass มีคุณสมบัติยอมให้ความถี่ที่ต่ำกว่าความถี่ที่กำหนดผ่านได้

High - pass คล้ายกับ Low - pass แต่กลับกันคือ ยอมให้ความถี่ที่สูงกว่าที่กำหนดผ่านได้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Band - reject ขอมให้ความถี่นอกแบนด์ผ่าน แต่ความถี่ในช่วงที่กำหนดจะถูกลดทอนลง

2.2 อนุกรมฟูรีเยร์ (Fourier series)

รูปคลื่น (waveform) ของสัญญาณของเสียงที่ออกจากกีตาร์จะได้เป็น Complex waveform ชนิด Periodic แบบ nonharmonic

แต่เราพบว่า Complex waveform นี้จะประกอบไปด้วยหลาย harmonic waveform เราจึงต้องใช้อนุกรมฟูรีเยร์แยก Complex waveform จาก time domain เป็น frequency domain ดังสมการ

$$v(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n^2 + b_n^2)^{\frac{1}{2}} \cos(n\omega_0 t - \theta_n) \quad 2.29$$

ในที่นี้

$$\theta_0 = \tan^{-1} \left(\frac{b_n}{a_n} \right) \quad 2.30$$

$$A_0 = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt \quad 2.31$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T v(t) \cos(n\omega_0 t) dt \quad 2.32$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T v(t) \sin(n\omega_0 t) dt \quad 2.33$$

ซึ่งค่าใน Frequency Domain จะให้จำนวน Harmonic ไปถึง infinity

2.3 ไมโครโฟน (Microphone)

ไมโครโฟนเป็นอุปกรณ์พื้นฐานอย่างหนึ่งที่ใช้ในการแปลงพลังงานรูปแบบหนึ่งไปเป็นพลังงานอีกรูปแบบหนึ่ง ซึ่งในที่นี้ก็คือ เปลี่ยนพลังงานเสียงธรรมชาติหรือที่เรียกว่า พลังงานที่เป็นอคูสติก (Acoustic) เป็นพลังงานไฟฟ้าหรือที่เราเรียกว่า สัญญาณเสียง (audio signal) นั่นเอง

2.3.1 ชนิดของไมโครโฟน (Type of Microphone) ไมโครโฟนมีหลายชนิด ได้แก่

1. แบบมูฟวี่งคอยล์ (Moving coil)
2. แบบริบบอน (Ribbon)

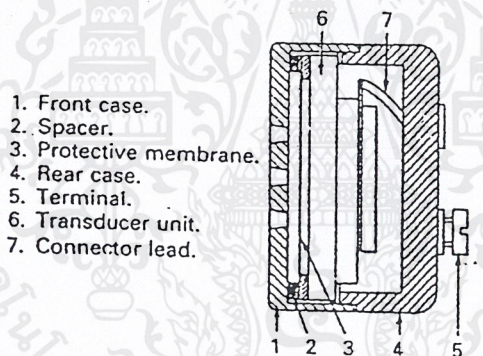
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. แบบคอนเดนเซอร์ (Condenser)
4. แบบคาร์บอน (Carbon)
5. แบบคริสตอล (Crystal)

แต่ในการทดลองนี้เราใช้ไมโครโฟนแบบคอนเดนเซอร์ ซึ่งจะอธิบายดังรายละเอียดต่อไป

2.3.2 คอนเดนเซอร์ไมโครโฟน (Condenser microphone)

เป็นไมโครโฟนที่มีความชัดเจนของเสียงแบบหนึ่งในจำนวนไมโครโฟนหลาย ๆ แบบ ซึ่งไมโครโฟนชนิดนี้ ใช้แผ่นโลหะที่เป็นขั้วหนึ่งของตัวเก็บประจุเป็นแผ่นไดอะแฟรม ซึ่งเมื่อมีคลื่นเสียงมากระทบที่แผ่นไดอะแฟรมแล้ว รูปทรงของแผ่นโลหะจะเปลี่ยนไป และจะเปลี่ยนค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไปด้วย



1. Front case.
2. Spacer.
3. Protective membrane.
4. Rear case.
5. Terminal.
6. Transducer unit.
7. Connector lead.

รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะโครงสร้างภายในของคอนเดนเซอร์ไมโครโฟน

แผ่นไดอะแฟรมของคอนเดนเซอร์ไมโครโฟน (Vibrating plate) ทำมาจากโลหะหรือฟิล์มพลาสติก ด้านหลังของแผ่นไดอะแฟรมจะเป็นขั้วโลหะ ซึ่งจะทำตัวเป็นขั้วหนึ่งของตัวเก็บประจุไฟฟ้าดังกล่าวจะต้องนำไปป้อนให้วงจรขยายสัญญาณที่เรียกว่า ปริแอมพลิฟายเออร์หนึ่งเพื่อขยายสัญญาณให้มีความแรงพอเหมาะต่อไป

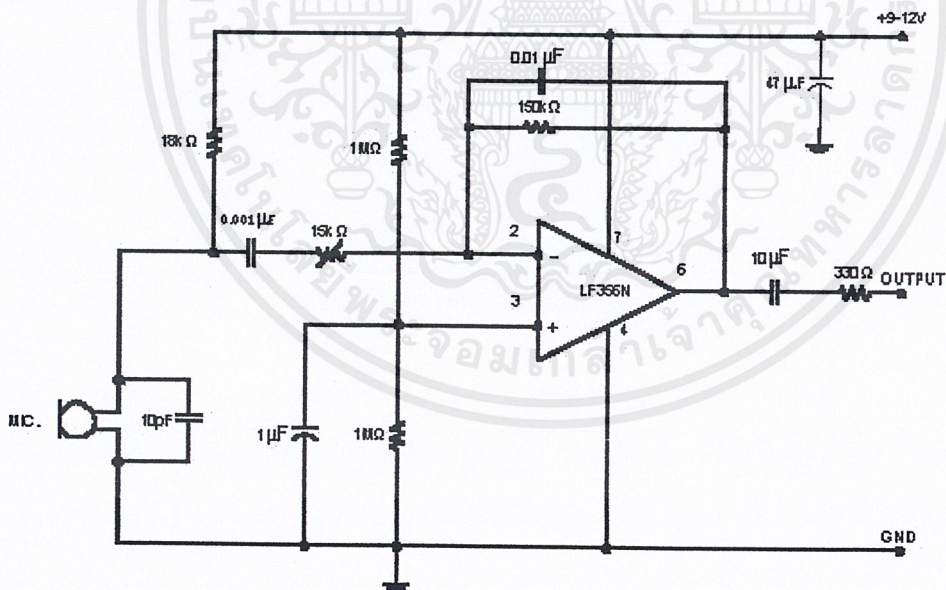
บทที่ 3

การดำเนินการทดลอง

3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่เกี่ยวข้อง

1. ไมโครโฟนชนิดคอนเดนเซอร์
2. วงจร Preamplifier
3. กีตาร์โปร่ง 20 เฟรตตั้งสายมาตรฐาน
4. ออสซิลอโคป
5. สเปกตรัม อนาไลเซอร์ (spectrum analyzer)
6. ซาวนด์เลเวลมิเตอร์ (sound level meter)

3.2 วงจรที่ใช้ในการทดลองและวงจร Preamplifier



รูปที่ 3.1 แสดงวงจร Preamplifier

วงจรมีอัตราขยายไม่สูงมากจากทฤษฎีได้ 10 เท่า แต่จากการทดลองจริงได้สูงสุด 7 เท่า ซึ่งเกิดจากตัวอุปกรณ์ต่างๆมีค่าคลาดเคลื่อน การปรับอัตราขยายสามารถปรับค่าความต้านทานปรับค่าให้มีค่าน้อยลง ถ้าความต้านทานปรับค่ามีค่ามากขึ้นอัตราขยายจะน้อยลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การดำเนินการทดลอง

ตอนที่ 1 การตั้งสายกีตาร์โดยใช้สเปกตรัม อนุบาลเซอร์

1. นำไมโครโฟนที่ได้เชื่อมต่อกับสเปกตรัมอนุบาลเซอร์มาติดตั้งที่ตัวกีตาร์
2. ตั้งสายตามมาตรฐานโดยดูความถี่ที่ fundamental mode จากสเปกตรัมอนุบาลเซอร์ โดยสายต่าง ๆ มีความถี่ ตามมาตรฐานดังนี้

สายที่ 1 มีความถี่ 330 Hz.

สายที่ 2 มีความถี่ 250 Hz.

สายที่ 3 มีความถี่ 195 Hz.

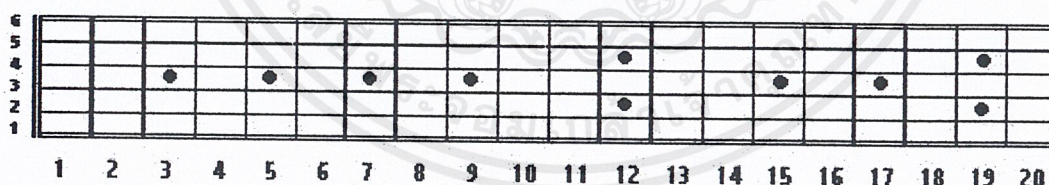
สายที่ 4 มีความถี่ 145 Hz.

สายที่ 5 มีความถี่ 107.5 Hz.

สายที่ 6 มีความถี่ 80 Hz.

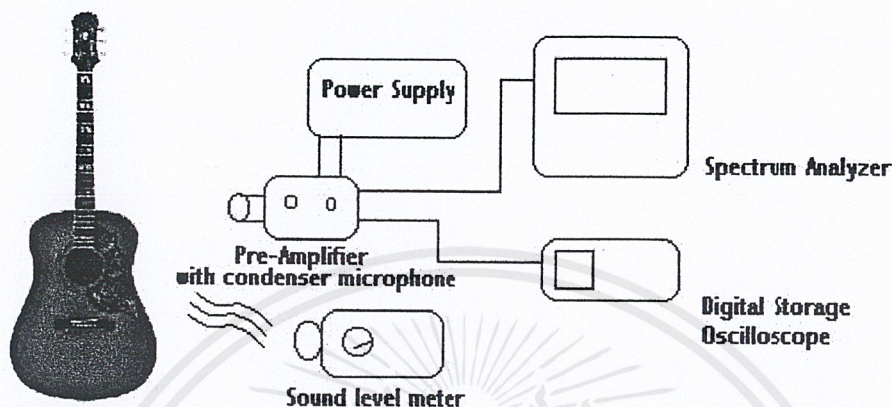
ตอนที่ 2 การทดลองหาค่าเบนควิคว์ของกีตาร์

1. การทดลองเพื่อที่จะหาเบนควิคว์ของกีตาร์ กีตาร์จะมี 6 สาย โดยในแต่ละสายจะให้ความถี่ที่แตกต่างกันและในแต่ละสายจะมีจุดที่สามารถเล่นได้ตามรูปภาพที่ 3.2 ซึ่งจะให้ความถี่ที่แตกต่างกันหลายค่าออกไปอีก การหาเบนควิคว์ก็คือหาค่าช่วงความถี่ที่กีตาร์ให้ออกมา



รูปที่ 3.2 แสดงภาพของคอกีตาร์ขนาด 20 เฟรต

2. จัดอุปกรณ์ตามรูปที่ 3.3

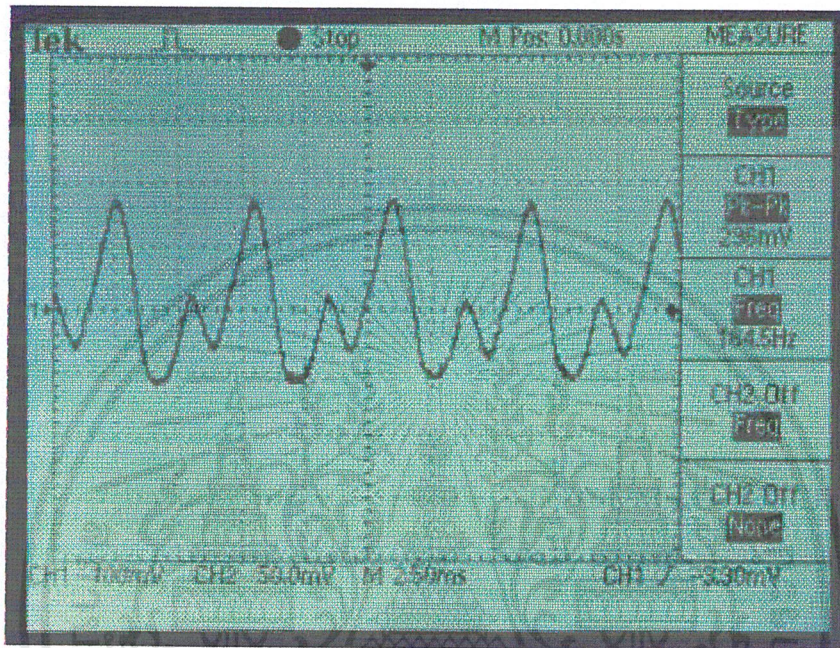


รูปที่ 3.3 แสดงภาพการเชื่อมต่ออุปกรณ์

3. กีตาร์เป็นแหล่งกำเนิดเสียง โดยมีชวาน์คเลเวลมิเตอร์อยู่ห่างจากกีตาร์ 1 เมตร
4. นำไมค์คอนเดนเซอร์เข้าไปในตัวของกีตาร์ไมค์จะต่ออยู่กับวงจรขยายสัญญาณเอาท์พุทของวงจรจะต่อกับออสซิลอโคปและสเปกตรัม อนาไลเซอร์
5. ทำการดีดกีตาร์โดยสายกีตาร์จะมีทั้งหมด 6 เส้น แต่ละเส้นจะมี 20 ตำแหน่ง (20 ตัวโน้ต) และสายเปล่าอีก 6 ตำแหน่ง เพราะฉะนั้นในสายแต่ละเส้นจะต้องเล่นทั้งหมด 21 ครั้ง ทำการเล่นทั้ง 6 สาย รวมทั้งหมด 21 ตัวโน้ต
6. เริ่มการทดลองจะดีดกีตาร์ให้มีความดังเท่า ๆ กัน โดยจะใช้เครื่องชวาน์คเลเวลมิเตอร์จัดให้มีความดัง 64 เดซิเบลเอ มีค่าผิดพลาดได้ไม่เกินบวกลบ 1 เดซิเบลเอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

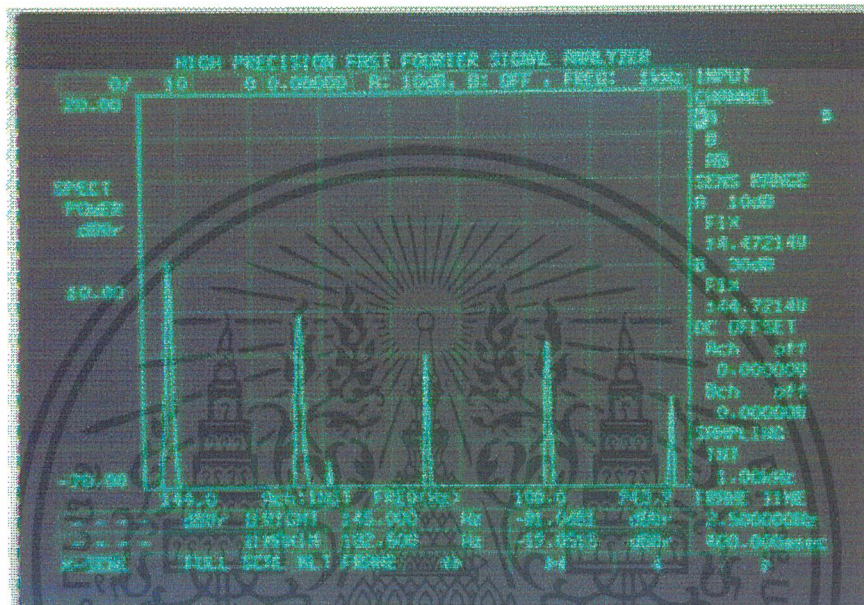
7. ใช้เครื่องออสซิลโลสโคปบันทึกข้อมูลในโดเมน (time domain) โดยแกน x จะเป็นค่าความถี่และแกน y จะเป็นค่าแอมพลิจูด ดังรูปภาพที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงค่าของความถี่และค่าแอมพลิจูด สายกีตาร์เส้นที่ 5 จุดที่ 9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. เครื่องสเปกตรัม อนุไลเซอร์จะแปลงจากไทม์โดเมน (time domain) เป็น frequency domain จะมีค่าความถี่ที่ fundamental mode และ ฮาโมนิกต่าง ๆ โดยแกน Y จะเป็นค่าของความดังมีหน่วยเป็น dB_V และแกน X จะเป็นค่าของความถี่รูปภาพที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงค่าของความดังและค่าของ ความถี่สายกีตาร์เส้นที่ 5 จุดที่ 9

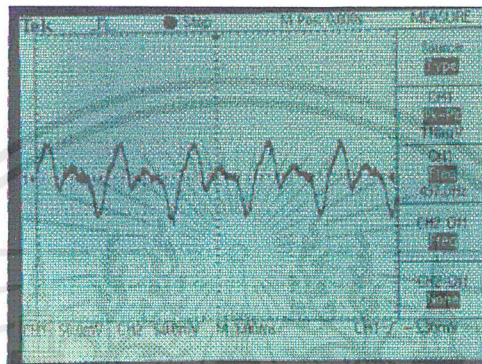
9. บันทึกผลการทดลองเพื่อนำไปวิเคราะห์แบนด์วิดธ์ของสายกีตาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

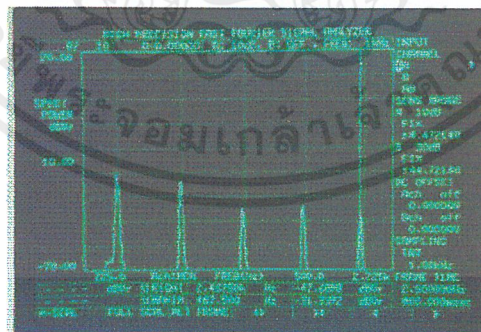
ผลการทดลอง

จากการทดลองเครื่องออสซิลอโคปจะได้อัฒมูทในไทม์โดเมน (Time domain) คือค่าความถี่กับค่าแอมพลิจูด ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงค่าของความถี่และค่าแอมพลิจูด สายกีตาร์เส้นที่ 1 จุดที่ 7

จากเครื่องออสซิลอโคปสามารถเก็บข้อมูล กับค่าแอมพลิจูดในหน่วย (mv) ความถี่ในหน่วย (Hz) สองค่านี้นำไปบันทึกในตาราง เครื่องสเปกตรัมนอนาไลเซอร์จะแปลงจากไทม์โดเมน (time domain) เป็น frequency domain ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงค่าของความถี่และค่าของความถี่สายกีตาร์เส้นที่ 1 จุดที่ 7

โดยแกน Y จะเป็นค่าของความถี่มีหน่วยเป็น dB_{V} และแกน X จะเป็นค่าของความถี่มีหน่วยเป็น kHz โดยจะมอย่างละ 5 ค่า เมื่อทำการทดลอง ครบทุกสายทุกจุดแล้วจะได้ผลการทดลองดังตาราง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดลองของสายที่ 1

ตำแหน่งที่	Amplitude (mv)	Frequency (Hz)	dB(A)	ค่าความเข้มของแต่ละความถี่ (dBvr)					ค่าความถี่ของแต่ละความเข้ม (kHz)				
				1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
0	102	328.1	63.5	-34.4116	-36.047	-40.9332	-44.1455	-58.4354	0.33	0.66	0.99	1.32	1.65
1	112	353.8	64	-31.0558	-36.9866	-35.0239	-44.4074	-58.4337	0.35	0.7	0.105	1.4	1.75
2	192	371.8	64	-25.8773	-29.028	-47.3708	-49.8876	-49.5888	0.37	0.74	1.11	1.485	1.855
3	160	386.5	64	-27.7556	-35.1143	-52.5659	-52.5659	-39.4021	0.3875	0.7875	1.175	1.575	1.9625
4	112	418.1	63	-29.539	-45.2355	-56.6321	-53.1892	-60.6993	0.4125	0.8375	1.25	1.6625	2.075
5	216	442.8	65	-20.5218	-43.526	-72.6864	-50.1065	-44.3259	0.4375	0.8875	1.325	1.7625	2.2125
6	80	471.3	64	-32.403	-39.1224	-44.7938	-47.4071	-57.6702	0.4625	0.9375	1.4	1.875	2.3375
7	118	497	64	-31.3992	-33.5905	-44.0538	-44.0538	-47.6868	0.4875	0.9875	1.475	1.975	2.4625
8	122	497	64	-31.88	-30.3503	-53.4578	-44.6556	-48.669	0.525	1.05	1.575	2.1	2.625
9	52	548	64	-38.5466	-42.7046	-52.1707	-49.3908	-69.1711	0.55	1.1	1.6625	2.225	2.775
10	78	586.5	64	-35.6873	-42.2077	-42.4883	-68.0933	-52.0694	0.5875	1.175	1.7625	2.35	2.9375
11	98	652.2	64	-38.1542	-27.0493	-44.9925	-49.0724	-55.4235	0.625	1.25	1.875	2.5	3.125
12	50	668.9	64	-35.2731	-40.5892	-50.8933	-55.464	-75.5051	0.6625	1.325	1.9875	2.65	3.3125
13	88	699.1	64	-30.0318	-38.7677	-46.2021	-47.9132	-63.3196	0.7	1.4	2.1	2.8	3.5
14	102	741.3	64	-33.1144	-39.9211	-53.9024	-57.7984	-73.7036	0.7375	1.4875	2.225	2.962	3.712
15	54	790.5	64	-38.5513	-44.0903	-55.6117	-64.3983	-59.9407	0.7875	1.575	2.3625	3.15	3.9375
16	46	800	64	-42.3358	-48.8371	-57.1117	-58.2738	-58.2725	0.8375	1.6625	2.5	3.325	4.1625

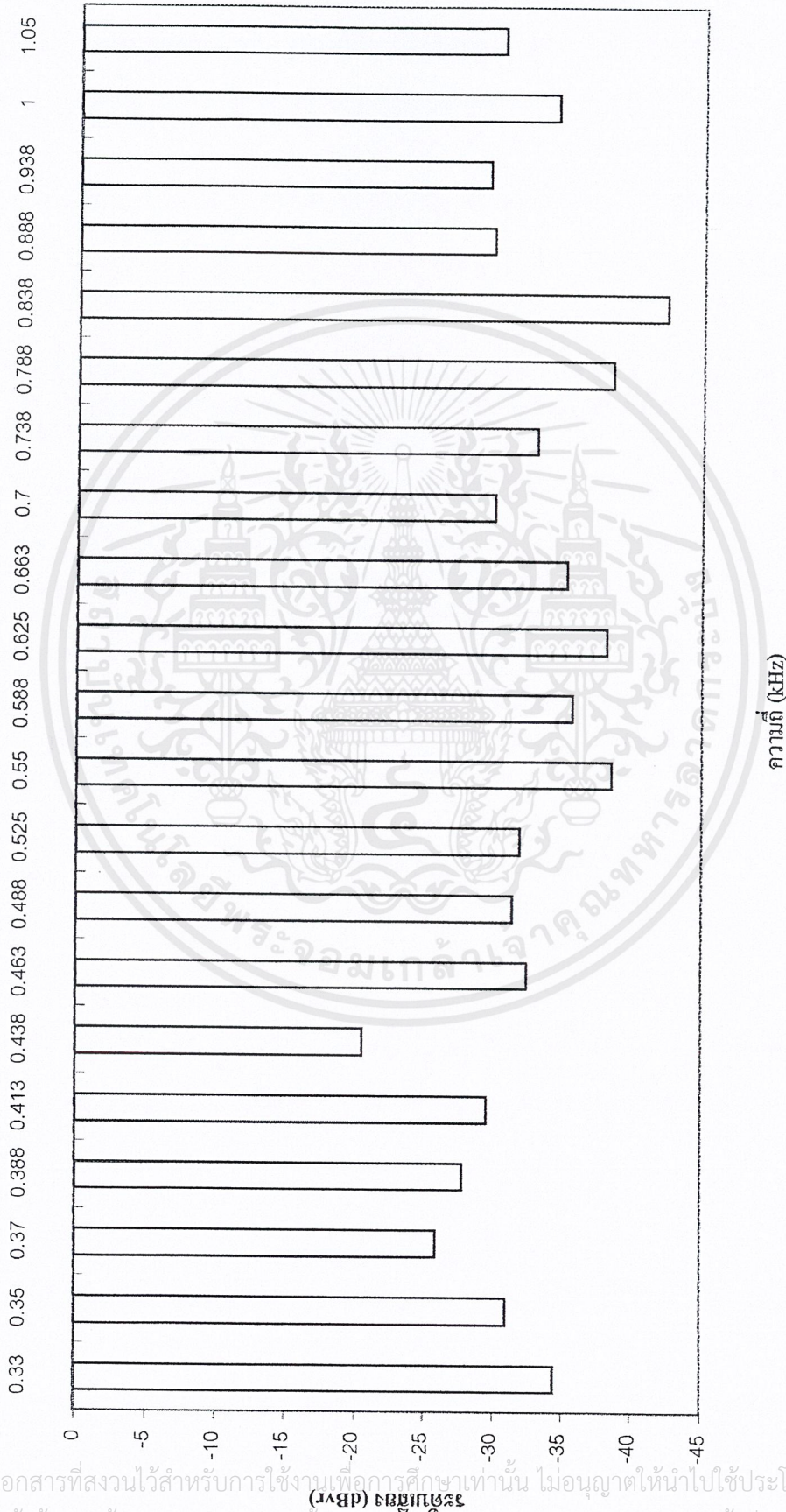
สายที่ 1

สายที่ 1

ตำแหน่งที่	Amplitude (mv)	Frequency (Hz)	dB(A)	ค่าความเข้มของแอมพลิจูดความเข้ม (dBvr)					ค่าความถี่ของแอมพลิจูดความเข้ม (kHz)				
				1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
17	90	869	64	-29.8372	-52.7167	-39.264	-59.427	-78.3695	0.8875	1.7625	2.65	3.375	4.425
18	86	932.2	64	-29.4932	-46.7891	-62.2252	-62.9968	-78.3227	0.9375	1.8625	2.8	3.375	4.675
19	54	1,003	64	-34.4385	-45.3824	-60.3005	-72.7082	-78.3695	1	1.975	2.975	3.95	4.95
20	90	1,064	64	-30.5829	-56.8557	-64.0764	-75.1685	-71.807	1.05	1.2.1	3.15	4.2	5.25

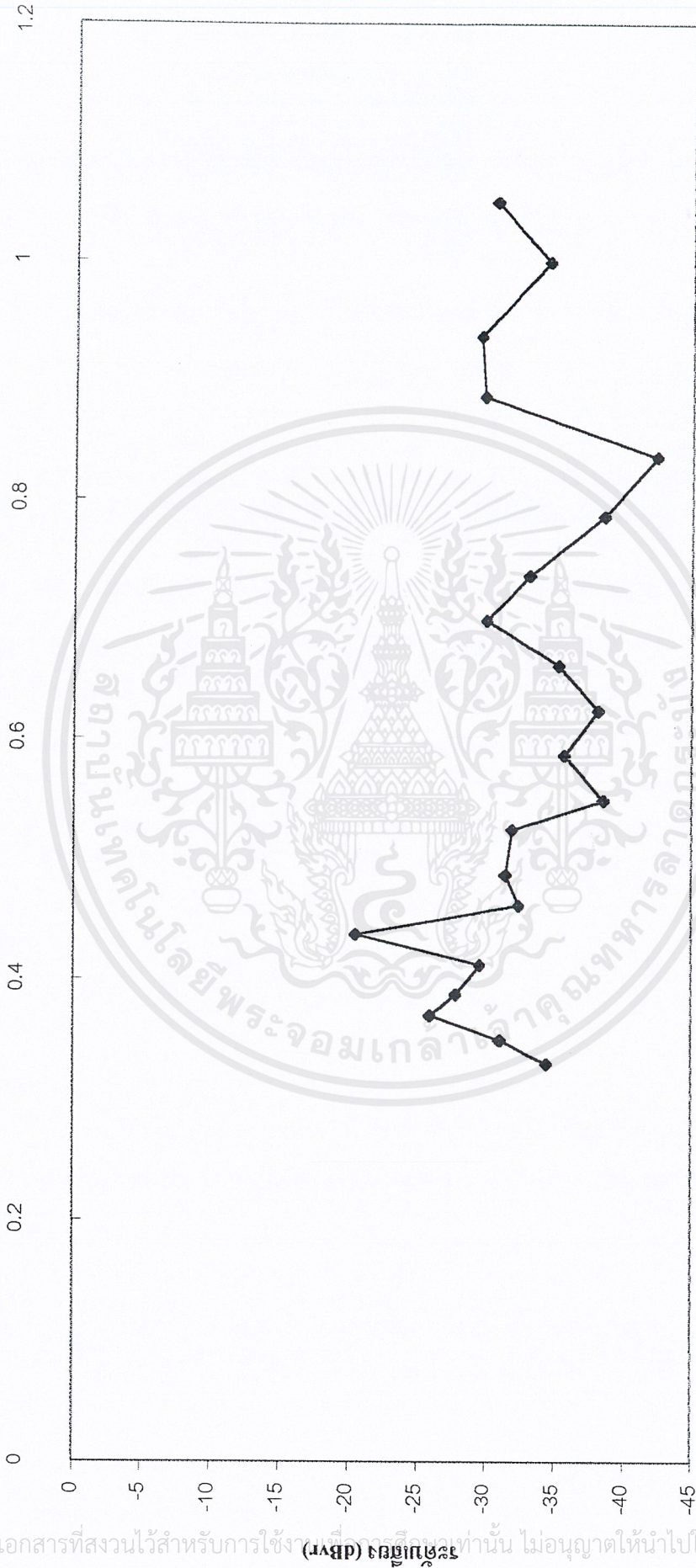
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผนภูมิแสดงค่าความถี่ กับ ระดับเสียงของสายกีตาร์เส้นที่ 1 ใน Fundamental mode



รูปที่ 4.3ก แสดงแผนภูมิแบบแท่งแสดงค่าความถี่ กับ ระดับเสียงของสายกีตาร์เส้นที่ 1 ใน Fundamental mode

แผนภูมิแสดงความถี่ กับ ระดับเสียงของสายกีตาร์เส้นที่ 1 ใน Fundamental mode



รูปที่ 4.3บ แสดงแผนภูมิแบบจุดแสดงความถี่ กับ ระดับเสียงของสายกีตาร์เส้นที่ 1 ใน Fundamental mode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดลองของสายที่ 2

ตำแหน่งที่	Amplitude (mv)	Frequency (Hz)	dB(A)	ค่าความเข้มของแต่ละความถี่ (dBvr)					ค่าความถี่ของแต่ละความถี่ (kHz)				
				1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
0	218	690.3	64	-33.5845	-34.2909	-22.3981	-34.4995	-37.4386	0.25	0.495	0.745	0.99	1.24
1	170	217.7	64	-31.3739	-47.3014	-47.3014	-39.1015	-40.5916	0.26	0.525	0.785	1.045	1.31
2	150	279.3	64	-30.1728	-36.3227	-46.5853	-42.3696	-42.692	0.275	0.55	0.83	1.05	1.38
3	164	293.4	65	-26.9908	-31.0733	-39.4189	-40.9363	-43.7037	0.295	0.585	0.88	1.175	1.465
4	126	426.9	63.5	-32.6147	-38.5548	-35.8539	-45.173	-47.066	0.31	0.62	0.93	1.24	1.55
5	86	324	63.5	-36.01	-40.0894	-36.6076	-54.4567	-52.1601	0.33	0.655	0.985	1.315	1.645
6	90	324.2	64	-38.1244	-35.2632	-39.4096	-41.3238	-54.7123	0.35	0.695	1.045	1.395	1.74
7	260	682.6	64	-29.4596	-20.8684	-33.2059	-46.9564	-44.4106	0.37	0.735	1.105	1.475	1.845
8	168	389.2	64	-22.4758	-33.6617	-52.7378	-52.5484	-47.708	0.39	0.78	1.175	1.565	1.955
9	160	413.8	64	-24.7714	-42.1133	-46.3822	-47.4915	-51.6665	0.4125	0.825	1.2375	1.662	2.075
10	228	438.1	64.5	-21.9936	-37.3551	-47.0431	-55.783	-52.9534	0.4375	0.875	1.3125	1.75	2.2
11	204	462.1	63.5	-24.5181	-34.7881	-50.8386	-49.0909	-56.0244	0.4625	0.925	1.4	1.8625	2.3775
12	118	565	64	-34.9433	-28.8653	-40.7884	-56.7836	-76.5626	0.4875	0.9875	1.475	1.775	2.4625
13	56	897	64	-39.7865	-39.7099	-49.6017	-62.176	-60.5018	0.525	1.0375	1.5625	2.0875	2.6125
14	94	550	65	-30.9711	-30.6813	-51.9919	-50.8345	-58.9701	0.55	1.125	1.6625	2.2125	2.775
15	108	589.2	65	-30.2502	-31.0346	-58.9736	-49.625	-56.5883	0.5875	1.175	1.75	2.35	2.9375
16	42	761.2	65	-39.2101	-42.6297	-46.2624	-66.1274	-75.0714	0.625	1.2375	1.8625	2.4875	3.1125

สายที่ 2

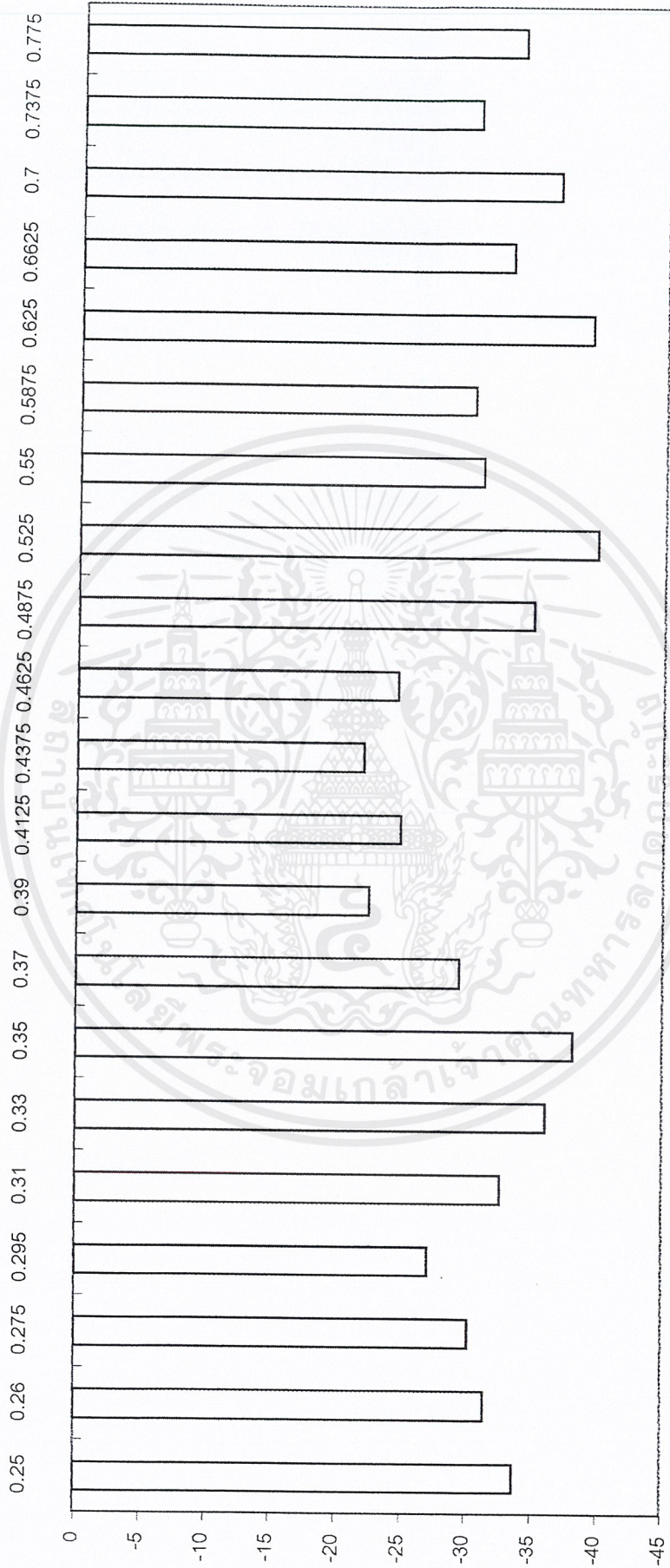
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายที่ 2

ตำแหน่งที่	Amplitude (mv)	Frequency (Hz)	dB(A)	ค่าความเข้มของแต่ละความถี่ (dBv)					ค่าความถี่ของแต่ละความถี่ (kHz)				
				1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
17	50	675.7	65	-33.0901	-92.9438	-50.9919	-73.6341	-78.4722	0.6625	1.312	1.975	2.6375	3.3125
18	52	507.4	64	-36.6623	-50.7354	-58.2176	-62.2119	-69.0276	0.7	1.3875	2.0875	2.775	3.475
19	70	744.6	64	-30.5062	-51.7168	-55.8107	-76.1873	-76.7646	0.7375	1.475	2.21	2.9625	3.7
20	36	866.1	64	-33.8808	-37.7921	-59.8141	-59.6832	-62.4538	0.775	1.5625	2.32	3.1125	3.8875

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผนภูมิแสดงค่าความถี่ กับ ระดับเสียงของสายกีตาร์เส้นที่ 2 ใน Fundamental mode

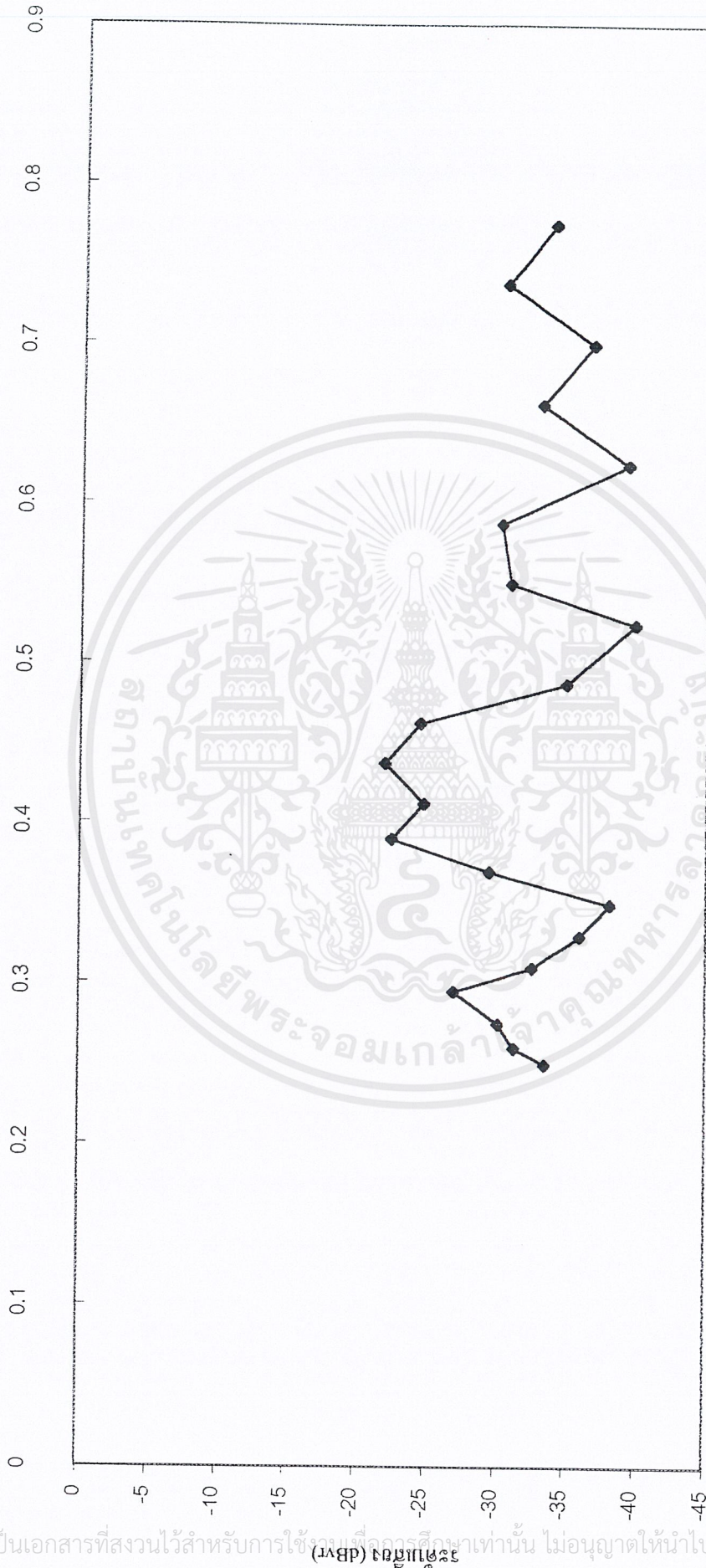


ความถี่ (kHz)

รูปที่ 4.4ก แสดงแผนภูมิแบบแท่งแสดงค่าความถี่ กับ ระดับเสียงของสายกีตาร์เส้นที่ 2 ใน Fundamental mode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน (MVP) เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผนภูมิแสดงความถี่ กับ ระดับเสียงของสายกีตาร์เส้นที่ 2 ใน Fundamental mode



รูปที่ 4.4ข แสดงแผนภูมิแบบจุดแสดงความถี่ กับ ระดับเสียงของสายกีตาร์เส้นที่ 2 ใน Fundamental mode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในภาควิชาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดลองของสายที่ 3

สายที่ 3

ตำแหน่งที่	Amplitude (mv)	Frequency (Hz)	dB(A)	ค่าความเข้มของแต่ละความถี่ (dBv)					ค่าความถี่ของแต่ละความถี่ (kHz)				
				1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
0	154	359.7	64	-23.1046	-33.8812	-49.7376	-51.6591	-45.3734	0.195	0.395	0.585	0.785	0.985
1	162	208.9	64	-41.1682	-29.7124	-44.1664	-54.8378	-56.5001	0.21	0.415	0.625	0.835	1.04
2	86	292.4	64	-24.2028	-39.694	-41.434	-44.3381	-29.2413	0.22	0.44	0.665	0.885	1.105
3	222	481.9	64	-23.5332	-36.2133	-44.2351	-31.1818	-37.5665	0.235	0.47	0.7	0.935	1.17
4	144	375.7	64	-29.5651	-34.9665	-40.8841	-40.0857	-39.8198	0.245	0.49	0.74	0.985	1.23
5	86	267.4	63.5	-35.1001	-37.541	-43.867	-41.9174	-50.7401	0.26	0.525	0.785	1.05	1.31
6	84	450.5	63.5	-34.3948	-38.3098	-54.238	-33.4472	-41.9784	0.28	0.555	0.835	1.1	1.39
7	102	294	64	-31.6987	-36.0234	-43.7451	-36.3029	-41.1703	0.295	0.59	0.885	1.8	1.47
8	108	307.7	64	-31.8771	-41.0106	-40.955	-45.9427	-48.4026	0.31	0.62	0.935	1.245	1.56
9	100	331.1	64	-31.0632	-43.7683	-47.6743	-47.3897	-49.8796	0.33	0.66	0.995	1.325	1.665
10	124	354.6	64	-31.1309	-41.1968	-31.0435	-52.8318	-62.8563	0.35	0.7	1.05	1.4	1.75
11	154	784.9	64	-42.5181	-26.3314	-42.1343	-42.593	-40.7105	0.37	0.735	1.105	1.45	1.84
12	120	394.4	64	-31.9554	-42.8742	-41.2885	-58.1434	-67.0083	0.39	0.785	1.175	1.57	1.956
13	118	408.2	64	-30.719	-46.5625	-52.0785	-53.1066	-64.1245	0.4125	0.825	1.25	1.6625	2.075
14	62	427.7	64	-39.4384	-47.0439	-50.9402	-68.7601	-51.9236	0.4375	0.875	1.325	1.7625	2.2
15	94	464.6	64	-30.3192	-34.5121	-52.6689	-52.6886	-56.958	0.4625	0.9375	1.4	1.8625	2.3375
16	98	495	64	-31.7736	-37.357	-61.663	-57.7418	-74.806	0.4875	0.9875	1.4875	1.975	2.475

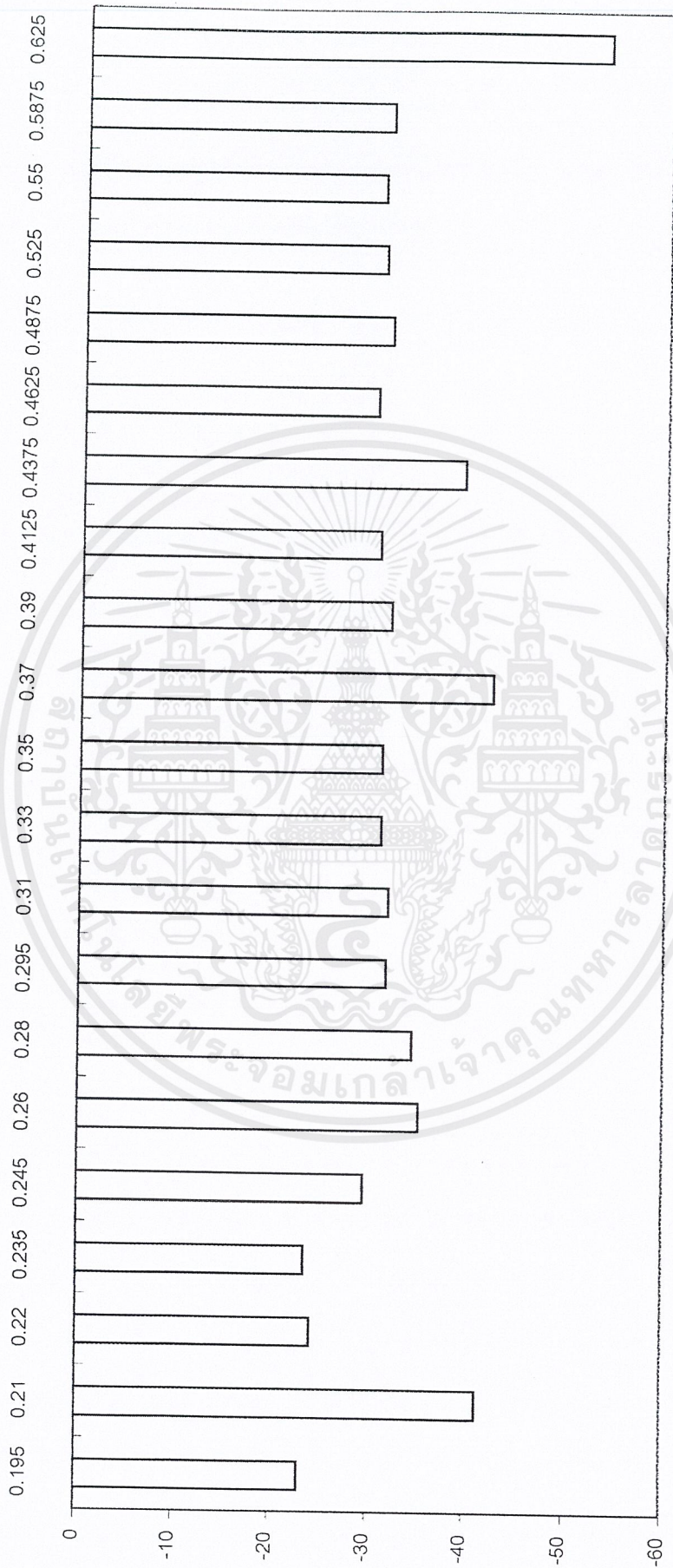
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายที่ 3

ตำแหน่งที่	Amplitude (mv)	Frequency (Hz)	dB(A)	ค่าความเข้มของแต่ละความเข้ม (dBvr)					ค่าความถี่ของแต่ละความเข้ม (kHz)				
				1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
17	94	591	65	-31.0174	-36.2731	-45.1495	-51.277	-70.7662	0.525	1.05	1.575	2.1	2.625
18	102	545	65	-30.8287	-31.5052	-40.1044	-45.8228	-45.1694	0.55	1.1	1.65	2.2	2.75
19	70	612.2	65	-31.5699	-55.7722	-52.8432	-63.6608	-60.3809	0.5875	1.175	1.7625	2.35	2.9375
20	38	934.6	65	-53.7337	-41.9368	-52.176	-70.9219	-64.3118	0.625	1.25	1.875	2.45	3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผนภูมิแสดงความถี่ กับ ระดับเสียงของสายกีตาร์เส้นที่ 3 ใน Fundamental mode

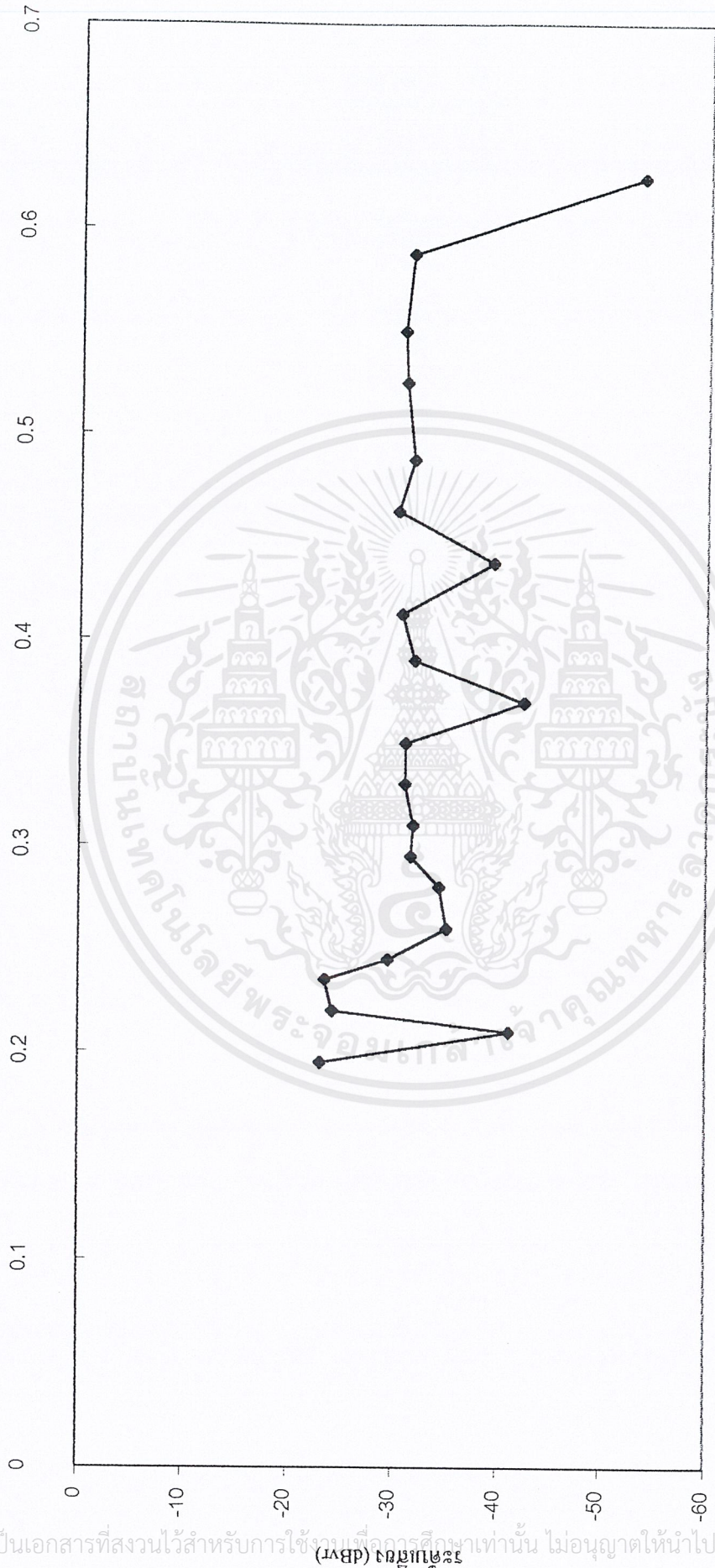


ความถี่ (kHz)

รูปที่ 4.5ก แสดงแผนภูมิแบบแท่งแสดงความถี่ กับ ระดับเสียงของสายกีตาร์เส้นที่ 3 ใน Fundamental mode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานใน... ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผนภูมิแสดงความถี่ กับ ระดับเสียงของสายกีตาร์เส้นที่ 3 ใน Fundamental mode



รูปที่ 4.5x แสดงแผนภูมิแบบจุดแสดงความถี่ กับ ระดับเสียงของสายกีตาร์เส้นที่ 3 ใน Fundamental mode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการทดลองของสายที่ 4

ตำแหน่งที่	Amplitude (mv)	Frequency (Hz)	dB(A)	ค่าความเข้มของแต่ละความถี่ (dBvr)					ค่าความถี่ของแต่ละความถี่ (kHz)				
				1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
0	196	245.5	64	-21.6811	-28.3607	-30.8841	-56.7342	-44.3666	0.145	0.29	0.435	0.58	0.73
1	110	156.7	64	-31.5823	-38.9035	-37.6687	-55.9789	-44.4848	0.155	0.31	0.62	0.62	0.775
2	210	161.7	64	-21.9953	-26.6994	-95.4123	-50.6166	-46.7474	0.165	0.33	0.495	0.655	0.82
3	196	174.2	64	-24.8953	-28.0880	-50.4607	-50.4066	-49.6576	0.175	0.35	0.52	0.695	0.87
4	300	373.3	64	-27.8752	-20.8736	-51.9836	-39.8813	-52.4408	0.185	0.37	0.555	0.735	0.92
5	322	391.3	64	-55.4128	-19.6883	-42.3858	-45.4149	-53.4918	0.195	0.39	0.585	0.78	0.975
6	328	410.7	63	-38.7693	-18.7438	-53.6004	-47.1456	-45.2036	0.205	0.415	0.62	0.825	1.03
7	340	390.1	64.5	-27.3620	-20.6748	-47.3735	-47.7446	51.7765	0.22	0.44	0.655	0.875	1.095
8	240	395.3	63.5	-26.8375	-24.8737	-41.2648	-43.8069	-62.4847	0.23	0.465	0.695	0.925	1.16
9	170	653.6	63.5	-28.4024	-33.2565	-34.5335	-39.0849	-39.5023	0.245	0.49	0.735	0.985	1.23
10	210	261.4	63.5	-22.9079	-43.4543	-40.2608	-42.2946	-57.7731	0.26	0.52	0.78	1.04	1.3
11	94	272.1	65	-32.2096	-45.1822	-58.6978	-34.3056	-47.5635	0.275	0.55	0.825	1.105	1.38
12	132	291.1	65	-39.8228	-51.4073	-52.1892	-30.5593	-51.5272	0.295	0.585	0.875	1.17	1.465
13	276	309.1	65	-22.8973	-46.2547	-27.1197	-51.6942	-44.9912	0.31	0.62	0.925	1.235	1.545
14	116	432.9	64	-28.3991	-46.7477	-36.0409	-37.8746	-59.6509	0.325	0.655	0.985	1.31	1.64
15	144	347.2	65	-29.5448	-50.0352	-34.1069	-56.1447	-62.0552	0.345	0.695	1.04	1.38	1.735
16	316	363.3	65	-19.3118	-28.6678	-26.7752	-42.0592	-44.4451	0.365	0.73	1.1	1.77	1.835

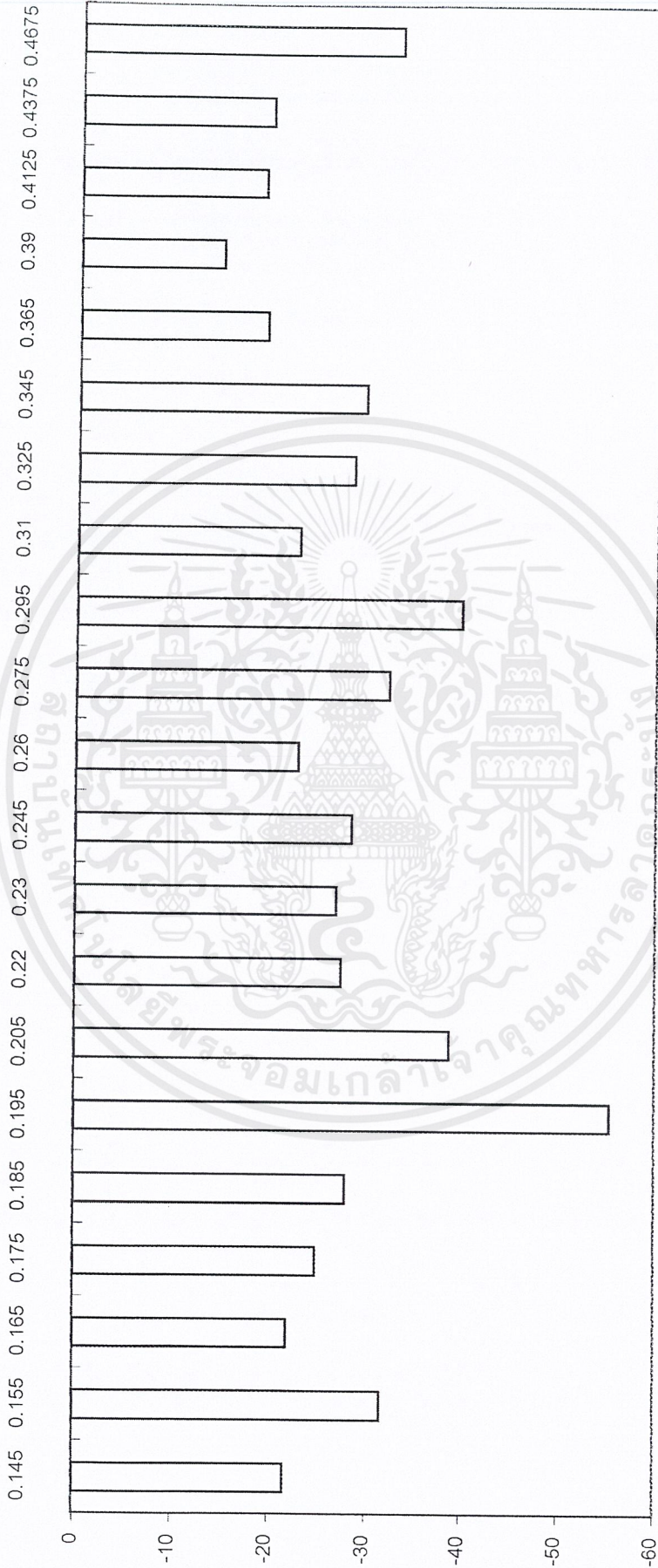
สายที่ 4

สายที่ 4

ตำแหน่งที่	Amplitude (mv)	Frequency (Hz)	dB(A)	ค่าความเข้มของแต่ละความถี่ (dBvr)					ค่าความถี่ของแต่ละความถี่ (kHz)				
				1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
17	420	391.1	64	-14.7468	-32.2300	-38.3203	-39.0517	-64.9373	0.39	0.78	1.175	1.565	1.95
18	286	410.5	64	-19.0204	-37.4494	-30.8948	-60.5019	-52.5380	0.4125	0.825	1.2375	1.65	2.05
19	310	434.8	64.5	-19.7427	-38.4721	-52.5267	-50.5089	-50.1700	0.4375	0.875	1.3125	1.75	2.1875
20	74	455.2	64.5	-32.9648	-40.3502	-72.7555	-62.4884	-69.1582	0.4675	0.925	1.45	1.85	2.3125

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผนภูมิแสดงความถี่ กับ ระดับเสียงของสายกีตาร์เส้นที่ 4 ใน Fundamental mode

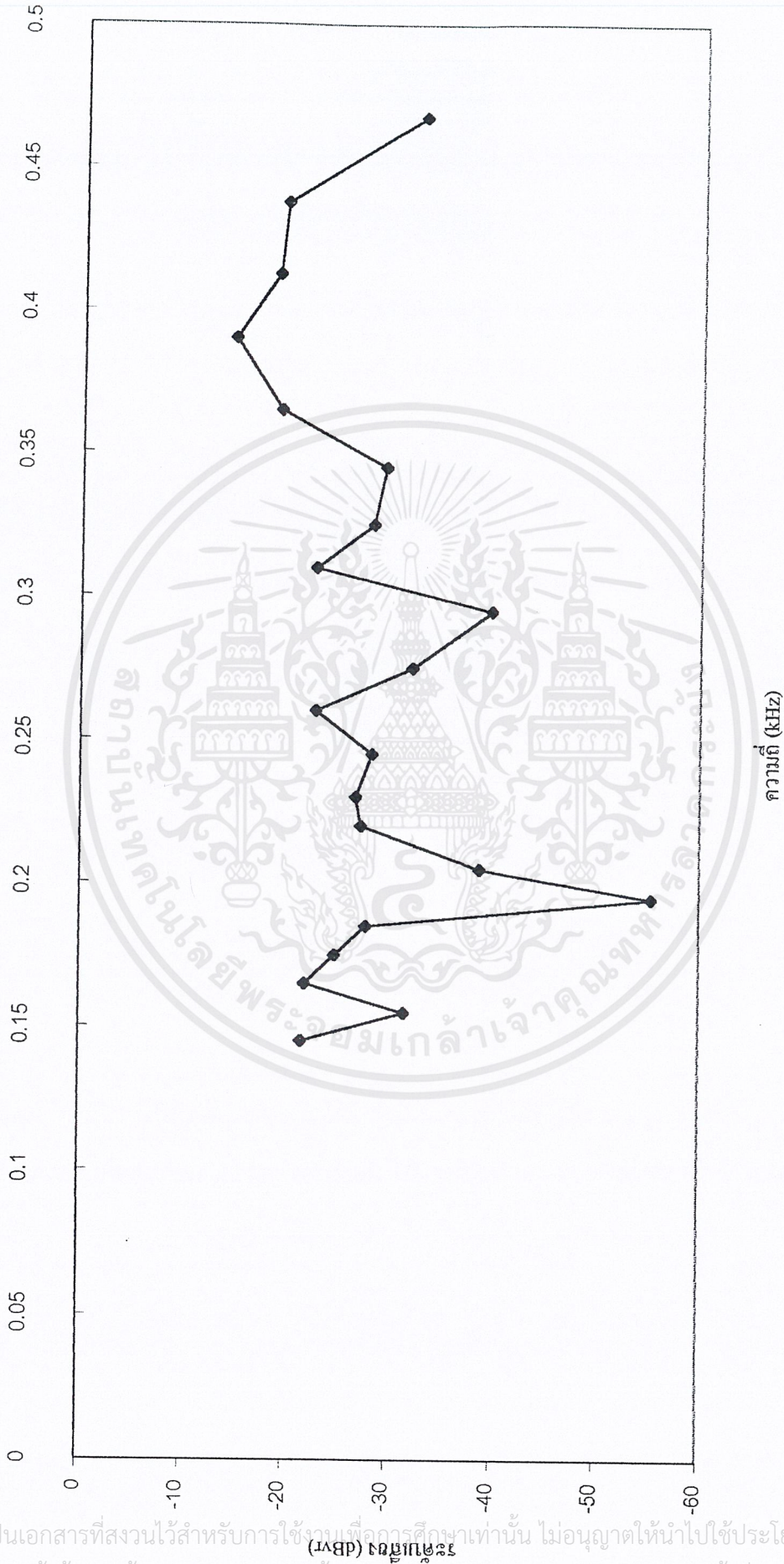


ความถี่ (kHz)

รูปที่ 4.6ก แสดงแผนภูมิแบบแท่งแสดงความถี่ กับ ระดับเสียงของสายกีตาร์เส้นที่ 4 ใน Fundamental mode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานในวงจำกัดเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผนภูมิแสดงความถี่ กับ ระดับเสียงของสายกีตาร์เส้นที่ 4 ใน Fundamental mode



รูปที่ 4.6 แสดงแผนภูมิแบบจุดแสดงความถี่ กับ ระดับเสียงของสายกีตาร์เส้นที่ 4 ใน Fundamental mode

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดลองของสายที่ 5

ตำแหน่งที่	Amplitude (mv)	Frequency (Hz)	dB(A)	ค่าความเข้มของแต่ละความถี่ (dBvr)					ค่าความถี่ของแต่ละความถี่ (kHz)				
				1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
0	324	108.6	65	-21.1881	-19.3933	-35.2452	-33.1972	-55.4369	0.1075	0.2175	0.325	0.4325	0.5425
1	342	179.2	64	-22.3938	-32.8759	-25.1149	-27.7012	-42.3037	0.115	0.23	0.345	0.46	0.575
2	420	207.5	63.5	-21.4258	-29.2328	-22.2847	-45.6557	-66.8101	0.1225	0.245	0.365	0.4875	0.61
3	426	216.4	64	-22.7125	-25.8244	-20.0487	-36.9211	-53.4703	0.13	0.2575	0.3875	0.5175	0.645
4	268	136.2	63	-22.5072	-31.6349	-40.8394	-44.5395	-55.8031	0.1375	0.275	0.41	0.5475	0.615
5	316	195.1	64	-49.5533	-28.2633	-30.1815	-52.6791	-39.9296	0.145	0.29	0.4375	0.585	0.7275
6	292	152.4	64	-21.5289	-26.9618	-32.8028	-54.9926	-46.986	0.1525	0.3075	0.46	0.615	0.7675
7	372	162.2	65	-10.9999	-25.7755	-40.3233	-45.715	-42.2753	0.16	0.325	0.49	0.65	0.815
8	274	171.8	63	-20.1446	-27.6546	-56.2764	-51.9886	-56.3347	0.17	0.345	0.615	0.69	0.86
9	290	184.5	64	-49.0515	-31.4201	-40.7416	-38.2921	-50.1144	0.1825	0.365	0.55	0.735	0.1975
10	150	407.6	64.5	-27.8529	-24.9222	-46.6724	-47.0485	-54.6073	0.195	0.385	0.58	0.775	0.965
11	90	204.1	64	-23.5047	-57.5051	-48.9529	-65.4337	-48.2302	0.205	0.41	0.615	0.82	1.02
12	214	216.5	64	-21.2642	-43.4037	-58.708	-68.367	-43.6174	0.22	0.435	0.65	0.865	1.085
13	128	234.7	64	-26.7839	-47.098	-53.7816	-35.9978	-59.3586	0.23	0.46	0.69	0.92	1.15
14	164	254.9	64	-23.6672	-37.6217	-68.5863	-37.7426	-43.364	0.245	0.485	0.73	0.97	1.45
15	144	259.7	64	-25.5583	-29.8965	-64.3235	-51.4017	-50.0196	0.26	0.515	0.77	1.03	1.29
16	54	279.3	63	-36.8184	-60.0881	-49.9237	-45.5669	-51.3166	0.275	0.545	0.82	1.09	1.36

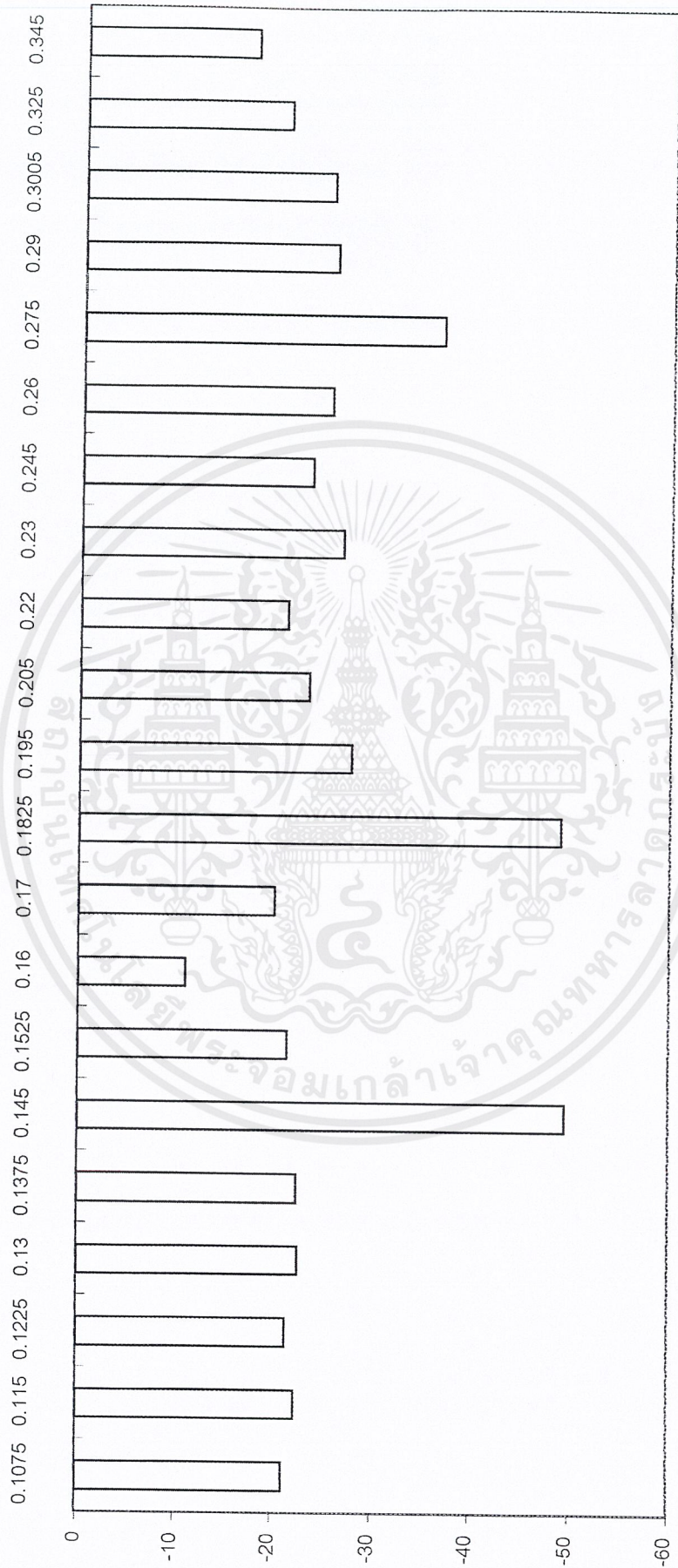
สายที่ 5

สายที่ 5

ตำแหน่งที่	Amplitude (mv)	Frequency (Hz)	dB(A)	ค่าความเข้มของแต่ละความถี่ (dBvr)					ค่าความถี่ของแต่ละความเข้ม (kHz)				
				1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
17	164	283.3	65	-25.9662	-52.452	-48.5221	-37.3725	-64.5568	0.29	0.575	0.865	1.15	1.44
18	154	308.2	64	-25.5509	-50.6306	-44.1787	-52.1861	-47.8211	0.3005	0.615	0.925	1.23	1.54
19	222	323.6	64	-21.1308	-45.8855	-47.1716	-40.1578	-63.6006	0.325	0.65	0.97	1.3	1.625
20	188	556.6	64	-17.6216	-48.4557	-31.9281	-49.5464	-49.2875	0.345	0.685	1.03	1.375	1.725

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผนภูมิแสดงค่าที่ กับ ระดับเสียงของสายกีตาร์เส้นที่ 5 ใน Fundamental mode

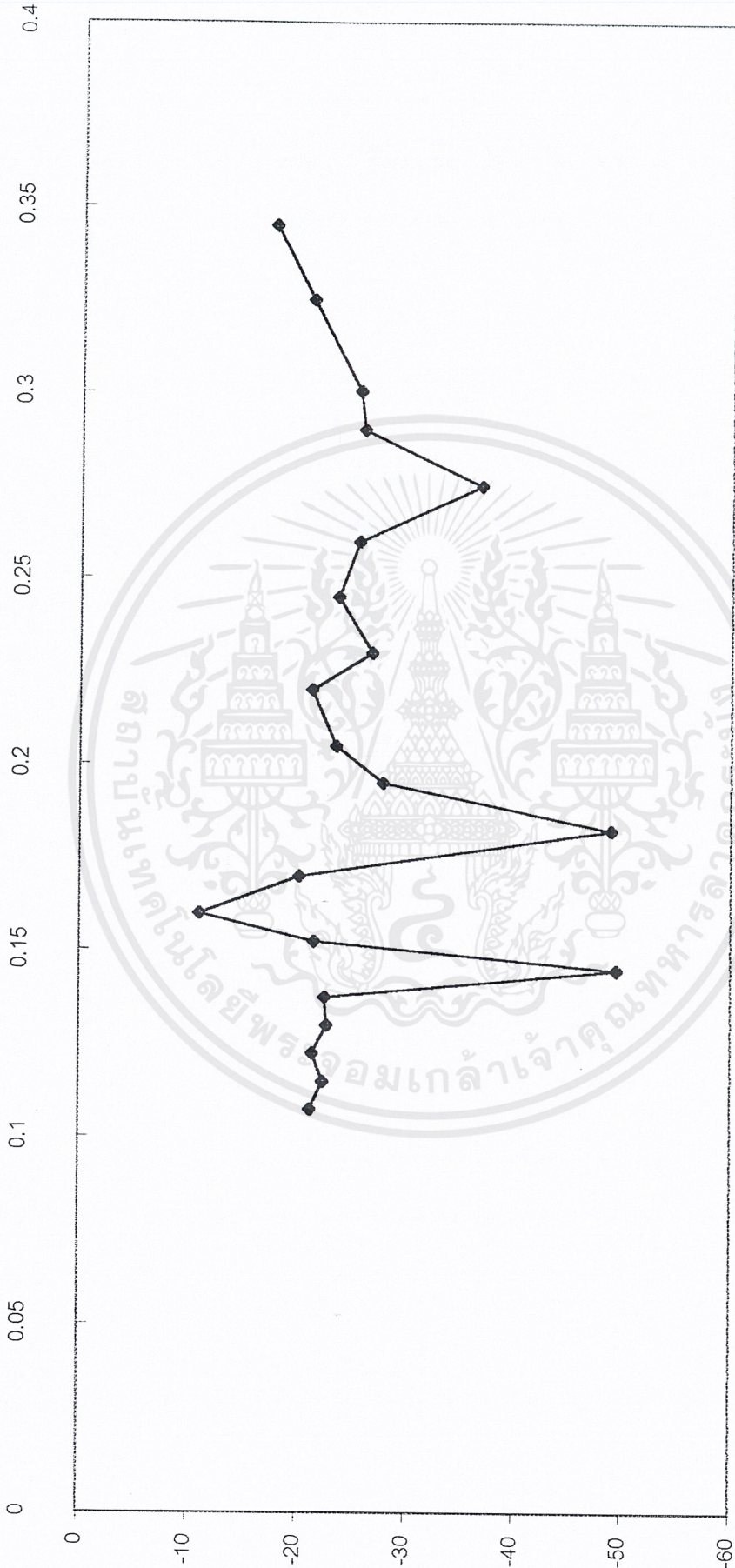


ความถี่ (kHz)

รูปที่ 4.7ก แสดงแผนภูมิแบบแท่งแสดงค่าที่ กับ ระดับเสียงของสายกีตาร์เส้นที่ 5 ใน Fundamental mode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน (MP) ณ จุดนี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผนภูมิแสดงค่าความถี่ กับ ระดับเสียงของสายกีตาร์เส้นที่ 5 ใน Fundamental mode



รูปที่ 4.7ข แสดงแผนภูมิแบบจุดแสดงค่าความถี่ กับ ระดับเสียงของสายกีตาร์เส้นที่ 5 ใน Fundamental mode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 แสดงผลการทดลองของสายที่ 6

ตำแหน่งที่	Amplitude (mv)	Frequency (Hz)	dB(A)	ค่าความเข้มของแต่ละความถี่ (dBvr)					ค่าความถี่ของแต่ละความถี่ (kHz)				
				1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
0	360	199.2	65	-38.197	-28.4909	-23.5922	-35.1393	-30.2099	0.08	0.165	0.245	0.33	0.41
1	342	214.1	65	-33.292	-20.6997	-32.5514	-34.2979	-28.4093	0.085	0.175	0.26	0.35	0.435
2	288	357.1	64.5	-28.8758	-19.1271	-31.6023	-29.7997	-43.801	0.09	0.185	0.28	0.37	0.465
3	324	84.67	64	-19.216	-30.8465	-34.6231	-32.6742	-36.9373	0.0975	0.19	0.3925	0.39	0.4875
4	182	104.4	64	-25.7728	-28.6834	-33.4948	-35.7306	-55.7478	0.105	0.21	0.31	0.415	0.52
5	486	110	64	-15.9292	-20.9203	-33.3684	-36.0034	-54.6813	0.11	0.22	0.33	0.44	0.55
6	384	116.2	64	-18.0602	-30.6734	-47.0712	-33.9388	-53.7966	0.115	0.325	0.35	0.465	0.58
7	258	123.3	64	-21.6885	-27.9946	-49.8195	-54.7492	-57.2848	0.125	0.245	0.37	0.495	0.615
8	388	129.5	64	-19.9471	-25.4709	-46.1563	-33.7457	-40.6668	0.13	0.26	0.39	0.52	0.6475
9	274	137.2	64	-22.2514	-27.8239	-40.5273	-47.0222	-50.2994	0.14	0.275	0.415	0.555	0.695
10	348	146.4	64	-18.8764	-28.072	-39.5299	-47.7768	-39.9951	0.145	0.295	0.44	0.59	0.735
11	264	155.3	63	-20.8975	-36.9384	-35.423	-56.5427	-51.1994	0.155	0.31	0.465	0.625	0.78
12	312	163.9	64	-18.1244	-43.3354	-61.0584	-61.8818	-55.4225	0.165	0.33	0.495	0.66	0.825
13	302	173.3	64	-19.521	-39.0134	-40.6524	-5.58941	-50.3581	0.175	0.35	0.525	0.7	0.875
14	124	543.5	64	-24.6142	-35.8617	-41.2595	-35.5248	-50.2553	0.185	0.37	0.555	0.74	0.93
15	50	192.7	64	-30.4998	-37.9891	-46.4749	-55.0809	-44.3243	0.195	0.39	0.59	0.79	0.99
16	116	208.3	63.5	-15.9866	-34.9152	-38.9454	-52.2555	-55.0611	0.21	0.415	0.625	0.83	1.045

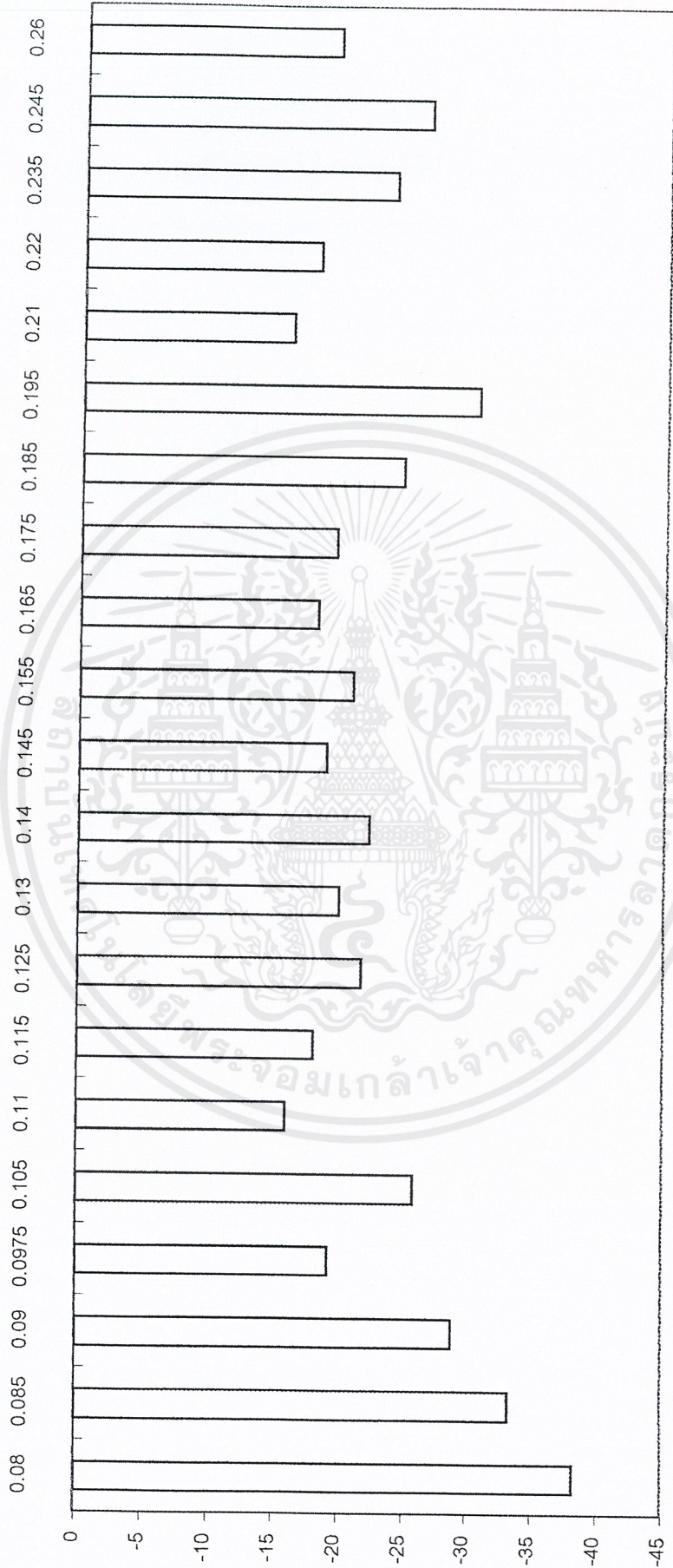
สายที่ 6

สายที่ 6

ตำแหน่งที่	Amplitude (mv)	Frequency (Hz)	dB(A)	ค่าความเข้มของแต่ละความถี่ (dBvr)					ค่าความถี่ของแต่ละความถี่ (kHz)				
				1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
17	174	223.7	64.5	-18.0602	-44.3858	-67.0109	-46.3184	-59.4264	0.22	0.44	0.665	0.87	1.15
18	158	234.7	64	-23.8771	-45.2056	-57.4433	-44.0463	-68.105	0.235	0.47	0.7	0.935	1.18
19	120	255.1	64	-26.4832	-42.0836	-39.2742	-20.2858	-68.9752	0.245	0.495	0.74	0.99	1.245
20	228	261.4	64.5	-19.4154	-40.7027	-42.5411	-47.379	-51.0802	0.26	0.52	0.785	1.05	1.315

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผนภูมิแสดงความถี่ กับ ระดับเสียงของสายกีตาร์เส้นที่ 6 ใน Fundamental mode

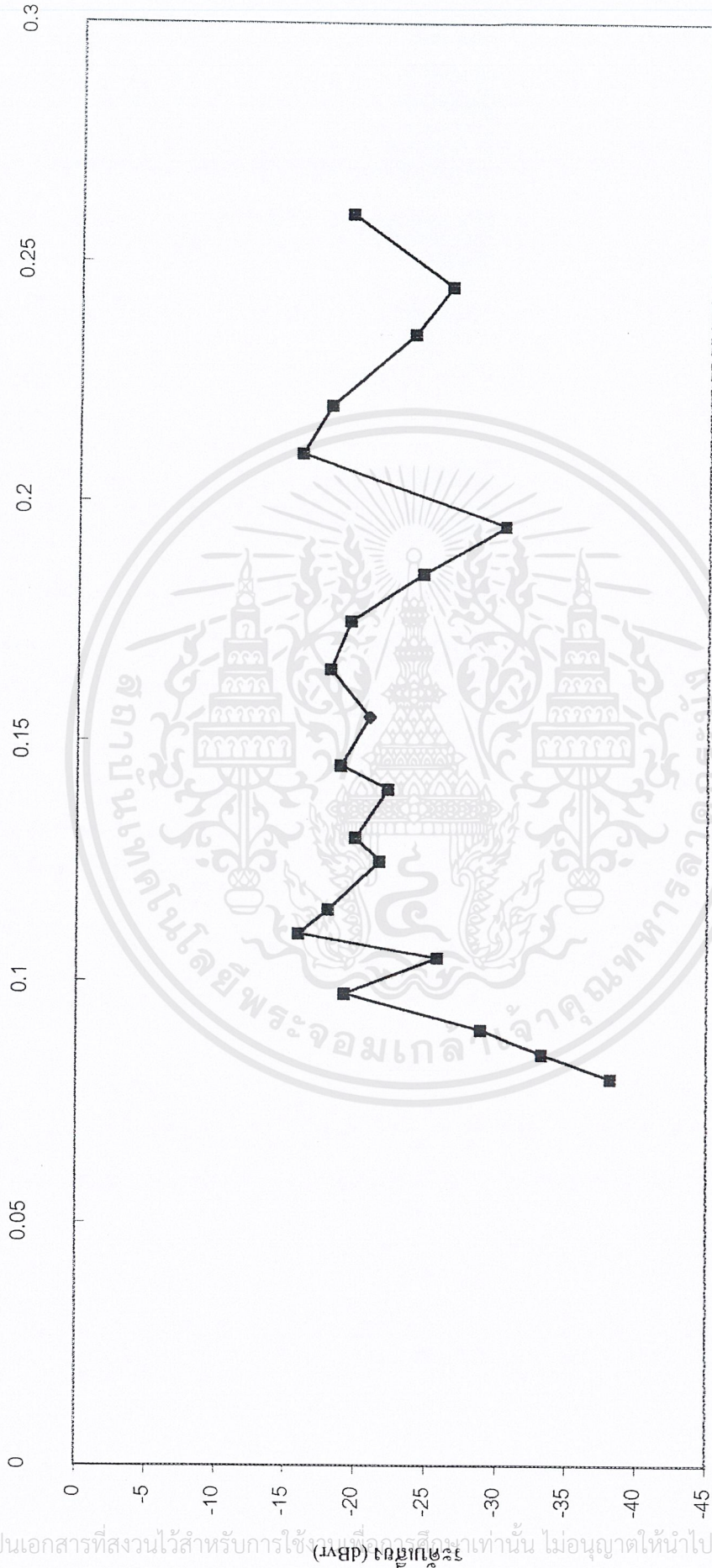


ความถี่ (kHz)

รูปที่ 4.8ก แสดงแผนภูมิแบบแท่งแสดงความถี่ กับ ระดับเสียงของสายกีตาร์เส้นที่ 6 ใน Fundamental mode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน (ฉบับร่าง) เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผนภูมิแสดงความถี่ กับ ระดับเสียงของสายกีตาร์เส้นที่ 6 ใน Fundamental mode



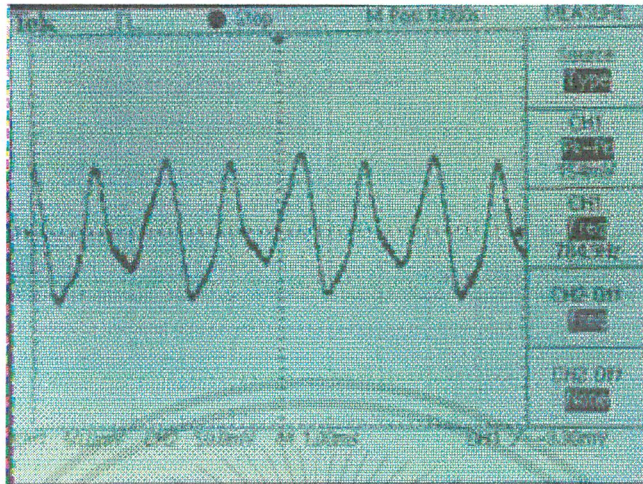
รูปที่ 4.8ข แสดงแผนภูมิเบบจุดแสดงความถี่ กับ ระดับเสียงของสายกีตาร์เส้นที่ 6 ใน Fundamental mode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในองค์กรศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 แสดงผลการทดลองของการเดินคอร์ค

คอร์ค	Amplitude (mv)	Frequency (Hz)	ค่าความเข้มของแต่ละความถี่ (dBvr)						ค่าความถี่ของแต่ละความถี่ (kHz)					
			สาย 1	สาย 2	สาย 3	สาย 4	สาย 5	สาย 6	สาย 1	สาย 2	สาย 3	สาย 4	สาย 5	สาย 6
			สาย 1	สาย 2	สาย 3	สาย 4	สาย 5	สาย 6	สาย 1	สาย 2	สาย 3	สาย 4	สาย 5	สาย 6
A	322	119.2	-25.5232	-27.9989	-24.9981	-32.7678	-33.1974	-30.6352	0.11	0.1625	0.22	0.2775	0.33	0.44
B	234	178.6	-29.7882	-38.4415	-27.2044	-31.5487	-31.3487	-41.782	0.1225	0.1825	0.2475	0.3125	0.37	0.495
C	216	149.9	-23.5652	-24.7157	-23.4714	-34.807	-29.1191	-28.8144	0.0975	0.13	0.1625	0.195	0.26	0.33
D	324	197.4	-25.4628	-28.3134	-39.6896	-31.6459	-36.4145	-26.9295	0.11	0.145	0.2175	0.295	0.37	0.44
E	292	316.6	-38.6621	-21.832	-22.4824	-28.4138	-30.6388	-33.5858	0.08	0.1225	0.1625	0.21	0.2475	0.33
F	260	183	-33.2452	-23.0219	-22.5739	-38.1193	-30.6104	-26.7822	0.085	0.13	0.1725	0.22	0.26	0.35
G	246	131.2	-23.2353	-23.6622	-25.5945	-30.8544	-26.6671	-26.8186	0.0975	0.1225	0.145	0.195	0.245	0.3925
Am	270	385.6	-21.2187	-25.7599	-28.114	-27.8212	-29.7419	-24.427	0.11	0.16	0.22	0.265	0.33	0.44
Bm	230	421.9	-27.9665	-23.6344	-31.2296	-27.1935	-32.0328	-19.8824	0.0925	0.1225	0.1825	0.2475	0.2925	0.37
Cm	220	141.8	-20.6912	-23.6605	-35.9237	-24.5463	-30.6233	-26.4475	0.0975	0.13	0.195	0.2625	0.31	0.39
Dm	218	150.6	-40.0852	-21.5462	-33.1416	-34.8868	-27.7184	-30.1593	0.08	0.1075	0.1425	0.22	0.2925	0.35
Em	198	113	-38.0882	-21.7039	-18.3357	-34.0965	-30.3248	-38.3074	0.08	0.1225	0.1625	0.1925	0.245	0.33
Fm	244	135.3	-34.8506	-27.4782	-33.7197	-32.4234	-32.2575	-29.8238	0.085	0.13	0.1725	0.21	0.2625	0.35
Gm	222	167	-22.909	-24.0867	-40.8649	-25.7471	-29.0802	-28.7275	0.0975	0.145	0.195	0.235	0.295	0.3925

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่เว้นกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



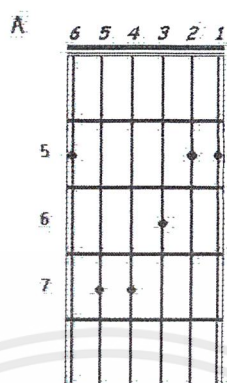
รูปที่ 4.11 แสดงค่าของความถี่และค่าแอมพลิจูด สายกีตาร์เส้นที่ 3 จุดที่ 11 ในโหมดโดเมน



รูปที่ 4.12 แสดงค่าของความถี่และค่าของควมถี่สายกีตาร์เส้นที่ 3 จุดที่ 11 ใน Frequency domain

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

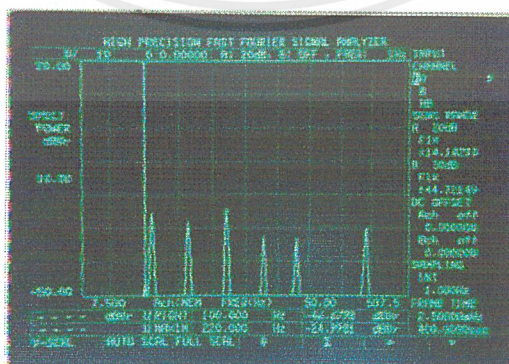
แสดงตัวอย่างภาพผลการทดลอง การเล่นกีตาร์ที่คอร์ดต่างๆกัน



รูปที่ 4.17 แสดงการจับคอร์ด A

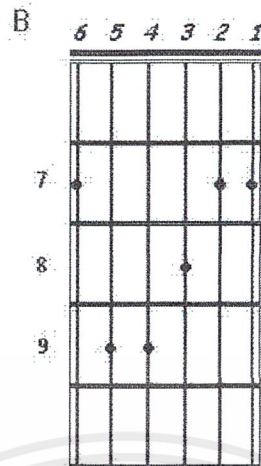


รูปที่ 4.18 แสดงค่าของความถี่และค่าแอมพลิจูดของคอร์ด A ใน โทม์โดเมน

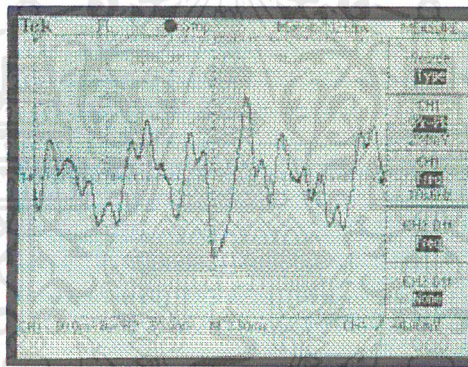


รูปที่ 4.19 แสดงค่าของความถี่และค่าของความถี่ของคอร์ด A ใน Frequency domain

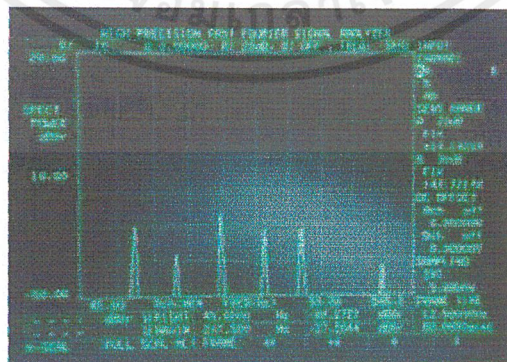
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 แสดงการจับขั้วคอร์ด์ B

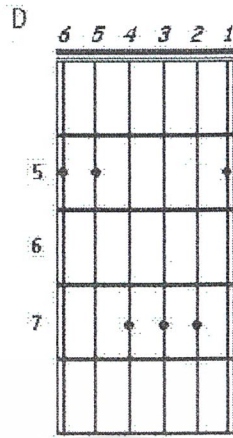


รูปที่ 4.21 แสดงค่าของความถี่และค่าแอมพลิจูดของคอร์ด์ B ในไทม์โดเมน

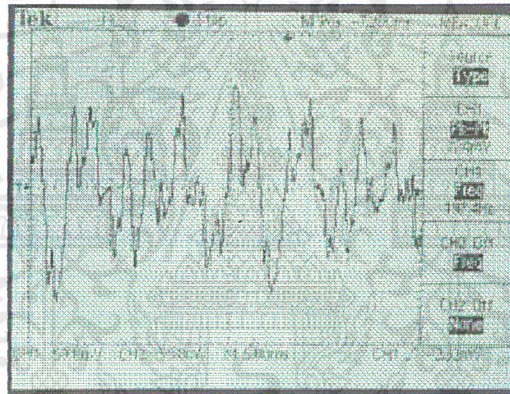


รูปที่ 4.22 แสดงค่าของความถี่และค่าของความถี่ของคอร์ด์ B ใน Frequency domain

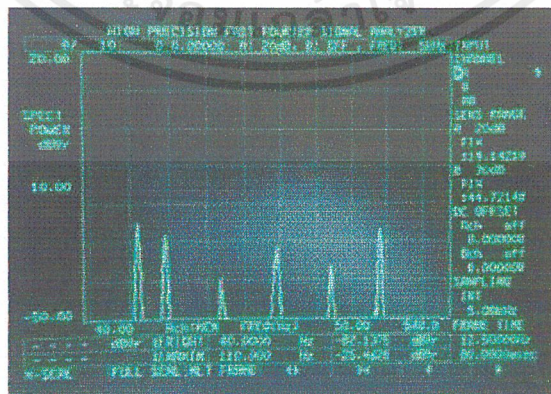
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 แสดงการจับคอร์ดD



รูปที่ 4.24 แสดงค่าของความถี่และค่าแอมพลิจูดของคอร์ดD ในไทม์โดเมน



รูปที่ 4.25 แสดงค่าของความถี่และความถี่ของคอร์ดD ใน Frequency domain

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการทดลองเราพบว่า ไม่ว่าจะเล่นกีตาร์ที่ตัวโน้ตเดียวกันด้วยความดังเท่าใด และเมื่อเวลาเปลี่ยนไปเท่าใด ความถี่ของตัวโน้ตนั้น ก็จะเท่าเดิม ไม่แปรผันตามความดัง และเวลา

ผลการทดลองสรุปได้ว่า แบนด์วิดธ์ของกีตาร์ใน Fundamental mode จะมีค่าประมาณ 970 Hz. ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 80 - 1050 Hz. ที่แสดงไว้ ดังรูปที่ 5.2ก ซึ่งถือว่าใกล้เคียงกับค่ามาตรฐาน (930 Hz.) และในการทดลองนี้ ได้ทำการเก็บค่าความถี่ของสัญญาณของเสียงกีตาร์ถึงฮาร์โมนิกที่ 5 ซึ่งมีผลดังนี้

Fundamental mode มีช่วงความถี่อยู่ระหว่าง 80 - 1050 Hz

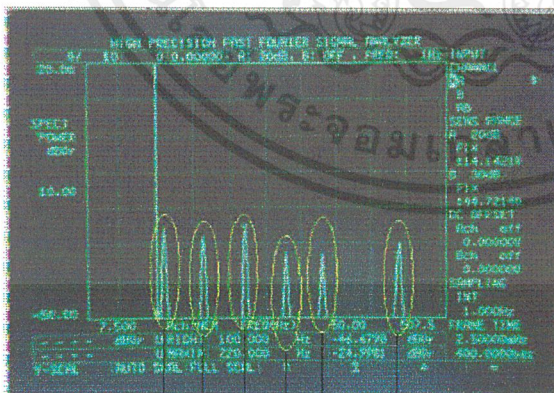
2nd Harmonic มีช่วงความถี่อยู่ระหว่าง 165 - 1210 Hz

3rd Harmonic มีช่วงความถี่อยู่ระหว่าง 245 - 3150 Hz

4th Harmonic มีช่วงความถี่อยู่ระหว่าง 330 - 4200 Hz

5th Harmonic มีช่วงความถี่อยู่ระหว่าง 410 - 5250 Hz

และในการเล่นกีตาร์ออกมาในรูปแบบของคอร์ดนั้น จะพบว่าเป็นการผสมเสียงกันของตัวโน้ตที่กดลงบนตัวกีตาร์นั่นเองดังรูป 5.1 (ซึ่งเป็นคอร์ด A)



spectrum of 1st string (440 Hz.)

spectrum of 2nd string (330 Hz.)

spectrum of 3rd string (277.5 Hz.)

spectrum of 4th string (220 Hz.)

spectrum of 5th string (162.5 Hz.)

spectrum of 6th string (110 Hz.)

รูปที่ 5.1 แสดงค่าความถี่การเล่นกีตาร์ออกมาในรูปแบบของคอร์ด (ใน Fundamental mode)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปตัวอย่างที่ 5.2 ข. นั้นประกอบไปด้วย

สเปกตรัมที่ 1 ซึ่งมีความถี่ 110 Hz.

สเปกตรัมที่ 2 ซึ่งมีความถี่ 162.5 Hz.

สเปกตรัมที่ 3 ซึ่งมีความถี่ 220 Hz.

สเปกตรัมที่ 4 ซึ่งมีความถี่ 277.5 Hz.

สเปกตรัมที่ 5 ซึ่งมีความถี่ 330 Hz.

สเปกตรัมที่ 6 ซึ่งมีความถี่ 440 Hz.

เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับตารางผลการทดลองที่ 4.1 – 4.2 จะพบว่าเป็นการผสมเสียงกันของตัวโน้ตแต่ละตัวของกีตาร์ดังนี้

สายที่ 6 จุดที่ 5 ซึ่งมีความถี่ 110 Hz (fundamental mode)

สายที่ 5 จุดที่ 7 ซึ่งมีความถี่ 162.5 Hz (fundamental mode)

สายที่ 4 จุดที่ 7 ซึ่งมีความถี่ 220 Hz. (fundamental mode)

สายที่ 3 จุดที่ 6 ซึ่งมีความถี่ 277.5 Hz (fundamental mode)

สายที่ 2 จุดที่ 5 ซึ่งมีความถี่ 330 Hz. (fundamental mode)

สายที่ 1 จุดที่ 5 ซึ่งมีความถี่ 440 Hz (fundamental mode)

จึงสรุปได้ว่าจากรูปซึ่งแสดงภาพใน fundamental mode ของคอร์ด ๆ หนึ่งซึ่งจะประกอบไปด้วย สเปกตรัมที่บอกถึงความถี่ของแต่ละสายของกีตาร์จากสาย 6 ไปจนถึงสาย 1 (สาย 6 จะมีความถี่ต่ำที่สุด และสาย 1 จะมีความถี่น้อยที่สุด)

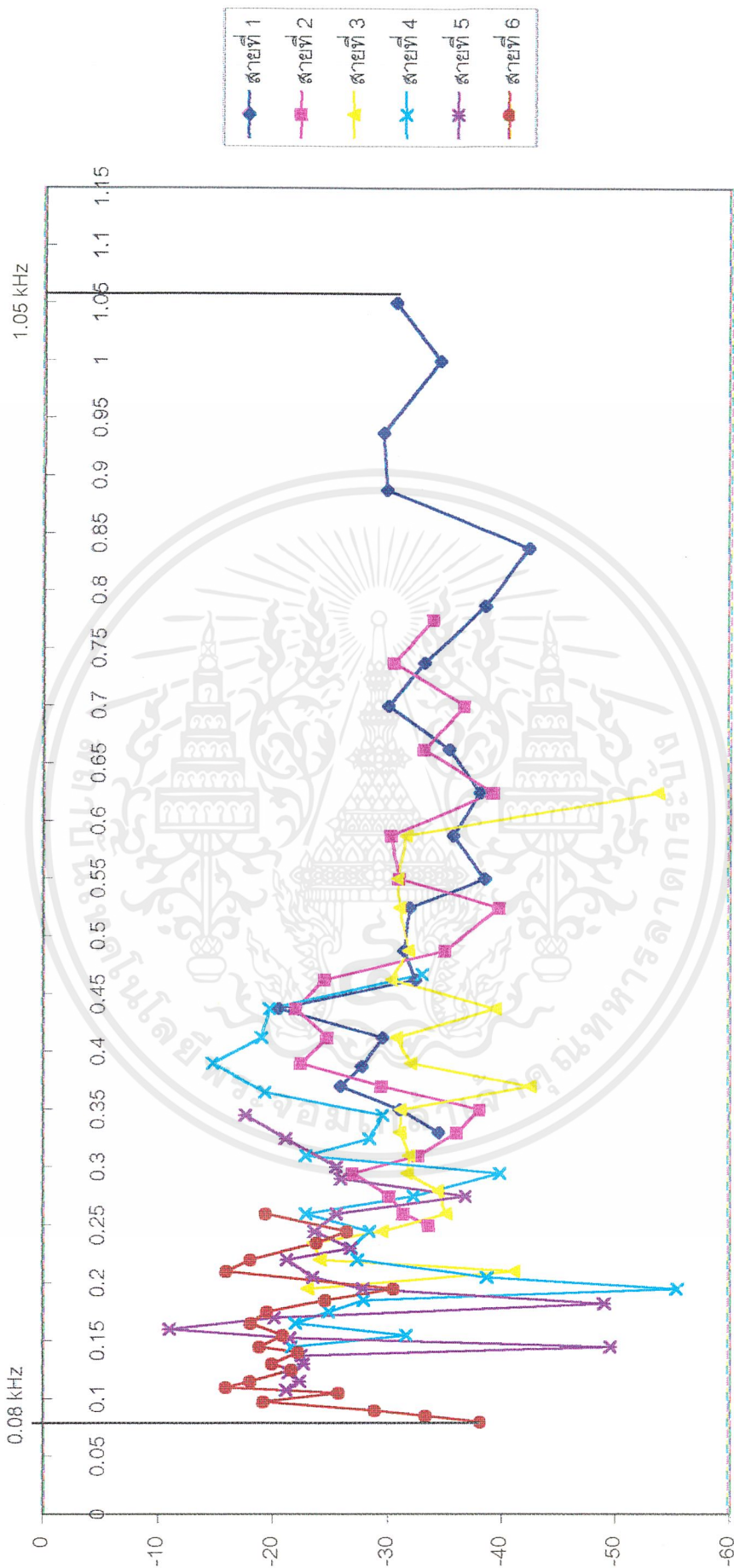
∴ 1 cord ประกอบด้วย $f_6 + f_5 + f_4 + f_3 + f_2 + f_1$; in fundamental mode

โดย f_n = ความถี่ของสายกีตาร์แต่ละเส้น ($n = 1, 2, 3, 4, 5, 6$)

จากการทดลองสามารถแสดงให้เห็นว่าแบนด์วิดธ์ของเสียงกีตาร์ใน Fundamental mode อยู่ในช่วง 80 - 1050 Hz. ซึ่งแสดงไว้ดังรูปที่ 5.2 ก. ซึ่งเป็นรูปที่ดูได้ลำบาก จึงได้สร้างรูปที่ 5.2 ข. โดยนำค่าความเข้มในหน่วย dB_{v_r} บวกด้วย 100 แล้วหารด้วย 89.0001 ซึ่งเป็นค่าสูงสุดของความเข้ม ทำให้ได้รูปที่ 5.2 ข. ออกมา ทำให้สามารถพิจารณาได้ง่ายขึ้น

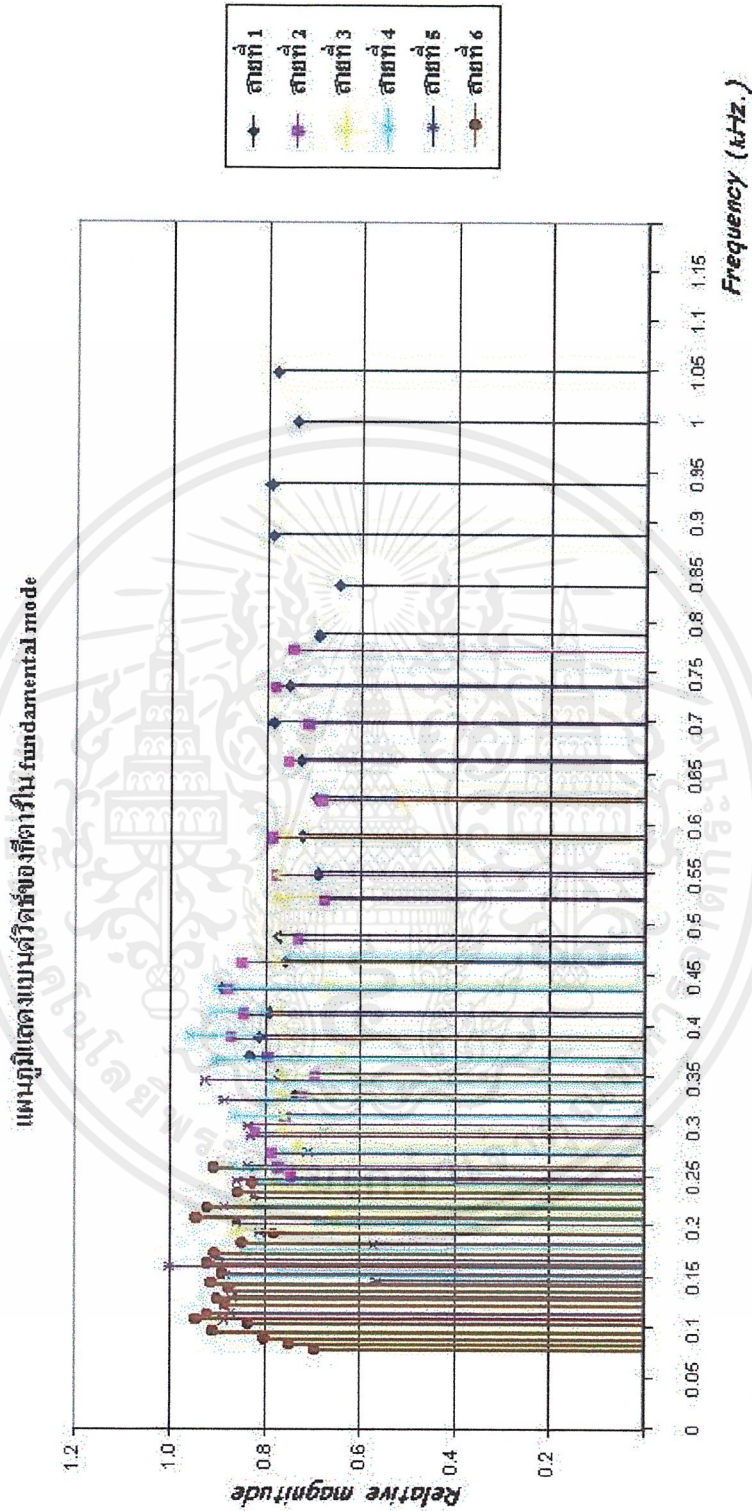
จากการพิจารณารูป 5.2 ข. แบนด์วิดธ์ตั้งแต่ 80 – 500 Hz มีความหนาแน่นสูงมาก เพราะฉะนั้นเสียงของการเล่นกีตาร์ที่ออกมาส่วนมากจะอยู่ในช่วง 80 – 500 Hz

แผนภูมิแสดง Bandwidth ของกีตาร์ ใน Fundamental mode



รูปที่ 5.2ก. แสดงแผนภูมิแบนด์วิดท์ของกีตาร์ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 ข. แสดงแผนภูมิแบบแท่งแสดงแอมพลิจูดของกิตาใน fundamental mode

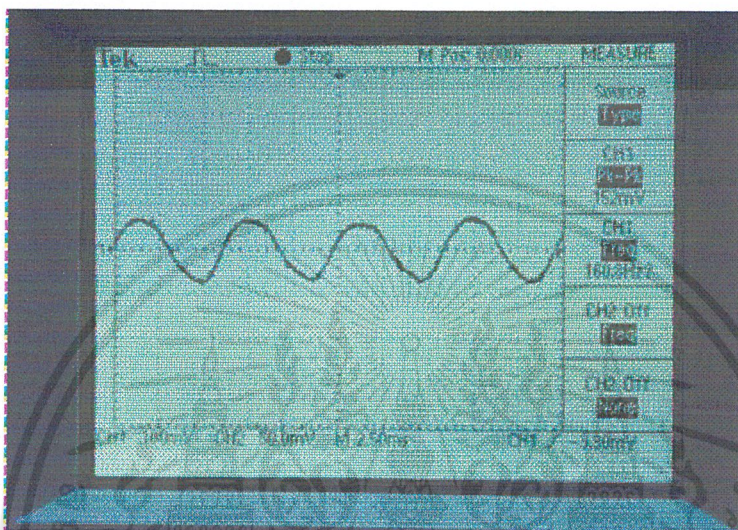
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



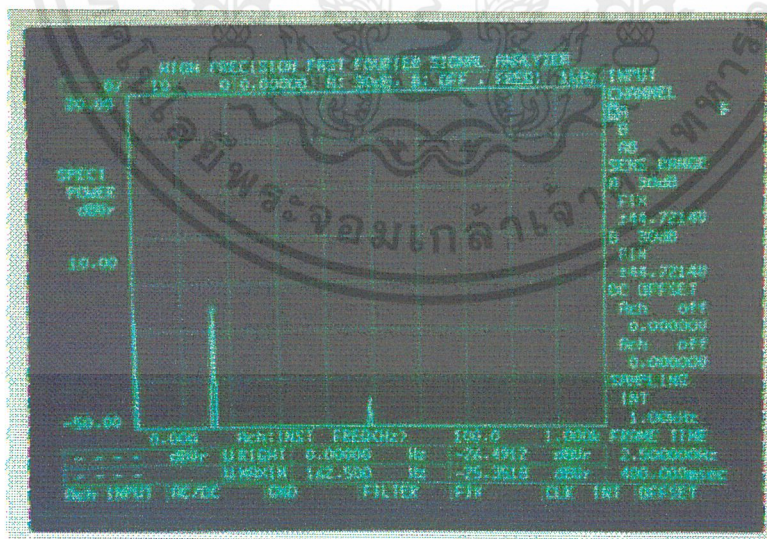
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงรูปคลื่นฮาร์โมนิกของเสียงกีตาร์

จากการทดลองเราจะพบว่ารูปคลื่นที่เสียงกีตาร์ที่ตัวกีตาร์ได้ผลิตออกมาจะเป็นแบบ Non-harmonic และ เป็นแบบ periodic แต่เราสามารถใช้นเทคนิคการเล่นกีตาร์ให้เสียงออกมาเป็นแบบ harmonic ได้ ซึ่งได้แสดงไว้ดังรูป



จากรูปนี้จะเห็นว่ารูปคลื่นเป็นรูป Sine wave ซึ่งตรงตามทฤษฎี



จากรูปนี้จะเห็นว่าสเปกตรัมออกมาเพียงความถี่เดียวหรือเป็น Pure tone ซึ่งตรงตามทฤษฎี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LF155/LF156/LF355/LF356/LF357 JFET Input Operational Amplifiers

General Description

These are the first monolithic JFET input operational amplifiers to incorporate well matched, high voltage JFETs on the same chip with standard bipolar transistors (BI-FET™ Technology). These amplifiers feature low input bias and offset currents/low offset voltage and offset voltage drift, coupled with offset adjust which does not degrade drift or common-mode rejection. The devices are also designed for high slew rate, wide bandwidth, extremely fast settling time, low voltage and current noise and a low 1/f noise corner.

Features

Advantages

- Replace expensive hybrid and module FET op amps
- Rugged JFETs allow blow-out free handling compared with MOSFET input devices
- Excellent for low noise applications using either high or low source impedance—very low 1/f corner
- Offset adjust does not degrade drift or common-mode rejection as in most monolithic amplifiers
- New output stage allows use of large capacitive loads (5,000 pF) without stability problems
- Internal compensation and large differential input voltage capability

Applications

- Precision high speed integrators
- Fast D/A and A/D converters
- High impedance buffers

- Wideband, low noise, low drift amplifiers
- Logarithmic amplifiers
- Photocell amplifiers
- Sample and Hold circuits

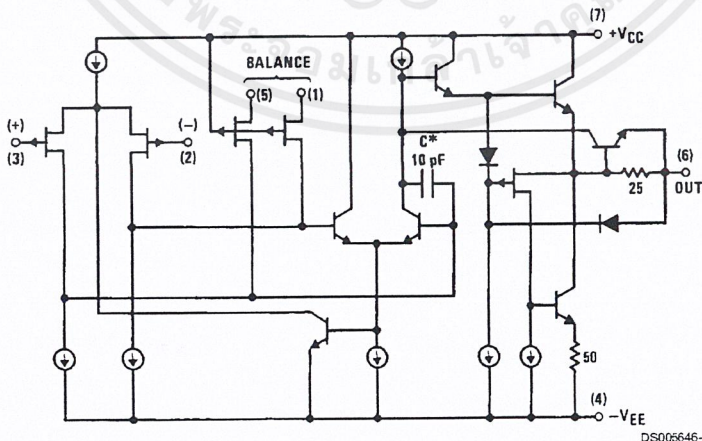
Common Features

- Low input bias current: 30pA
- Low Input Offset Current: 3pA
- High input impedance: $10^{12}\Omega$
- Low input noise current: $0.01 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$
- High common-mode rejection ratio: 100 dB
- Large dc voltage gain: 106 dB

Uncommon Features

	LF155/ LF355	LF156/ LF356	LF357 ($A_v=5$)	Units
■ Extremely fast settling time to 0.01%	4	1.5	1.5	μs
■ Fast slew rate	5	12	50	V/ μs
■ Wide gain bandwidth	2.5	5	20	MHz
■ Low input noise voltage	20	12	12	nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$

Simplified Schematic



*3 pF in LF357 series.

DS005646-1

Absolute Maximum Ratings (Note 1)

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

	LF155/6	LF356B	LF355/6/7
Supply Voltage	±22V	±22V	±18V
Differential Input Voltage	±40V	±40V	±30V
Input Voltage Range (Note 2)	±20V	±20V	±16V
Output Short Circuit Duration	Continuous	Continuous	Continuous
T_{JMAX}			
H-Package	150°C	115°C	115°C
N-Package		100°C	100°C
M-Package		100°C	100°C
Power Dissipation at $T_A = 25^\circ\text{C}$ (Notes 1, 8)			
H-Package (Still Air)	560 mW	400 mW	400 mW
H-Package (400 LF/Min Air Flow)	1200 mW	1000 mW	1000 mW
N-Package		670 mW	670 mW
M-Package		380 mW	380 mW
Thermal Resistance (Typical) θ_{JA}			
H-Package (Still Air)	160°C/W	160°C/W	160°C/W
H-Package (400 LF/Min Air Flow)	65°C/W	65°C/W	65°C/W
N-Package		130°C/W	130°C/W
M-Package		195°C/W	195°C/W
(Typical) θ_{JC}			
H-Package	23°C/W	23°C/W	23°C/W
Storage Temperature Range	-65°C to +150°C	-65°C to +150°C	-65°C to +150°C
Soldering Information (Lead Temp.)			
Metal Can Package			
Soldering (10 sec.)	300°C	300°C	300°C
Dual-In-Line Package			
Soldering (10 sec.)	260°C	260°C	260°C
Small Outline Package			
Vapor Phase (60 sec.)		215°C	215°C
Infrared (15 sec.)		220°C	220°C
See AN-450 "Surface Mounting Methods and Their Effect on Product Reliability" for other methods of soldering surface mount devices.			
ESD tolerance			
(100 pF discharged through 1.5 k Ω)	1000V	1000V	1000V

DC Electrical Characteristics

(Note 3)

Symbol	Parameter	Conditions	LF155/6			LF356B			LF355/6/7			Units
			Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
V_{OS}	Input Offset Voltage	$R_S=50\Omega$, $T_A=25^\circ\text{C}$ Over Temperature		3	5		3	5		3	10	mV
					7		6.5			13	mV	
$\Delta V_{OS}/\Delta T$	Average TC of Input Offset Voltage	$R_S=50\Omega$		5			5			5	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	
$\Delta TC/\Delta V_{OS}$	Change in Average TC with V_{OS} Adjust	$R_S=50\Omega$, (Note 4)		0.5			0.5			0.5	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ per mV	
I_{OS}	Input Offset Current	$T_J=25^\circ\text{C}$, (Notes 3, 5) $T_J \leq T_{HIGH}$		3	20		3	20		3	50	pA
					20		1		2	nA		
I_B	Input Bias Current	$T_J=25^\circ\text{C}$, (Notes 3, 5) $T_J \leq T_{HIGH}$		30	100		30	100		30	200	pA
					50		5		8	nA		
R_{IN}	Input Resistance	$T_J=25^\circ\text{C}$		10^{12}			10^{12}			10^{12}	Ω	

DC Electrical Characteristics (Continued)

(Note 3)

Symbol	Parameter	Conditions	LF155/6			LF356B			LF355/6/7			Units
			Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
A _{VOL}	Large Signal Voltage Gain	V _S =±15V, T _A =25°C	50	200		50	200		25	200		V/mV
		V _O =±10V, R _L =2k Over Temperature	25			25			15			V/mV
V _O	Output Voltage Swing	V _S =±15V, R _L =10k	±12	±13		±12	±13		±12	±13		V
		V _S =±15V, R _L =2k	±10	±12		±10	±12		±10	±12		V
V _{CM}	Input Common-Mode Voltage Range	V _S =±15V	±11	+15.1 -12		±11	±15.1 -12		+10	+15.1 -12		V
												V
CMRR	Common-Mode Rejection Ratio		85	100		85	100		80	100		dB
PSRR	Supply Voltage Rejection Ratio	(Note 6)	85	100		85	100		80	100		dB

DC Electrical Characteristics

T_A = T_J = 25°C, V_S = ±15V

Parameter	LF155		LF355		LF156/356B		LF356		LF357		Units
	Typ	Max	Typ	Max	Typ	Max	Typ	Max	Typ	Max	
Supply Current	2	4	2	4	5	7	5	10	5	10	mA

AC Electrical Characteristics

T_A = T_J = 25°C, V_S = ±15V

Symbol	Parameter	Conditions	LF155/355	LF156/356B	LF156/356/ LF356B	LF357	Units
			Typ	Min	Typ	Typ	
SR	Slew Rate	LF155/6: A _V =1, LF357: A _V =5	5	7.5	12	50	V/μs V/μs
GBW	Gain Bandwidth Product		2.5		5	20	MHz
t _s	Settling Time to 0.01%	(Note 7)	4		1.5	1.5	μs
e _n	Equivalent Input Noise Voltage	R _S =100Ω					
		f=100 Hz	25		15	15	nV/√Hz
		f=1000 Hz	20		12	12	nV/√Hz
i _n	Equivalent Input Current Noise	f=100 Hz	0.01		0.01	0.01	pA/√Hz
		f=1000 Hz	0.01		0.01	0.01	pA/√Hz
C _{IN}	Input Capacitance		3		3	3	pF

Notes for Electrical Characteristics

Note 1: The maximum power dissipation for these devices must be derated at elevated temperatures and is dictated by T_{JMAX}, θ_{JA}, and the ambient temperature, T_A. The maximum available power dissipation at any temperature is P_d=(T_{JMAX}-T_A)/θ_{JA} or the 25°C P_{dMAX}, whichever is less.

Note 2: Unless otherwise specified the absolute maximum negative input voltage is equal to the negative power supply voltage.

Note 3: Unless otherwise stated, these test conditions apply:

	LF155/156	LF356B	LF355/6/7
Supply Voltage, V _S	±15V ≤ V _S ≤ ±20V	±15V ≤ V _S ≤ ±20V	V _S = ±15V
T _A	-55°C ≤ T _A ≤ +125°C	0°C ≤ T _A ≤ +70°C	0°C ≤ T _A ≤ +70°C
T _{HIGH}	+125°C	+70°C	+70°C

and V_{OS}, I_B and I_{OS} are measured at V_{CM}=0.

Note 4: The Temperature Coefficient of the adjusted input offset voltage changes only a small amount (0.5μV/°C typically) for each mV of adjustment from its original unadjusted value. Common-mode rejection and open loop voltage gain are also unaffected by offset adjustment.

Notes for Electrical Characteristics (Continued)

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 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 . $T_J = T_A + \theta_{JA} P_d$ 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 is measured for both supply magnitudes increasing or decreasing simultaneously, in accordance with common practice.

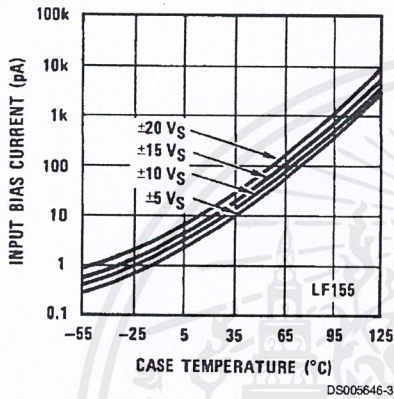
Note 7: Settling time is defined here, for a unity gain inverter connection using 2 kΩ resistors for the LF155/6. It is the time required for the error voltage (the voltage at the inverting input pin on the amplifier) to settle to within 0.01% of its final value from the time a 10V step input is applied to the inverter. For the LF357, $A_V = -5$, the feedback resistor from output to input is 2 kΩ and the output step is 10V (See Settling Time Test Circuit).

Note 8: 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.

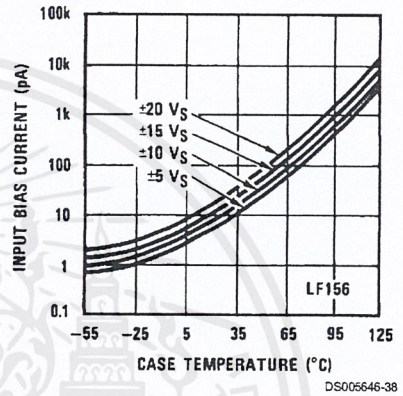
Typical DC Performance Characteristics

Curves are for LF155 and LF156 unless otherwise specified.

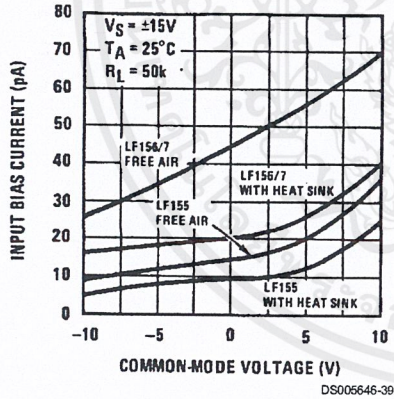
Input Bias Current



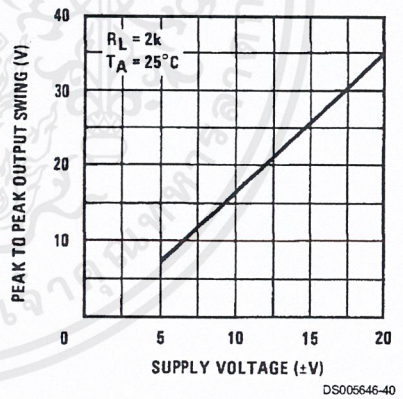
Input Bias Current



Input Bias Current

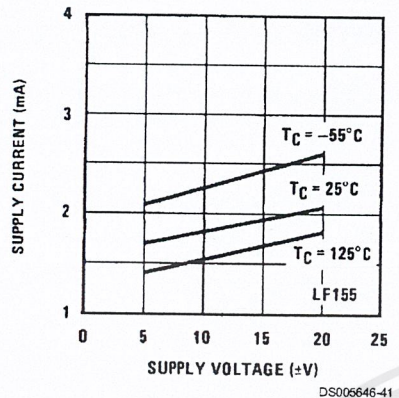


Voltage Swing

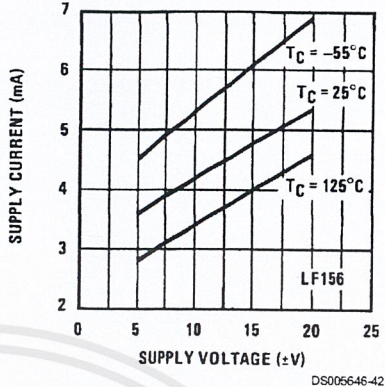


Typical DC Performance Characteristics Curves are for LF155 and LF156 unless otherwise specified. (Continued)

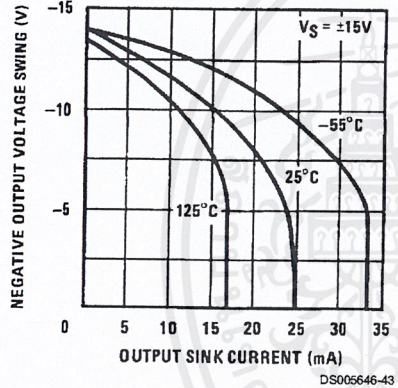
Supply Current



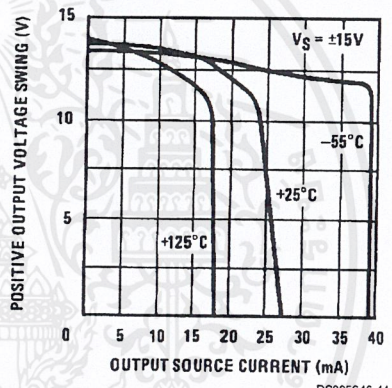
Supply Current



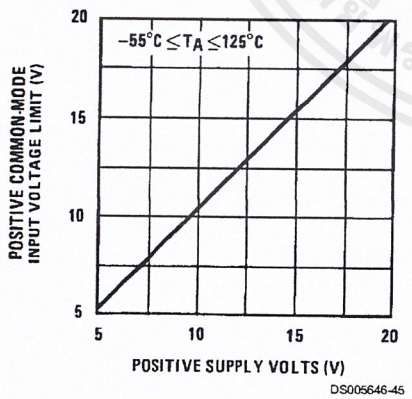
Negative Current Limit



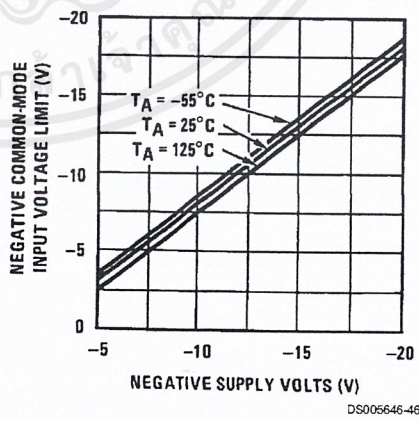
Positive Current Limit



Positive Common-Mode Input Voltage Limit



Negative Common-Mode Input Voltage Limit

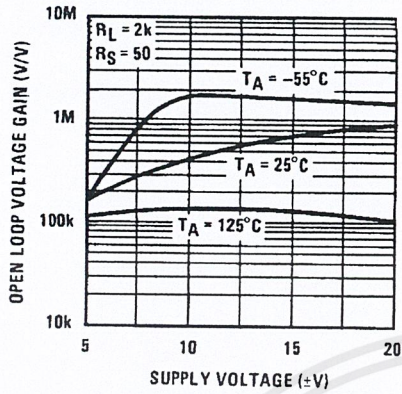


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

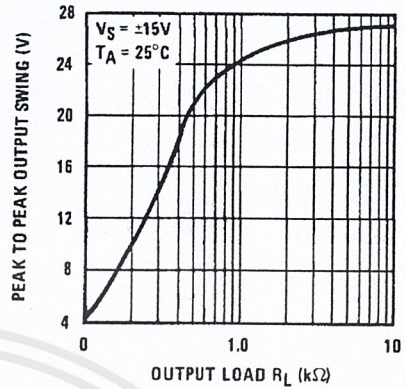
Typical DC Performance Characteristics

Curves are for LF155 and LF156 unless otherwise specified. (Continued)

Open Loop Voltage Gain

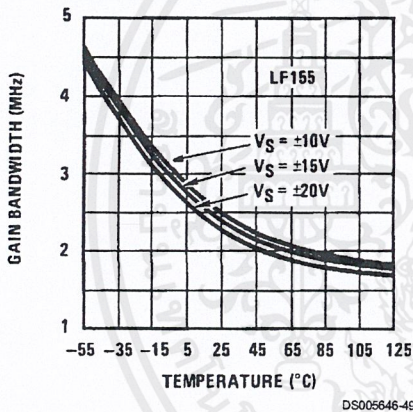


Output Voltage Swing

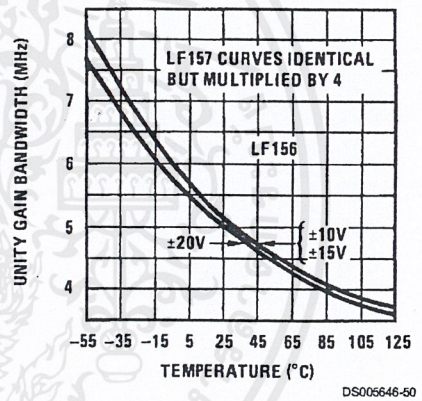


Typical AC Performance Characteristics

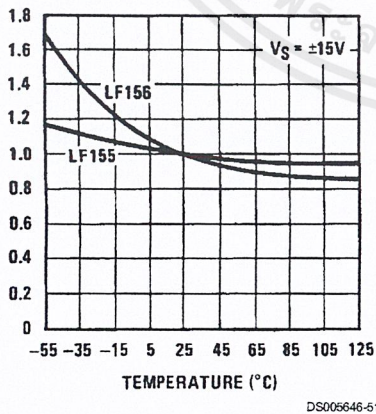
Gain Bandwidth



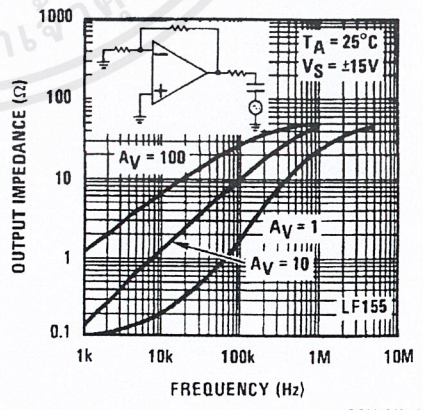
Gain Bandwidth



Normalized Slew Rate

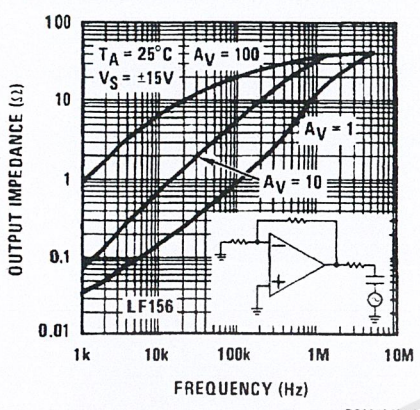


Output Impedance



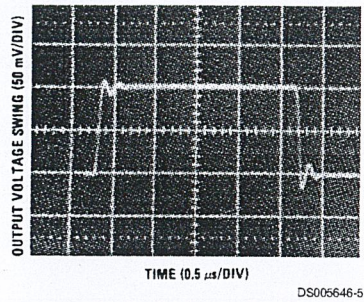
Typical AC Performance Characteristics (Continued)

Output Impedance



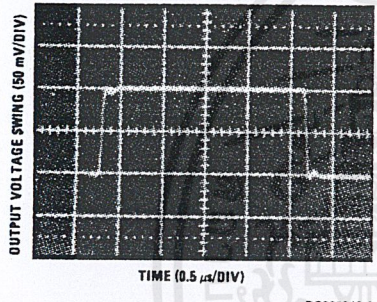
DS005646-53

LF155 Small Signal Pulse Response, $A_V = +1$



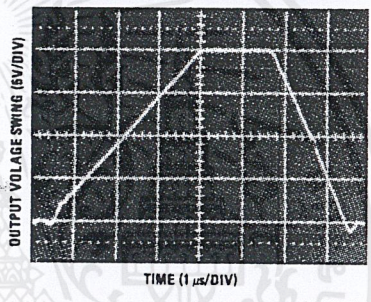
DS005646-5

LF156 Small Signal Pulse Response, $A_V = +1$



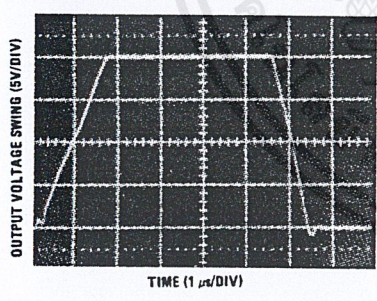
DS005646-6

LF155 Large Signal Pulse Response, $A_V = +1$



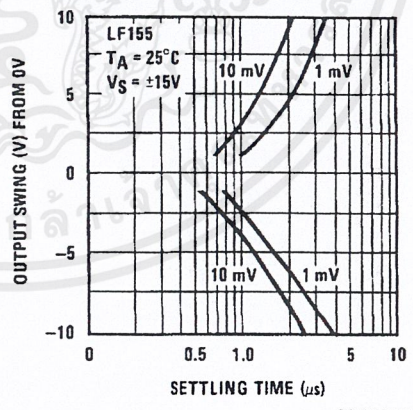
DS005646-8

LF156 Large Signal Puls Response, $A_V = +1$



DS005646-9

Inverter Settling Time

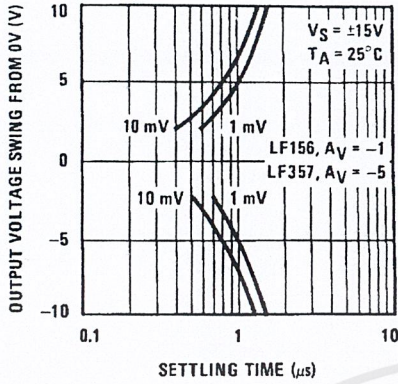


DS005646-55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

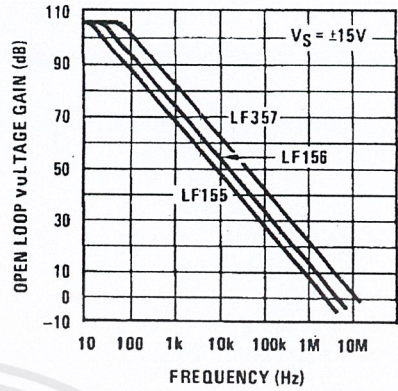
Typical AC Performance Characteristics (Continued)

Inverter Settling Time



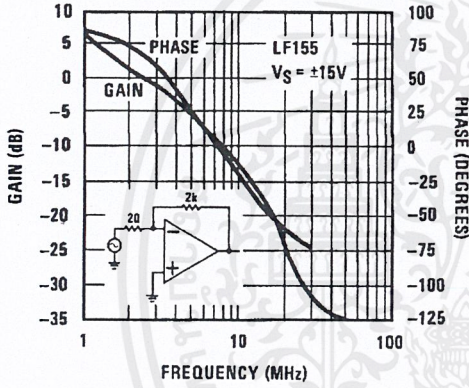
DS006646-66

Open Loop Frequency Response



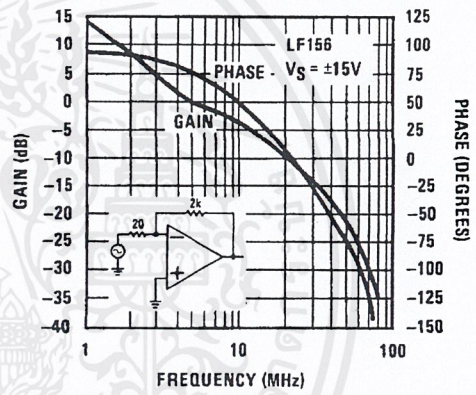
DS006646-67

Bode Plot



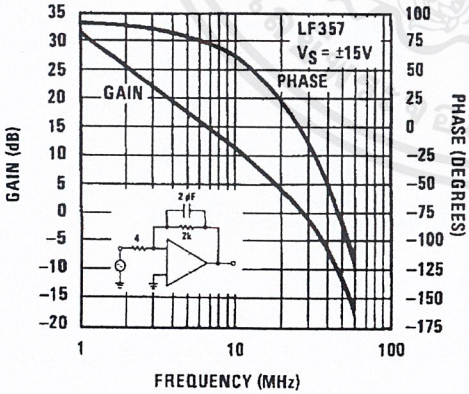
DS006646-68

Bode Plot



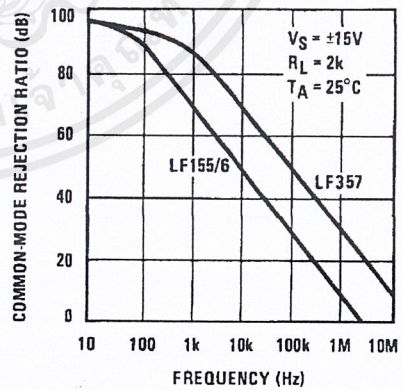
DS006646-69

Bode Plot



DS006646-60

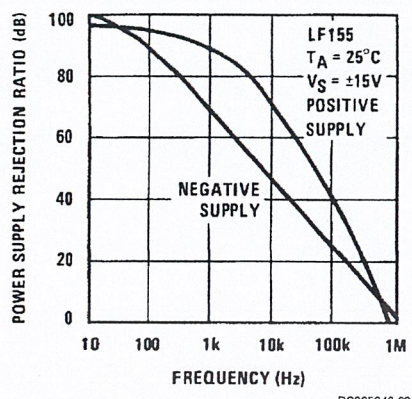
Common-Mode Rejection Ratio



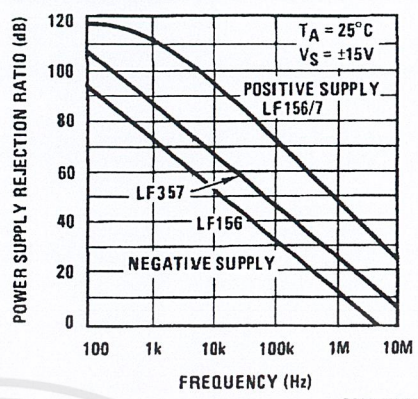
DS006646-61

Typical AC Performance Characteristics (Continued)

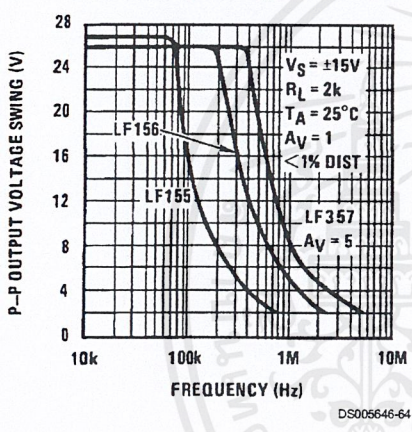
Power Supply Rejection Ratio



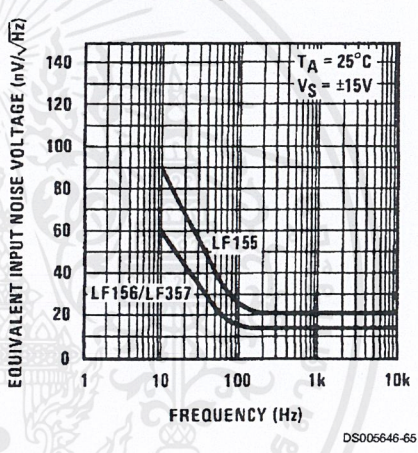
Power Supply Rejection Ratio



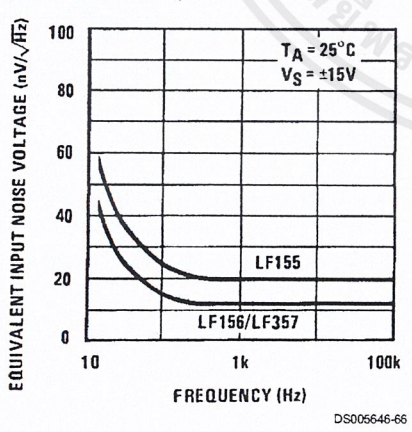
Undistorted Output Voltage Swing



Equivalent Input Noise Voltage

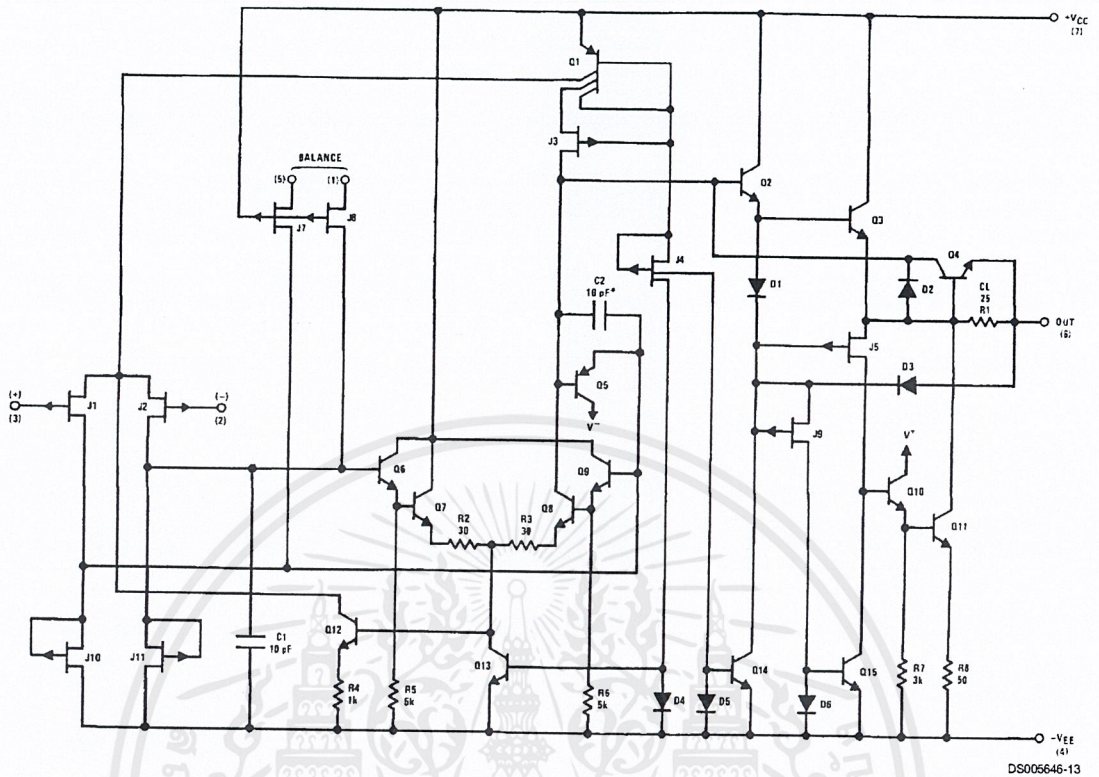


Equivalent Input Noise Voltage (Expanded Scale)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Detailed Schematic

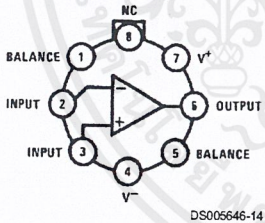


DS005646-13

*C = 3 pF in LF357 series.

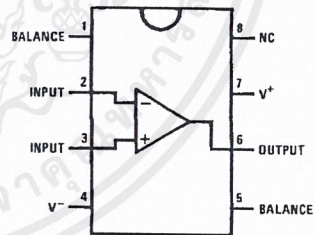
Connection Diagrams (Top Views)

Metal Can Package (H)



DS005646-14

Dual-In-Line Package (M and N)



DS005646-29

*Available per JM38510/11401 or JM38510/11402

Order Number LF155H, LF156H, LF356BH, LF356H, or LF357H

See NS Package Number H08C

Order Number LF356M, LF356MX, LF355N, or LF356N
See NS Package Number M08A or N08E

Application Hints

These are op amps with JFET input devices. 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.

These amplifiers will operate with the common-mode input voltage equal to the positive supply. In fact, the common-mode voltage can exceed the positive supply by approximately 100 mV independent of supply voltage and over the full operating temperature range. The positive supply can therefore be used as a reference on an input as, for example, in a supply current monitor and/or limiter.

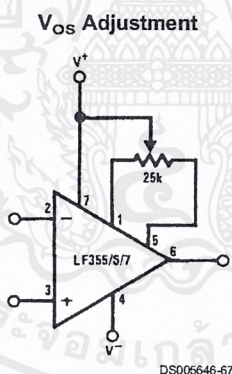
Precautions should be taken to ensure that the power supply for the integrated circuit never becomes reversed in polarity or that the unit is not inadvertently installed backwards in a socket as an unlimited current surge through the resulting forward diode within the IC could cause fusing of the internal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

All of the bias currents in these amplifiers are set by FET current sources. The drain currents for the amplifiers are therefore essentially independent of supply voltage.

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 "pickup" 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 six 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.

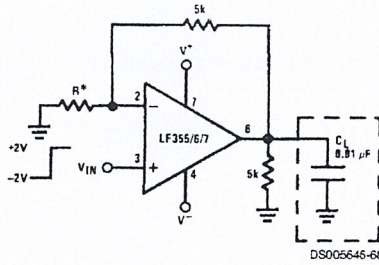
Typical Circuit Connections



- V_{OS} is adjusted with a 25k potentiometer
- The potentiometer wiper is connected to V^+
- For potentiometers with temperature coefficient of 100 ppm/°C or less the additional drift with adjust is $\approx 0.5 \mu V/^{\circ}C/mV$ of adjustment
- Typical overall drift: $5 \mu V/^{\circ}C \pm (0.5 \mu V/^{\circ}C/mV \text{ of adj.})$

Typical Circuit Connections (Continued)

Driving Capacitive Loads

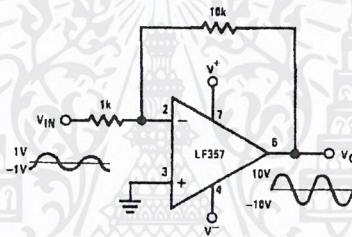


DS005646-68

- * LF155/6 R = 5k
- LF357 R=1.25k

Due to a unique output stage design, these amplifiers have the ability to drive large capacitive loads and still maintain stability.
 $C_{L(MAX)} \approx 0.01 \mu F$.
 Overshoot $\leq 20\%$
 Settling time (t_s) $\approx 5 \mu s$

LF357. A Large Power BW Amplifier

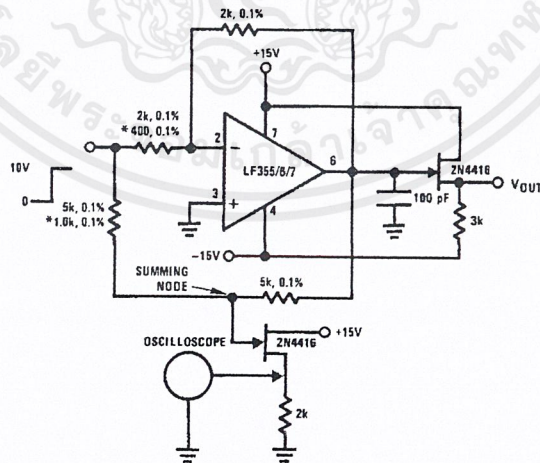


DS005646-15

For distortion $\leq 1\%$ and a 20 Vp-p V_{OUT} swing, power bandwidth is: 500 kHz.

Typical Applications

Settling Time Test Circuit



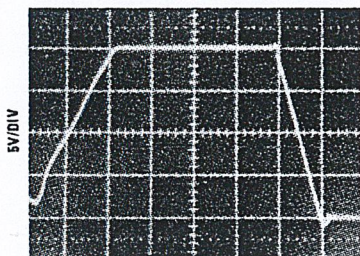
DS005646-16

- Settling time is tested with the LF155/6 connected as unity gain inverter and LF357 connected for $A_v = -5$
- FET used to isolate the probe capacitance
- Output = 10V step
- $A_v = -5$ for LF357

Typical Applications (Continued)

Large Signal Inverter Output, V_{OUT} (from Settling Time Circuit)

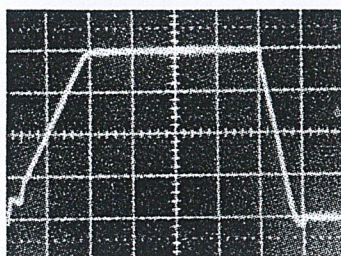
LF355



2 μ s/DIV

DS005646-17

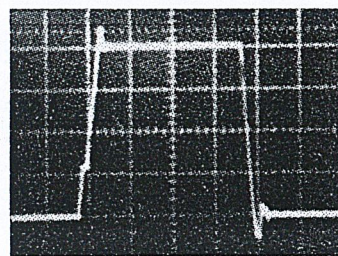
LF356



1 μ s/DIV

DS005646-18

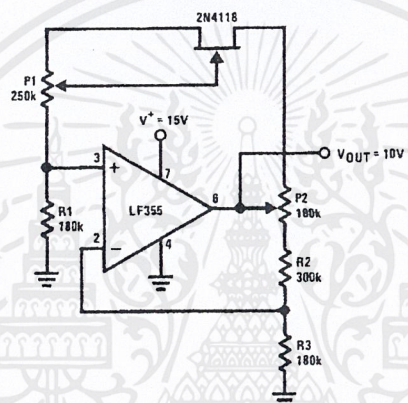
LF357



1 μ s/DIV

DS005646-19

Low Drift Adjustable Voltage Reference

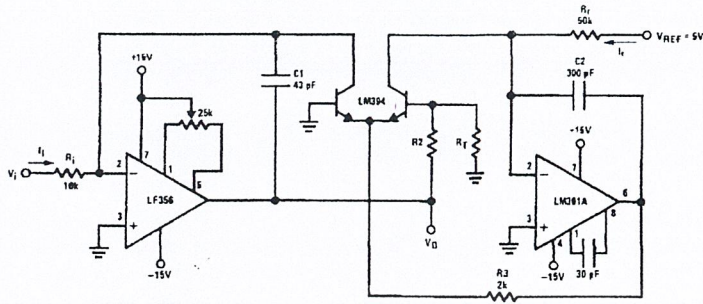


DS005646-20

- $\Delta V_{OUT}/\Delta T = \pm 0.002\%/^{\circ}\text{C}$
- All resistors and potentiometers should be wire-wound
- P1: drift adjust
- P2: V_{OUT} adjust
- Use LF155 for
 - Low I_B
 - Low drift
 - Low supply current

Typical Applications (Continued)

Fast Logarithmic Converter

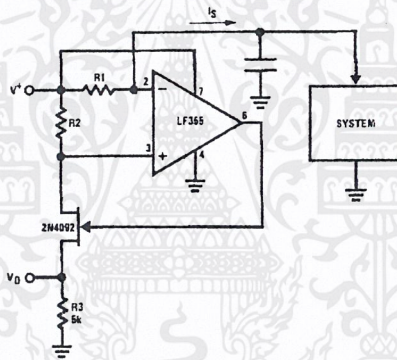


DS005646-21

- Dynamic range: $100 \mu\text{A} \leq I_i \leq 1 \text{ mA}$ (5 decades), $|V_0| = 1\text{V/decade}$
- Transient response: $3 \mu\text{s}$ for $\Delta I_i = 1 \text{ decade}$
- C1, C2, R2, R3: added dynamic compensation
- V_{OS} adjust the LF156 to minimize quiescent error
- R_T : Tel Labs type Q81 + $0.3\%/^{\circ}\text{C}$

$$|V_{OUT}| = \left[1 + \frac{R_2}{R_T} \right] \frac{kT}{q} \ln V_i \left[\frac{R_T}{V_{REF} R_i} \right] = \log V_i \frac{1}{R_i I_i} \quad R_2 = 15.7\text{k}, R_T = 1\text{k}, 0.3\%/^{\circ}\text{C} \text{ (for temperature compensation)}$$

Precision Current Monitor

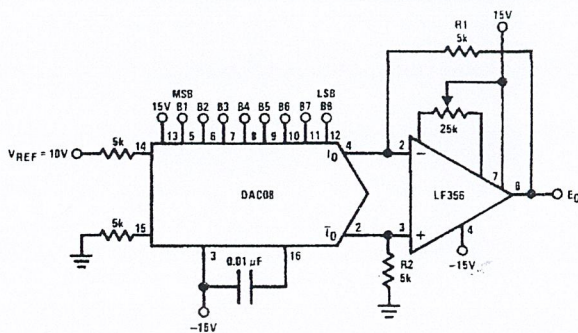


DS005646-31

- $V_0 = 5 R_1/R_2$ (V/mA of I_S)
- R1, R2, R3: 0.1% resistors
- Use LF155 for
 - Common-mode range to supply range
 - Low I_B
 - Low V_{OS}
 - Low Supply Current

Typical Applications (Continued)

8-Bit D/A Converter with Symmetrical Offset Binary Operation

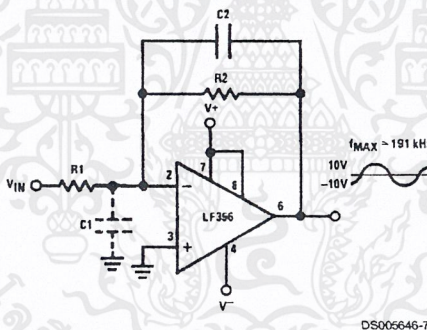


DS005646-32

- R1, R2 should be matched within $\pm 0.05\%$
- Full-scale response time: 3 μs

E_o	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	Comments
+9.920	1	1	1	1	1	1	1	1	Positive Full-Scale
+0.040	1	0	0	0	0	0	0	0	(+) Zero-Scale
-0.040	0	1	1	1	1	1	1	1	(-) Zero-Scale
-9.920	0	0	0	0	0	0	0	0	Negative Full-Scale

Wide BW Low Noise, Low Drift Amplifier



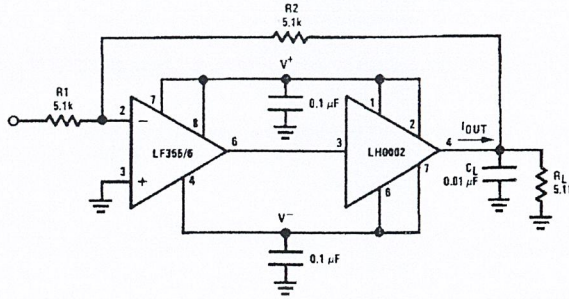
DS005646-70

- Power BW: $f_{MAX} = \frac{S_r}{2\pi V_p} \approx 191 \text{ kHz}$
- Parasitic input capacitance $C_1 \approx (3 \text{ pF for LF155, LF156 and LF357 plus any additional layout capacitance})$ interacts with feedback elements and creates undesirable high frequency pole. To compensate add C_2 such that: $R_2 C_2 \approx R_1 C_1$.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Typical Applications (Continued)

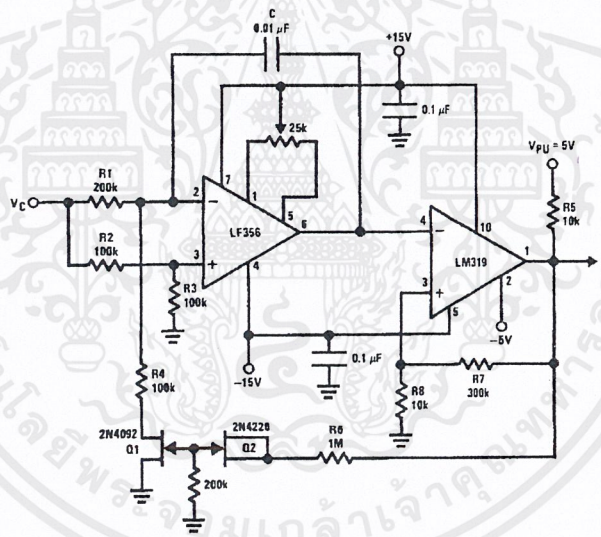
Boosting the LF156 with a Current Amplifier



DS005646-73

- $I_{OUT(MAX)} = 150 \text{ mA}$ (will drive $R_L \geq 100\Omega$)
- $\frac{\Delta V_{OUT}}{\Delta T} = \frac{0.15}{10^{-2}} \text{ V}/\mu\text{s}$ (with C_L shown)
- No additional phase shift added by the current amplifier

3 Decades VCO



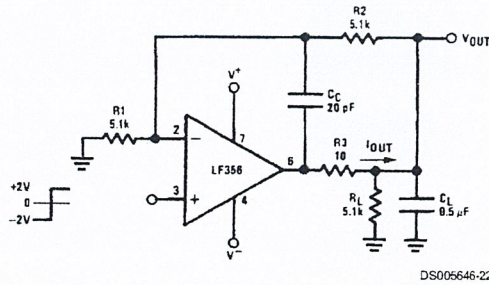
DS005646-24

$$f = \frac{V_C (R8 + R7)}{(8 V_{PU} R8 R1) C'} \quad 0 \leq V_C \leq 30\text{V}, \quad 10 \text{ Hz} \leq f \leq 10 \text{ kHz}$$

R1, R4 matched. Linearity 0.1% over 2 decades.

Typical Applications (Continued)

Isolating Large Capacitive Loads

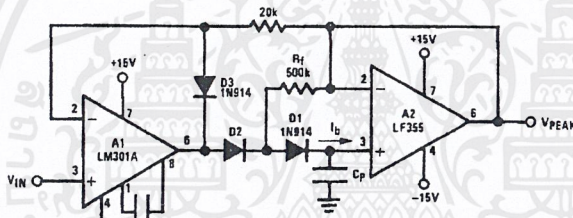


DS005646-22

- Overshoot 6%
- t_s 10 μs
- When driving large C_L , the V_{OUT} slew rate determined by C_L and $I_{OUT(MAX)}$:

$$\frac{\Delta V_{OUT}}{\Delta T} = \frac{I_{OUT}}{C_L} \cong \frac{0.02}{0.5} V/\mu s = 0.04 V/\mu s \text{ (with } C_L \text{ shown)}$$

Low Drift Peak Detector



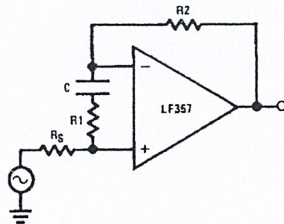
DS005646-23

- By adding $D1$ and R_f , $V_{D1}=0$ during hold mode. Leakage of $D2$ provided by feedback path through R_f .
- Leakage of circuit is essentially I_b (LF155, LF156) plus capacitor leakage of C_p .
- Diode $D3$ clamps V_{OUT} (A1) to $V_{IN}-V_{D3}$ to improve speed and to limit reverse bias of $D2$.
- Maximum input frequency should be $\ll \frac{1}{2\pi R_f C_{D2}}$ where C_{D2} is the shunt capacitance of $D2$.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Typical Applications (Continued)

Non-Inverting Unity Gain Operation for LF157



DS005646-75

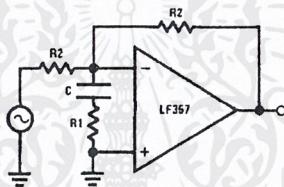
$$R_1 C \geq \frac{1}{(2\pi)(5 \text{ MHz})}$$

$$R_1 = \frac{R_2 + R_S}{4}$$

$$A_{V(DC)} = 1$$

$$f_{-3 \text{ dB}} \approx 5 \text{ MHz}$$

Inverting Unity Gain for LF157



DS005646-25

$$R_1 C \geq \frac{1}{(2\pi)(5 \text{ MHz})}$$

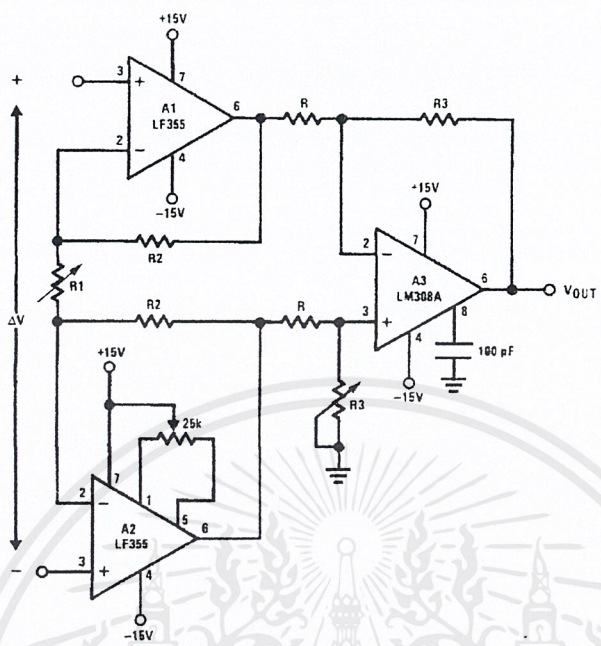
$$R_1 = \frac{R_2}{4}$$

$$A_{V(DC)} = -1$$

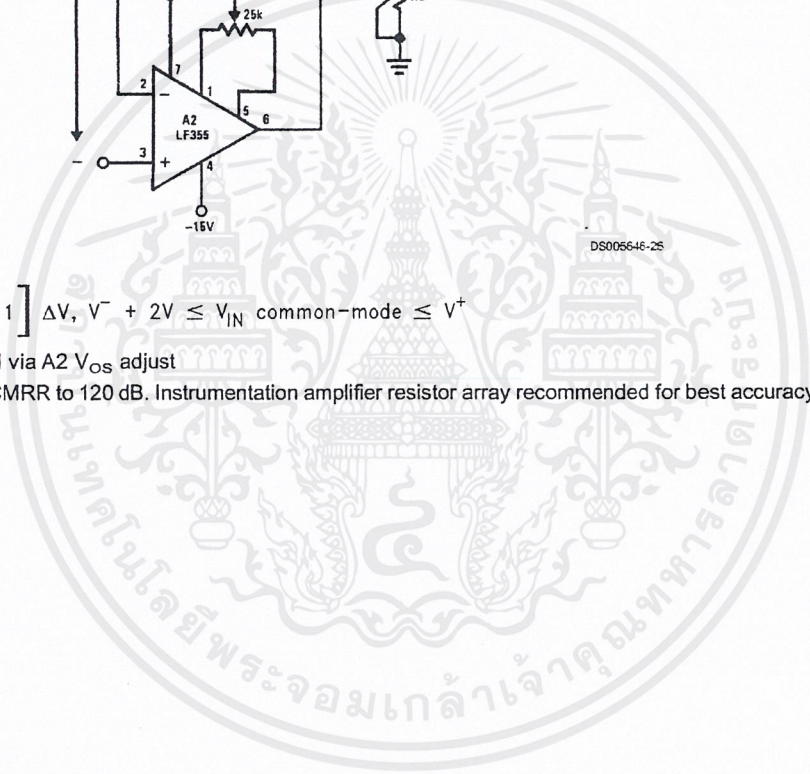
$$f_{-3 \text{ dB}} \approx 5 \text{ MHz}$$

Typical Applications (Continued)

High Impedance, Low Drift Instrumentation Amplifier

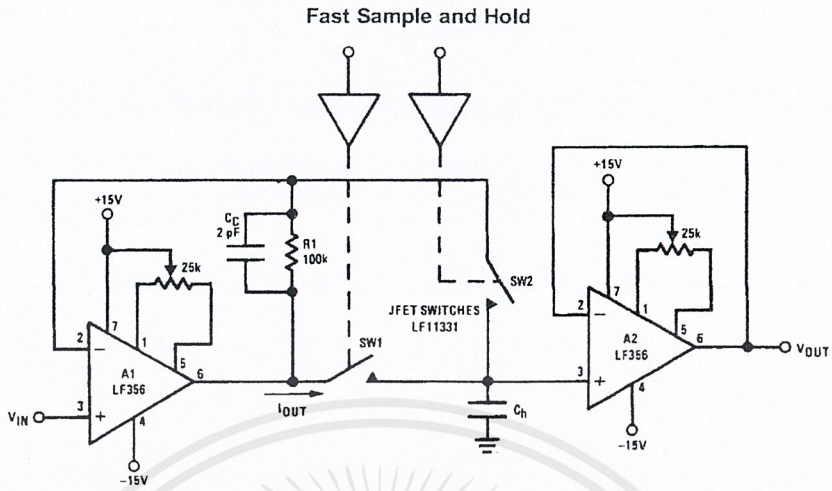


- $V_{OUT} = \frac{R3}{R} \left[\frac{2R2}{R1} + 1 \right] \Delta V, V^- + 2V \leq V_{IN \text{ common-mode}} \leq V^+$
- System V_{OS} adjusted via A2 V_{OS} adjust
- Trim R3 to boost up CMRR to 120 dB. Instrumentation amplifier resistor array recommended for best accuracy and lowest drift



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Typical Applications (Continued)



DS006646-33

- Both amplifiers (A1, A2) have feedback loops individually closed with stable responses (overshoot negligible)
- Acquisition time T_A , estimated by:

$$T_A \cong \left[\frac{2R_{ON} \cdot V_{IN} \cdot C_h}{S_r} \right]^{1/2} \text{ provided that:}$$

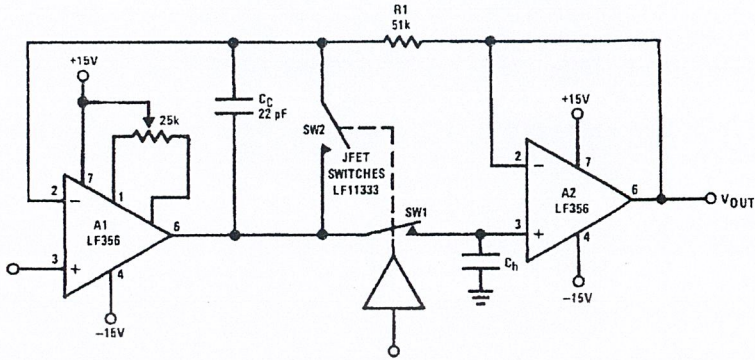
$$V_{IN} < 2\pi S_r R_{ON} C_h \text{ and } T_A > \frac{V_{IN} C_h}{I_{OUT(MAX)}}, \text{ } R_{ON} \text{ is of SW1}$$

$$\text{If inequality not satisfied: } T_A \cong \frac{V_{IN} C_h}{20 \text{ mA}}$$

- LF156 develops full S_r output capability for $V_{IN} \geq 1V$
- Addition of SW2 improves accuracy by putting the voltage drop across SW1 inside the feedback loop
- Overall accuracy of system determined by the accuracy of both amplifiers, A1 and A2

Typical Applications (Continued)

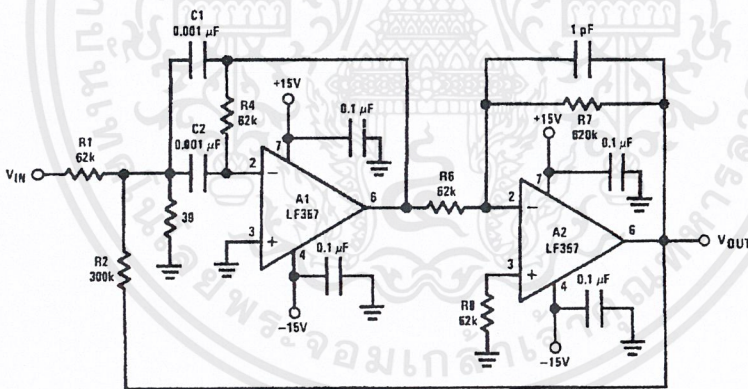
High Accuracy Sample and Hold



DS006646-27

- By closing the loop through A2, the V_{OUT} accuracy will be determined uniquely by A1. No V_{OS} adjust required for A2.
- T_A can be estimated by same considerations as previously but, because of the added propagation delay in the feedback loop (A2) the overshoot is not negligible.
- Overall system slower than fast sample and hold
- R_1, C_C : additional compensation
- Use LF156 for
 - Fast settling time
 - Low V_{OS}

High Q Band Pass Filter



DS005646-28

- By adding positive feedback (R2)
- Q increases to 40
- $f_{BP} = 100$ kHz

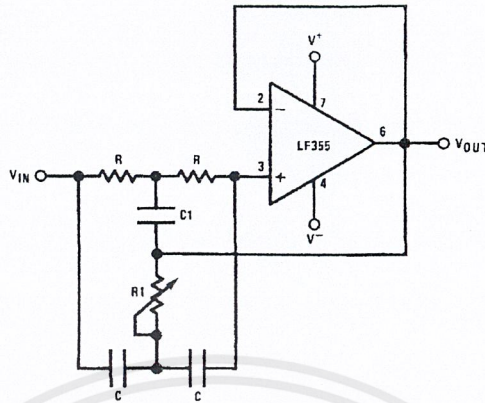
$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = 10\sqrt{Q}$$

- Clean layout recommended
- Response to a 1 Vp-p tone burst: 300 μ s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Typical Applications (Continued)

High Q Notch Filter

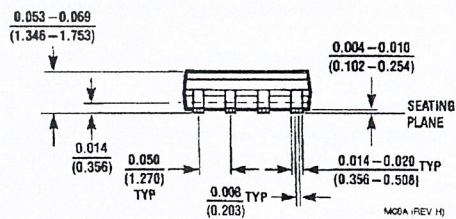
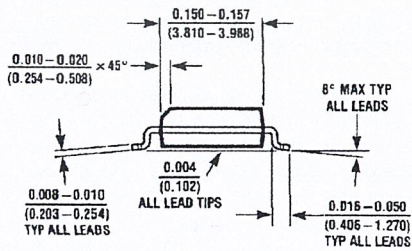
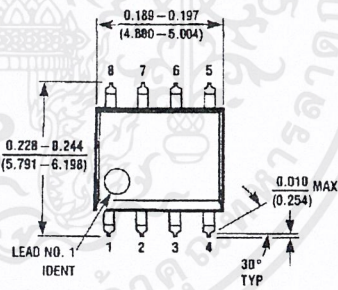
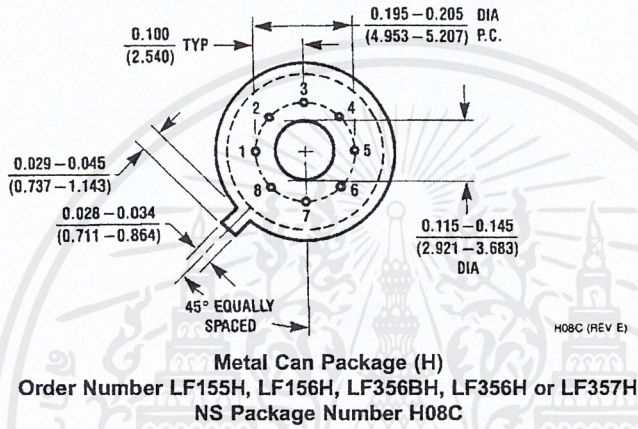
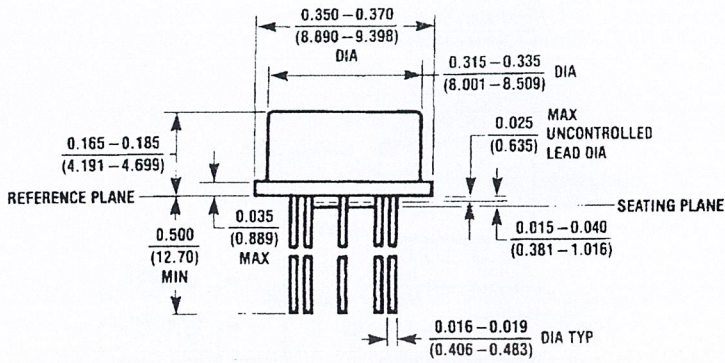


DS006646-34

- $2R1 = R = 10\text{ M}\Omega$
- $2C = C1 = 300\text{ pF}$
- Capacitors should be matched to obtain high Q
- $f_{\text{NOTCH}} = 120\text{ Hz}$, notch = -55 dB, $Q > 100$
- Use LF155 for
 - Low I_B
 - Low supply current



Physical Dimensions inches (millimeters) unless otherwise noted

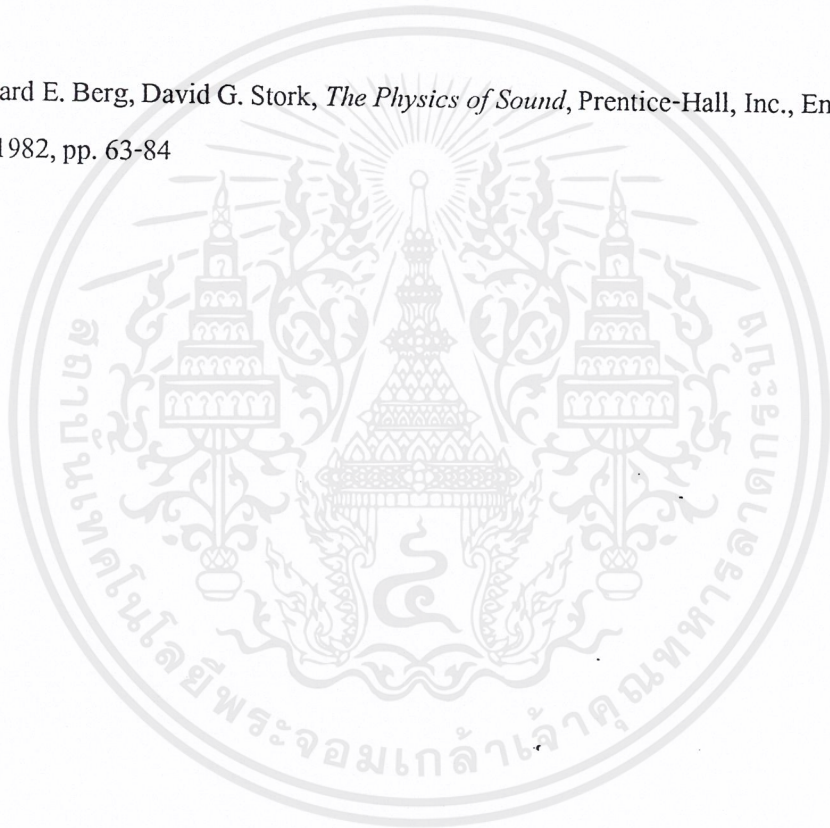


Small Outline Package (M)
Order Number LF356M or LF356MX
NS Package Number M08A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

1. Gordon McComb, *Building Speaker Systems*, Master Publishing, Inc., Richardson, Texas, USA.; 1988
2. Peter J. Nolan, *Fundamental of collage Physics*, Wm. C. Brown Publishing, 2nd Ed.; 1995, pp. 336-363
3. Richard E. Berg, David G. Stork, *The Physics of Sound*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ; 1982, pp. 63-84



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้