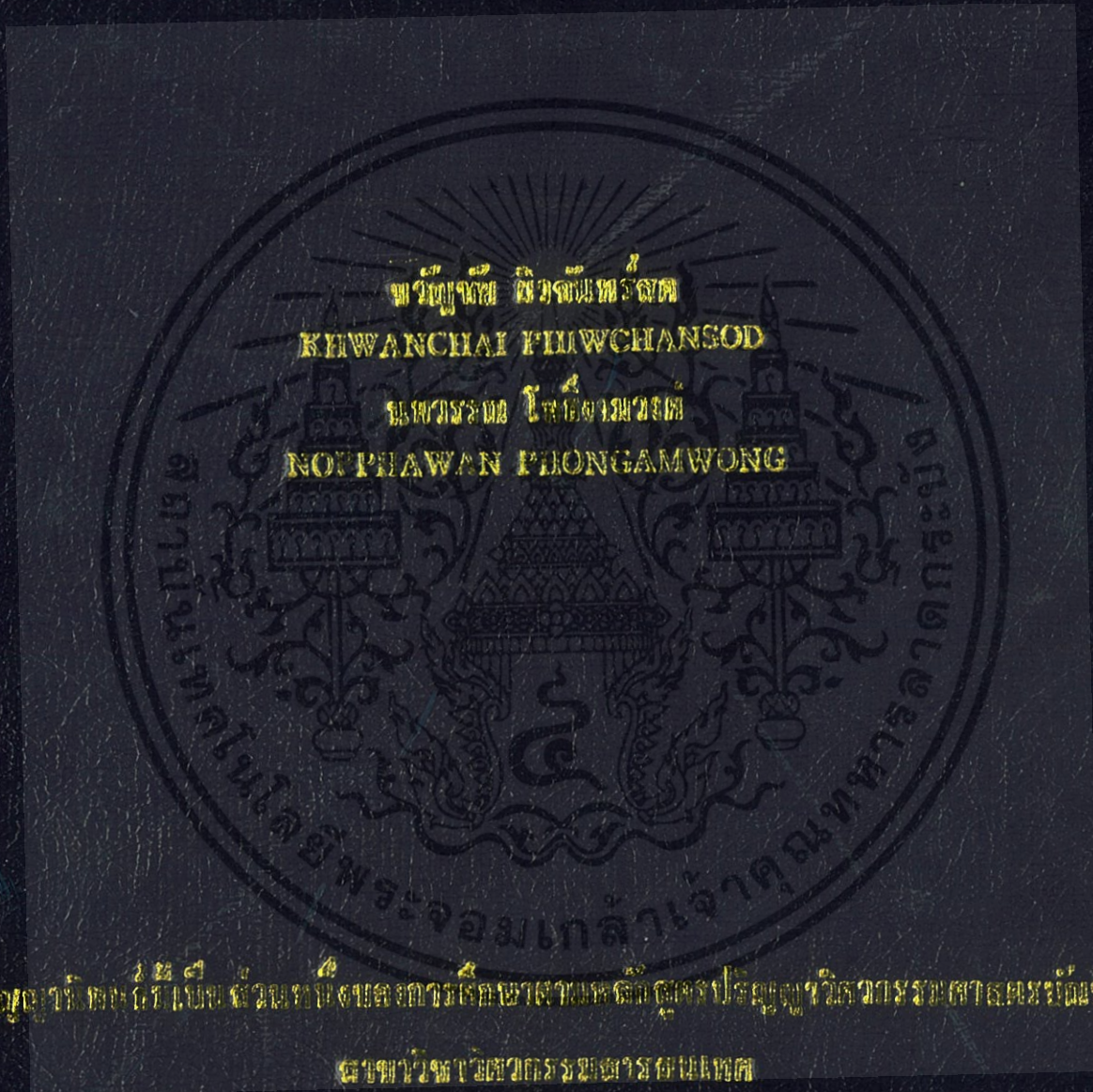


การสังเคราะห์เสียงสังเคราะห์ที่มีคุณภาพโปรแกรม MAX/MSP
ANALOG SOUND SYNTHESIZER ON MAX/MSP



วิทยานิพนธ์นี้จัดทำขึ้นเพื่อเป็นวิทยานิพนธ์ของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

โดย นายวิชาญ วิชาญธรรมสาร ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ศาสตราจารย์ ดร. วิชาญธรรมสาร ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา 2555

การสังเคราะห์เสียงระนาดเสมือนบนโปรแกรม MAX/MSP
RANAD SOUND SYNTHESIZER ON MAX/MSP



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2555

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RANAD SOUND SYNTHESIZER ON MAX/MSP



THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN INFORMATION ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2012

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญาบัตร
รายชื่อนักศึกษา

การสังเคราะห์เสียงระนาดเสมือนบนโปรแกรม MAX/MSP
นายขวัญชัย ฝิวจันทร์สด รหัสนักศึกษา 52010100
นางสาวนพวรรณ โพธิ์งามวงศ์ รหัสนักศึกษา 52010562

ปริญญา
สาขาวิชา
พ.ศ.

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
วิศวกรรมสารสนเทศ
2555

อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาบัตร ผศ.ดลชัย สุขเจริญผล

ปริญญาบัตรฉบับนี้ ได้รับการอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง


(ผศ.ดลชัย สุขเจริญผล)

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาบัตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์
รายชื่อนักศึกษา

การสังเคราะห์เสียงระนาดเสมือนบนโปรแกรม MAX/MSP
นายขวัญชัย ฝิวจันทร์สด รหัสนักศึกษา 52010100
นางสาวนพวรรณ โพธิ์งามวงศ์ รหัสนักศึกษา 52010562

ปริญญา
สาขาวิชา

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
วิศวกรรมสารสนเทศ

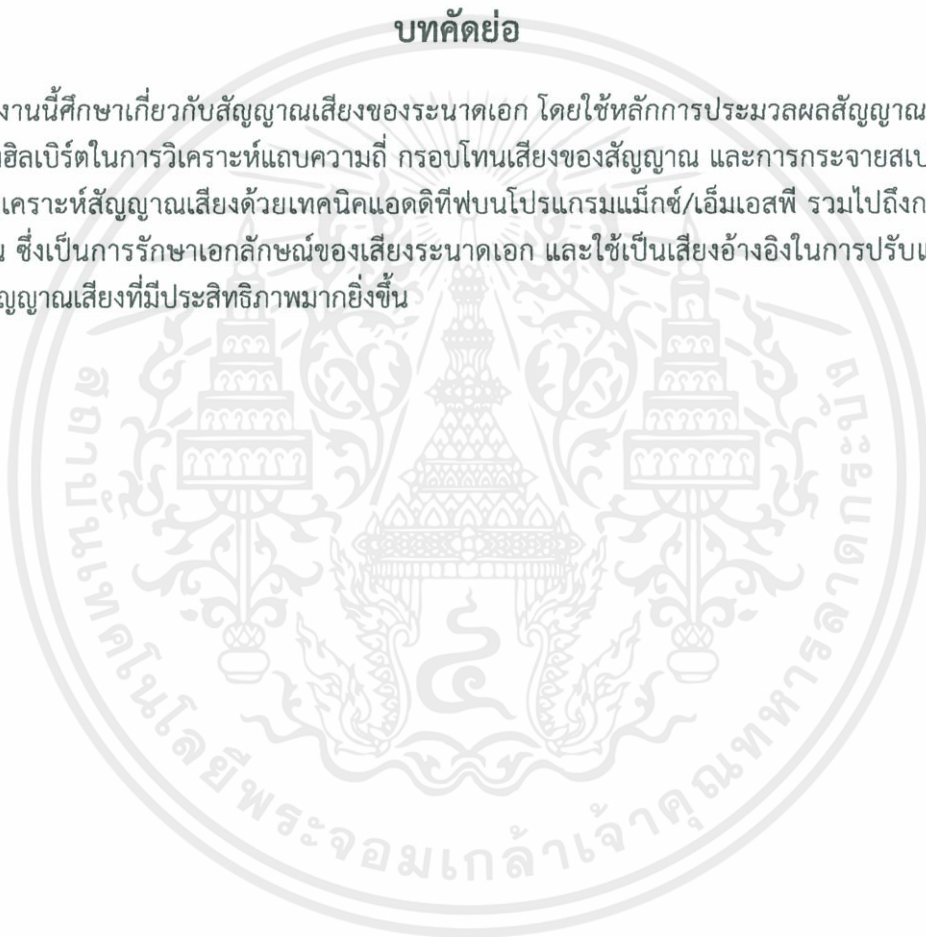
พ.ศ.

2555

อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ ผศ.ดลชัย สุขเจริญผล

บทคัดย่อ

โครงการนี้ศึกษาเกี่ยวกับสัญญาณเสียงของระนาดเอก โดยใช้หลักการประมวลผลสัญญาณแบบดิจิทัล และการแปลงฮิลเบิร์ตในการวิเคราะห์แถบความถี่ กรอบทอนเสียงของสัญญาณ และการกระจายสเปกตรัม 3 มิติ เพื่อทำการสังเคราะห์สัญญาณเสียงด้วยเทคนิคแอดดิทีฟบนโปรแกรมแม็กซ์/เอ็มเอสพี รวมไปถึงการสร้างส่วนติดต่อผู้ใช้งาน ซึ่งเป็นการรักษาเอกลักษณ์ของเสียงระนาดเอก และใช้เป็นเสียงอ้างอิงในการปรับแต่งเสียงโน้ตระนาดให้ได้สัญญาณเสียงที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	RANAD SOUND SYNTHESIZER ON MAX/MSP		
Student	Mr. KHWANCHAI	PHIWCHANSOD	Student ID. 52010100
	Miss NOPPHAWAN	PHONGAMWONG	Student ID. 52010562
Degree	Bachelor of Engineering		
Program	Information Engineering		
Year	2012		
Thesis Advisor	Asst.Prof. DOLCHAI SOOKCHAROENPHOL		

ABSTRACT

This project is studied about sound signals of Ranad-Eak by using the principles of digital signal processing, and Hilbert transform for analyses of frequency, envelope, and three- dimension spectrum to synthesize sound signals with additive technique on Max/MSP, and to create user interface. The advantages of this project are conservation of the unique sounds of Ranad-Eak, and using these analyzed sounds to customize Ranad-Eak sound notes for its better efficiencies.



กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ด้วยความเมตตากรุณาและความอนุเคราะห์เป็นอย่างดีจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ดลชัย สุขเจริญผล ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ ที่คอยให้คำปรึกษาและได้ให้การสนับสนุนในด้านต่างๆเป็นอย่างดี คณะผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่งและกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้ด้วย

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์บุญยชนะ ภูระหงษ์ ที่ให้คำแนะนำและให้ความอนุเคราะห์ในการให้ยืมใช้อุปกรณ์การทำโครงการ คือ ระเบิดอก และเครื่องบันทึกเสียง ตลอดระยะเวลาการทำโครงการ คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ชุมนุมดนตรีไทย คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการบันทึกเสียง ระเบิดอกเพื่อใช้ในการทำโครงการ ตลอดจนให้คำแนะนำช่วยเหลือทุกๆด้าน คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ญาติพี่น้อง ที่อบรม สั่งสอน ให้อำลัใจ ตลอดจนให้การสนับสนุนในทุกๆด้านเป็นอย่างดี คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ ภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ ที่ให้คำแนะนำและกำลังใจในยามท้อแท้ ให้มีแรงที่จะทำโครงการต่อไป ตลอดจนให้คำแนะนำและการช่วยเหลือทุกๆด้านด้วยดีมาตลอด

ขอขอบคุณ ทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวถึงและมีส่วนร่วมที่ทำให้โครงการฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี
สุดท้ายนี้ คุณค่าและประโยชน์อันพึงได้จากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ คณะผู้จัดทำขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ขวัญชัย ผิวจันทร์สด
นพวรรณ โพธิ์งามวงศ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 จุดประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 อุปกรณ์ที่ต้องใช้	2
1.6 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้.....	4
2.1 องค์ประกอบของเสียงดนตรี.....	4
2.1.1 ระดับเสียง (Pitch).....	4
2.1.2 ความเข้มเสียง (Volume or Intensity).....	5
2.1.3 สีสันเสียง (Timbre or Tone Color).....	6
2.1.4 คุณภาพของเสียง (Tone Quality).....	7
2.1.5 ความยาวเสียง (Duration).....	7
2.1.6 ทฤษฎีดนตรี.....	7
2.1.7 กรอบของโทนเสียง (Sound Envelope).....	9
2.2 การแปลงฟูเรียร์ (Fourier Transform).....	4
2.2.1 การหาสูตรอนุกรมฟูเรียร์ของฟังก์ชันไม่มีคาบ	10
2.2.2 การหาสูตรการแปลงฟูเรียร์.....	13
2.2.3 การเลื่อนเชิงเวลา (Time Shifting).....	14
2.2.4 การเลื่อนสเกลเชิงเวลา (Time Scaling).....	15
2.2.5 การเลื่อนความถี่ (Frequency Shifting).....	16
2.2.6 การเลื่อนระดับเสียง (Pitch Shifting).....	17
2.3 การแปลงฮิลเบิร์ต (Hilbert Transform)	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.1 การมอดูเลตสัญญาณแบบสมดุล (Balanced Modulation).....	17
2.3.2 การแปลงฮิลเบิร์ต (Hilbert Transform).....	19
2.4 การสังเคราะห์เสียงด้วยการมอดูเลชันเชิงความถี่ (Frequency Modulation).....	22
2.4.1 การสร้างสัญญาณ FM อย่างง่าย (Simple FM Generation).....	23
2.4.2 การคำนวณองค์ประกอบของความถี่ฮาร์โมนิกส์ (Frequency of the Partial).....	23
2.4.3 การคำนวณแอมพลิจูดของความถี่ฮาร์โมนิกส์ (Amplitude of the Partial).....	24
2.4.4 สเปกตรัมของการสังเคราะห์เมื่อเวลาเปลี่ยนแปลง (Synthesizing Time-Varying Spectra).....	24
2.4.5 อัตราส่วนความถี่การออกแบบเสียง (Frequency Ratio and Sound Design).....	25
2.5 การสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคแอดดิทีฟ (Additive Synthesis).....	26
2.5.1 การสร้างวงจรสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคแอดดิทีฟ.....	26
2.5.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของเสียงดนตรีด้วยเทคนิคแอดดิทีฟ.....	27
2.4.5 อัตราส่วนความถี่การออกแบบเสียง (Frequency Ratio and Sound Design).....	25
บทที่ 3 การออกแบบการทดลอง.....	28
3.1 การเก็บบันทึกเสียงโน้ตของระนาด (Record).....	28
3.2 การวิเคราะห์เสียงด้วยโปรแกรม Adobe Audition CS6.....	29
3.3 การวิเคราะห์เสียงด้วยโปรแกรม MATLAB.....	30
3.3.1 วิเคราะห์หาองค์ประกอบของเสียง.....	31
3.3.2 การเลื่อนความถี่และการแปลงฮิลเบิร์ต.....	33
3.3.3 การวิเคราะห์หากรอบของโทนเสียงด้วยกราฟการกระจายสเปกตรัม 3 มิติ.....	35
3.3.4 การวิเคราะห์เสียงโน้ตที่ได้จากการเลื่อนความถี่เทียบกับเสียงโน้ตต้นฉบับ.....	38
3.4 การสังเคราะห์เสียงด้วยโปรแกรม MAX/MSP.....	39
3.4.1 การใช้งานแม็ก/เอ็มเอสพีเบื้องต้น (Basic Usage of MAX/MSP).....	39
3.4.2 การออกแบบบล็อกสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคแอดดิทีฟบนโปรแกรม MAX/MSP.....	43
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง.....	47
4.1 การใช้งานวงจรสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคแอดดิทีฟบน MAX/MSP.....	47
4.2 ผลการใช้งานวงจรสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคแอดดิทีฟบน MAX/MSP.....	51
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	59
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	59
5.2 ปัญหาและอุปสรรค.....	61
5.3 แนวทางการพัฒนาต่อ.....	61
บรรณานุกรม.....	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงค่าความถี่มูลฐานของแต่ละโน้ต.....	7
3.1 แสดงค่าความถี่ของเสียงโน้ตระนาดเอก 22 เสียงที่ได้จากเสียงต้นฉบับ	31
3.2 แสดงค่าความถี่ของเสียงโน้ตระนาดเอก 21 เสียงที่ได้จากการเลื่อนความถี่	34
3.3 แสดงเครื่องมือภายในโปรแกรมแม็กซ์/เอ็มเอสพี (MAX/MSP) ที่ใช้ในการออกแบบ.....	42
3.4 แสดงคำสั่งต่างๆที่กำหนดให้กับเครื่องมือ Object Box	43
4.1 ตารางค่าความถี่ของเสียงโน้ตระนาดที่ได้จากการเลื่อนความถี่จากเสียงโน้ตอ้างอิง	48
5.1 ตารางแสดงค่าความถี่และอัตราส่วนฮาร์โมนิกส์แต่ละตัวของแต่ละโน้ต	60



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 บล็อกไดอะแกรมการสังเคราะห์เสียงขนาดเสมือน	2
2.1a แสดงการสั่นสะเทือนของแอมพลิจูดรูปคลื่นไซน์ความถี่ต่ำในโดเมนเวลา	4
2.1b แสดงการสั่นสะเทือนของแอมพลิจูดรูปคลื่นไซน์ความถี่ต่ำในโดเมนความถี่	4
2.1c แสดงการสั่นสะเทือนของแอมพลิจูดรูปคลื่นไซน์ความถี่สูงโดเมนเวลา	5
2.1d แสดงการสั่นสะเทือนของแอมพลิจูดรูปคลื่นไซน์ความถี่สูงโดเมนความถี่	5
2.2a แสดงการสั่นสะเทือนสูงของแอมพลิจูดรูปคลื่นไซน์ในโดเมนเวลา (เสียงดัง)	5
2.2b แสดงการสั่นสะเทือนสูงของแอมพลิจูดรูปคลื่นไซน์ในโดเมนความถี่	5
2.2c แสดงการสั่นสะเทือนต่ำของแอมพลิจูดรูปคลื่นไซน์ในโดเมนเวลา (เสียงเบา)	5
2.2d แสดงการสั่นสะเทือนต่ำของแอมพลิจูดรูปคลื่นไซน์ในโดเมนความถี่	5
2.3 สัญญาณเสียงที่เกิดจากแหล่งกำเนิดเสียงที่มีสีสั่นเสียงต่างกัน	6
2.4 โน้ตตัวลาบริสุทธ์ (ออกเตปที่4)	8
2.5 โน้ตตัวลาของเปียโน และกีตาร์ (ออกเตปที่4)	8
2.6 กรอบของโทนเสียงรูปร่างแบบเอดีเอสอาร์ (ADSR shape)	9
2.7 ฟังก์ชันมีคาบ $T=2p$	10
2.8 ฟังก์ชันมีคาบเมื่อ $p \rightarrow \infty$	10
2.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง $a, \Delta\omega$ เมื่อคาบฟังก์ชันขยายใหญ่ขึ้น	11
2.10 แสดงคุณสมบัติการเลื่อนเวลา	14
2.11a ปรับสเกลด้วยค่า $a < 1$ กราฟจะยืดขยายออก เนื่องจากใช้เวลานานมากขึ้น	5
2.11b กราฟแสดงสเปคตรัมที่ยังไม่เกิดการปรับสเกล	15
2.11c ปรับสเกลด้วยค่า $a > 1$ กราฟจะหดสั้นลง เนื่องจากใช้เวลาดนน้อยลง	15
2.12 แสดงคุณสมบัติการเลื่อนความถี่	16
2.13 วงจรมอดูเลตสัญญาณแบบสมดุล	18
2.14 การมอดูเลตสัญญาณแบบดุลในโดเมนความถี่ (Frequency Domain)	18
2.15a บล็อกไดอะแกรมของการแปลงฮิลเบิร์ต	20
2.15b คุณสมบัติของการแปลงฮิลเบิร์ตของคลื่นโคไซน์ (Cosine Wave) ในโดเมนเวลา	20
2.15c คุณสมบัติของการแปลงฮิลเบิร์ตของคลื่นไซน์ (Sine Wave) ในโดเมนเวลา	20
2.15d คุณสมบัติของการแปลงฮิลเบิร์ตของคลื่นโคไซน์ และคลื่นไซน์ในโดเมนความถี่	20
2.16 สัญญาณแบบแถบข้างเดี่ยว (Single-Side Band) ในโดเมนเวลา และโดเมนความถี่	21
2.17 บล็อกไดอะแกรมวงจรสร้างสัญญาณ FM อย่างง่าย	23
2.18 ลักษณะการกระจายสเปคตรัมของสัญญาณ FM เมื่อใช้สัญญาณเสียงเพียง 1 สัญญาณ	23

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.19 สเปกตรัมของการสังเคราะห์เมื่อเวลาเปลี่ยนแปลง	25
2.20 แสดงวงจรสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคแอดดิทีฟ.....	26
3.1 การออกแบบขั้นตอนการทดลอง.....	28
3.2 ขั้นตอนการเก็บบันทึกเสียงโน้ตของระนาด	29
3.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์เสียงโน้ตของระนาดที่เก็บบันทึก	29
3.4 แสดงรูปคลื่นของสัญญาณเสียง (Waveform)	30
3.5 แสดงสเปกโตรแกรมของสัญญาณเสียง	30
3.6 ขั้นตอนการวิเคราะห์หาเสียงโน้ต 21 เสียงจากเสียงโน้ตอ้างอิง.....	30
3.7 แสดงรูปคลื่นของสัญญาณเสียงต้นฉบับ (Waveform) ที่ใช้โปรแกรม MATLAB	32
3.8 แสดงกรอบของโทนเสียงต้นฉบับ (Envelope)	32
3.9 แสดงกราฟสเปกตรัม (Spectrum) ของสัญญาณเสียงที่ใช้โปรแกรม MATLAB	32
3.10 แสดงสเปกตรัมของความถี่ที่ยังไม่ผ่านการแปลงฮิลเบิร์ต และถูกเลื่อนไปด้วย $f_c = 3412.7$ Hz.....	33
3.11 แสดงสเปกตรัมของความถี่ที่ผ่าน Hilbert Transform และถูกเลื่อนความถี่ไปด้วย $f_c = 3412.7$ Hz	33
3.12 แสดงตัวอย่างกราฟการกระจายสเปกตรัม 3 มิติ	35
3.13 แสดงกราฟการกระจายสเปกตรัม 3 มิติของโน้ตตัวที่ 11 (โด)	35
3.14 ขั้นตอนการวิเคราะห์เสียงโน้ตที่ได้จากการเลื่อนความถี่กับเสียงต้นฉบับ.....	36
3.15a สเปกตรัมต้นฉบับของเสียงโน้ตลูกที่ 10 (เสียงที) จากโปรแกรม MATLAB.....	36
3.15b สเปกตรัมต้นฉบับของเสียงโน้ตลูกที่ 10 (เสียงที) จากโปรแกรม Adobe Audition CS6.....	37
3.16a สเปกตรัมเสียงโน้ตลูกที่ 10 โดยใช้ความถี่สำหรับการเลื่อน $f_c = -40.3$ Hz ด้วยโปรแกรมMATLAB.....	37
3.16b สเปกตรัมเสียงโน้ตลูกที่ 10 โดยใช้ความถี่สำหรับการเลื่อน $f_c = -40.3$ Hz ด้วยโปรแกรมAU	37
3.17 สเปกตรัมของเสียงโน้ตอ้างอิง ความถี่ 473.7 Hz.....	38
3.18 สเปกตรัมของเสียงโน้ตที่ถูกเลื่อนไปที่ความถี่ต่ำ 175 Hz.....	38
3.19 สเปกตรัมของเสียงโน้ตที่ถูกเลื่อนไปที่ความถี่สูง 1352 Hz.....	38
3.20 หน้าต่างสำหรับต่อบล็อกวงจร	39
3.21 แถบเครื่องมือบนหน้าต่างสำหรับต่อบล็อกวงจร	39
3.22 หน้าต่างเครื่องมือที่นำมาต่อวงจร	40
3.23 หน้าต่างปรับแต่งเครื่องมือ.....	40
3.24 แสดงรูปแบบของเส้นเชื่อมต่อ (Patch Cords).....	41
3.25 แสดงบล็อกไดอะแกรมการทำงานการสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคแอดดิทีฟ.....	44
3.26 แสดงหน้าบล็อกการเชื่อมต่อหลักภายในโปรแกรม MAX/MSP	45

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.27 แสดงหน้าบล็อกรูปการเชื่อมต่อย่อยของวงจร.....	45
3.28 แสดงวงจรภายในของการสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคแอดดีทีฟ.....	46
4.1 หน้าต่างการเชื่อมต่อวงจรสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคแอดดีทีฟ.....	47
4.2 ลักษณะกรอบของโทนเสียงของเสียงโน้ตลูกที่ 11 เสียงโด (C4).....	49
4.3 หน้าต่างการเชื่อมต่อย่อยที่กำหนดค่าความถี่และกรอบของโทนเสียงของโน้ตลูกที่ 11 เสียงโด (C4).....	49
4.4 แสดงปุ่มบนคีย์บอร์ดที่แทนเสียงแต่ละโน้ตสำหรับผู้ใช้.....	50
4.5 แสดงขั้นตอนการจัดเก็บเสียงบนหน้าบล็อกเชื่อมต่อวงจร.....	50
4.6a สเปกตรัมเสียงโน้ตลูกที่ 11 เสียงโด (C4) ที่ได้จากการเลื่อนความถี่.....	51
4.6b สเปกโตรแกรมเสียงโน้ตลูกที่ 11 เสียงโด (C4) ที่ได้จากการเลื่อนความถี่.....	51
4.6c สเปกตรัมเสียงโน้ตลูกที่ 11 เสียงโด (C4) ที่ได้จากการสังเคราะห์เสียงด้วยโปรแกรม MAX/MSP	52
4.6d สเปกโตรแกรมเสียงโน้ตลูกที่ 11 เสียงโด (C4) ที่ได้จากการสังเคราะห์เสียงด้วยโปรแกรม MAX/MSP	52
4.7a สเปกตรัมเสียงโน้ตลูกที่ 1 เสียงซอล (G2) ที่ได้จากการเลื่อนความถี่.....	53
4.7b สเปกโตรแกรมเสียงโน้ตลูกที่ 1 เสียงซอล (G2) ที่ได้จากการเลื่อนความถี่.....	53
4.7c สเปกตรัมเสียงโน้ตลูกที่ 1 เสียงซอล (G2) ที่ได้จากการสังเคราะห์เสียงด้วยโปรแกรม MAX/MSP	54
4.7d สเปกโตรแกรมเสียงโน้ตลูกที่ 1 เสียงซอล (G2) ที่ได้จากการสังเคราะห์เสียงด้วยโปรแกรม MAX/MSP ...	54
4.8a สเปกตรัมเสียงโน้ตลูกที่ 22 เสียงซอล (G5) ที่ได้จากการเลื่อนความถี่.....	55
4.8b สเปกโตรแกรมเสียงโน้ตลูกที่ 22 เสียงซอล (G5) ที่ได้จากการเลื่อนความถี่.....	55
4.8c สเปกตรัมเสียงโน้ตลูกที่ 22 เสียงซอล (G5) ที่ได้จากการสังเคราะห์เสียงด้วยโปรแกรม MAX/MSP	56
4.8d สเปกโตรแกรมเสียงโน้ตลูกที่ 22 เสียงซอล (G5) ที่ได้จากการสังเคราะห์เสียงด้วยโปรแกรม MAX/MSP ..	56
4.9a สเปกโตรแกรมเสียงโน้ตต้นฉบับลูกที่ 10	57
4.9b สเปกโตรแกรมเสียงโน้ตลูกที่ 10 ที่ได้จากการเลื่อนความถี่.....	57
4.9c สเปกโตรแกรมเสียงโน้ตต้นฉบับลูกที่ 10 จากการสังเคราะห์บนโปรแกรม MAX/MSP.....	57
4.9d สเปกตรัมเสียงโน้ตต้นฉบับลูกที่ 10.....	58
4.9e สเปกตรัมเสียงโน้ตลูกที่ 10 ที่ได้จากการเลื่อนความถี่.....	58
4.9f สเปกตรัมเสียงโน้ตต้นฉบับลูกที่ 10 จากการสังเคราะห์บนโปรแกรม MAX/MSP.....	58
5.1 แสดงกรอบของโทนเสียง (Envelop) ของโน้ตลูกที่ 11 (เสียงโด).....	59

บทที่ 1

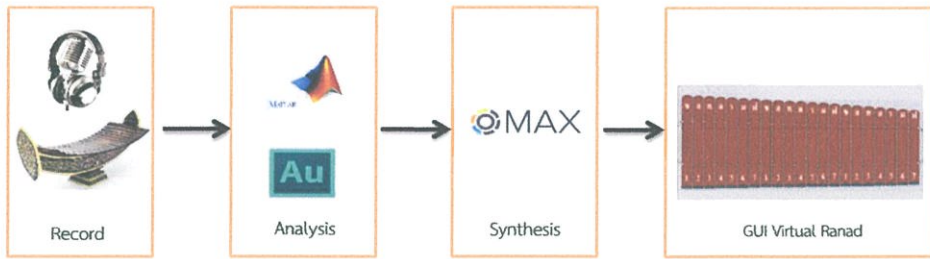
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ปัจจุบันมีการใช้เทคโนโลยีทางคอมพิวเตอร์ และเทคโนโลยีทางการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล ในการสังเคราะห์เสียงดนตรีกันอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะเครื่องดนตรีสากล เช่น การสังเคราะห์เสียงเปียโน (Piano synthesis) [1], การสังเคราะห์เสียงกีตาร์ (Virtual air guitar) [2] รวมทั้ง การสังเคราะห์เสียงเครื่องเป่าโดยใช้แบบจำลองเชิงฟิสิกส์ (Physical Modeling) [3] เป็นต้น แต่สำหรับการสังเคราะห์เสียงดนตรีไทยนั้นยังมีผู้ที่ให้ความสนใจน้อยมาก และยิ่งไปกว่านั้นการนำวิธีการสังเคราะห์เสียงดนตรีไทยเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ทั้งในการศึกษาต่อ และประกอบอาชีพที่ยังไม่เป็นที่แพร่หลายมากนัก ทำให้การพัฒนาดนตรีไทยนั้นยังดูเป็นเรื่องที่ยากและนับวันก็ยิ่งเป็นเอกลักษณ์ที่ค่อยๆหายไป

ทั้งที่ความเป็นจริงแล้วการสังเคราะห์เสียงดนตรีไทยนั้น ไม่ได้ยุ่งยากไปกว่าการสังเคราะห์เสียงของดนตรีสากลเลย จากคุณลักษณะทางกายภาพของเสียงที่สำคัญ จะประกอบด้วยองค์ประกอบความถี่มูลฐาน (Fundamental Frequency) หนึ่งความถี่ และองค์ประกอบความถี่ฮาร์โมนิกส์ (Harmonics) อีกจำนวนหนึ่ง ซึ่งเครื่องดนตรีไทยจำพวกเครื่องตีเช่น ฆ้องวงมีองค์ประกอบความถี่หลักและความถี่ฮาร์โมนิกส์จำนวนไม่มาก ทำให้ง่ายต่อการที่จะนำมาศึกษาและวิเคราะห์ อาทิเช่น ฆ้องวง ฆ้องวง เป็นต้น นอกจากนั้นแล้วการตั้งเสียงโน้ตของเครื่องดนตรีไทยในทางปฏิบัติก็ยังไม่มีการที่ชัดเจนเหมือนกับดนตรีสากล ดังนั้นจึงทำให้มีความคิดที่จะทำการสังเคราะห์เสียงโน้ตของระนาดจากเสียงโน้ตจริงที่ได้เก็บบันทึกมา โดยจะเลือกเสียงโน้ตเพียง 1 เสียงที่มีความไพเราะมากที่สุด(เสียงต้นแบบ) มาทำการวิเคราะห์และสังเคราะห์ให้ได้เสียงโน้ตอีก 21 เสียงที่มีเสียงใกล้เคียงกับเสียงต้นแบบจากการเก็บบันทึกเพื่อใช้เป็นเสียงอ้างอิงในการสังเคราะห์และวัดเทียบเสียง

การนำไปประยุกต์ใช้ เพื่อการพัฒนางานการดนตรีไทยด้วยการนำเสียงระนาดที่ได้มาทำการวิเคราะห์หาคุณลักษณะทางกายภาพของเสียง จากนั้นทำการสังเคราะห์เสียงด้วยสมการคณิตศาสตร์และโปรแกรมแม็กซ์/เอ็มเอสพี (MAX/MSP) แล้วจึงนำเสียงที่สังเคราะห์ได้มาใช้ในการสร้างเสียงระนาดเสมือน (Virtual Ranaad) ดังแสดงในรูปภาพที่ 1 โดยเสียงระนาดเสมือนที่สร้างขึ้นจะช่วยให้ผู้ใช้ไม่จำเป็นต้องมีเครื่องดนตรีจริงก็สามารถเล่นระนาด หรือสามารถทำการเรียนการสอนได้อย่างสะดวก, ประหยัด และช่วยรักษาเผยแพร่ดนตรีไทยซึ่งเป็นเอกลักษณ์สำคัญยิ่งอันหนึ่งของประเทศไทยให้ได้รับสนใจจากบุคคลทุกวัยในยุคสมัย พร้อมทั้งเป็นการพัฒนาดนตรีไทยให้สอดคล้องกับความเจริญก้าวหน้าทางด้านวิศวกรรมและเทคโนโลยีด้านดนตรี-สารสนเทศ



รูปที่ 1.1 บล็อกไดอะแกรมการสังเคราะห์เสียงขนาดเสมือน

1.2 จุดประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาคุณลักษณะของสัญญาณเสียงขนาดเสมือน
- 1.2.2 เพื่อวิเคราะห์สัญญาณเสียงของขนาดในโดเมนของความถี่
- 1.2.3 เพื่อศึกษาการแทนสัญญาณเสียงขนาดด้วยสมการคณิตศาสตร์
- 1.2.4 เพื่อศึกษาการสังเคราะห์เสียงขนาดด้วยโปรแกรม MAX/MSP และการประยุกต์ใช้งาน

1.3 ขอบเขตของโครงการ

- 1.3.1 รวบรวมเสียงขนาดเอกเพื่อวิเคราะห์สัญญาณเสียงแต่ละคีย์
- 1.3.2 ทำการสังเคราะห์เสียงขนาดในแต่ละโน้ตจากสมการทางคณิตศาสตร์
- 1.3.3 สร้าง Graphic User Interface (GUI)

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ทราบถึงโครงสร้างสัญญาณของโน้ตแต่ละตัวในขนาดแต่ละชนิด
- 1.4.2 สามารถสร้างสัญญาณของโน้ตแต่ละตัวของขนาดได้จากสมการทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการวิเคราะห์โน้ตแต่ละตัวจากขนาดของจริง

1.5 อุปกรณ์ที่ต้องใช้

1.5.1 ฮาร์ดแวร์

- | | |
|---|-----------------|
| - ขนาดเอกสำหรับศึกษาคุณลักษณะของเสียง | จำนวน 1 ราง |
| - เครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับวิเคราะห์และสังเคราะห์เสียง | จำนวน 1 เครื่อง |
| - เครื่องบันทึกเสียงสำหรับบันทึกเสียงเพื่อศึกษา | จำนวน 1 เครื่อง |

1.5.2 ซอฟต์แวร์

- MATLAB
- ADOBE AUDITION CS6
- MAX/MSP

1.6 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ระยะเวลาการดำเนินงาน													
	ม.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	2556				
1. ศึกษาแนวคิดและที่มาของปัญหา และขอบเขตโครงการ														
2. จัดเก็บเสียงตัวอย่างของขนาด														
3. วิเคราะห์หาลักษณะทางกายภาพของเสียง														
4. สังเคราะห์เสียงด้วยสมการทางคณิตศาสตร์														
5. สังเคราะห์เสียงด้วยโปรแกรม MAX/MSP														
6. สร้างส่วนการแสดงผลทาง GUI														
7. ทดลองและแก้ไขข้อบกพร่อง														
8. จัดทำเอกสาร														

บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้

2.1 องค์ประกอบของเสียงดนตรี

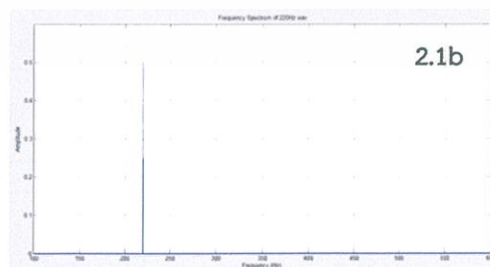
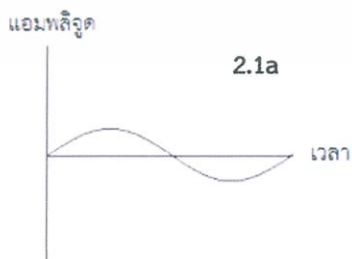
เสียงเกิดจากการสั่นสะเทือนของวัตถุ เมื่อวัตถุสั่นสะเทือนจะทำให้เกิดการอัดตัวและการขยายตัวของคลื่นเสียง ซึ่งถูกส่งไปยังหูคนโดยผ่านชั้นบรรยากาศ ดังนั้นเสียงที่ได้ยินก็เป็นผลจากการที่คลื่นเสียงถูกส่งจากวัตถุที่สั่นสะเทือนไปยังหูนั่นเอง เสียงที่ได้ยินจะเป็นเสียงสูง เสียงต่ำ เสียงดัง เสียงเบา หรือมีคุณภาพเสียงในลักษณะต่างๆ อย่างไรนั้น จะขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดเสียงและจำนวนรอบต่อวินาทีของการสั่นสะเทือนที่ทำให้เกิดเสียงนั้น เสียงแต่ละเสียงมีคุณสมบัติซึ่งสามารถแยกแยะได้ดังนี้

2.1.1 ระดับเสียง (Pitch)

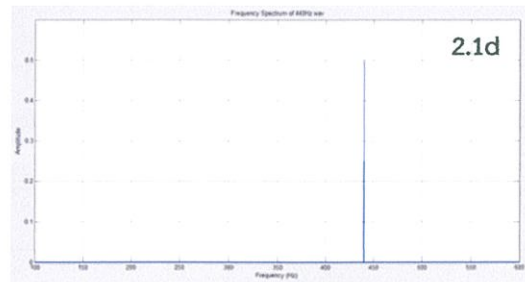
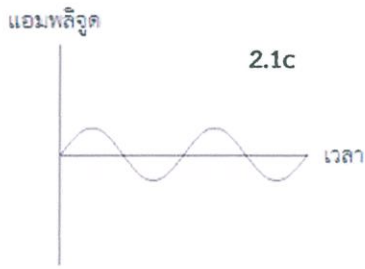
ระดับเสียง หมายถึง เสียงสูง เสียงต่ำ เราสามารถเปรียบเทียบเสียง 2 เสียงได้ว่า เสียงไหนมีระดับสูงกว่า และเสียงไหนมีระดับต่ำกว่าโดยการฟัง ถ้าระดับเสียงต่างกันมากก็จะฟังง่าย ถ้าต่างกันเพียงเล็กน้อยก็จะฟังยากกว่า

ระดับเสียง เกิดจากความถี่ของการสั่นสะเทือนของวัตถุหรืออาจกล่าวได้ว่า ความถี่ของการสั่นสะเทือนเป็นตัวกำหนดระดับเสียง วัตถุที่สั่นสะเทือนเร็วกว่าทำให้เกิดเสียงระดับสูงกว่า ในขณะที่วัตถุที่สั่นสะเทือนช้ากว่าทำให้เกิดระดับเสียงต่ำกว่า ความถี่ซึ่งเป็นตัวกำหนดระดับเสียงได้มาจากการวัดความถี่ของการสั่นสะเทือนของวัตถุ โดยมีหน่วยเป็นรอบต่อวินาที หรือเฮิรตซ์ (Hz) ของโน้ตแต่ละตัว วัตถุที่สั่นสะเทือนมากกว่าจะมีความถี่มากกว่า ทำให้เกิดเสียงสูงมากกว่า ถ้าความถี่มากขึ้นเท่าตัว ระดับเสียงจะสูงขึ้น 1 ช่วงคู่แปด (Octave) เช่น โน้ตที่มีความถี่ 220 รอบต่อวินาที จะมีระดับเสียงสูงกว่าโน้ตที่มีความถี่ 110 รอบต่อวินาทีอยู่ 1 ช่วงคู่แปด และในทำนองเดียวกันในกรณีที่ความถี่น้อยลง 1 เท่าตัว ระดับเสียงจะต่ำลง 1 ช่วงคู่แปด ฉะนั้นโน้ตที่มีความถี่ 440 รอบต่อวินาที จะมีระดับเสียงต่ำกว่าโน้ตที่มีความถี่ 880 รอบต่อวินาทีเป็นระยะ 1 ช่วงคู่แปด

โดยทั่วไปแล้ววัตถุที่สั่นสะเทือนยังมีขนาดเล็กก็จะทำให้เกิดการสั่นสะเทือนเร็วขึ้น สิ่งก็ตามมากก็คือเสียงสูงขึ้น เช่น ถ้าเราดีดสายไวโอลิน (Violin) เปลา่ ๆ จะพบว่าจะมีความถี่สูงหรือเสียงสูงกว่าเราดีดสายดับเบิลเบส (double bass) เปลา่ ๆ ทั้งนี้เนื่องจากว่าสายของไวโอลินมีขนาดและความยาวน้อยกว่าดับเบิลเบสนั่นเอง



รูปที่ 2.1a แสดงการสั่นสะเทือนของแอมพลิจูดรูปคลื่นไซน์ความถี่ต่ำในโดเมนเวลา
รูปที่ 2.1b แสดงการสั่นสะเทือนของแอมพลิจูดรูปคลื่นไซน์ความถี่ต่ำในโดเมนความถี่



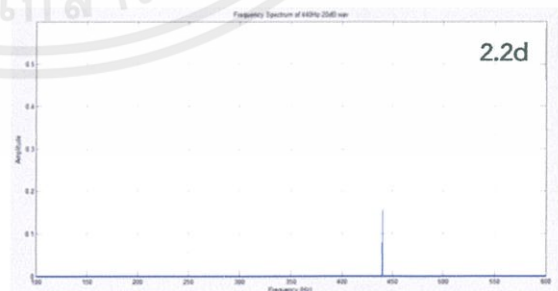
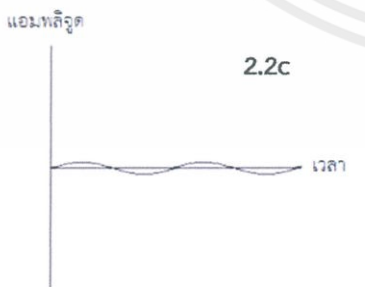
รูปที่ 2.1c แสดงการสั่นสะเทือนของแอมพลิจูดรูปคลื่นไซน์ความถี่สูงในโดเมนเวลา
รูปที่ 2.1d แสดงการสั่นสะเทือนของแอมพลิจูดรูปคลื่นไซน์ความถี่สูงในโดเมนความถี่

2.1.2 ความเข้มเสียง (Volume or Intensity)

ความเข้มเสียง หมายถึง เสียงเบา เสียงดัง ความเข้มเสียงเกิดจากแรงสั่นสะเทือนของวัตถุที่เป็นแหล่งกำเนิดเสียง ถ้าวัตถุสั่นสะเทือนมากเสียงจะดัง และในทางตรงกันข้ามถ้าวัตถุสั่นสะเทือนน้อยเสียงจะเบา ความเข้มเสียงขึ้นอยู่กับแรงที่ส่งจากแหล่งกำเนิดเสียงไปยังหู เวลาที่เราตะโกนเส้นเสียงจะสั่นสะเทือนมาก ทำให้เกิดเสียงดัง ถ้าเราติกลองโดยออกแรงมากขึ้นหนังกลองจะสั่นมากขึ้น ทำให้เสียงกลองดังขึ้น ความเข้มเสียงวัดได้จากความกว้างคลื่นเสียง (Amplitude) ถ้าคลื่นเสียงยิ่งกว้างเสียงก็จะยิ่งดัง ในขณะที่เสียงเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศนั้นความเข้มเสียงจะน้อยลงตามลำดับ กล่าวคือ เสียงจะเบาลง ดังนั้นระยะทางที่เสียงต้องเดินทางก็จะมีผลต่อความเข้มเสียงด้วย



รูปที่ 2.2a แสดงการสั่นสะเทือนสูงของแอมพลิจูดรูปคลื่นไซน์ในโดเมนเวลา (เสียงดัง)
รูปที่ 2.2b แสดงการสั่นสะเทือนสูงของแอมพลิจูดรูปคลื่นไซน์ในโดเมนความถี่

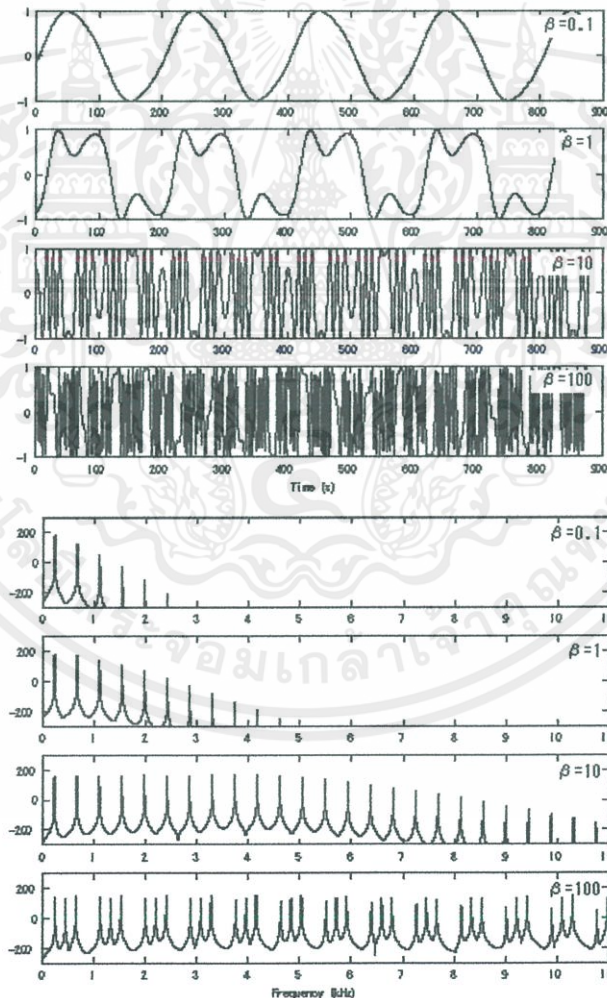


รูปที่ 2.2c แสดงการสั่นสะเทือนต่ำของแอมพลิจูดรูปคลื่นไซน์ในโดเมนเวลา (เสียงเบา)
รูปที่ 2.2d แสดงการสั่นสะเทือนต่ำของแอมพลิจูดรูปคลื่นไซน์ในโดเมนความถี่

2.1.3 สีสันเสียง (Timbre or Tone Color)

สีสันเสียง หมายถึง เสียงที่มาจากแหล่งกำเนิดเสียงต่างๆกัน เช่น เสียงระนาด เสียงกั๋งดาร์ เสียงร้อง เสียงสัตว์ เสียงลม ฯลฯ คลื่นเสียงที่เกิดจากแหล่งกำเนิดที่มีสีสันเสียงแตกต่างกันจะมีรูปร่างลักษณะต่างกัน เช่น คลื่นเสียงของไวโอลิน จะมีรูปร่างต่างจากคลื่นของทรัมเป็ต สื่อดนตรีที่ต่างกันทำให้เกิดสีสันเสียงต่างกัน สื่อดนตรี ก็คือ เครื่องดนตรีหรือเส้นเสียงดนตรีในกรณีของการขับร้อง เครื่องดนตรีต่างชนิดกันจะทำให้เกิดสีสันเสียงต่างกัน เพลงเดี่ยวที่บรรเลงโดยเครื่องดนตรีต่างชนิดกันจะทำให้เกิดรสชาติต่างกันเพราะสีสันเสียงต่างกัน

สิ่งที่สำคัญที่สุดที่เป็นตัวกำหนดเสียง ก็คือ พาร์เชียล(Partials) ซึ่งเป็นระดับเสียงจำนวนหนึ่งที่ประกอบกันเป็นเสียงที่เราได้ยิน เพราะฉะนั้น จำนวนระดับเสียงของพาร์เชียล ความเข้มเสียงของพาร์เชียล และการกระจายของพาร์เชียล จะเป็นตัวกำหนดสีสันเสียงทั้งสิ้น เสียงที่มีจำนวนพาร์เชียลน้อยจะมีเสียงใส เช่น เสียงของฟลูตที่เล่นโน้ตสูงๆ ส่วนเสียงที่มีจำนวนพาร์เชียลมากจะมีเสียงที่หนักแน่นกว่า เช่น เสียงของเซลโล เสียงที่ไม่มีจำนวนพาร์เชียลเลย หรือเสียงบริสุทธิ์เกิดขึ้นได้จากเครื่องเสียงดนตรีไฟฟ้า และจะเป็นช่วงเสียงสูงมากๆ ไม่ใช่เพราะสำหรับหูคนทั่วไป



รูปที่ 2.3 สัญญาณเสียงที่เกิดจากแหล่งกำเนิดเสียงที่มีสีสันเสียงต่างกันในโดเมนเวลา (Time Domain) และโดเมนความถี่ (Frequency Domain)

2.1.4 คุณภาพของเสียง (Tone Quality)

คุณภาพของเสียง หมายถึง เสียงตีมาก เสียงตื้นน้อย เช่น เสียงโน้ตตัวเดียวกันที่เกิดจากเปียโน 2 ตัว จะมีคุณภาพเสียงไม่เหมือนกันทีเดียว แม้จะมีระดับเสียง ความเข้มเสียง และสีสันเสียงเหมือนกันทุกประการ เสียงร้องหรือเสียงพูดของคนก็เช่นเดียวกัน บางคนมีคุณภาพเสียงที่ทุ้มนุ่มนวล ในขณะที่อีกคนหนึ่งมีคุณภาพเสียงที่ก้องกังวาน ในการปฏิบัติเครื่องดนตรี นักดนตรีต้องคำนึงอย่างมากถึงคุณภาพของเสียง เพื่อให้ได้น้ำเสียงที่ไพเราะน่าฟัง

2.1.5 ความยาวเสียง (Duration)

ความยาวเสียง เป็นพื้นฐานของดนตรีที่เกี่ยวข้องกับระยะเวลา เสียงแต่ละเสียงที่เกิดขึ้นต้องมีระยะเวลา ซึ่งทำให้เกิดเสียงยาว เสียงสั้น เสียงไม่ว่าจะมีที่ระดับเสียงที่แน่นอนหรือไม่ ก็ต้องมี ความยาวเข้ามาเกี่ยวข้อง ความยาวเสียงที่มาของจังหวะ ซึ่งมีส่วนสำคัญอย่างยิ่งในดนตรีของทุกชาติ ทุกภาษา ความยาวเสียงในที่นี้ หมายถึงรวมถึง ความเงียบของตัวหยุดด้วย เนื่องจากดนตรีเป็นผลของกระบวนการเกิดเสียง (Sound) สลับกับความเงียบ (Silence) ไม่ว่าจะเป็นเสียงหรือความเงียบย่อมต้องมีความยาวหรือระยะเวลาทั้งสิ้น

2.1.6 ทฤษฎีดนตรี

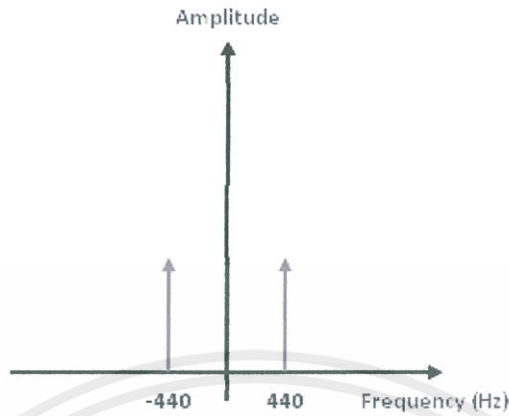
ช่วงดนตรีจะถูกแบ่งออกเป็นหลายคีย์ แต่ละคีย์จะต่างกันครึ่งเสียง (Semitone) แต่ละครึ่งเสียงจะสอดคล้องกับตัวโน้ตที่กำหนดไว้ ตัวโน้ตบริสุทธิ์ทำจากสัญญาณไซน์ซอไซด์ (Sinusoid) เดียวกับความถี่มูลฐาน (Fundamental Frequency)

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าความถี่มูลฐานของแต่ละโน้ต

Note	Hz	Note	Hz	Note	Hz	Note	Hz	Note	Hz	Note	Hz	Note	Hz
C1	32.7	C2	65.4	C3	130.8	C4	261.6	C5	523.3	C6	1046.5	C7	2093.0
C#1	34.6	C#2	69.3	C#3	138.6	C#4	277.2	C#5	554.4	C#6	1108.7	C#7	2217.5
D1	36.7	D2	73.4	D3	146.8	D4	293.7	D5	587.3	D6	1174.7	D7	2349.3
D#1	38.9	D#2	77.8	D#3	155.6	D#4	311.1	D#5	622.3	D#6	1244.5	D#7	2489.0
E1	41.2	E2	82.4	E3	164.8	E4	329.6	E5	659.3	E6	1318.5	E7	2637.0
F1	43.7	F2	87.3	F3	174.6	F4	349.2	F5	698.5	F6	1396.9	F7	2793.8
F#1	46.2	F#2	92.5	F#3	185.0	F#4	370.0	F#5	740.0	F#6	1480.0	F#7	2960.0
G1	49.0	G2	98.0	G3	196.0	G4	392.0	G5	784.0	G6	1568.0	G7	3136.0
G#1	51.9	G#2	103.8	G#3	207.7	G#4	415.3	G#5	830.6	G#6	1661.2	G#7	3322.4
A1	55.0	A2	110.0	A3	220.0	A4	440.0	A5	880.0	A6	1760.0	A7	3520.0
A#1	58.3	A#2	116.5	A#3	233.1	A#4	466.2	A#5	932.3	A#6	1864.7	A#7	3729.3
B1	61.7	B2	123.5	B3	246.9	B4	493.9	B5	987.8	B6	1975.5	B7	3951.1

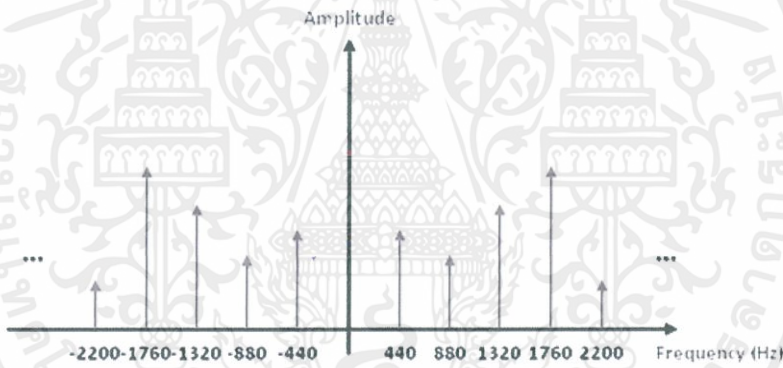
เสียงจากเครื่องดนตรีต่างๆ เล่นโน้ตตัวเดียวกัน แต่เราก็สามารถแยกออกได้ว่าเสียงไหน เป็นเสียงของเครื่องดนตรีชนิดใด ทั้งนี้ เพราะคุณภาพของเสียง โน้ตเดียวกันที่เล่นโดยเครื่องดนตรีที่ต่างกันนั้นไม่ได้ให้เสียงที่เหมือนกัน นี่เป็นเหตุผลว่าแต่ละตัวโน้ตที่สร้างจากความถี่มูลฐานนั้นต้องตั้งค่าฮาร์โมนิกส์ (Harmonics) ด้วย โดยที่ฮาร์โมนิกส์ คือ ส่วนประกอบในรูปสัญญาณคลื่นไซน์ (Sine Wave) ของสัญญาณหรือปริมาณเป็นคาบใดๆ ซึ่งมีความถี่เป็นจำนวนเต็มเท่าของความถี่มูลฐาน (Fundamental Frequency)

A4 Pure note

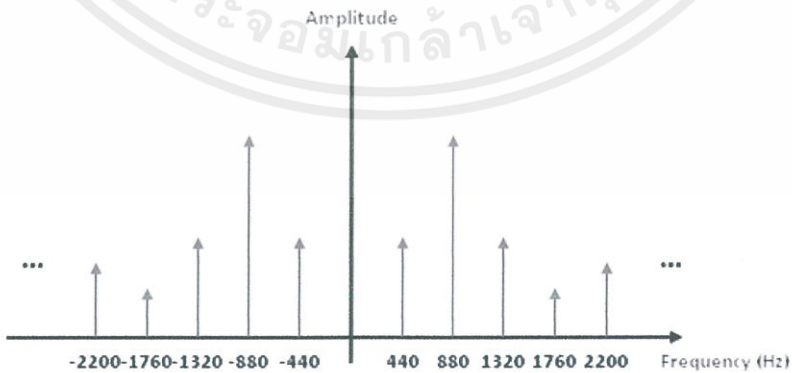


รูปที่ 2.4 โน้ตตัวลาบริสุทธิ์ (ออกเตปที่4)

A4 Piano



A4 Guitar



รูปที่ 2.5 โน้ตตัวลาของเปียโน และกีตาร์ (ออกเตปที่4)

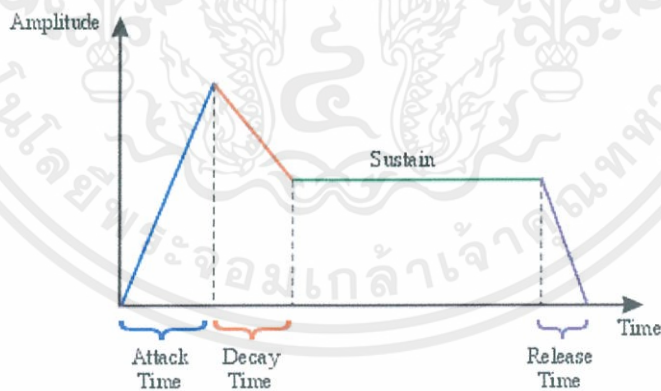
รูปที่ 2.4 แสดงตัวโน้ตบริสุทธิ์ และรูปที่ 2.5 แสดงโน้ตที่เล่นโดยเครื่องดนตรีที่แตกต่างกัน ตัวโน้ตบริสุทธิ์จะสร้างขึ้นโดยใช้ค่าความถี่มูลฐาน 440 เฮิรต ขณะที่โน้ตที่ถูกเล่นโดยเครื่องดนตรีจะถูกสร้างขึ้นในหลายๆฮาร์โมนิกส์ จะเห็นได้จากฮาร์โมนิกส์ที่แตกต่างกันในแต่ละเครื่องดนตรีที่จะกำหนดคุณลักษณะของเสียงที่เราได้ยิน

2.1.7 กรอบของโทนเสียง (Sound Envelope)

ในเทคนิคการสังเคราะห์เสียงด้วยการมอดูเลชันเชิงความถี่ เพื่อให้ได้เสียงใกล้เคียงกับเครื่องดนตรีจริง เราสามารถกำหนดอัตราการมอดูเลชันให้มีการเปลี่ยนแปลงค่าเล็กน้อยได้ในแต่ละช่วงเวลาความยาวเสียง โดยอาศัยการประมาณจากการวิเคราะห์สเปกตรัมของเสียงเครื่องดนตรีจริงแต่ละชนิด ลักษณะกรอบของโทนเสียงทั่วไปมีรูปร่างแบบเอดีเอสอาร์ (ADSR shape) ดังรูปที่ 2.6 ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 4 ส่วนได้ดังนี้

1. ช่วงแอทแท็ค (Attack) เป็นช่วงที่เสียงมีการเปลี่ยนแปลงทางขนาดในรูปของสัญญาณไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างกะทันหันในช่วงเวลาอันรวดเร็ว (Transient)
2. ช่วงดีเคย์ (Decay) เป็นช่วงที่เสียงมีขนาดของสัญญาณเสียงลดลงอย่างมาก มีนัยสำคัญจากขนาดสูงสุดของสัญญาณในช่วงแอทแท็ค
3. ช่วงซัสเทน (Sustain) เป็นช่วงที่เสียงมีขนาดของสัญญาณคงที่หรือมีการเปลี่ยนแปลงลดลงเพียงเล็กน้อย อยู่ในช่วงเวลาหลังจากช่วงดีเคย์จนถึงเวลาที่หยุดเล่นเสียง
4. ช่วงรีลีส (Release) เป็นช่วงที่ขนาดสัญญาณเสียงลดลงจากช่วงซัสเทนภายหลังการหยุดเล่นเสียงจนขนาดของสัญญาณเสียงมีค่าเป็นศูนย์

รูปร่างแบบเอดีเอสอาร์ เป็นการพยายามที่จะเลียนแบบกรอบของเสียงที่พบในเครื่องดนตรีหรือคูดิก และใช้อย่างแพร่หลายในคีย์บอร์ดสังเคราะห์เสียงอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป



รูปที่ 2.6 กรอบของโทนเสียงรูปร่างแบบเอดีเอสอาร์ (ADSR shape)

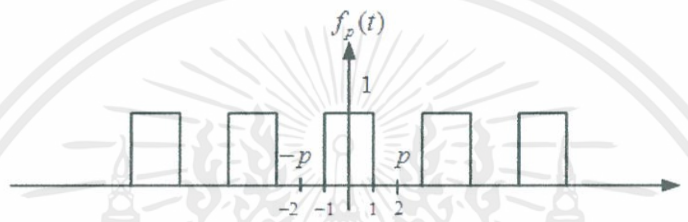
รูปร่างและระยะเวลาของส่วนแอทแท็คและดีเคย์ มีอิทธิพลอย่างมากกับสีสันเสียงในเครื่องดนตรีหรือคูดิก โดยทั่วไปจะมีระยะเวลาของช่วงแอทแท็คที่ค่อนข้างสั้นกว่าช่วงดีเคย์ ช่วงแอทแท็คที่สั้นมากจะเป็นลักษณะเฉพาะของเสียงจากเครื่องดนตรีประเภทตีหรือเคาะ (Percussive Sound) ในขณะที่ช่วงแอทแท็คที่ยาวกว่าจะพบในเครื่องดนตรีหรือคูดิก เช่น ออร์แกน ซึ่งสร้างเสียงจากกระแสอากาศที่รุนแรงข้ามผ่านขอบของพื้นผิว เครื่องดนตรีหรือคูดิกหลายชนิดมีช่วงแอทแท็คที่ยาวกว่า จะสร้างเสียงที่มีลักษณะคล้ายกับเสียงจากการเล่นเทปบันทึกลับที่ย้อนหลัง

2.2 การแปลงฟูรีเยร์ (Fourier Transform)

การวิเคราะห์ฟังก์ชันหรือสัญญาณมีคาบที่สามารถแทนด้วยอนุกรมฟูรีเยร์ได้ แต่ในกรณีฟังก์ชันที่ไม่มีคาบ (Non-periodic function) โดยจะพิจารณาจากสูตรการหาอนุกรมฟูรีเยร์ โดยพิจารณาว่า การที่ฟังก์ชันไม่มีคาบนั้นก็คือ การขยายช่วงคาบของฟังก์ชันมีคาบให้กว้างมากจนเป็นอนันต์ซึ่งกรณีนี้จะทำให้อนุกรมฟูรีเยร์ กลายเป็นอินทิกรัลฟูรีเยร์ แล้วจึงจะแยกวิเคราะห์อินทิกรัลฟูรีเยร์ออกเป็นการแปลงฟูรีเยร์ (Fourier Transform) และการแปลงกลับฟูรีเยร์ (Inverse Fourier Transform)

2.2.1 การหาสูตรอนุกรมฟูรีเยร์ของฟังก์ชันไม่มีคาบ

ในที่นี้จะกำหนด $f_p(t)$ แทนฟังก์ชันมีคาบและ $f(t)$ แทนฟังก์ชันไม่มีคาบ



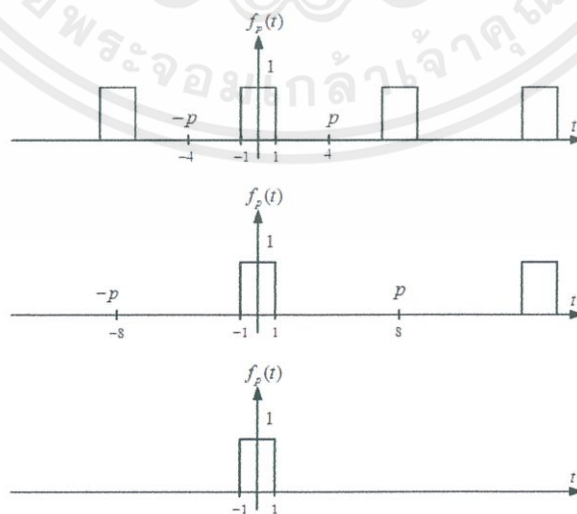
รูปที่ 2.7 ฟังก์ชันมีคาบ $T=2p$

พิจารณารูปที่ 2.7 โดยเรากำหนดคาบของฟังก์ชันดังนี้

$$f_p(t) = \begin{cases} 0 & ; -p < t < -p \\ 1 & ; -p < t < p \\ 0 & ; p < t < p \end{cases}$$

และถ้าขยายคาบให้ใหญ่ขึ้นจน $p \rightarrow \infty$ ดังแสดงได้ในรูปที่ 2.8 ซึ่งแทนด้วยอนุกรมฟูรีเยร์ของฟังก์ชันมีคาบเป็น

$$f_p(t) = \frac{a_0}{2} + a_1 \cos \frac{\pi t}{p} + a_2 \cos \frac{2\pi t}{p} + \dots + a_n \cos \frac{n\pi t}{p} + \dots \quad (2.1)$$



รูปที่ 2.8 ฟังก์ชันมีคาบเมื่อ $p \rightarrow \infty$

ขณะที่สัมพันธ์ $a_0 = \frac{2}{p} \int_0^1 dt = \frac{2}{p}$ (2.2a)

และ $a_n = \frac{2}{p} \int_0^1 1 \cos \frac{n\pi t}{p} dt$
 $= \frac{2}{p} \left[\frac{\sin(\frac{n\pi t}{p})}{\frac{n\pi}{p}} \right] = \frac{2}{p} \frac{\sin(\frac{n\pi}{p})}{\frac{n\pi}{p}}$ (2.2b)

สิ่งที่ต้องพิจารณาก็คือ ได้ $p \rightarrow \infty$ เมื่อเราทำการเขียนสเปกตรัมของ $f_p(t)$ แล้วขนาดของ a_n จะมีความสัมพันธ์กับความถี่เชิงมุมอย่างไรบ้าง โดยค่าของความถี่เชิงมุม เราหาได้จาก

$$\omega_n = \frac{n\pi}{p}$$

เราแทนค่า ω_n ในสมการที่ (2.2b) จะได้

$$a_n = \frac{2 \sin \omega_n}{p \omega_n} \quad (2.3)$$

ถ้าเราจะหากราฟความสัมพันธ์ระหว่าง a_n กับ ω_n หรือที่เรียกว่า องค์ประกอบความถี่ของสัญญาณ หรือ สเปกตรัมของ $f_p(t)$ เมื่อ $p = 2, 4$ และ 8 โดยใช้สมการที่ (2.3) จะได้ดังรูปที่ 2.9 โดยเราสามารถหา $\Delta\omega$ ได้จาก

$$\Delta\omega = \omega_{n+1} - \omega_n = \frac{(n+1)\pi}{p} - \frac{n\pi}{p} = \frac{\pi}{p} \quad (2.4)$$

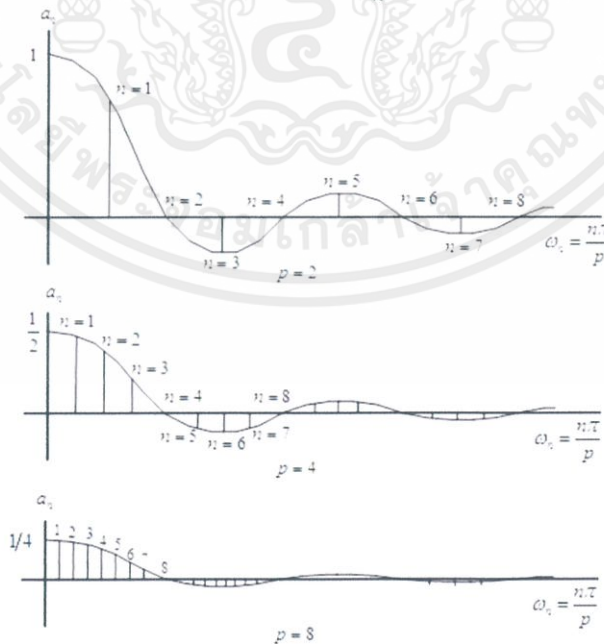
และค่า $\Delta\omega$ จะเป็นค่าคงที่ ที่ไม่แปรค่าตามค่า n

จากสมการที่ (2.3) เราจะเขียนความสัมพันธ์ของ a_n กับ ω_n โดยจะทำการเปลี่ยนค่า p เป็น π ทำได้โดย สร้างความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\frac{2}{p} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\pi}{p} = \frac{2}{\pi} \Delta\omega$$

ดังนั้นสมการที่ (2.3) เขียนใหม่ได้เป็น

$$a_n = \frac{2 \sin \omega_n}{\pi \omega_n} \Delta\omega \quad (2.5)$$



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง a_n , $\Delta\omega$ เมื่อคาบฟังก์ชันขยายใหญ่ขึ้น

จากสมการที่ (2.5) ซึ่งจะสอดคล้องกับรูปที่ 2.9 คือ

1. ขนาดของ a_n หรือสเปกตรัมของ $f_p(t)$ จะมีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$a_n \propto \omega \quad \text{และ} \quad a_n \propto \frac{1}{p}$$

2. ช่วงห่างของ a_{n+1} กับ a_n หรือ $\Delta\omega \propto \frac{1}{p}$ (สอดคล้องตามสมการที่ 2.4)

3. เมื่อ $p \rightarrow \infty$ หรือ $\Delta\omega \rightarrow 0$ (ตามสมการที่ 2.4) จะทำให้ช่วงห่างของ a_{n+1} กับ a_n มีค่าน้อยมาก ๆ (ประมาณศูนย์) หรือกล่าวได้ว่า จะทำให้ a_n ซึ่งเป็นฟังก์ชันไม่ต่อเนื่องหรือฟังก์ชันของตัวแปรเต็มหน่วย กลายเป็นฟังก์ชันที่ต่อเนื่อง

จากเหตุผลทั้ง 3 ข้อที่กล่าวมา และความรู้ของวิชาคณิตศาสตร์ในเรื่องของลิมิต เมื่อ $\lim_{\Delta\omega \rightarrow 0}$ จะ ทำให้ $\Delta\omega \rightarrow d\omega$ และ a_n จะกลายเป็นฟังก์ชันต่อเนื่อง ทำให้การบวกพจน์ของสเปกตรัม (Σ) จะกลายเป็น อินทิกรัลพจน์ของสเปกตรัม (\int) หรือกล่าวได้ว่าจากอนุกรมฟูเรียร์ จะกลายเป็นอินทิกรัลฟูเรียร์ จากความรู้เรื่องฟูเรียร์เชิงซ้อนในสมการ

$$f_p(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{jn\omega t}$$

หรือ

$$f_p(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{\frac{jn\omega t}{p}} \quad (2.6)$$

โดยขณะนี้เราพิจารณา $T = 2p$ (T = คาบของฟังก์ชัน)

และสามารถเขียนสมการ c_n ได้เป็น

$$c_n = \frac{1}{2p} \int_{-p}^p f_p(t) e^{-\frac{jn\pi t}{p}} dt \quad (2.7)$$

เพื่อไม่ให้เกิดความสับสนในการวิเคราะห์สมการ เราจะเปลี่ยนตัวแปร t ในสมการที่ (4.7) เป็นตัวแปร τ จะได้

$$c_n \equiv \frac{1}{2\pi} \int_{-p}^p f_p(\tau) e^{-\frac{jn\pi\tau}{p}} d\tau$$

แทนค่า c_n ในสมการที่ (2.6) จะได้

$$\begin{aligned} f_p(t) &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[\frac{1}{2p} \int_{-p}^p f_p(\tau) e^{-\frac{jn\pi\tau}{p}} d\tau \right] e^{\frac{jn\pi t}{p}} \\ &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[\frac{1}{2\pi} \int_{-p}^p f_p(\tau) e^{-\frac{jn\pi\tau}{p}} d\tau \right] e^{\frac{jn\pi t}{p}} \cdot \frac{\pi}{p} \end{aligned}$$

และเราทราบว่า $\omega_n = \frac{n\pi}{p}$ และ $\Delta\omega = \frac{\pi}{p}$ ดังนั้นเราสามารถเขียน $f_p(t)$ ใหม่ได้เป็น

$$f_p(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[\frac{1}{2\pi} e^{j\omega_n t} \int_{-p}^p f_p(\tau) e^{j\omega_n \tau} d\tau \right] \Delta\omega \quad (2.8)$$

เราจะกำหนดให้

$$g(\omega) = \frac{1}{2\pi} e^{j\omega t} \int_{-p}^p f_p(\tau) e^{j\omega \tau} d\tau \quad (2.9)$$

แทนลงในสมการที่ (2.8) ดังนั้นสามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$f_p(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} g(\omega_n) \Delta\omega \quad (2.10)$$

ถ้าเราให้ $p \rightarrow \infty$ จะทำให้ $\Delta\omega \rightarrow d\omega$ เราจะได้

$f_p(t) \Rightarrow f(t)$ (ฟังก์ชันมีคาบ \Rightarrow ฟังก์ชันไม่มีคาบ)

$f(\omega_n) \Rightarrow f(\omega)$ (ฟังก์ชันของตัวแปรเต็มหน่วย, ไม่ต่อเนื่อง \Rightarrow ฟังก์ชันต่อเนื่อง)

$\sum_{n=-\infty}^{\infty} \Rightarrow \int_{-\infty}^{\infty}$ (การบวก \Rightarrow การอินทิเกรต)

ดังนั้นจากสมการที่ (2.10) จะได้

$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} g(\omega) d\omega \quad (2.11)$$

แทนค่าสมการที่ (2.9) โดยเงื่อนไข $p \rightarrow \infty$ แล้ว $f_p(\tau) \rightarrow f(\tau)$ ลงในสมการที่ (2.11) จะได้

$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{1}{2\pi} e^{j\omega t} \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) e^{j\omega\tau} d\tau \right] d\omega \quad (2.12)$$

สมการที่ (2.12) เราเรียกว่า “ฟูเรียร์อินทิกรัล (Fourier Integral)”

2.2.2 การหาสูตรการแปลงฟูเรียร์

จากสมการที่ (2.12) สามารถเขียนแยกได้เป็น 2 อินทิกรัล คือ

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (2.13)$$

และ

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (2.14)$$

โดย $F(\omega)$ ในสมการที่ (2.13) เรียกว่า “การแปลงฟูเรียร์ (Fourier Transform)” ของ $f(t)$ เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ F

$$F(\omega) = F[f(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (2.15)$$

ส่วนในสมการที่ (2.14) เราเรียกว่า “การแปลงฟูเรียร์ผกผัน (Inverse Fourier Transform)” แทนด้วยสัญลักษณ์ F^{-1}

$$f(t) = F^{-1}[F(\omega)] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (2.16)$$

และเรียกสมการที่ (2.15) และ (2.16) ว่า “คู่การแปลงฟูเรียร์ (Fourier Transform pair)” ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$f(t) \leftrightarrow F(\omega) \quad (2.17)$$

ข้อสังเกต

จากสมการที่ (2.13) และ (2.14) $F(\omega)$ จะทำหน้าที่สำหรับสัญญาณไม่ซ้ำคาบ เช่นเดียวกับ C_n สำหรับสัญญาณซ้ำคาบ ดังนั้น $F(\omega)$ คือ สเปกตรัมของ $f(t)$ ที่แตกต่างกัน คือ $F(\omega)$ จะเป็นฟังก์ชันของ ω ที่ต่อเนื่อง ในขณะที่ C_n จะนิยามเฉพาะความถี่ที่เป็นช่วง ดังนั้นสัญญาณไม่ซ้ำคาบจะมีสเปกตรัมที่ต่อเนื่อง

จากสมการการแปลงฟูเรียร์สามารถเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$F(\omega) = A(\omega) + jB(\omega) \quad (2.18)$$

เมื่อ $A(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cos(\omega t) dt$ และ $B(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \sin(\omega t) dt$

และจากสมการ (2.18) เขียนแทนด้วยพิกัดเอ็กซีโพเนนเชียล

$$F(\omega) = |F(\omega)| e^{j\theta(\omega)} \quad (2.19)$$

จากสมการที่ (2.19) ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ

- I. ขนาด $|F(\omega)| = \sqrt{A(\omega)^2 + B(\omega)^2}$
- II. มุมเฟส $\theta(\omega) = \tan^{-1} \frac{B(\omega)}{A(\omega)}$

จะได้ว่า $A(\omega)$ เป็นฟังก์ชันคู่ ส่วน $B(\omega)$ เป็นฟังก์ชันคี่ นั่นคือ

$$\begin{aligned} A(\omega) &= A(-\omega) \\ B(\omega) &= -B(-\omega) \end{aligned}$$

และ

$$F(-\omega) = F^*(\omega)$$

ซึ่งฟังก์ชัน $F(\omega)$ ที่ความถี่เป็น $(-\omega)$ คือ ค่าสังยุคเชิงซ้อนของ $F(\omega)$ ดังนั้นจะได้ว่า ขนาด $|F(\omega)|$ เป็นฟังก์ชันคู่ และมุมเฟส $\theta(\omega)$ เป็นฟังก์ชันคี่ โดยความสัมพันธ์ของแต่ละสมการการแปลงฟูเรียร์สามารถนำมาช่วยในการปรับแต่งองค์ประกอบของเสียงได้ ดังนี้

2.2.3 การเลื่อนเชิงเวลา (Time Shifting)

การเลื่อนกราฟของสัญญาณทั้งหมดไปตามแกนเวลา เป็นระยะเวลาเท่ากับ t_0 ในกรณีของสัญญาณต่อเนื่องเชิงเวลา (หรือ เป็นระยะเวลาเท่ากับ n_0 ในกรณีของสัญญาณไม่ต่อเนื่องเชิงเวลา) ซึ่งถ้าค่า t_0 เป็นบวกจะเป็นการเคลื่อนสัญญาณไปทางขวา เป็นระยะเวลาเท่ากับ t_0 ในกรณีของสัญญาณต่อเนื่องเชิงเวลา (หรือ เป็นระยะเวลาเท่ากับ n_0 ในกรณีของสัญญาณไม่ต่อเนื่องเชิงเวลา) พิจารณาได้จากสมการทางคณิตศาสตร์ ดังนี้

$$F[f(t - t_0)] = F(\omega)e^{-j\omega t_0} \quad (2.20)$$

พิสูจน์ จาก

$$F(\omega) = F[f(t - t_0)] = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt$$

ดังนั้น

$$F[f(t - t_0)] = \int_{-\infty}^{\infty} f(t - t_0) e^{-j\omega t} dt$$

กำหนดให้

$$\begin{aligned} (t - t_0) &= x \text{ จะได้} \\ F[f(t - t_0)] &= \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-j\omega(x+t_0)} dx \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-j\omega x} e^{-j\omega t_0} dx \end{aligned}$$

เพราะฉะนั้น

$$F[f(t - t_0)] = F(\omega)e^{-j\omega t_0}$$

จากคุณสมบัติข้อนี้ กล่าวได้ว่า ถ้าฟังก์ชันในโดเมนเวลาเลื่อนไป t_0 วินาที สเปกตรัมเชิงขนาดจะไม่เปลี่ยนแปลง แต่สเปกตรัมเชิงเฟสเปลี่ยนไปจำนวนเท่ากับ $-\omega t_0$



รูปที่ 2.10 แสดงคุณสมบัติการเลื่อนเวลา

2.2.4 การเลื่อนสเกลเชิงเวลา (Time Scaling)

การเปลี่ยนแปลงของกราฟที่เกี่ยวข้องกับการนำค่าคงที่คูณเข้ากับสเกลของแกนเวลา เมื่อปรับสเกลด้วยค่าคงที่ที่มีค่ามากกว่า 1 กราฟจะหดสั้นลง เนื่องจากเวลาที่เดินเร็วขึ้น ทำให้เราเห็นกราฟทั้งหมดในระยะเวลาที่สั้นลง ในทางตรงกันข้ามเมื่อปรับสเกลด้วยค่าคงที่ที่มีค่าน้อยกว่า 1 จะทำให้กราฟยืดขยายออก เราจึงต้องใช้เวลาที่นานมากขึ้นในการที่จะเห็นกราฟครบทั้งหมด

จากการแปลงฟูเรียร์สามารถแสดงการลดทอนและขยายในรูปแบบทางคณิตศาสตร์ได้ ดังนี้ กำหนดให้ a เป็นค่าคงที่ที่มีค่ามากกว่า 1

$$F[f(at)] = \frac{1}{|a|} F\left(\frac{\omega}{a}\right) \quad (2.21)$$

พิสูจน์

$$F[f(at)] = \int_{-\infty}^{\infty} f(at)e^{-j\omega t} dt$$

กำหนดให้ $x = at$; $dt = \frac{1}{a} dx$

$$F[f(at)] = \frac{1}{a} \int_{-\infty}^{\infty} f(x)e^{-\left(\frac{j\omega}{a}\right)x} dx$$

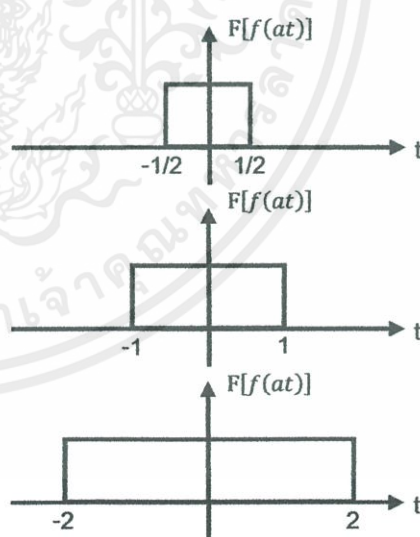
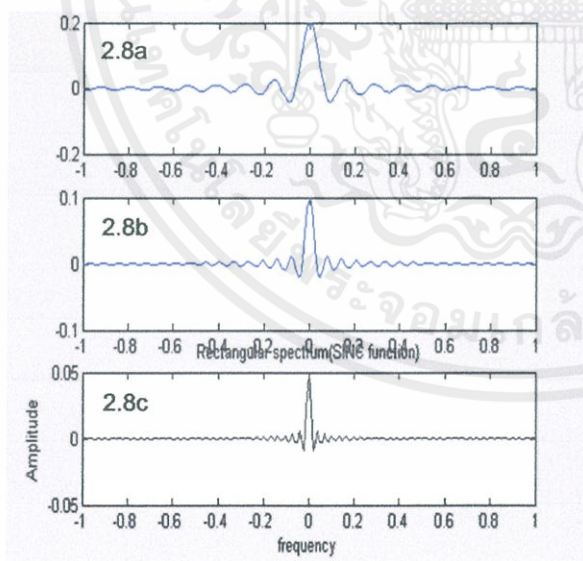
$$F[f(at)] = \frac{1}{a} F\left(\frac{\omega}{a}\right)$$

เช่นเดียวกัน ถ้า $a < 1$ เราก็จะแสดงได้ว่า

$$F[f(at)] = -\frac{1}{a} F\left(\frac{\omega}{a}\right)$$

ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า

$$F[f(at)] = \frac{1}{|a|} F\left(\frac{\omega}{a}\right)$$



รูปที่ 2.11a ปรับสเกลด้วยค่า $a < 1$ กราฟจะยืดขยายออก เนื่องจากใช้เวลาานานมากขึ้น

รูปที่ 2.11b กราฟแสดงสเปกตรัมที่ยังไม่เกิดการปรับสเกล

รูปที่ 2.11c ปรับสเกลด้วยค่า $a > 1$ กราฟจะหดสั้นลง เนื่องจากใช้เวลาลดน้อยลง

2.2.5 การเลื่อนความถี่ (Frequency Shifting)

การเลื่อนความถี่ไม่เท่ากับ ω_0 ในโดเมนความถี่ เสมือนว่าในโดเมนเวลาถูกคูณด้วย $e^{j\omega_0 t}$ จะทำให้สเปกตรัมเชิงความถี่เลื่อนไป ω_0 ซึ่งพิจารณาได้จากสมบัติของการแปลงฟูรีเยร์

$$F[f(t)e^{j\omega_0 t}] = F(\omega - \omega_0) \quad (2.22)$$

พิสูจน์

$$\begin{aligned} F(\omega) &= F[f(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \\ F[e^{j\omega_0 t}] &= \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{j\omega_0 t} e^{-j\omega t} dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j(\omega - \omega_0)t} dt \\ &= F(\omega - \omega_0) \end{aligned}$$

ดังนั้น

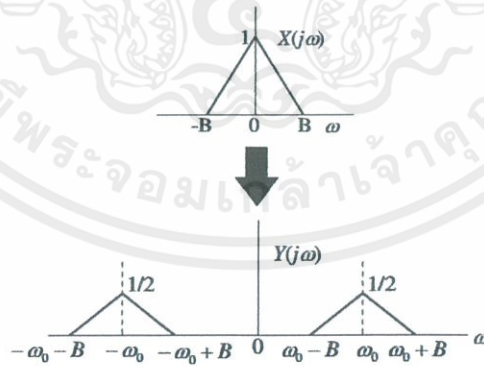
$$F[f(t)e^{j\omega_0 t}] = F(\omega - \omega_0)$$

การประยุกต์คุณสมบัติข้อนี้ ในทางวิศวกรรมไฟฟ้าคือ ใช้ในการมอดูเลต (Modulation) โดยการนำสัญญาณ $f(t)$ คูณกับสัญญาณซายน์ เนื่องจากสัญญาณซายน์มีความถี่ ω_0 ซึ่งจะอยู่ในรูปผลบวกของฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียล ดังนั้นการมอดูเลตสัญญาณลักษณะนี้ จะทำให้ความถี่ทั้งหมดเลื่อนไป ตามคุณสมบัติ เราจะลองดูการมอดูเลตระหว่าง $f(t)$ กับฟังก์ชันซายน์

$$\begin{aligned} f(t)\cos(\omega_0 t) &= f(t)\frac{1}{2}[e^{j\omega_0 t} + e^{-j\omega_0 t}] \\ &= \frac{1}{2}f(t)e^{j\omega_0 t} + \frac{1}{2}f(t)e^{-j\omega_0 t} \\ F[f(t)\cos(\omega_0 t)] &= F\left[\frac{1}{2}f(t)e^{j\omega_0 t} + \frac{1}{2}f(t)e^{-j\omega_0 t}\right] \end{aligned}$$

เราจะใช้คุณสมบัติการเลื่อนความถี่จะได้

$$F[f(t)\cos(\omega_0 t)] = \frac{1}{2}F(\omega + \omega_0) + \frac{1}{2}F(\omega - \omega_0)$$



รูปที่ 2.12 แสดงคุณสมบัติการเลื่อนความถี่

จะเห็นได้ว่า การเลื่อนความถี่นั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงตามค่า ω_0 ของสเปกตรัมเท่านั้น ทำให้ระยะห่างของแต่ละฮาร์โมนิกส์หรือสเกลเชิงเวลาไม่มีการเปลี่ยนแปลง (Time Scaling) วิธีการนี้จึงมีประโยชน์มากในการส่งสัญญาณออกอากาศ สามารถนำไปใช้ในด้านของการสื่อสารได้ต่อไป

2.2.6 การเลื่อนระดับเสียง (Pitch Shifting)

การเลื่อนระดับเสียง คือ การเปลี่ยนระดับสัญญาณโดยไม่เปลี่ยนความยาวคลื่น การเปลี่ยนความยาวคลื่นของเสียง โดยประสิทธิภาพของอัตราการสุ่ม (Sample Rate) เปลี่ยนแปลงตามระดับเสียงที่เปลี่ยนไป การเลื่อนระดับเสียง (Pitch Shifting) จึงมักจะถูกเข้าใจผิดว่าเป็นการเลื่อนความถี่ (Frequency Shifting) อยู่บ่อยๆ โดยการเลื่อนระดับเสียงจะเป็นการลดหรือขยายสเปกตรัม แต่ยังคงรักษาฮาร์โมนิกส์ของเสียงไว้ ส่วนการเลื่อนความถี่เป็นการเลื่อนสเปกตรัมของเสียงเท่านั้น ซึ่งการเลื่อนระดับเสียงจะทำให้ระยะเวลาเมื่อระดับเสียงเพิ่มขึ้น และเมื่อระดับเสียงลดลงก็จะทำให้มีระยะเวลาเพิ่มขึ้น ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงระดับเสียงจึงมีความเกี่ยวข้องกับการเลื่อนเชิงเวลา (Time Shifting) และการลดทอนและขยาย (Time Scaling)

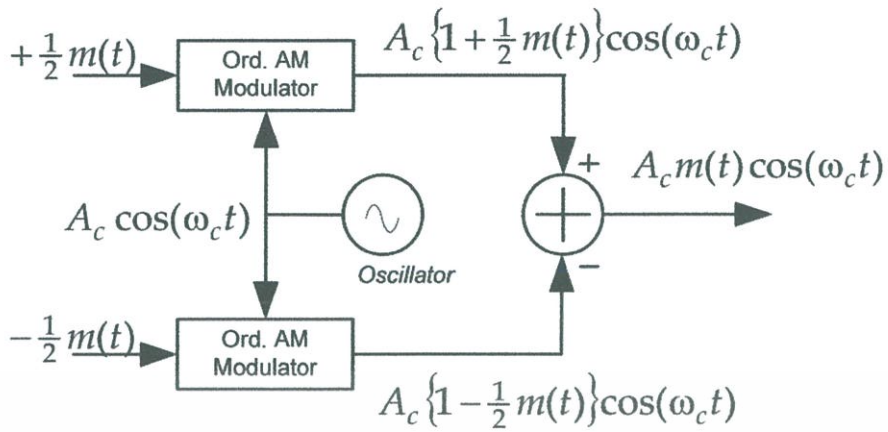
2.3 การแปลงฮิลเบิร์ต (Hilbert Transform)

เมื่อพิจารณาในเชิงความถี่ของสัญญาณมอดูเลต (Modulated Signal) แล้วปรากฏว่าความถี่ของสัญญาณจะมีองค์ประกอบ 3 ส่วนด้วยกัน ได้แก่ ความถี่กลาง (Central Frequency) มีความถี่เท่ากับสัญญาณคลื่นพาห้ และความถี่แถบข้าง (Side band) ซึ่งมีอีกสองความถี่ คือ สัญญาณความถี่ที่สูงกว่าความถี่กลางเป็น $f_c + f_m$ และสัญญาณความถี่ที่ต่ำกว่าความถี่กลางเป็น $f_c - f_m$ โดยองค์ประกอบความถี่แถบข้างด้านที่มีความถี่สูงกว่าความถี่กลางรวมกันทั้งหมดเรียกว่า แถบข้างบน (Upper Sideband : USB) และองค์ประกอบความถี่แถบข้างด้านที่มีความถี่ต่ำกว่าความถี่กลางรวมกันทั้งหมด เรียกว่า แถบข้างล่าง (Lower Sideband : LSB) ซึ่งรูปแบบของการส่งสัญญาณมอดูเลตที่ได้สัญญาณที่มีองค์ประกอบทั้ง 3 ส่วนจะเรียกว่า “การส่งสองสัญญาณแถบข้าง (Double-Sideband : DSB)” แต่สัญญาณมอดูเลตเพียงแถบข้างเดียว ก็สามารถสื่อความหมายของสัญญาณมอดูเลตที่ต้องการส่งได้อย่างครบถ้วน ดังนั้น “การส่งสัญญาณเพียงแถบข้างเดียว (Single-Sideband : SSB)” ก็เพียงพอแล้ว โดยการแปลงสองสัญญาณแถบข้างเป็นสัญญาณแถบข้างเดียวจะใช้ การแปลงฮิลเบิร์ต (Hilbert Transform)

2.3.1 การมอดูเลตสัญญาณแบบสมดุล (Balanced Modulation)

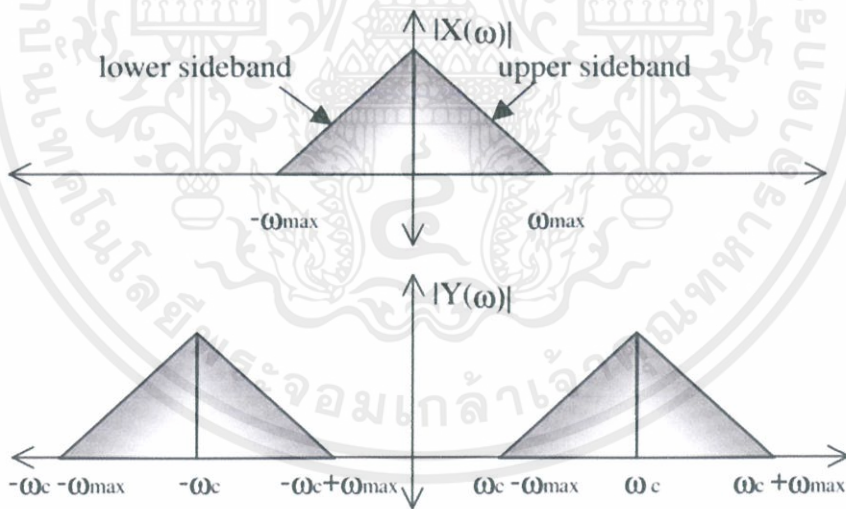
วิธีการนี้จะนำวงจรมอดูเลตสำหรับสัญญาณเอเอ็ม (AM) ธรรมดา 2 ชุดมาประกอบกันโดยใช้คลื่นพาห้เดียวกัน แต่สัญญาณข้อมูลที่ป้อนเข้าวงจรแต่ละส่วนจะกลับเฟสกัน ผลที่ได้จะนำมารวมกันอีกครั้งหนึ่งจะทำให้ส่วนของคลื่นพาห้หักล้างกันไป เหลือแต่ส่วนของแถบทั้งสอง

โดยวงจรมอดูเลตต้องมีลักษณะสมบัติที่เหมือนกันทุกประการ สัญญาณคลื่นพาห้จึงหักล้างกันจนหมด สัญญาณมอดูเลตแล้วที่ได้จึงจะไม่มีส่วนของคลื่นพาห้เหลืออยู่ จึงเป็นที่มาของชื่อวงจรมอดูเลตแบบสมดุล แต่ในความเป็นจริงมักจะมีส่วนของคลื่นพาห้หลงเหลืออยู่บ้าง ความสามารถในการหักล้างคลื่นพาห้นี้จะเรียกว่า Carrier Suppression Ratio คิดจากอัตราส่วนของคลื่นพาห้ที่หลงเหลืออยู่หลังการตัดกับคลื่นพาห้ก่อนการตัด



รูปที่ 2.13 วงจรมอดูเลตสัญญาณแบบสมดุล

ดังนั้น ถ้าสัญญาณ $w(t)$ เป็นคลื่นพาห์ การกระทำของวงจรมอดูเลตสัญญาณแบบสมดุล (Balanced Modulator) ในโดเมนเวลา (Time Domain) และโดเมนความถี่ (Frequency Domain) ดังรูปที่ 2.14 สัญญาณ $x(t)$ ของความถี่แถบข้างบน (USB) และความถี่แถบข้างล่าง (LSB) ถูกเลื่อนความถี่ไปด้วยความถี่ของสัญญาณคลื่นพาห์ ซึ่งในระบบการสื่อสารเรียกสัญญาณมอดูเลตนี้ว่า “สองสัญญาณแถบข้างโดยตัดคลื่นพาห์ (Double-Side Band Suppressed Carrier : DSB-SC)”



รูปที่ 2.14 การมอดูเลตสัญญาณแบบดุลในโดเมนความถี่ (Frequency Domain)

2.3.2 การแปลงฮิลเบิร์ต (Hilbert Transform)

จากสัญญาณมอดูเลต ความถี่ทางด้านบวก (Positive Frequency) และความถี่ทางด้านลบ (Negative Frequency) ของสัญญาณอินพุต $x(t)$ สามารถแยกออกจากกันได้ ด้วยการคำนวณการแปลงสัญญาณด้วยวิธีการแปลงฮิลเบิร์ต (Hilbert Transform) ซึ่งแสดงในโดเมนเวลา (Time Domain) และโดเมนความถี่ (Frequency Domain) กำหนดด้วยสมการที่ (2.23a) และ (2.23b)

$$\hat{x}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t-\tau} d\tau \quad (2.23a)$$

$$\hat{X}(\omega) = -j \operatorname{sgn}(\omega) \cdot X(\omega) \quad (2.23b)$$

$$\operatorname{sgn}(\omega) = \begin{cases} 1, & \omega > 0 \\ 0, & \omega = 0 \\ -1, & \omega < 0 \end{cases}$$

การวิเคราะห์สัญญาณที่ได้มาจาก $x(t)$ หาค่าได้จากสมการที่ 2.24

$$s(t) = x(t) + j\hat{x}(t) \quad (2.24)$$

ดังนั้น การวิเคราะห์สัญญาณนั้นมีประโยชน์ในการใช้เป็นตัวแทนความถี่อีกด้านหนึ่ง เพราะสัญญาณที่วิเคราะห์ได้มานั้นมีแต่ความถี่ด้านบวก ดังสมการที่ (2.25a) – (2.25c)

$$S(\omega) = X(\omega) + j\hat{X}(\omega), \quad (2.25a)$$

$$S(\omega) = X(\omega) + \operatorname{sgn}(\omega) \cdot X(\omega), \quad (2.25b)$$

$$S(\omega) = \begin{cases} 2X(\omega), & \omega \geq 0 \\ 0, & \omega < 0 \end{cases} \quad (2.25c)$$

และสามารถแสดงในรูปแบบเชิงขั้ว (Polar Form) ดังสมการที่ (2.26a) – (2.26c)

$$s(t) = m(t)e^{j\theta(t)}, \quad (2.26a)$$

$$m(t) = \sqrt{x(t)^2 + \hat{x}(t)^2}, \quad (2.26b)$$

$$\theta(t) = \arctan\left(\frac{\hat{x}(t)}{x(t)}\right), \quad (2.26c)$$

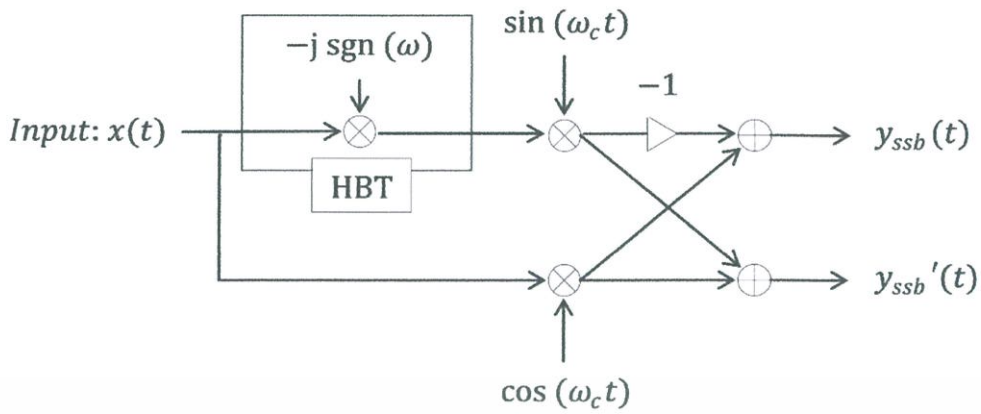
นำสัญญาณที่วิเคราะห์ได้คูณด้วยเอ็กซ์โพเนนเชียลเชิงซ้อน และเลือกสัญญาณในส่วนของเทอมจริง (Real Part) ซึ่งจะประกอบด้วยแถบข้างบน (Upper Sideband) หรือความถี่ด้านบวก (Positive Frequency) ของอินพุต $x(t)$ ที่ถูกเลื่อนไป ดังสมการที่ (2.27a) – (2.27d)

$$y(t) = (x(t) + j\hat{x}(t))e^{\pm j\omega_c t}, \quad (2.27a)$$

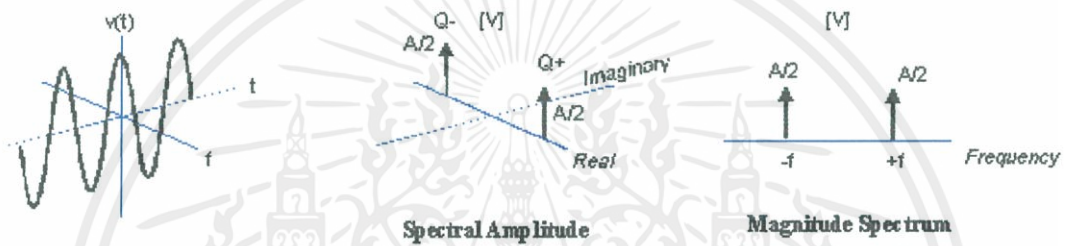
$$y(t)_{ssb} = \operatorname{Re}(y(t)), \quad (2.27b)$$

$$y(t)_{ssb} = x(t) \cdot \cos(\omega_c t) \mp \hat{x}(t) \cdot \sin(\omega_c t), \quad (2.27c)$$

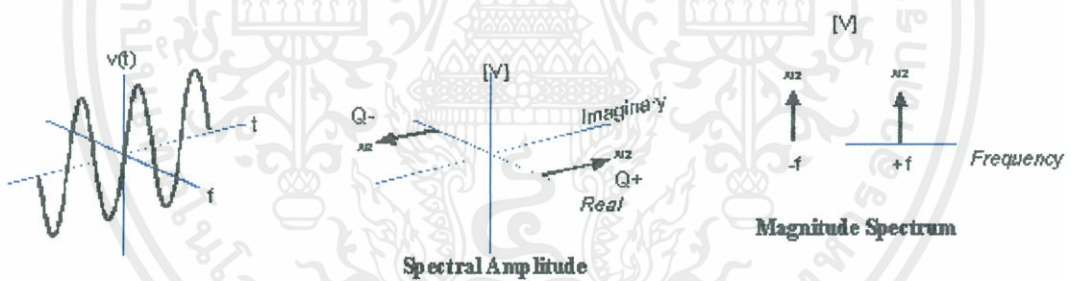
$$y(t)_{ssb} = m(t) \cdot \cos(\theta(t) \pm \omega_c t), \quad (2.27d)$$



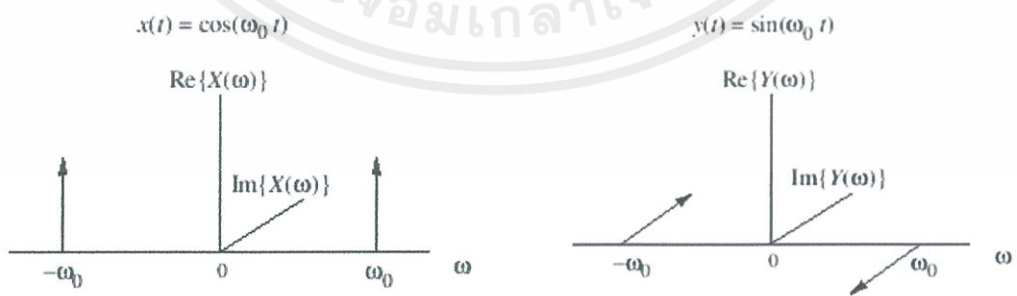
รูปที่ 2.15a บล็อกไดอะแกรมของการแปลงฮิลเบิร์ต



รูปที่ 2.15b คุณสมบัติของการแปลงฮิลเบิร์ตของคลื่นโคไซน์ (Cosine Wave) ในโดเมนเวลา



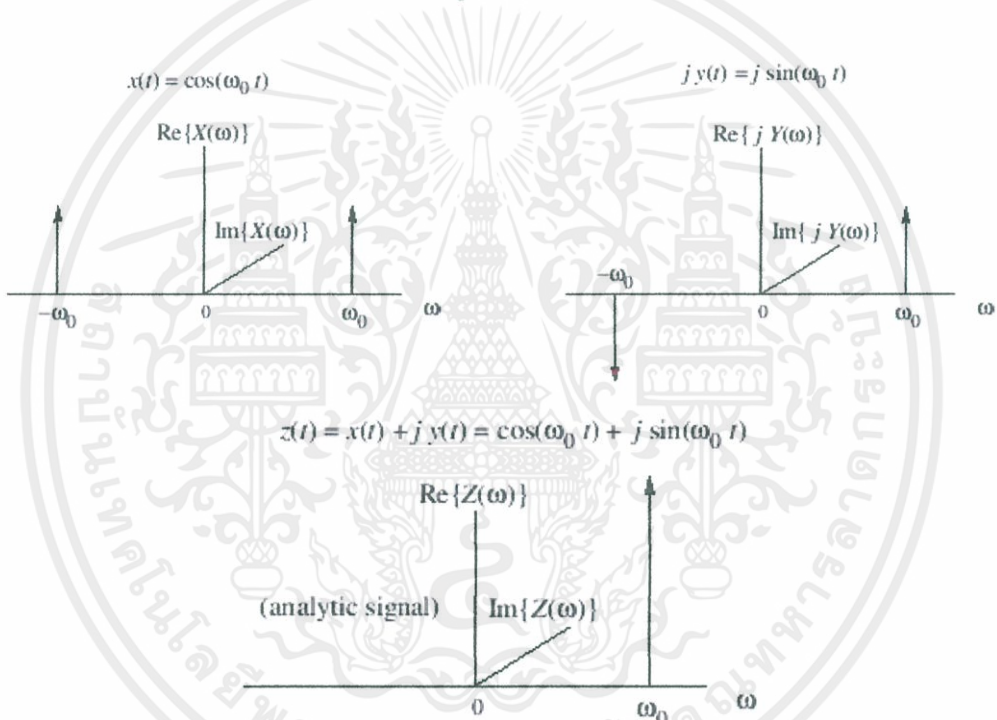
รูปที่ 2.15c คุณสมบัติของการแปลงฮิลเบิร์ตของคลื่นไซน์ (Sine Wave) ในโดเมนเวลา



รูปที่ 2.15d คุณสมบัติของการแปลงฮิลเบิร์ตของคลื่นโคไซน์ และคลื่นไซน์ในโดเมนความถี่

จากสมการที่ (2.27d) แสดงให้เห็นการมอดูเลตสัญญาณแบบแถบข้างเดียว (SSB Modulator) ที่มีการรักษากรอบของสัญญาณ (Envelope) สำหรับความถี่คลื่นพาห์ (Carrier Frequency) ในทางทฤษฎีแล้วจะต้องมีค่าไม่เกิน 2-3 เปรอร์เซ็นต์ของความถี่มูลฐาน (Fundamental Frequency) ของสัญญาณข้อมูล จึงจะได้การมอดูเลตสัญญาณแบบแถบข้างเดียว SSB ที่ใช้วิธีการเลื่อนระดับเสียง (Pitch Shifting) ที่เหมาะสม แต่วิธีการเลื่อนระดับเสียงในทางปฏิบัติ ความถี่คลื่นพาห์จะเพิ่มขึ้นตามความถี่มูลฐานของสัญญาณข้อมูล และองค์ประกอบของความถี่ (Component Frequency) กับฮาร์โมนิกส์ (Harmonic) มีความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนและยุ่งยาก มีผลทำให้ความสัมพันธ์ขององค์ประกอบดังกล่าวไม่สอดคล้องกัน

ดังนั้น การมอดูเลตสัญญาณแบบแถบข้างเดียว SSB ที่ใช้วิธีการเลื่อนความถี่ (Frequency Shifting) จะทำให้ผลของความสัมพันธ์มีความสอดคล้องกัน แสดงในโดเมนเวลา (Time Domain) และโดเมนความถี่ (Frequency Domain) ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 สัญญาณแบบแถบข้างเดียว (Single-Side Band) ในโดเมนเวลา (Time Domain) และโดเมนความถี่ (Frequency Domain)

2.4 การสังเคราะห์เสียงด้วยการมอดูเลชันเชิงความถี่ (Frequency Modulation)

การสังเคราะห์เสียงด้วยกระบวนการมอดูเลชันเชิงความถี่เริ่มต้นเมื่อปี ค.ศ. 1960 โดย John Chowning มหาวิทยาลัย Stanford กระบวนการมอดูเลชันเชิงความถี่มีพื้นฐานมาจากการส่งสัญญาณวิทยุในระบบ FM การทดลองแรกของ John คือ ใช้สัญญาณเสียง (Audio Signal) เป็นมอดูเลเตอร์ (Modulator) ไปควบคุมความถี่และฮาร์โมนิกส์ของความถี่พื้นฐาน (Fundamental Frequency) เพื่อที่จะผลิตเสียงออกมา การทดลองต่อมา เมื่อใช้เสียงที่เป็นสัญญาณความถี่ต่ำ (Low Frequency Signal) หรือเสียงที่หูคนได้ยินที่ความถี่ 20 เฮิรตมาเป็นมอดูเลเตอร์ จะได้เสียงที่มีความถี่เปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ แต่ถ้านำเสียงที่มีความถี่มากกว่า 20 เฮิรตมาเป็นมอดูเลเตอร์ เปรียบเสมือนการเพิ่มสเปกตรัมของความถี่พื้นฐาน

การมอดูเลชันเชิงความถี่ คือ การมอดูเลชันที่ความถี่ของสัญญาณความถี่พื้นฐานและฮาร์โมนิกส์เปลี่ยนแปลงตามขนาดของสัญญาณความถี่เสียง โดยมีรูปสมการทั่วไป ดังนี้

$$X(t) = A \cdot \cos(\theta(t)) \quad (2.28)$$

$$\theta(t) = 2\pi f_c t + I \cdot \sin(2\pi f_m t) \quad (2.29)$$

$$F(t) = \frac{d\theta}{dt} = 2\pi f_c + 2\pi f_m \cdot I \cos(2\pi f_m t) \quad (2.30)$$

เมื่อ $\theta(t)$ = มุมที่เปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง (radian)

$F(t)$ = อัตราการเปลี่ยนแปลงมุมต่อเวลา (rad/sec)

f_c = ความถี่พื้นฐาน (Hz)

f_m = ความถี่มอดูเลชัน (Hz)

π = ค่าคงที่ = 3.142

A = แอมพลิจูดของสัญญาณ (แอมป์)

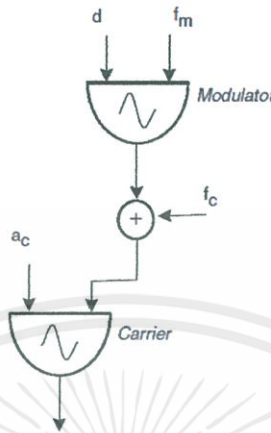
I = อัตราการมอดูเลชัน

เมื่อนำสัญญาณที่ได้จากการมอดูเลชันเชิงความถี่ตามสมการที่ 2.28 มาวิเคราะห์แยกองค์ประกอบสเปกตรัมของสัญญาณจะได้สมการดังนี้

$$\begin{aligned} x(t) &= \sin[\theta(t)] = \sin[2\pi f_c t + I \cdot \sin(2\pi f_m t)] \\ &= J_0(I) \cdot \sin(2\pi f_c t) \\ &\quad + J_1(I) \cdot \sin(2\pi f_c t + 2\pi f_m t) - J_1(I) \cdot \sin(2\pi f_c t - 2\pi f_m t) \\ &\quad + J_2(I) \cdot \sin(2\pi f_c t + 2 * 2\pi f_m t) - J_2(I) \cdot \sin(2\pi f_c t - 2 * 2\pi f_m t) \\ &\quad + J_3(I) \cdot \sin(2\pi f_c t + 3 * 2\pi f_m t) - J_3(I) \cdot \sin(2\pi f_c t - 3 * 2\pi f_m t) \end{aligned}$$

2.4.1 การสร้างสัญญาณ FM อย่างง่าย (Simple FM Generation)

การสร้างสัญญาณ FM อย่างง่ายดังสมการที่ 2.28 นั้น เราสามารถแทนได้ด้วยบล็อกไดอะแกรมย่อยดังรูปที่ 2.17 ซึ่งประกอบด้วยบล็อกย่อย 3 บล็อกดังนี้

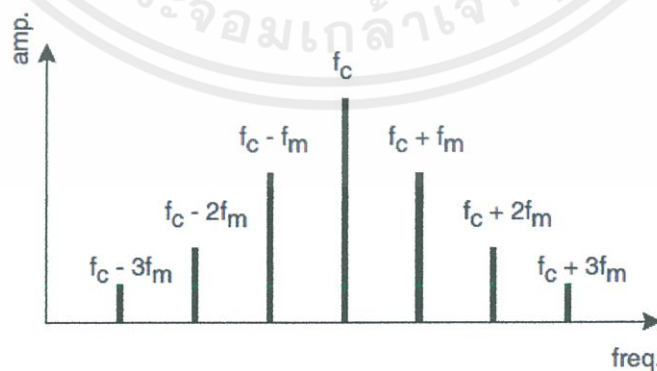


รูปที่ 2.17 บล็อกไดอะแกรมวงจรสร้างสัญญาณ FM อย่างง่าย

บล็อกแรกเป็นมอดูเลเตอร์ ซึ่งจะรับสัญญาณความถี่มอดูเลชันและค่าความถี่เบี่ยงเบนป้อนเข้ามา และให้สัญญาณมอดูเลชันออกมาแล้วจะป้อนเข้าสู่บล็อกที่สอง ซึ่งจะนำสัญญาณมอดูเลชันไปรวมกับสัญญาณความถี่พื้นฐาน ส่งต่อไปยังบล็อกที่สาม คือ แคริเออร์ (Carrier) ที่บล็อกนี้จะรับค่าแอมพลิจูดและสัญญาณที่ออกมาจากบล็อกที่สอง โดยค่าแอมพลิจูดที่ป้อนเข้า คือ แอมพลิจูดของสัญญาณมอดูเลชันเชิงความถี่ คือ $x(t)$ โดยค่าต่างๆอธิบายได้ดังนี้

- d = ความถี่แปรผัน (Frequency Deviation) หรือแอมพลิจูดของมอดูเลเตอร์
- f_m = ความถี่มอดูเลเตอร์ (Modulator Frequency)
- a_c = แอมพลิจูดคลื่นพาห้ (Fundamental Amplitude)
- f_c = ความถี่พื้นฐาน (Fundamental Frequency)

2.4.2 การคำนวณองค์ประกอบของความถี่ฮาร์โมนิกส์ (Frequency of the Partial)



รูปที่ 2.18 ลักษณะการกระจายสเปกตรัมของสัญญาณ FM เมื่อใช้สัญญาณเสียงเพียง 1 สัญญาณ

สเปกตรัมของเสียงที่เกิดจากการมอดูเลชันเชิงความถี่ประกอบด้วย ความถี่คลื่นพาห้คงที่ และจำนวนฮาร์โมนิกส์(Harmonic) ซึ่งห่างกันเท่ากับความถี่มอดูเลเตอร์ (f_m) ในทุกๆฮาร์โมนิกส์ โดยฮาร์โมนิกส์ที่ไม่ใช่ความถี่คลื่นพาห้จะเรียกว่า ความถี่ข้างเคียง (Sideband Frequency) หาได้จากสมการ

$$\text{Sideband Frequency} = f_c \pm k f_m \quad ; k = \text{จำนวนเต็มที่มีมากกว่า } 0$$

ตามทฤษฎีการมอดูเลชันเชิงความถี่มีอัตราการมอดูเลชัน (Modulation Index = 1) ควบคุมจำนวนความถี่ข้างเคียง โดยที่อัตราการมอดูเลชันเป็นอัตราส่วนระหว่างความถี่แปรผันกับความถี่มอดูเลเตอร์ตามสมการ $I = d/m$ โดยที่จำนวนคู่ของความถี่ข้างเคียงเท่ากับอัตราการมอดูเลชันบวกหนึ่ง

2.4.3 การคำนวณแอมพลิจูดของความถี่พาร์เชียล (Amplitude of the Partial)

ในการสังเคราะห์เสียงด้วยวิธีมอดูเลชันเชิงความถี่ โดยปกติแล้วความถี่คลื่นพาห้ (Carrier Frequency : f_c) จะเป็นส่วนสำคัญที่จะระบุระดับเสียง (Pitch) ของเสียงสังเคราะห์ที่จะได้จากกระบวนการสังเคราะห์เสียง วิศวกรเสียง (Sound Engineer) จะเรียกความถี่นี้ว่า ความถี่พื้นฐาน (Fundamental Frequency)

ทั้งนี้ ในการสังเคราะห์เสียงด้วยวิธีการมอดูเลชันเชิงความถี่มีบางกรณีที่มีความถี่คลื่นพาห้ (f_c) ไม่ได้เป็นส่วนหนึ่งที่จะระบุระดับเสียง (Pitch) ได้โดยตรง ซึ่งในการคำนวณนี้จะไม่ได้กล่าวถึง

การคำนวณแอมพลิจูดของความถี่พาร์เชียลจะใช้ฟังก์ชันเบสเซล (Bessel Function) ในการหาค่าสัมประสิทธิ์แอมพลิจูดของแต่ละฮาร์โมนิกส์

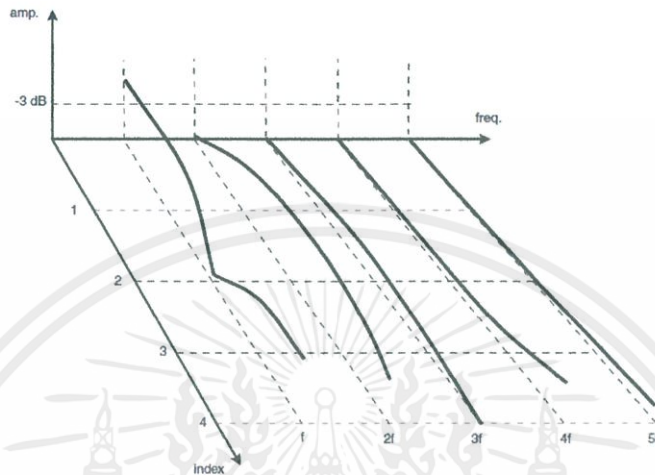
ฟังก์ชันเบสเซลเป็นฟังก์ชันที่แสดงสัมประสิทธิ์แอมพลิจูดของแต่ละฮาร์โมนิกส์ที่เกิดจากการกระจายสเปกตรัมความถี่พื้นฐานออกไปยังความถี่ข้างเคียง (Sideband Frequency of Partial) โดยเป็นไปได้อย่างซ้ำๆและซ้ำๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราการมอดูเลชัน (Modulation Index : I)

โดย	$J_0(I)$	แสดงสัมประสิทธิ์แอมพลิจูดของ f_c
	$J_1(I)$	แสดงสัมประสิทธิ์แอมพลิจูดของ $f_c \pm f_m$
	$J_n(I)$	แสดงสัมประสิทธิ์แอมพลิจูดของ $f_c \pm n f_m$

2.4.4 สเปกตรัมของการสังเคราะห์เมื่อเวลาเปลี่ยนแปลง (Synthesizing Time-Varying Spectra)

ส่วนสำคัญในการสังเคราะห์เสียงอีกส่วนหนึ่ง คือ ความสามารถในการควบคุมองค์ประกอบสเปกตรัมของเสียงให้แปรเปลี่ยนได้ในแต่ละช่วงความยาวเสียง (Duration) ต่อการเล่นเครื่องดนตรีในหนึ่งตัวโน้ต เนื่องจากแอมพลิจูดของพาร์เชียลต่างๆที่กำเนิดจากเครื่องดนตรีหรือคูดิกจะมีลักษณะที่แปรเปลี่ยนไปภายในระยะเวลาความยาวเสียง ซึ่งลักษณะการแปรเปลี่ยนที่แตกต่างกันนี้จะเป็นส่วนหนึ่งที่จะช่วยในการสร้างเอกลักษณ์ของสีสันของเสียง (Timbre) จากเครื่องดนตรีแต่ละชนิดให้แตกต่างกันออกไป

การสังเคราะห์เสียงด้วยวิธีการมอดูเลชันเชิงความถี่มีจุดเด่นกว่าวิธีอื่น คือ สามารถจะปรับพารามิเตอร์เพื่อสร้างเสียงที่มีแอมพลิจูดของพาร์เซียลต่างๆ ให้มีลักษณะแปรเปลี่ยนไปในแต่ละช่วงเวลาของความยาวเสียงได้ โดยการกำหนดอัตราการมอดูเลชัน (Modulation Index) ในแบบกรอบของโทนเสียง (Sound Envelope) ซึ่งมีค่าแปรเปลี่ยนไปในแต่ละระยะเวลา ภายในช่วงความยาวเสียง



รูปที่ 2.19 สเปกตรัมของการสังเคราะห์เมื่อเวลาเปลี่ยนแปลง

2.4.5 อัตราส่วนความถี่การออกแบบเสียง (Frequency Ratio and Sound Design)

ค่าอัตราส่วนที่เป็นพื้นฐานระหว่างตัวแปรในระบบมอดูเลชันเชิงความถี่มี 2 ค่า คือ

1. อัตราการมอดูเลชัน (I) $= \frac{\text{ความถี่แปรผัน } (d)}{\text{ความถี่มอดูเลเตอร์ } (f_m)}$ (2.31)
2. อัตราส่วนความถี่ $= \frac{\text{ความถี่คลื่นพาห์ } (f_c)}{\text{ความถี่มอดูเลเตอร์ } (f_m)}$ (2.32)

โดยอัตราส่วนการมอดูเลชันเป็นค่าที่ควบคุมจำนวนและแอมพลิจูดสเปกตรัมของความถี่ข้างเคียง (Sideband Frequency) อัตราส่วนความถี่เป็นค่าสำคัญในการควบคุมสีสันเสียง อัตราส่วนความถี่จะมีค่าเฉพาะตัวที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์เสียงเครื่องดนตรีแต่ละชนิด ทัวไปเครื่องดนตรีกลุ่มเดียวกันมีค่าอัตราส่วนความถี่เท่ากันหรือใกล้เคียงกัน ถ้าอัตราส่วนความถี่และอัตราการมอดูเลชันคงที่ ขณะที่ความถี่คลื่นพาห์เปลี่ยนแปลงไป เสียงที่สังเคราะห์จะมีการเปลี่ยนระดับเสียง (Pitch) แต่สีสันเสียง (Timbre) จะคงเดิม

พื้นฐานการออกแบบเสียงโดยใช้อัตราส่วนความถี่มี 6 กรณี

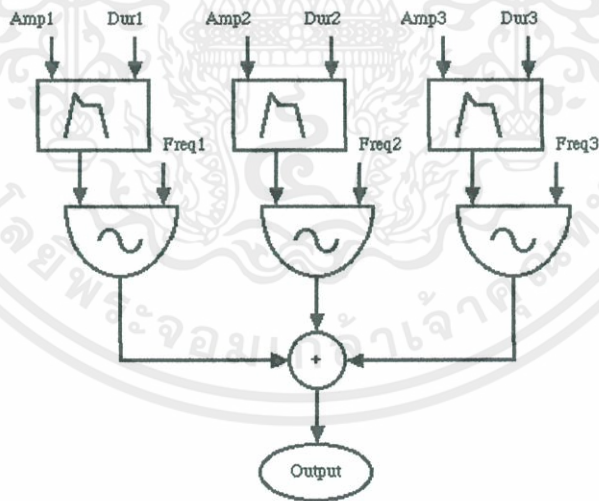
1. ถ้าความถี่คลื่นพาห์เป็นจำนวนเต็มใดๆ และความถี่มอดูเลเตอร์มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง 4 แล้วเสียงที่ออกมาจะเป็นเอกลักษณ์ เพราะความถี่คลื่นพาห์เปลี่ยนตามความถี่มอดูเลเตอร์อย่างเห็นได้ชัด
2. ถ้าความถี่คลื่นพาห์เป็นจำนวนเต็มใดๆ และความถี่มอดูเลเตอร์มีค่ามากกว่า 4 แล้วเสียงที่ออกมาจะมีหลายฮาร์โมนิกส์ แต่ฮาร์โมนิกส์พื้นฐานอาจสังเกตได้ไม่ชัด

3. ถ้าความถี่คลื่นพาห้เป็นจำนวนเต็มใดๆ และความถี่มอดูเลเตอร์มีค่าเท่ากับ 1 แล้วการมอดูเลชันจะได้สเปคตรัมที่ประกอบขึ้นจากหลายฮาร์โมนิกส์ เช่น 1:1 ได้ Sawtooth-Like Wave
4. ถ้าความถี่คลื่นพาห้เป็นจำนวนเต็มใดๆ และความถี่มอดูเลเตอร์มีค่าเป็นจำนวนคู่แล้ว; การมอดูเลชันจะได้สเปคตรัมที่ประกอบด้วยฮาร์โมนิกส์เป็นคู่ เช่น 2:1 ได้ Square-Like Wave
5. ถ้าความถี่คลื่นพาห้เป็นจำนวนใดๆ และความถี่มอดูเลเตอร์มีค่าเท่ากับ 3 แล้วการมอดูเลชันจะได้สเปคตรัมที่มีฮาร์โมนิกส์ที่ 3 หายไป เช่น 3:1 ได้ Narrow Pulse-Like Wave
6. ถ้าความถี่คลื่นพาห้เป็นจำนวนเต็มใดๆ และความถี่มอดูเลเตอร์มีค่าไม่เป็นจำนวนเต็ม แล้วการมอดูเลชันจะได้สเปคตรัมที่ไม่เป็นฮาร์โมนิกส์ (Non-Harmonic) เช่น 2:1:29 ได้เสียงระฆังโลหะ

2.5 การสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคแอดดิทีฟ (Additive Synthesis)

หลักการของการสังเคราะห์เสียงด้วยกระบวนการแอดดิทีฟ คือ กระบวนการที่เรียกว่า Fourier Decomposition หมายถึง การสังเคราะห์สัญญาณความถี่ต่างๆที่เป็นองค์ประกอบของเสียง โดยอาศัยค่าความถี่และแอมพลิจูดที่ได้จากการวิเคราะห์เสียงตัวอย่าง โดยใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณสร้างคลื่นไซน์ (Sine Wave) ที่มีแอมพลิจูดและความถี่ขององค์ประกอบต่างๆ ตามที่ได้จากการวิเคราะห์ห้วงองค์ประกอบสเปคตรัมของเสียง แล้วนำสัญญาณทั้งหมดที่ได้จากเครื่องกำเนิดสัญญาณมารวมกัน

2.5.1 การสร้างวงจรสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคแอดดิทีฟ



รูปที่ 2.20 แสดงวงจรสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคแอดดิทีฟ

ซึ่งผลลัพธ์ของสัญญาณสามารถเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$\omega(t) = \sum_{i=1}^n A_i \sin(\omega_i t) \quad (2.33)$$

$$\omega(t) = A_1 \sin(2\pi f_1 t) + A_2 \sin(2\pi f_2 t) + A_3 \sin(2\pi f_3 t) + \dots + A_n \sin(2\pi f_n t) \quad (2.34)$$

ข้อดีของการสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคแอดดิทีฟ คือ สามารถสังเคราะห์เสียงได้เหมือนกัน แม้ว่าเสียงนั้นจะมีความยืดหยุ่นมากก็ตาม แต่ในขณะที่เดียวกันเทคนิคนี้มีข้อเสียในด้านการวิเคราะห์เสียงตัวอย่างที่จำเป็นต้องใช้ข้อมูลมากพอสมควรเพื่ออธิบายลักษณะของเสียง ดังนั้นอาจไม่เหมาะสมกับเสียงที่มีความซับซ้อนมาก เช่น เสียงจากไวโอลิน เป็นต้น

2.5.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของเสียงดนตรีด้วยเทคนิคแอดดิทีฟ

ในการสังเคราะห์เสียงด้วยวิธีแอดดิทีฟจะต้องทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของเสียงตัวอย่างเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ ดังนี้

ก. **ความถี่ของแต่ละองค์ประกอบ** การวิเคราะห์หาสัญญาณความถี่พื้นฐานมี 2 วิธี คือ

- 1) สัญญาณความถี่พื้นฐาน คือ สัญญาณความถี่ที่ปรากฏตลอดความยาวเสียงในกราฟการกระจายสเปกตรัม 3 มิติบนโปรแกรมแมทแลบ (MATLAB)
- 2) สันนิษฐานตำแหน่งของสัญญาณความถี่พื้นฐานจากลักษณะกระจายพลังงานของสัญญาณความถี่พื้นฐานไปเป็นสัญญาณความถี่ข้างเคียงที่อธิบายได้ด้วยการใช้เบสเซลฟังก์ชัน

โดยการวิเคราะห์หาตำแหน่งสัญญาณความถี่พื้นฐานจะพิจารณาจากทั้งสองวิธีร่วมกัน

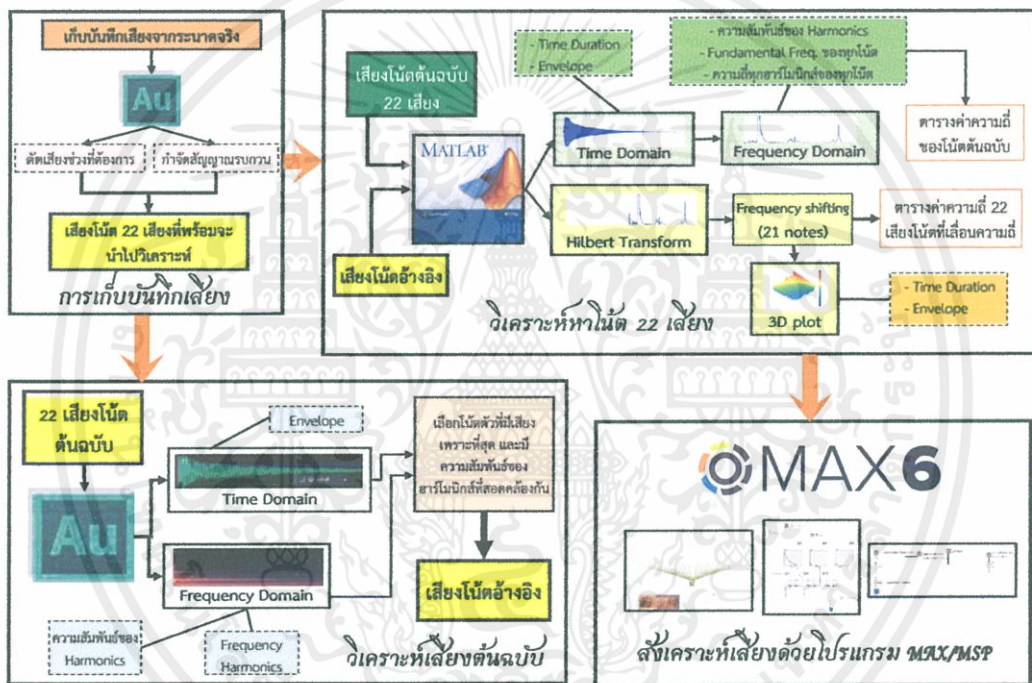
ข. **แอมพลิจูดของแต่ละองค์ประกอบ** จากทฤษฎีดนตรี เครื่องดนตรีเกือบทุกชนิดจะมีกรอบของแอมพลิจูดใกล้เคียงกับกรอบของดัชนีการมอดูเลชัน ดังนั้นสามารถประมาณให้กรอบของแอมพลิจูดมีลักษณะใกล้เคียงกับกรอบของดัชนีการมอดูเลชันได้ เพื่อลดความซับซ้อนในการสังเคราะห์และง่ายต่อการควบคุม

ค. **ความยาวเสียง** สามารถพิจารณาได้จากระยะเวลาที่ต้องใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของเสียงตัวอย่าง

บทที่ 3

การออกแบบการทดลอง

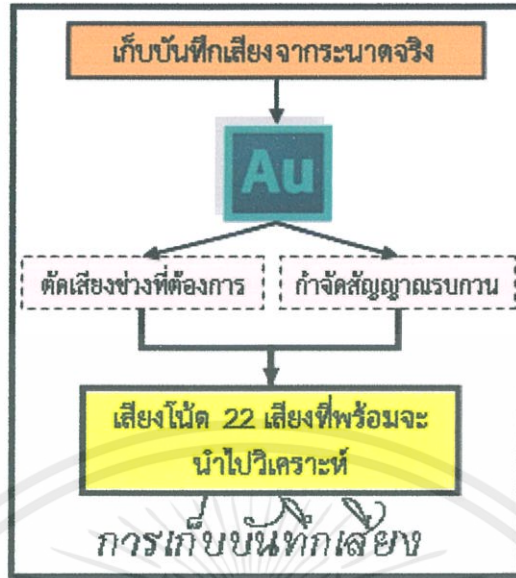
ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการวิเคราะห์เสียงโน้ตของระนาดทั้ง 22 เสียง แล้วเลือกโน้ตเพียง 1 เสียงมาทำการเลื่อนความถี่ที่ความถี่ค่าหนึ่งที่ทำให้ได้เสียงโน้ตอีก 21 เสียง ที่มีเสียงเหมือนกับเสียงจริงจากการเก็บบันทึก โดยจะใช้โปรแกรม Adobe Audition CS6 และโปรแกรม MATLAB ในการเปรียบเทียบเสียงที่ได้จากการเก็บบันทึกกับเสียงที่ได้จากการเลื่อนความถี่ ซึ่งจะพิจารณากรอบของโทนเสียง (Envelope) จากรูปคลื่นของสัญญาณ (Waveform), ความถี่มูลฐาน (Fundamental Frequency) องค์ประกอบแต่ละฮาร์โมนิกส์ และความสัมพันธ์ของฮาร์โมนิกส์ (Harmonics) จากภาพสเปกโตรแกรม (Spectrogram) และกราฟการกระจายสเปกตรัม 3 มิติ



รูปที่ 3.1 การออกแบบขั้นตอนการทดลอง

3.1 การเก็บบันทึกเสียงโน้ตของระนาด (Record)

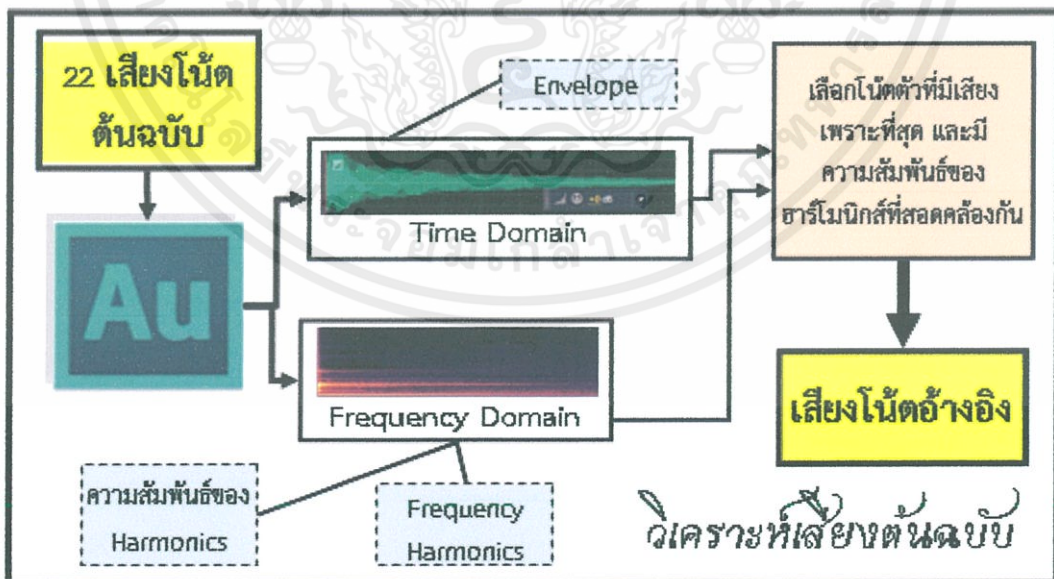
การเริ่มต้นการทดลองนั้นจะเริ่มจากการเก็บบันทึกเสียงโน้ตของระนาดทั้ง 22 เสียง จากนั้นก่อนจะนำไฟล์เสียงของโน้ตทุกไปทำการวิเคราะห์ จะต้องทำการตัดไฟล์เสียงแต่ละโน้ตให้อยู่ในช่วงที่ต้องการ และนำสัญญาณที่ตัดแล้วไปกำจัดสัญญาณรบกวน เพื่อให้ได้รูปคลื่นสัญญาณที่มีความชัดเจน สามารถนำมาวิเคราะห์ได้ง่าย ด้วยโปรแกรม Adobe Audition CS6 ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการเก็บบันทึกเสียงโน้ตของระนาด

3.2 การวิเคราะห์เสียงด้วยโปรแกรม Adobe Audition CS6

เมื่อได้สัญญาณเสียงโน้ตทั้ง 22 เสียงที่ผ่านการกำจัดสัญญาณรบกวนแล้วจะนำสัญญาณทั้งหมดมาวิเคราะห์ลักษณะกรอบของโทนเสียงจากรูปคลื่นของสัญญาณ (Waveform), ดุค่าความถี่มูลฐาน (Fundamental Frequency) องค์กรประกอบฮาร์โมนิกส์ และความสัมพันธ์ของฮาร์โมนิกส์ (Harmonics) สำหรับสัญญาณเสียงแต่ละโน้ต



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์เสียงโน้ตของระนาดที่เก็บบันทึก

ในขั้นตอนนี้จะวิเคราะห์สัญญาณเสียงโน้ตทั้ง 22 เสียง เพื่อที่จะเลือกเสียงโน้ตมา 1 เสียง โดยเสียงโน้ตที่เลือกมานั้นเป็นเสียงที่มีความไพเราะมากที่สุด และมีความสัมพันธ์ของฮาร์โมนิกส์ที่สอดคล้องกัน ซึ่งความถี่ของเสียงโน้ตที่เลือกมาจะเป็นค่าความถี่อ้างอิง (Reference Frequency) สำหรับนำไปหาความถี่ของเสียงโน้ตอีก 21 เสียง ด้วยกระบวนการทางคณิตศาสตร์

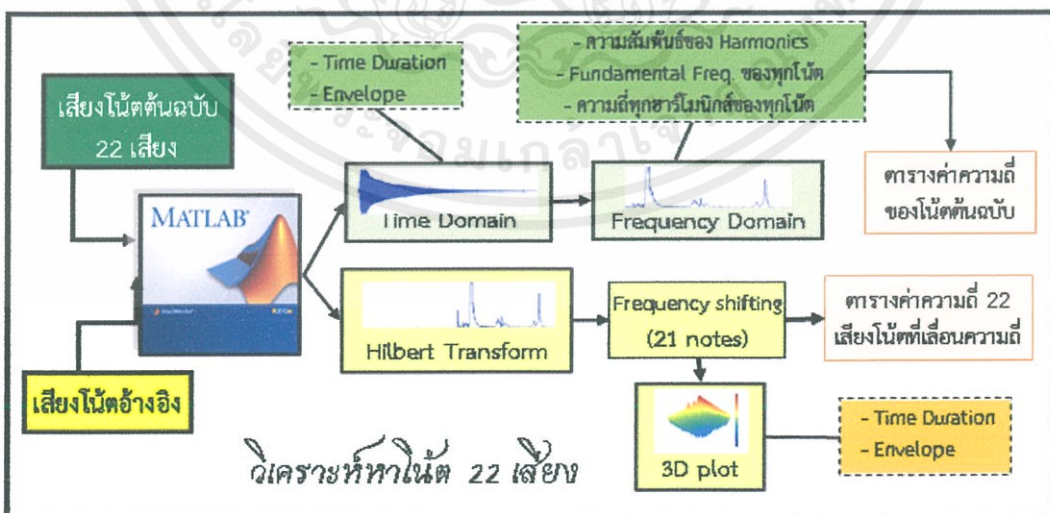


รูปที่ 3.4 แสดงรูปคลื่นของสัญญาณเสียง (Waveform)



รูปที่ 3.5 แสดงสเปกโตรแกรมของสัญญาณเสียง

3.3 การวิเคราะห์เสียงด้วยโปรแกรม MATLAB



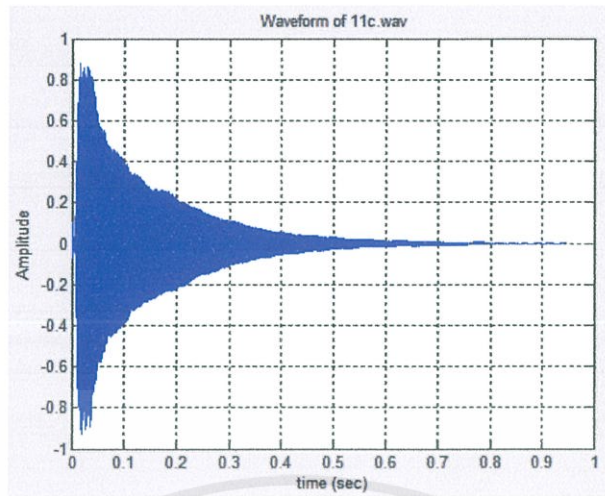
รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการวิเคราะห์หาเสียงโน้ต 21 เสียงจากเสียงโน้ตอ้างอิง

3.3.1 วิเคราะห์หาองค์ประกอบของเสียง

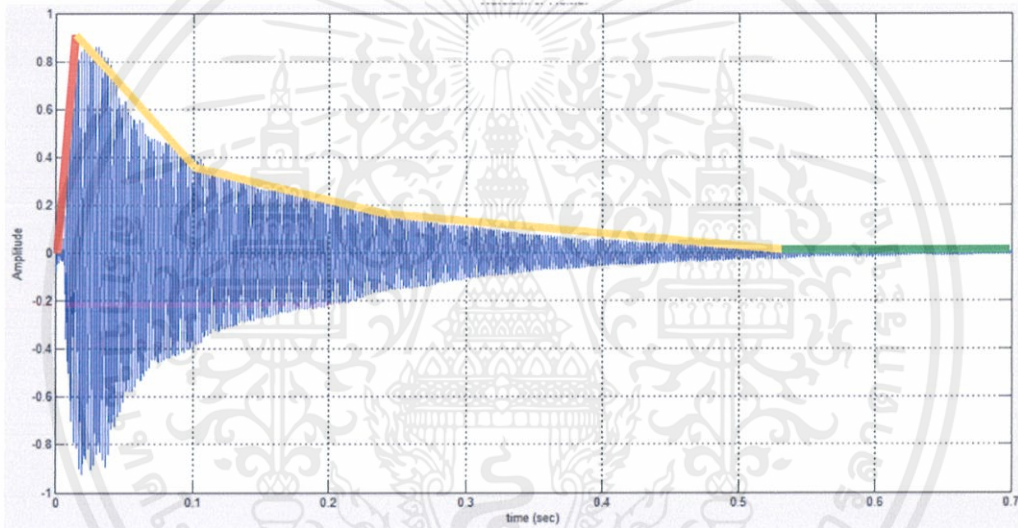
ในขั้นตอนนี้จะนำเสียงโน้ตทั้ง 22 เสียง มาวิเคราะห์ลักษณะกรอบของโทนเสียงจากรูปคลื่นของสัญญาณ (Waveform), ค่าความถี่มูลฐาน (Fundamental Frequency) องค์ประกอบฮาร์โมนิกส์ และความสัมพันธ์ของฮาร์โมนิกส์ (Harmonics) ที่มีความละเอียดและชัดเจนยิ่งขึ้นด้วยโปรแกรม MATLAB ทำให้ได้ค่าความถี่ของเสียงโน้ตที่เก็บบันทึก ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าความถี่ของเสียงโน้ตระนาดเอก 22 เสียงที่ได้จากเสียงต้นฉบับ

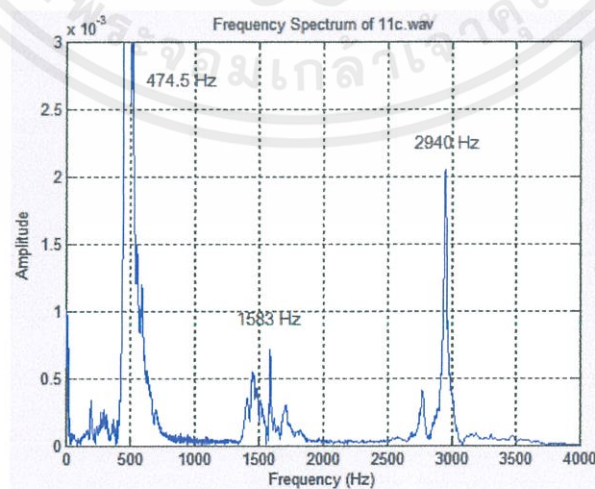
ลูกที่	โน้ต	ความถี่มูลฐาน (Hz)	ฮาร์โมนิกส์ที่ 2 (Hz)	ฮาร์โมนิกส์ที่ 3 (Hz)
1	ซอล	175	934	2342
2	ลา	188.4	971.7	2353
3	ที	209.9	1042	2471
4	โด	236.9	1139	2490
5	เร	266.5	1179	2522
6	มี	293.4	1249	2600
7	ฟา	320.3	1319	2622
8	ซอล	347.2	1362	2716
9	ลา	382.2	1424	2799
10	ที	433.4	1494	2810
11	โด	473.7	1583	2939
12	เร	524.9	1736	3125
13	มี	573.3	1779	3233
14	ฟา	670.2	1876	3375
15	ซอล	707.9	1978	3531
16	ลา	772.5	2110	3709
17	ที	850.6	2226	3548
18	โด	944.8	2336	4107
19	เร	1044	2541	-
20	มี	1163	2772	-
21	ฟา	1287	3004	5076
22	ซอล	1392	3227	5405



รูปที่ 3.7 แสดงรูปคลื่นของสัญญาณเสียงต้นฉบับ (Waveform) ที่ใช้โปรแกรม MATLAB



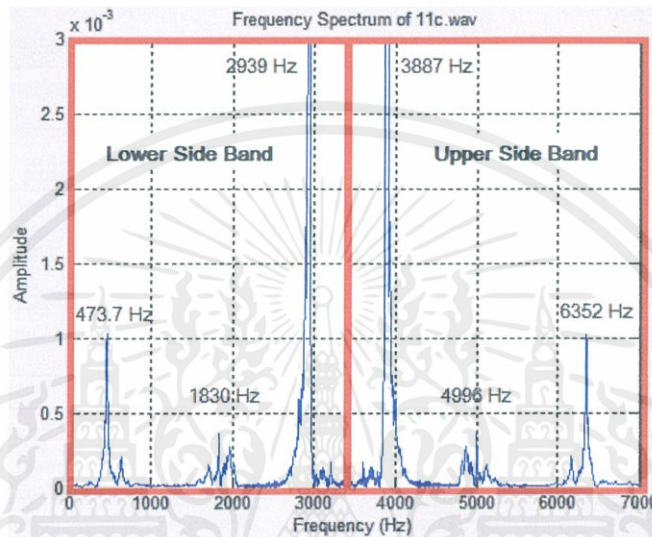
รูปที่ 3.8 แสดงกรอบของโทนเสียงต้นฉบับ (Envelope)



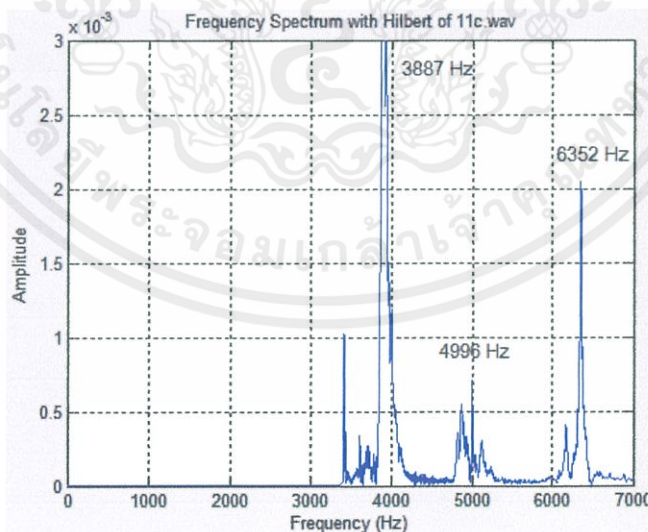
รูปที่ 3.9 แสดงกราฟสเปกตรัม (Spectrum) ของสัญญาณเสียงที่ใช้โปรแกรม MATLAB

3.3.2 การเลื่อนความถี่และการแปลงฮิลเบิร์ต

เมื่อได้ค่าความถี่ และความสัมพันธ์ของฮาร์โมนิกส์ของทุกเสียงแล้ว จะนำทฤษฎีการแปลงฮิลเบิร์ต (Hilbert Transform) เข้ามาช่วยในการกรองความถี่ของเสียงโน้ตอ้างอิง (ในที่นี้เสียงโน้ตโด ลูกที่ 11 ความถี่มูลฐาน 473.7 Hz. เป็นเสียงโน้ตอ้างอิง) จากสัญญาณเบสแบนด์ (Baseband) คือ มีสองแถบสัญญาณ (Double-Side Band) เหลือเพียงสัญญาณแถบด้านบน (Upper-Side Band) เท่านั้น ซึ่งเสียงที่ผ่านการแปลงฮิลเบิร์ตนั้นจะทำให้ได้ลักษณะของฮาร์โมนิกส์ และได้เสียงที่ไม่ผิดเพี้ยน หรือที่เรียกว่า เสียงบอด



รูปที่ 3.10 แสดงสเปกตรัมของความถี่ที่เลื่อนด้วยความถี่ $f_c = 3412.7$ Hz แต่ไม่ผ่าน Hilbert Transform



รูปที่ 3.11 แสดงสเปกตรัมของความถี่ที่เลื่อนด้วยความถี่ $f_c = 3412.7$ Hz และผ่าน Hilbert Transform

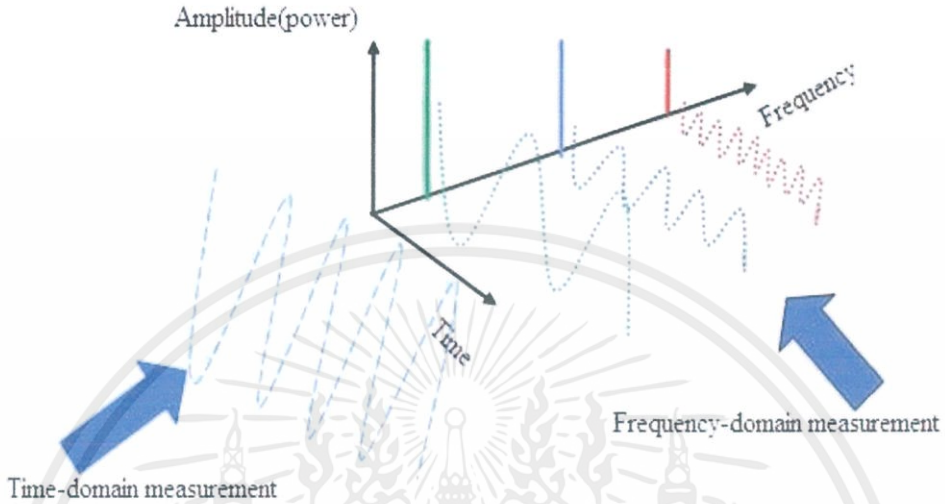
จากนั้นจึงนำความถี่มูลฐานของสัญญาณอ้างอิง ที่ผ่านการแปลงฮิลเบิร์ตแล้ว มาทำการหาค่าความถี่ของเสียงโน้ตอีก 21 เสียงที่วิเคราะห์ได้จากเสียงต้นฉบับ โดยการเลื่อนความถี่ (Frequency Shifting) ของทั้ง 3 ฮาร์โมนิกส์ของแต่ละเสียงโน้ต ด้วยความถี่คลื่นพาห้ (Carrier Frequency) ค่าหนึ่ง ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงค่าความถี่ของเสียงโน้ตระนาดเอก 21 เสียงที่ได้จากการเลื่อนความถี่ โดยใช้ความถี่อ้างอิงที่ 473.7 Hz (เสียงโน้ตโด ลูกที่11)

ลูกที่	โน้ต	ความถี่มูลฐาน (Hz)	ความถี่คลื่นพาห้ f_c (Hz)
1	ซอล	175	-298.7
2	ลา	188.4	-285.3
3	ที	209.9	-263.8
4	โด	236.9	-236.8
5	เร	266.5	-207.2
6	มี	293.4	-180.3
7	ฟา	320.3	-153.4
8	ซอล	347.2	-126.5
9	ลา	382.2	-91.5
10	ที	433.4	-40.3
11	โด	473.7	* ความถี่อ้างอิง *
12	เร	524.9	51.2
13	มี	573.3	99.6
14	ฟา	670.2	196.5
15	ซอล	707.9	234.2
16	ลา	772.5	298.8
17	ที	850.6	376.9
18	โด	944.8	471.1
19	เร	1044	570.3
20	มี	1163	689.3
21	ฟา	1287	813.3
22	ซอล	1392	918.3

3.3.3 การวิเคราะห์หากรอบของโทนเสียงด้วยกราฟการกระจายสเปกตรัม 3 มิติ

ในส่วนนี้จะเป็นการศึกษารอบของโทนเสียง (Envelope) เพื่อใช้ในการสังเคราะห์เสียง (Synthesis) ในแต่ละฮาร์โมนิกของเสียง ซึ่งจำเป็นต้องพิจารณาจากกราฟการกระจายสเปกตรัม 3 มิติ โดยประกอบด้วยแกนของความถี่ (Frequency), เวลา (Time) และแอมพลิจูด (Power) ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 แสดงตัวอย่างกราฟการกระจายสเปกตรัม 3 มิติ

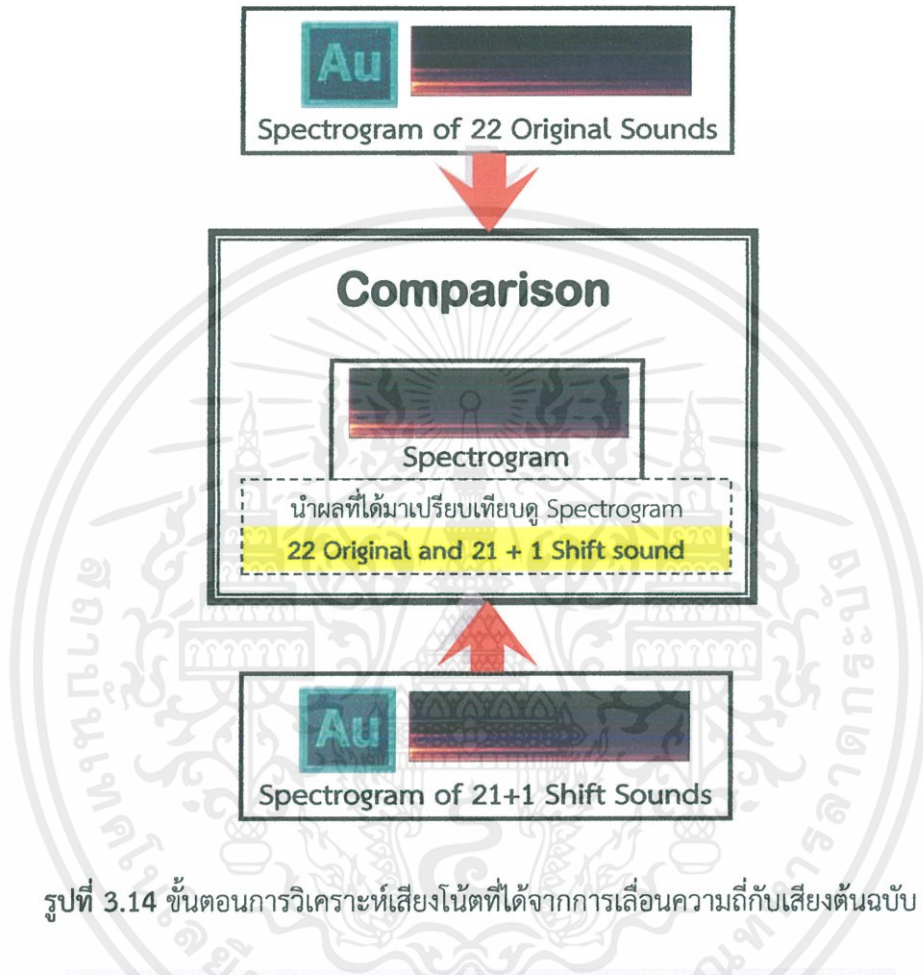
เมื่อนำเสียงอ้างอิงจากที่เลือกมา คือ โน้ตตัวที่ 11 (โด) มาพลอตกราฟการกระจายสเปกตรัม 3 มิติ จะทำให้สามารถเห็นกรอบของโทนเสียงของแต่ละฮาร์โมนิกได้ดังรูปที่ 3.13



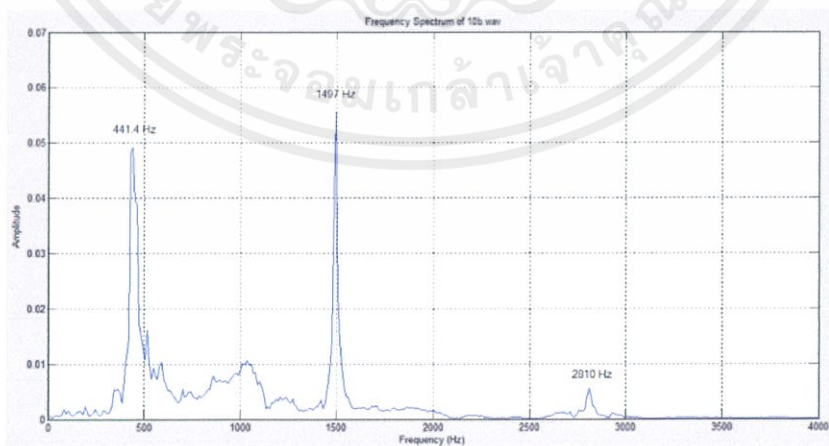
รูปที่ 3.13 แสดงกราฟการกระจายสเปกตรัม 3 มิติของโน้ตตัวที่ 11 (โด)

3.3.4 การวิเคราะห์เสียงโน้ตที่ได้จากการเลื่อนความถี่เทียบกับเสียงโน้ตต้นฉบับ

ในขั้นตอนนี้จะพิจารณาภาพสเปกโตรแกรม (Spectrogram) ของเสียงโน้ตที่ได้จากการเลื่อนความถี่ทั้ง 21 เสียง เทียบกับเสียงโน้ตต้นฉบับที่ได้จากการเก็บบันทึก เพื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของฮาร์โมนิกส์ว่ามีความสอดคล้องกัน และมีลักษณะองค์ประกอบฮาร์โมนิกส์เหมือนกันหรือไม่



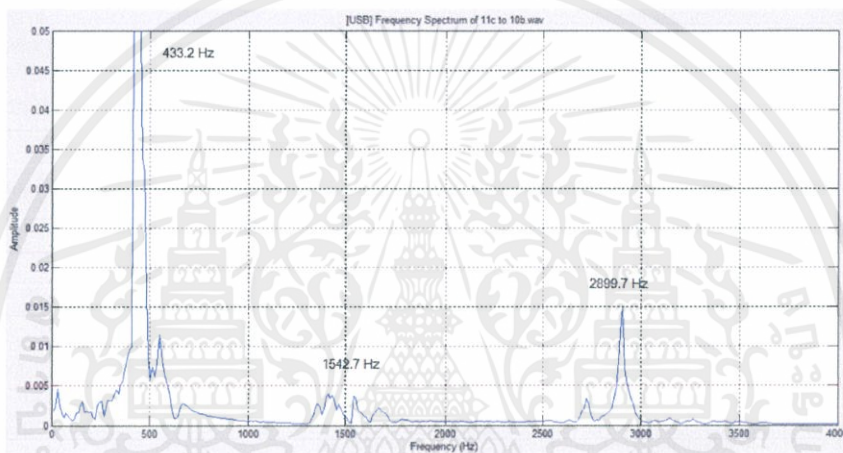
รูปที่ 3.14 ขั้นตอนการวิเคราะห์เสียงโน้ตที่ได้จากการเลื่อนความถี่กับเสียงต้นฉบับ



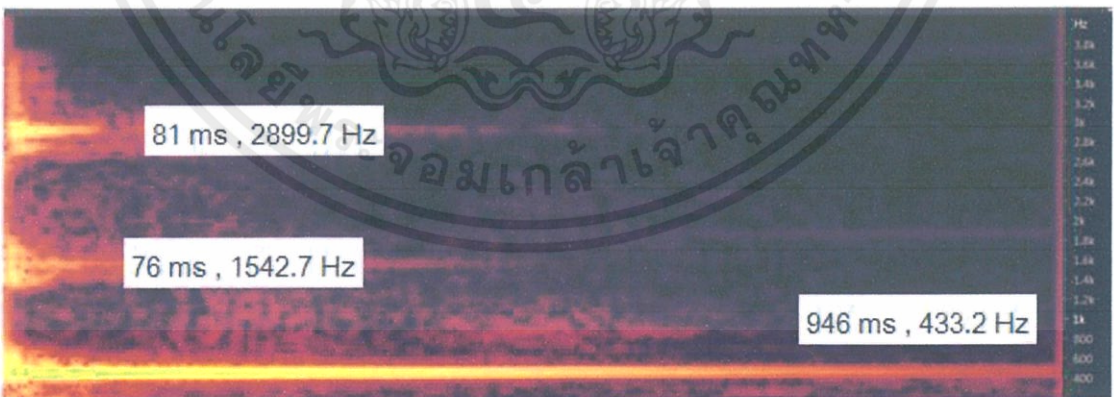
รูปที่ 3.15a สเปกตรัมต้นฉบับของเสียงโน้ตลูกที่10 (เสียงที) จากโปรแกรม MATLAB



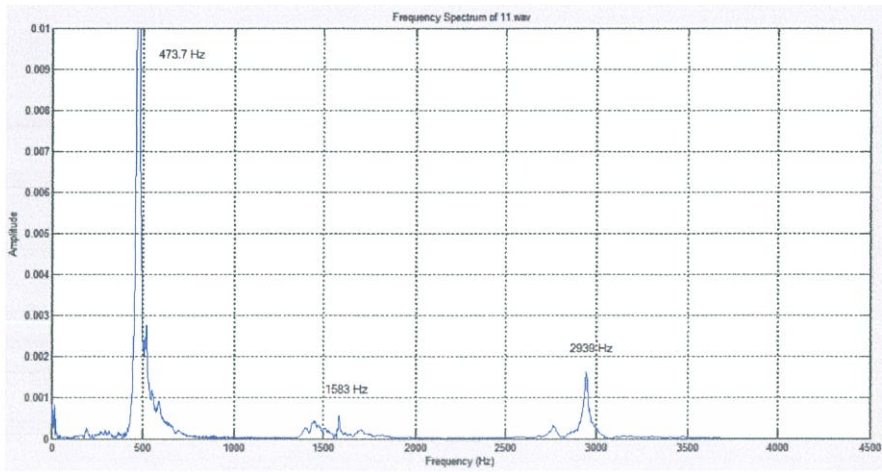
รูปที่ 3.15b สเปกตรัมต้นฉบับของเสียงโน้ตลูกที่10(เสียงที) จากโปรแกรม Adobe Audition CS6



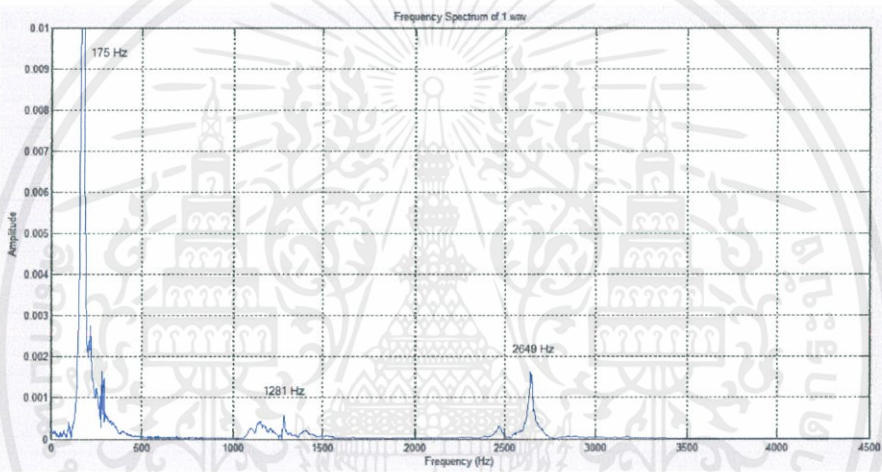
รูปที่ 3.16a สเปกตรัมเสียงโน้ตลูกที่ 10 ที่ความถี่มูลฐานของโน้ต = 433.4 Hz โดยใช้ความถี่สำหรับการเลื่อน $f_c = -40.3$ Hz ด้วยโปรแกรม MATLAB



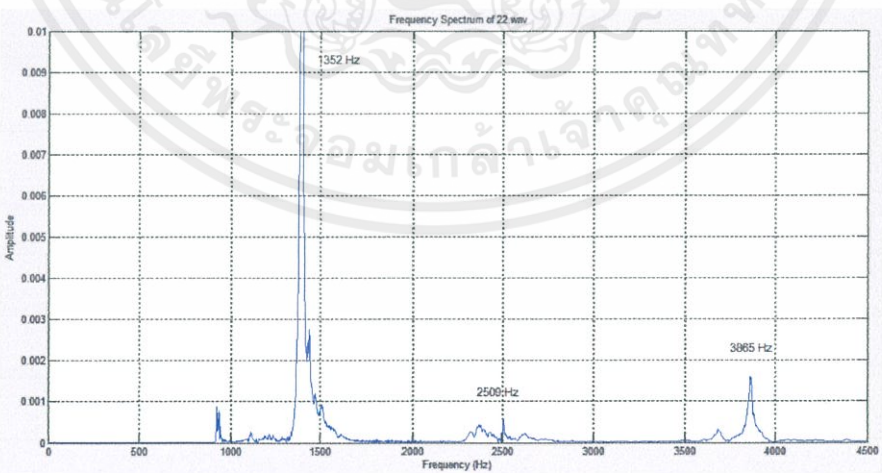
รูปที่ 3.16b สเปกตรัมเสียงโน้ตลูกที่ 10 ที่ความถี่มูลฐานของโน้ต = 433.4 Hz โดยใช้ความถี่สำหรับการเลื่อน $f_c = -40.3$ Hz ด้วยโปรแกรม Adobe Audition CS6



รูปที่ 3.17 สเปกตรัมของเสียงโน้ตอ้างอิง ความถี่ 473.7 Hz



รูปที่ 3.18 สเปกตรัมของเสียงโน้ตที่ถูกเลื่อนไปที่ความถี่ต่ำ 175 Hz



รูปที่ 3.19 สเปกตรัมของเสียงโน้ตที่ถูกเลื่อนไปที่ความถี่สูง 1352 Hz

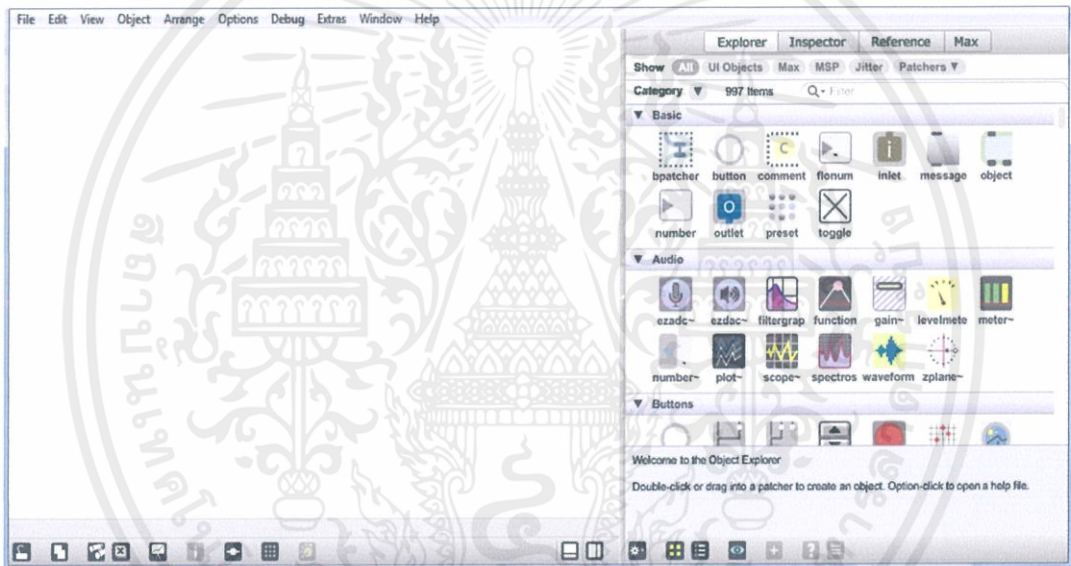
3.4 การสังเคราะห์เสียงด้วยโปรแกรม MAX/MSP

เมื่อได้เสียงโน้ตทั้ง 22 เสียง จากการวิเคราะห์ด้วยการเลื่อนความถี่ และได้ลักษณะของ โทนเสียง(Envelope) จากการพิจารณากราฟการกระจายสเปคตรัม 3 มิติแล้ว เราจะออกแบบการสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคแอดดิทีฟ (Additive Synthesis) โดยใช้โปรแกรมแม็กซ์/เอ็มเอสพี (MAX/MSP)

3.4.1 การใช้งานแม็กซ์/เอ็มเอสพีเบื้องต้น (Basic Usage of MAX/MSP)

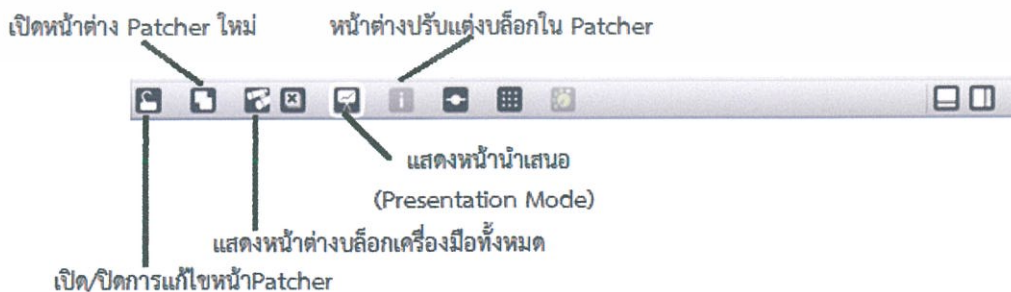
โปรแกรมแม็กซ์/เอ็มเอสพีนั้นจะมีเครื่องมือที่พร้อมให้ใช้งานอย่างสะดวก สามารถแสดง หน้าที่ทำกรเชื่อมต่อบล็อกวงจร หรือแสดงหน้าที่เอาไว้เป็นการนำเสนอที่สวยงามก็ได้ ซึ่งจะมี ส่วนประกอบดังนี้

- หน้าต่างสำหรับต่อบล็อกวงจร (Patcher)



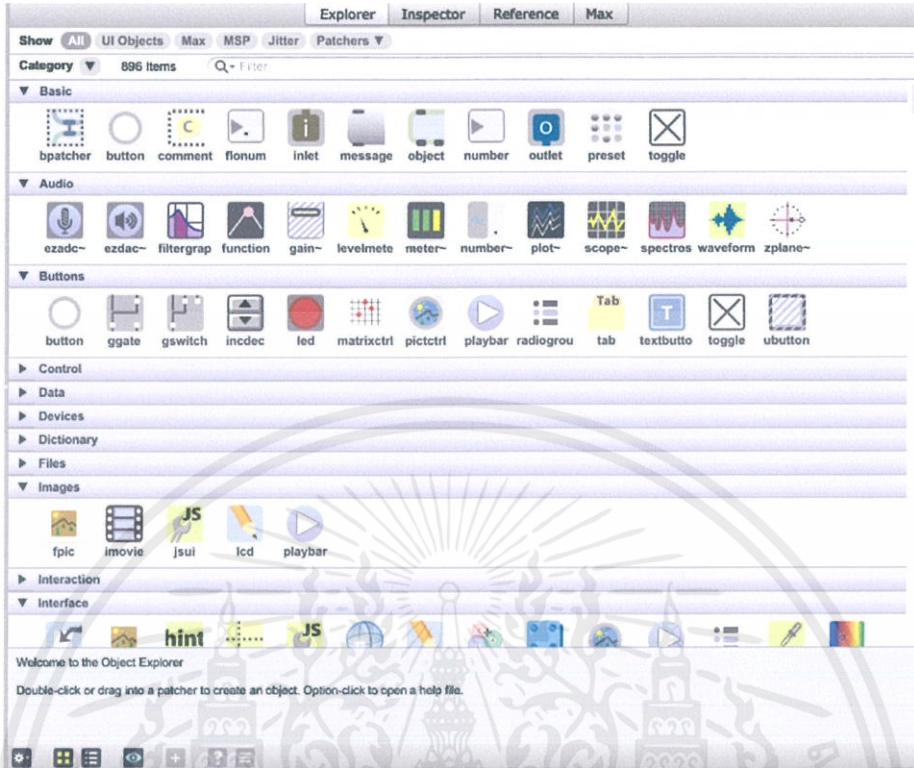
รูปที่ 3.20 หน้าต่างสำหรับต่อบล็อกวงจร

- แถบเครื่องมือบนหน้าต่างสำหรับต่อบล็อกวงจร (Patcher Windows Toolbar)



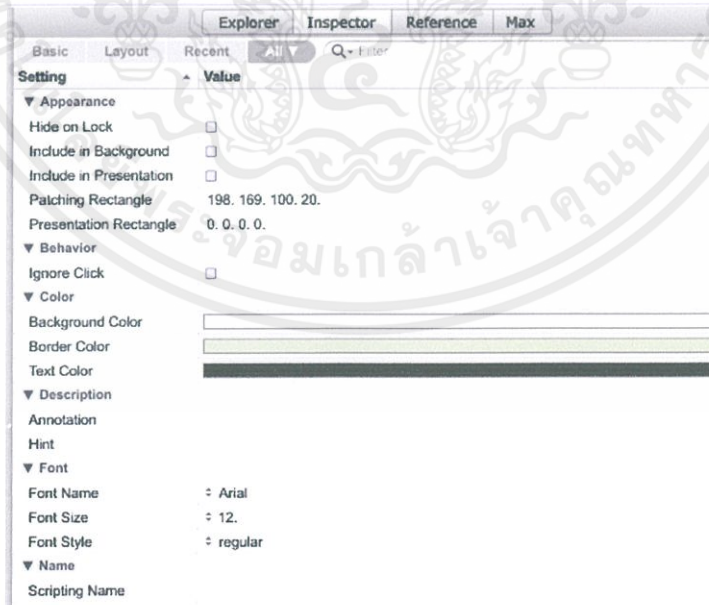
รูปที่ 3.21 แถบเครื่องมือบนหน้าต่างสำหรับต่อบล็อกวงจร

- หน้าต่างเครื่องมือที่นำมาต่อวงจร (Explorer)



รูปที่ 3.22 หน้าต่างเครื่องมือที่นำมาต่อวงจร

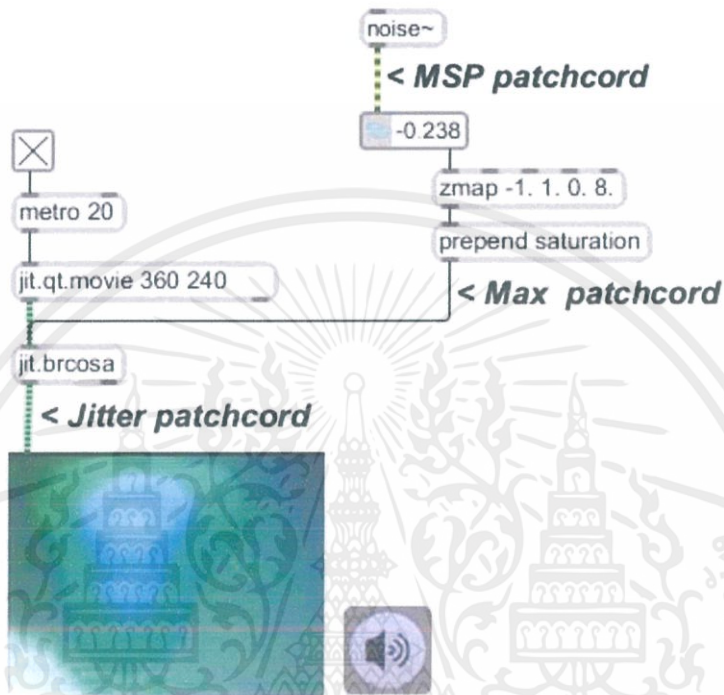
- หน้าต่างปรับแต่งเครื่องมือ (Inspector)



รูปที่ 3.23 หน้าต่างปรับแต่งเครื่องมือ

จากนั้นการเชื่อมต่อระหว่างเครื่องมือต่าง ๆ นั้นจะมีเส้นเชื่อมต่อ หรือ Patch Cords ซึ่งเส้นเชื่อมต่อนี้จะมีลักษณะที่แตกต่างกัน ดังนี้

- Max Patchcord คือ เส้นเชื่อมต่อระหว่าง Max Object
- MSP Patchcord คือ เส้นเชื่อมต่อระหว่าง object กับสัญญาณ signal
- Jitter Patchcord คือ เส้นเชื่อมต่อระหว่าง Jitter Object



รูปที่ 3.24 แสดงรูปแบบของเส้นเชื่อมต่อ (Patch Cords)

ในส่วนของการสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคแอดดีทีฟนั้นจะใช้เครื่องมือและคำสั่งต่างๆ ดังตารางที่ 3.3 และตารางที่ 3.4

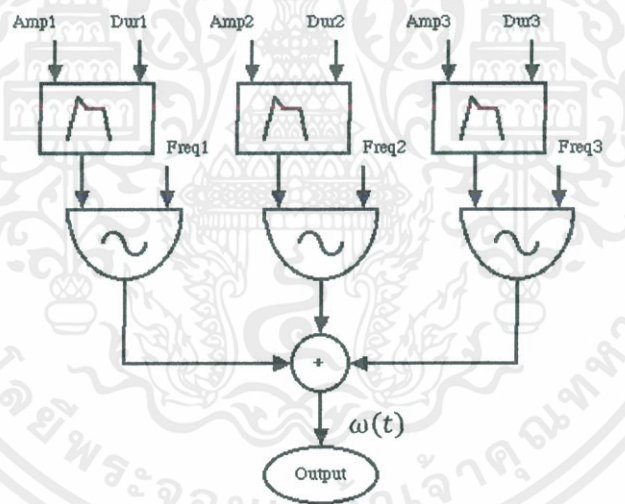
ตารางที่ 3.3 แสดงเครื่องมือภายในโปรแกรมแมกซ์/เอ็มเอสพี (MAX/MSP) ที่ใช้ในการออกแบบการสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคแอดดิทีฟ (Additive Synthesis)

ชื่อเครื่องมือ	สัญลักษณ์	ภาพเครื่องมือ	ลักษณะการทำงาน
Object Box	 object		ขึ้นอยู่กับคำสั่งที่กำหนดใส่ให้ หรืออาจเลือกใช้งานได้ตามรูปแบบที่โปรแกรมมีเตรียมไว้ให้แล้ว
Message Box	 message		ใช้สำหรับแสดง ส่ง หรือกำหนดค่าต่างๆ
Comment	 comment		แสดงคำอธิบาย
Number Box	 number		แสดงค่าหรือป้อนค่าแบบปรับได้ในรูปของจำนวนเต็ม
Float Box	 flonum		แสดงค่าหรือป้อนค่าแบบปรับได้ในรูปของทศนิยม
Audio Output	 ezdac~		ส่งเสียงออก(ลำโพง)
Toggle	 toggle		ปิด / เปิด
Bang	 button		แสดงผลตามที่ได้รับค่ามาจากการส่งค่าของวงจร
Inlet	 inlet		รับค่าจากวงจรภายนอกที่มีการเชื่อมต่อกับวงจรภายใน
Outlet	 outlet		ส่งค่าจากวงจรภายในให้แก่วงจรภายนอกที่เชื่อมต่อกัน
Function	 function		สร้างกราฟจากการกำหนดจุดด้วยตัวผู้ใช้ได้เอง
Picture File	 fpic		แสดงผลไฟล์ภาพที่นำเข้า

ตารางที่ 3.4 แสดงคำสั่งต่างๆที่กำหนดให้กับเครื่องมือ Object Box

คำสั่ง	ลักษณะการทำงาน
key	รับค่าแอสกีจากคีย์บอร์ด
sfrecord~	เก็บบันทึกเสียงที่ได้จากบล็อกรวบรวมที่สร้าง
patcher / partial	สร้างหน้าต่างเชื่อมต่อย่อยที่ซ่อนบล็อกการเชื่อมต่อกับหน้าต่างหลัก
loadbang	ส่งค่าออกให้กับbutton เมื่อวงจรมีการประมวลผล
*~	การคูณสัญญาณ 2 สัญญาณ
*	การคูณเพิ่ม
cycle~	สร้างสัญญาณคลื่นไซน์ (sine wave)
line~	เปลี่ยนค่าสัญญาณจากค่าหนึ่งไปยังอีกค่าหนึ่งตามเวลาที่กำหนด
pass~	กำจัดสัญญาณรบกวน

3.4.2 การออกแบบบล็อกสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคแอดดิทีฟโปรแกรมMAX/MSP

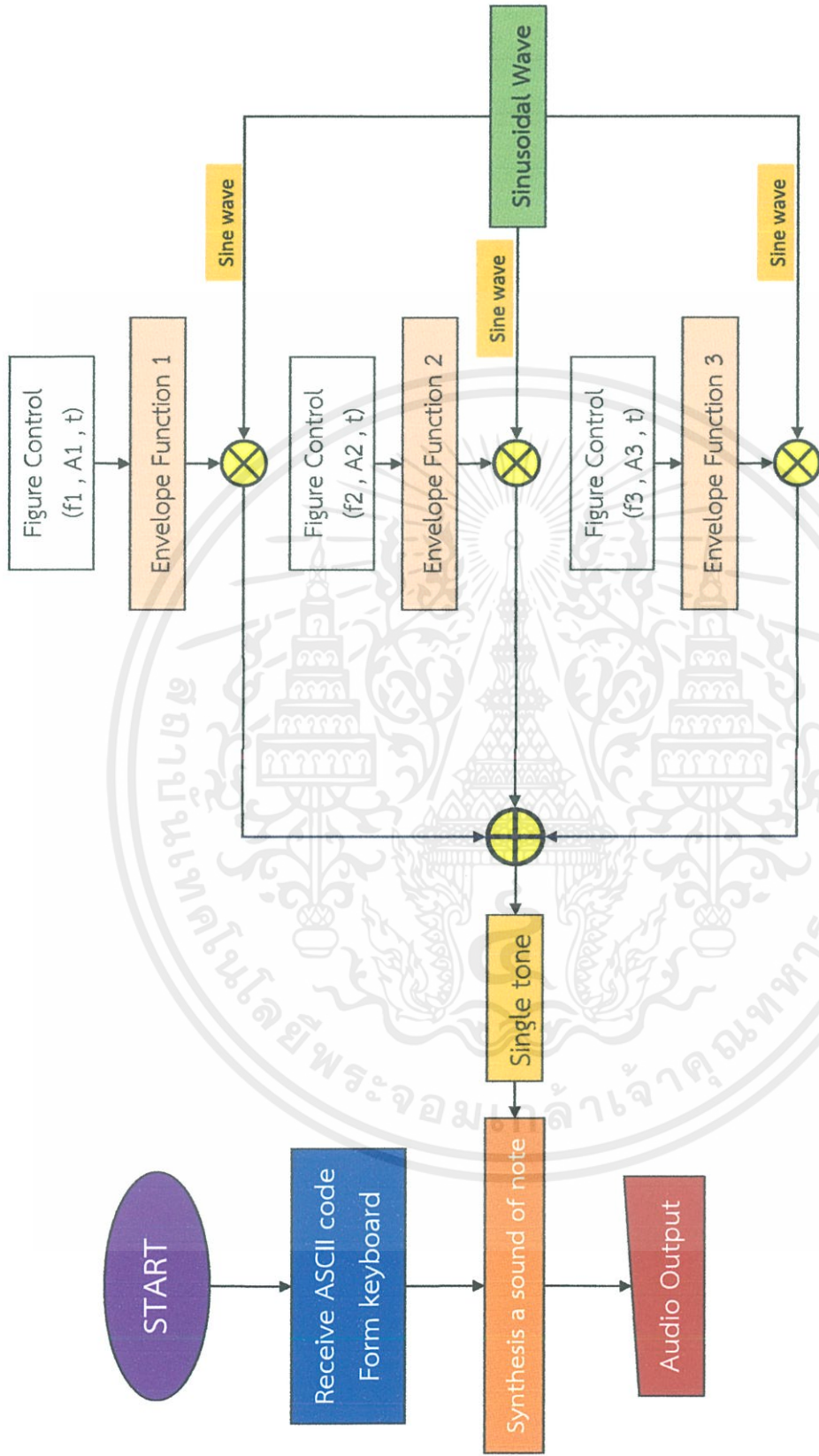


จากวงจรการสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคแอดดิทีฟ ทำให้ได้ผลลัพธ์ของสัญญาณในรูปของสมการ ดังนี้

$$\omega(t) = \sum_{i=1}^n A_i \sin(\omega_i t) \quad (3.1)$$

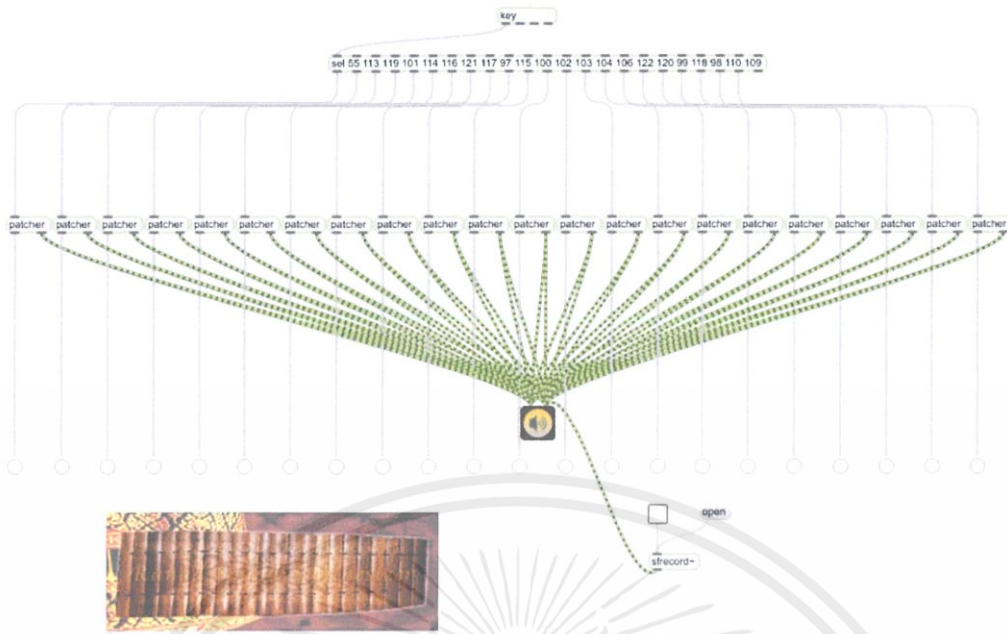
$$\omega(t) = A_1(t) \sin(2\pi f_1 t) + A_2(t) \sin(2\pi f_2 t) + A_3(t) \sin(2\pi f_3 t) \quad (3.2)$$

และจากวงจรข้างต้นกับผลลัพธ์ของสัญญาณในรูปของสมการนั้นสามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมการทำงานของบล็อกสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคแอดดิทีฟได้ดังรูปที่ 3.25 แล้วนำไปสร้างวงจรบนโปรแกรมแม็กซ์/เอ็มเอสพีได้ดังรูปที่ 3.26



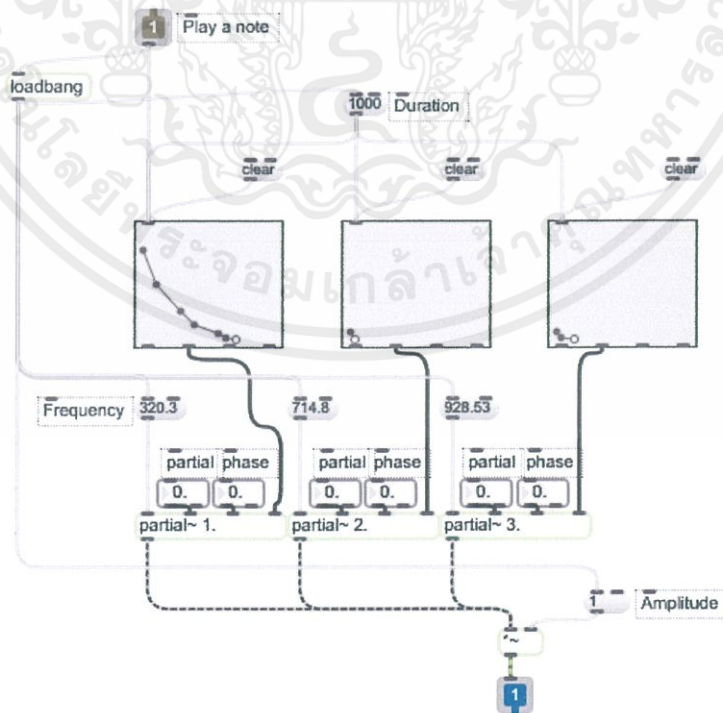
รูปที่ 3.25 แสดงบล็อกโต้ตอบแกรมการทำงานการสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคแอดดีทีฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



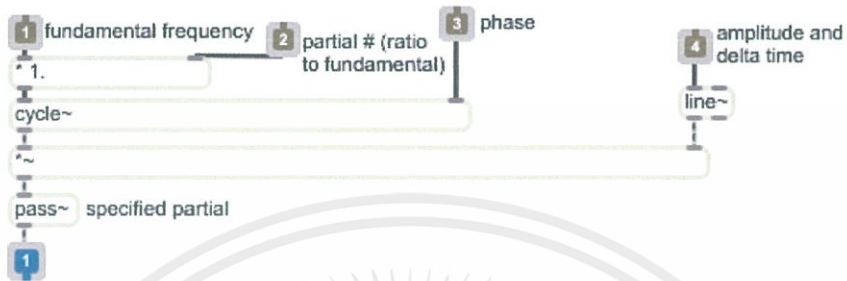
รูปที่ 3.26 แสดงหน้าบล็อกการเชื่อมต่อหลักภายในโปรแกรม MAX/MSP

จากรูปที่ 3.26 แสดงหน้าการเชื่อมต่อหลักของบล็อกการสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคแอดดีทีฟ มีการรับค่าจากคีย์บอร์ดด้วยบล็อกคำสั่งคีย์ (key) ที่กำหนดเป็นรหัสแอสกี (ASCII) ไว้ แล้วส่งค่าเข้าสู่จรรยาแอดดีทีฟ และแสดงผลออกทางลำโพง อีกทั้งยังสามารถเก็บบันทึกเสียงด้วยบล็อกคำสั่ง srecord~ ซึ่งวงจรรวการสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคแอดดีทีฟนั้นจะซ่อนอยู่ภายในหน้าการเชื่อมต่อย่อย (subpatcher) ดังรูปที่ 3.27



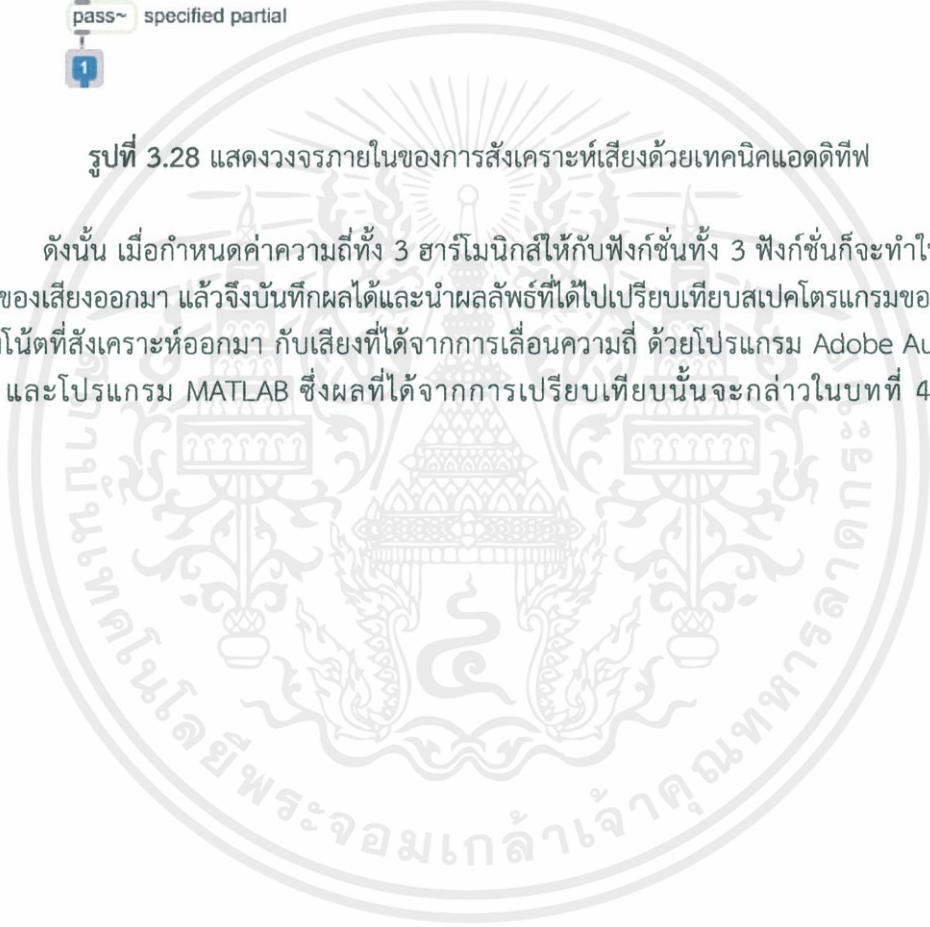
รูปที่ 3.27 แสดงหน้าบล็อกการเชื่อมต่อย่อยของวงจรร (sub patcher)

การทำงานของหน้าการเชื่อมต่อย่อยจะสร้างเสียงจากสมการของกราฟที่รวมเข้ากับค่าความถี่ที่แตกต่างกัน จากนั้นจะส่งค่าไปคำนวณในบล็อกการเชื่อมต่อย่อย partial~ ที่สร้างสัญญาณคลื่นขายนี้นิรูปที่ 3.28 จะทำให้ได้สมการการสังเคราะห์เสียงตามเทคนิคแอดดีทีฟแล้วแสดงผลออกเป็นเสียงออกมา ซึ่งกราฟทั้ง 3 จะแทนด้วยกรอบของโทนเสียง (envelope) ของทั้ง 3 ฮาร์โมนิกส์ และค่าความถี่ของแต่ละฮาร์โมนิกส์ก็กำหนดจากค่าความถี่ที่ได้จากตาราง 3.2



รูปที่ 3.28 แสดงวงจรภายในของการสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคแอดดีทีฟ

ดังนั้น เมื่อกำหนดค่าความถี่ทั้ง 3 ฮาร์โมนิกส์ให้กับฟังก์ชันทั้ง 3 ฟังก์ชันก็จะทำให้ได้ผลลัพธ์ของเสียงออกมา แล้วจึงบันทึกผลได้และนำผลลัพธ์ที่ได้ไปเปรียบเทียบสเปกโตรแกรมของแต่ละเสียงโน้ตที่สังเคราะห์ออกมา กับเสียงที่ได้จากการเลื่อนความถี่ ด้วยโปรแกรม Adobe Audition CS6 และโปรแกรม MATLAB ซึ่งผลที่ได้จากการเปรียบเทียบนั้นจะกล่าวในบทที่ 4 ต่อไป



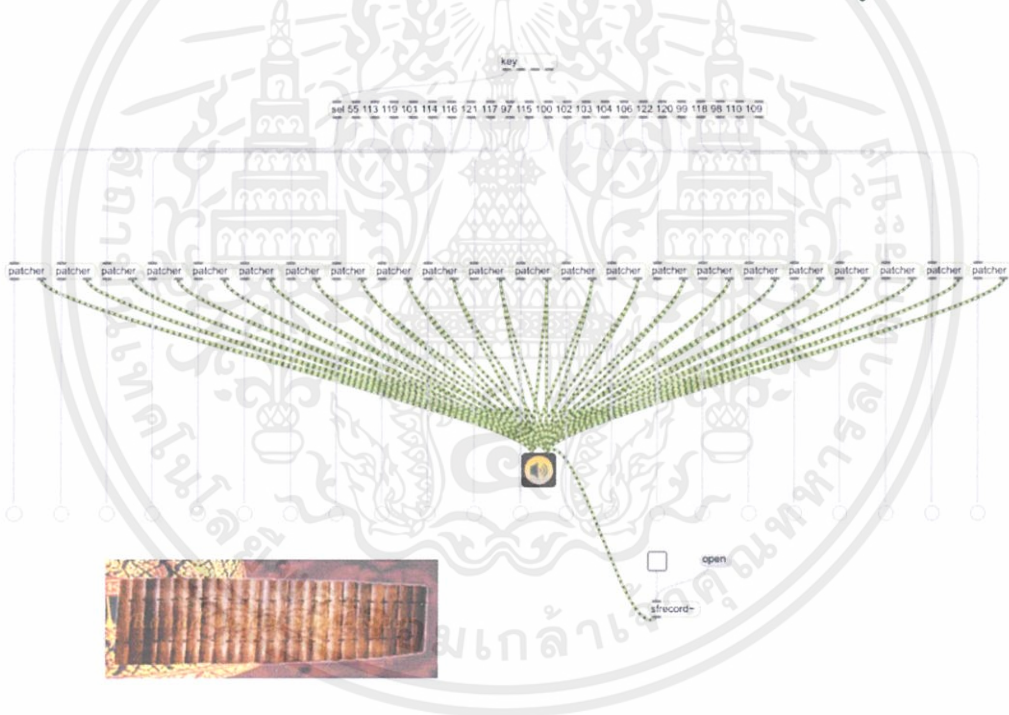
บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงการใช้งานโปรแกรมแม็กซ์/เอ็มเอสพี (MAX/MSP) ในการสังเคราะห์เสียงระนาดด้วยเทคนิคแอดดิทีฟ (Additive Synthesis) จากบล็อกของวงจรที่ได้ออกแบบและกล่าวไว้ในบทที่ 3 แล้ว โดยเมื่อประมาณรูปกรอบของโทนเสียงและกำหนดค่าความถี่ให้กับทั้ง 3 ฟังก์ชันที่อยู่ภายในหน้าต่างการเชื่อมต่อย่อย (Sub patcher) แล้วเล่นแต่ละเสียงด้วยปุ่มบนคีย์บอร์ด ที่เราได้กำหนดให้แสดงผลแต่ละเสียงโน้ตจากการรับค่าเป็นรหัสแอสกี (ASCII) บนคีย์บอร์ด จากนั้นทำการบันทึกเสียงที่ได้แล้วนำไปเปรียบเทียบกับสเปคโตรแกรมด้วยโปรแกรม Adobe Audition CS6 อีกครั้งหนึ่ง

4.1 การใช้งานโปรแกรมสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคแอดดิทีฟบน MAX/MSP

- เปิดหน้าต่างการเชื่อมต่อวงจรสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคแอดดิทีฟดังรูปที่ 4.1

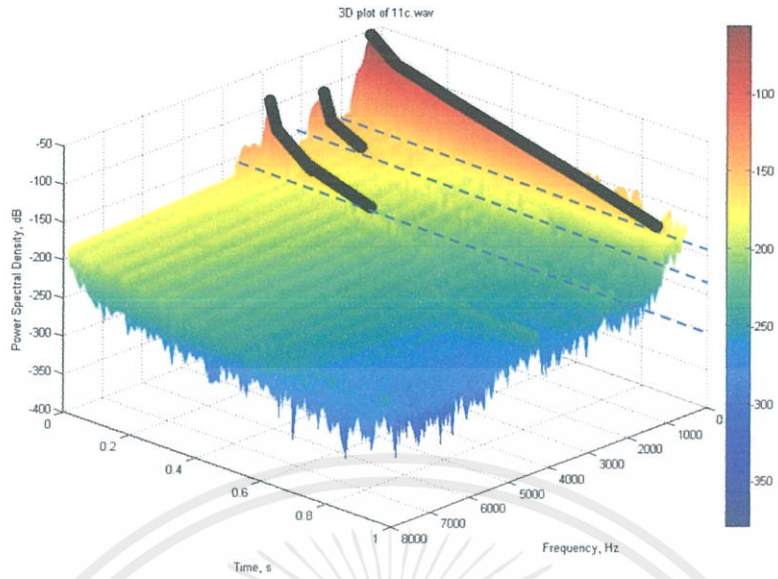


รูปที่ 4.1 หน้าต่างการเชื่อมต่อวงจรสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคแอดดิทีฟ

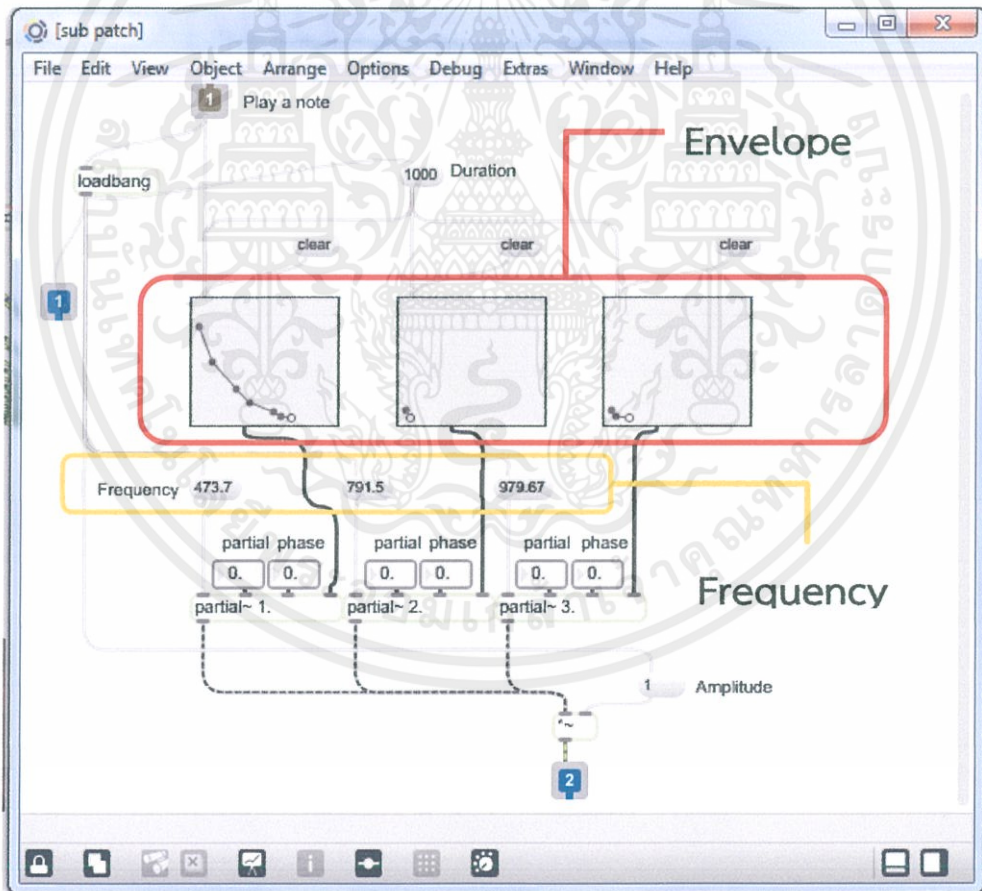
จากนั้นทำการเปิดหน้าต่างการเชื่อมต่อย่อย (sub patcher) เพื่อทำการประมาณกรอบของโทนเสียงให้กับฟังก์ชันทั้ง 3 ฟังก์ชัน โดยดูกรอบของโทนเสียงจากภาพกราฟการกระจายสเปคตรัม 3 มิติ (กรอบฟังก์ชันซ้ายสุดแทนด้วยกรอบของโทนเสียงความถี่มูลฐาน, ความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่ 2 และความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่ 3 ตามลำดับ) และกำหนดค่าความถี่ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยการเลื่อนความถี่ตามตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ตารางค่าความถี่ของเสียงโน้ตระนาดที่ได้จากการเลื่อนความถี่จากเสียงโน้ตอ้างอิง

ลูกที่	โน้ต	ความถี่มูลฐาน (Hz)	ฮาร์โมนิกส์ที่ 2 (Hz)	ฮาร์โมนิกส์ที่ 3 (Hz)
1	ซอล	175	1284.3	2640.3
2	ลา	188.4	1297.7	2653.7
3	ที	209.9	1319.2	2675.2
4	โด	236.9	1346.2	2702.2
5	เร	266.5	1375.8	2731.8
6	มี	293.4	1402.7	2758.7
7	ฟา	320.3	1429.6	2785.6
8	ซอล	347.2	1456.5	2812.5
9	ลา	382.2	1491.5	2847.5
10	ที	433.4	1542.7	2898.7
11	โด	473.7	1583	2939
12	เร	524.9	1634.2	2990.2
13	มี	573.3	1682.6	3038.6
14	ฟา	670.2	1779.5	3135.5
15	ซอล	707.9	1817.2	3173.2
16	ลา	772.5	1881.8	3237.8
17	ที	850.6	1959.9	3315.9
18	โด	944.8	2054.1	3410.1
19	เร	1044	2153.3	3509.3
20	มี	1163	2272.3	3628.3
21	ฟา	1287	2396.3	3752.3
22	ซอล	1392	2501.3	3857.3

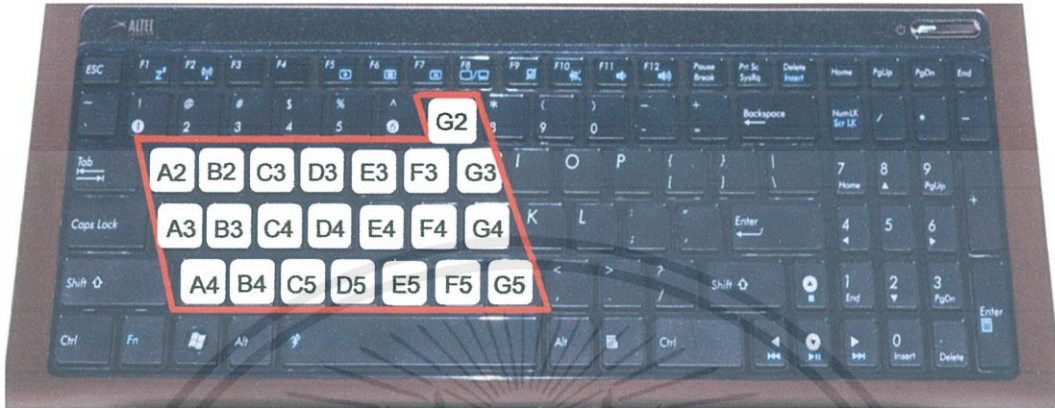


รูปที่ 4.2 ลักษณะกรอบของโทนเสียงของเสียงโน้ตลูกที่ 11 เสียงโด (C4)



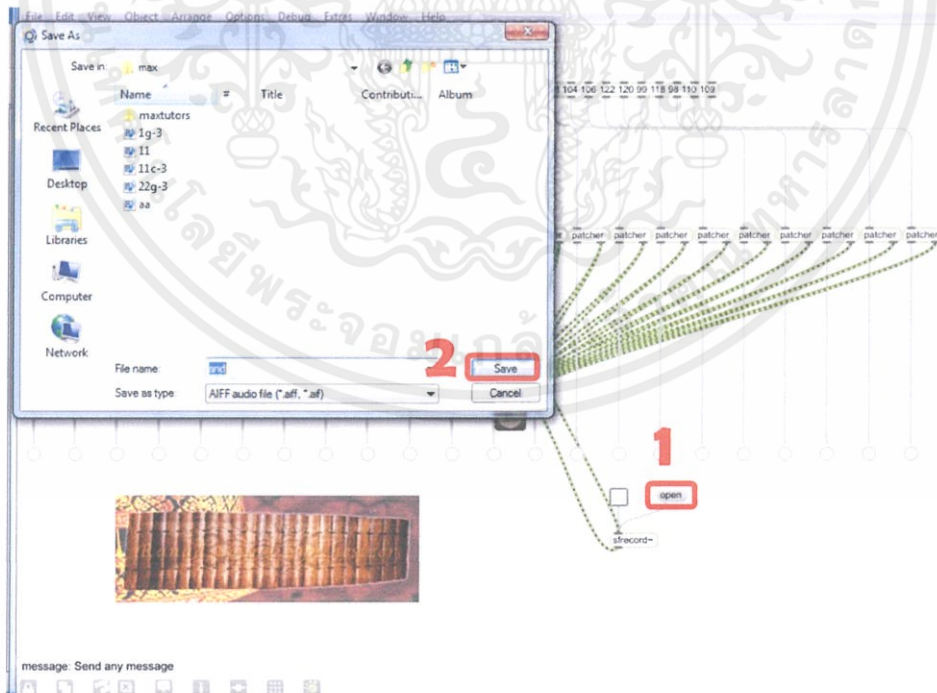
รูปที่ 4.3 หน้าต่างการเชื่อมต่อย่อย (sub patcher) ที่กำหนดค่าความถี่และกรอบของโทนเสียงของโน้ตลูกที่ 11 เสียงโด (C4)

ต่อจากนั้นกลับไปหน้าจอการเชื่อมต่อหลัก (patcher) กดปุ่มเปิดเสียงลำโพง แล้วกดปุ่มบนคีย์บอร์ดตามที่เราได้กำหนดค่าแอสกี (ASCII) ไว้ ว่าปุ่มไหนได้เสียงอะไร ดังรูปที่ 4.4 ค่าแอสกีของแต่ละปุ่มบนคีย์บอร์ดนั้นหาได้จากบล็อกคำสั่ง key ที่ได้อธิบายไว้ในตารางการใช้งาน เครื่องมือ และคำสั่งในบทที่ 3 แล้ว



รูปที่ 4.4 แสดงปุ่มบนคีย์บอร์ดที่แทนเสียงแต่ละโน้ตสำหรับผู้ใช้

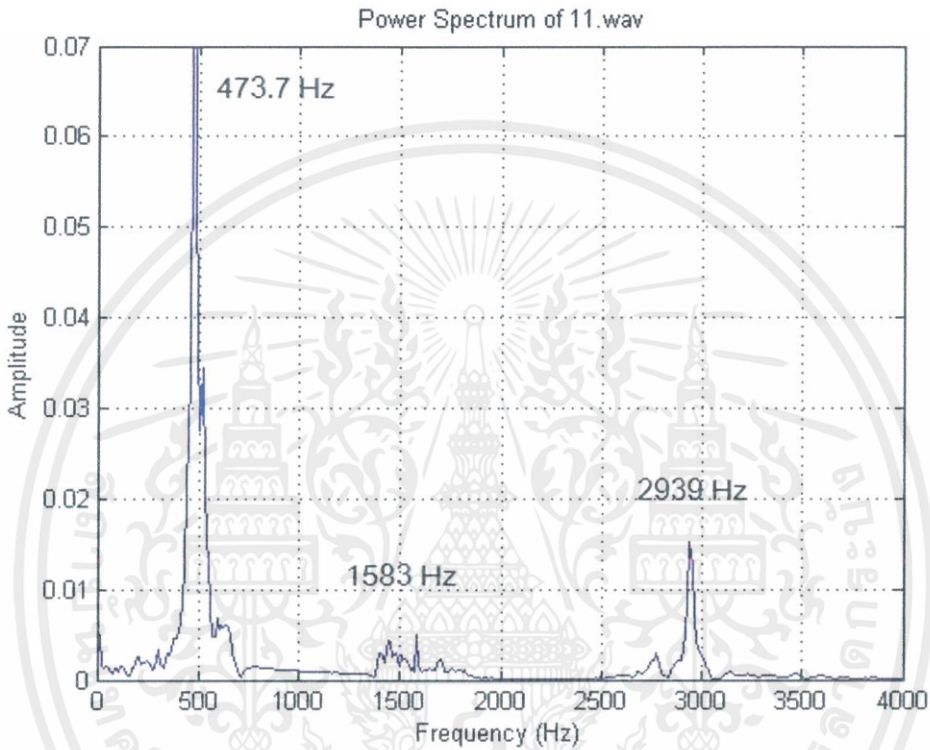
สุดท้ายในส่วนของการใช้งานโปรแกรม ขณะที่ทำการเล่นเสียงโน้ตระนาดผู้ใช้สามารถจัดเก็บบันทึกเสียงโน้ตไว้ได้อีกด้วย ง่ายต่อการที่จะนำออกมาวิเคราะห์หาความผิดพลาด หรือสามารถจัดเก็บไฟล์เพื่อเล่นให้ผู้อื่นฟังได้โดยง่าย แสดงขั้นตอนการจัดเก็บดังรูปที่ 4.5



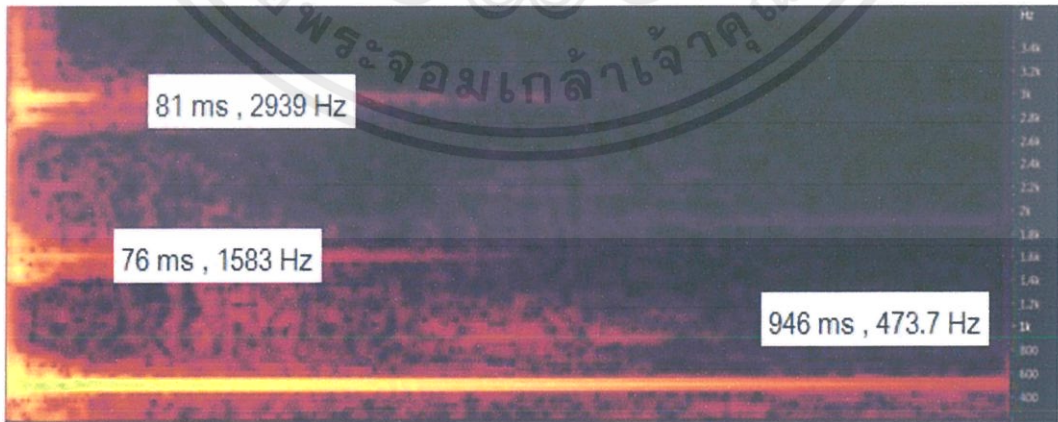
รูปที่ 4.5 แสดงขั้นตอนการจัดเก็บเสียงบนหน้าบล็อกเชื่อมต่อวงจร

4.2 ผลการใช้งานวงจรสังเคราะห์เสียงด้วยเทคนิคแอดดิทีฟบน MAX/MSP

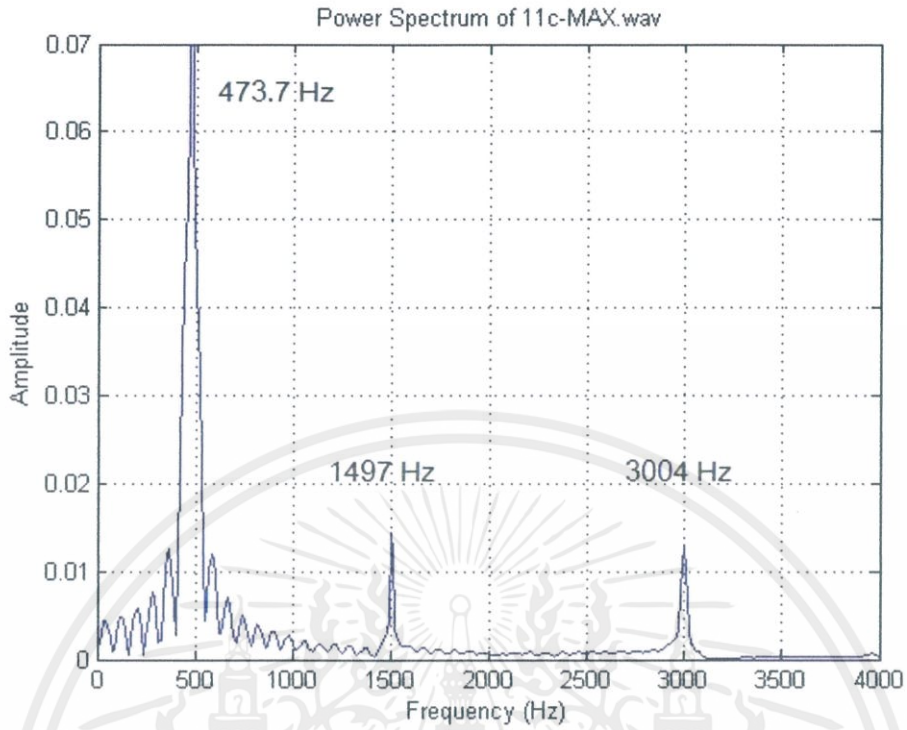
เมื่อทำการบันทึกเสียงโน้ตทั้ง 22 เสียงจากการสังเคราะห์บนโปรแกรม MAX/MSP แล้วจึงนำเสียงที่ได้มาทำการวิเคราะห์อีกครั้งหนึ่งกับเสียงโน้ตที่ได้จากการเลื่อนความถี่ไป เพื่อเปรียบเทียบว่าเสียงสังเคราะห์ที่ได้มานั้น มีความสัมพันธ์ของฮาร์โมนิกส์ที่เป็นอัตราส่วนต่อกันและมีลักษณะของฮาร์โมนิกส์ที่เหมือนกันในทุกโน้ต ดังผลของเสียงโน้ตลูกที่ 11 เสียงโด (C4)



รูปที่ 4.6a สเปกตรัมเสียงโน้ตลูกที่ 11 เสียงโด (C4) ที่ได้จากการเลื่อนความถี่



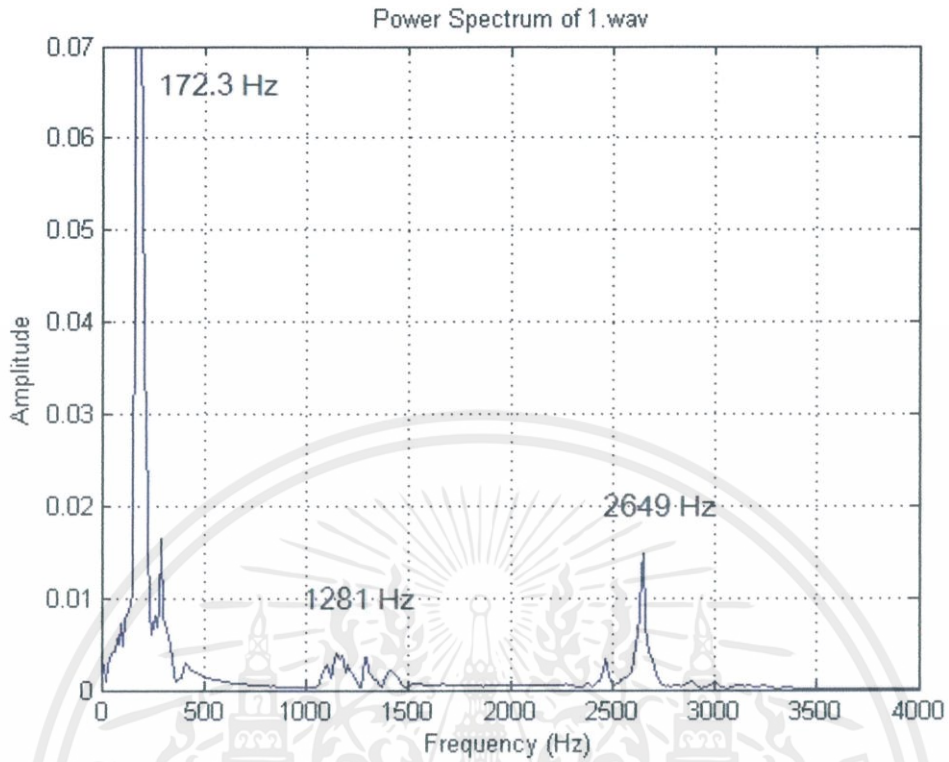
รูปที่ 4.6b สเปกโตรแกรมเสียงโน้ตลูกที่ 11 เสียงโด (C4) ที่ได้จากการเลื่อนความถี่



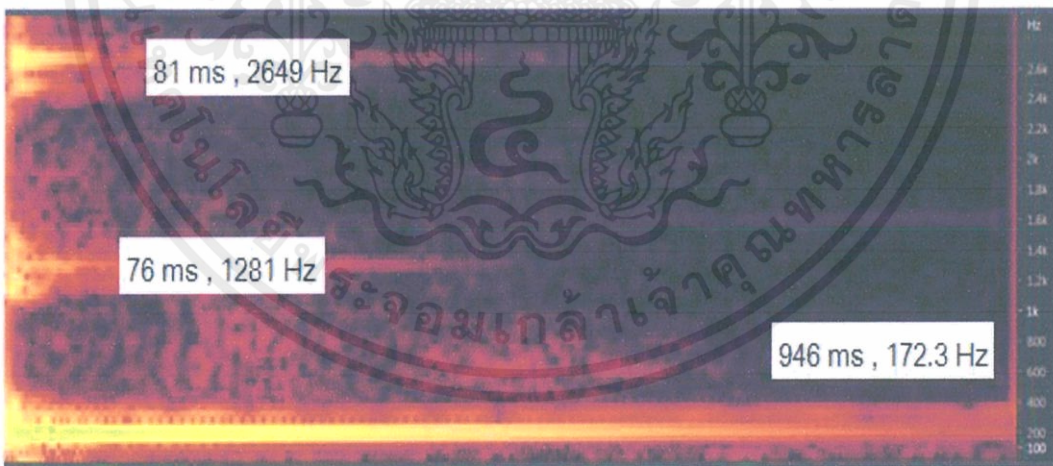
รูปที่ 4.6c สเปกตรัมเสียงโน้ตลูกที่ 11 เสียงโด (C4) ที่ได้จากการสังเคราะห์เสียงด้วยโปรแกรม MAX/MSP



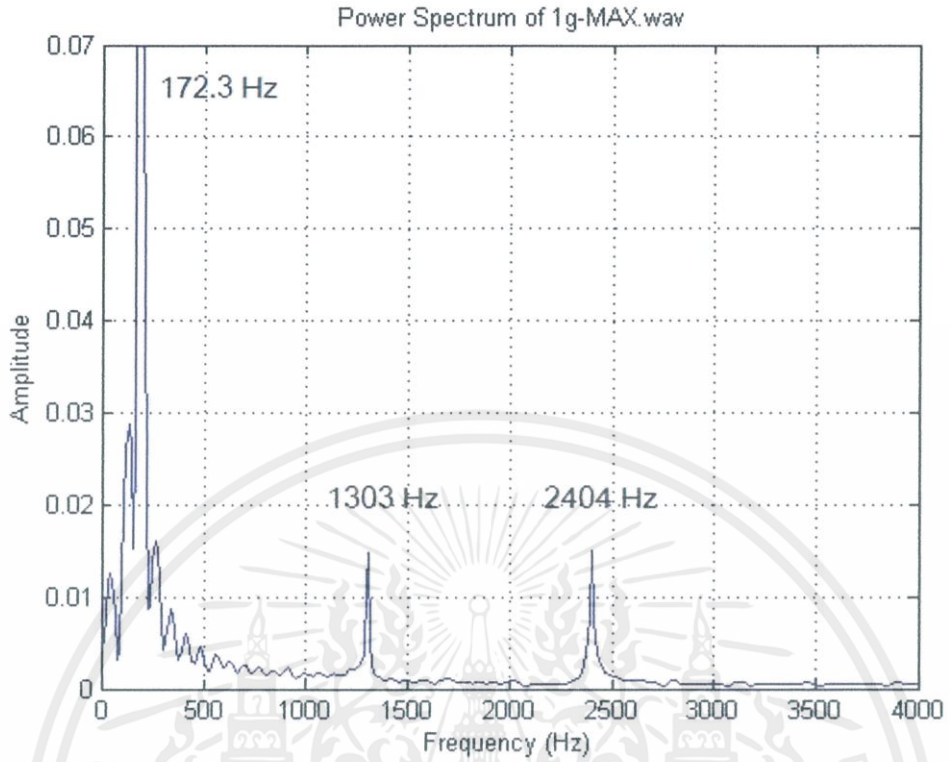
รูปที่ 4.6d สเปกโตรแกรมเสียงโน้ตลูกที่ 11 เสียงโด (C4) ที่ได้จากการสังเคราะห์เสียงด้วยโปรแกรม MAX/MSP



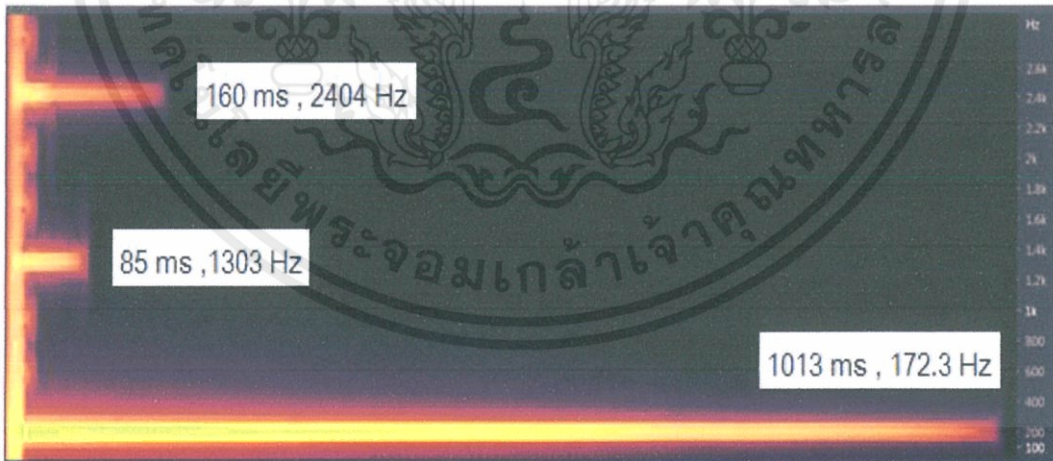
รูปที่ 4.7a สเปกตรัมเสียงโน้ตลูกที่ 1 เสียงซอล (G2) ที่ได้จากการเลื่อนความถี่



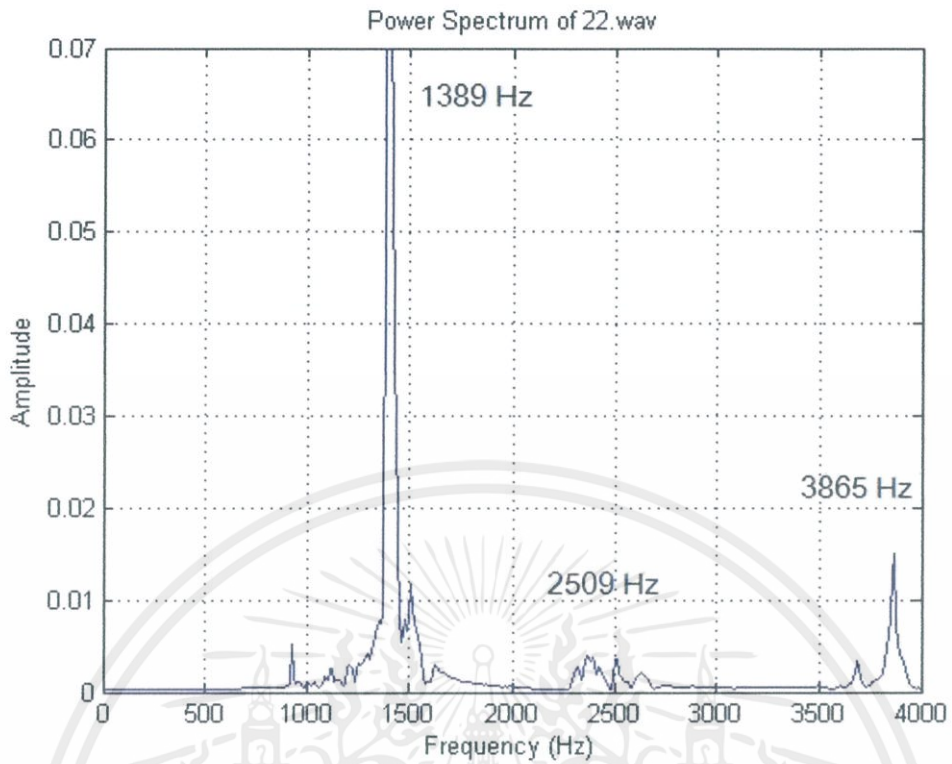
รูปที่ 4.7b สเปกโตรแกรมเสียงโน้ตลูกที่ 1 เสียงซอล (G2) ที่ได้จากการเลื่อนความถี่



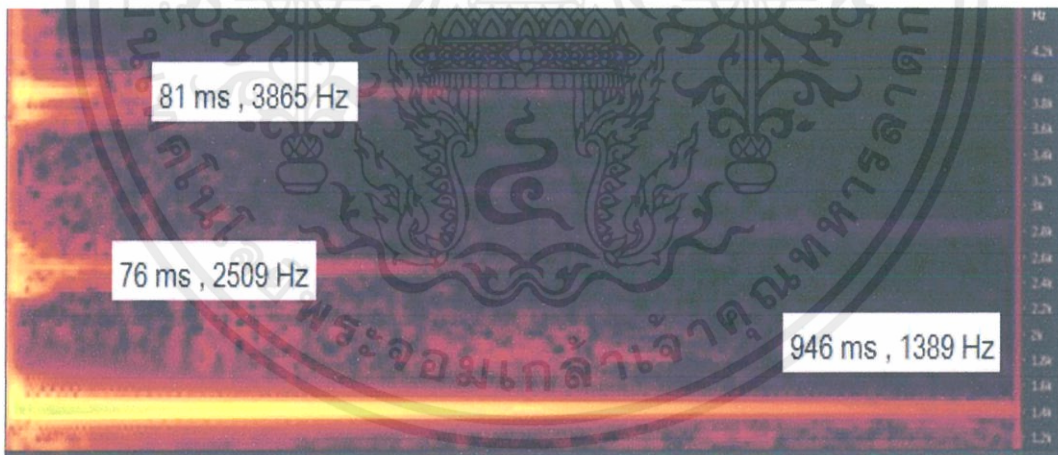
รูปที่ 4.7c สเปกตรัมเสียงโน้ตลูกที่ 1 เสียงซอล (G2) ที่ได้จากการสังเคราะห์เสียงด้วยโปรแกรม MAX/MSP



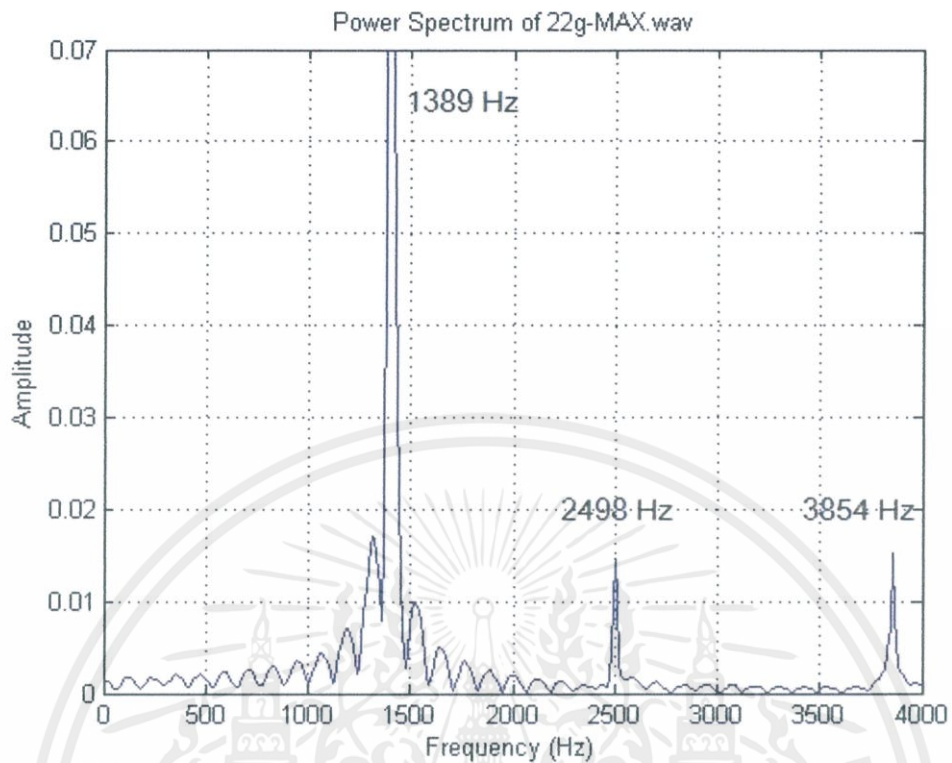
รูปที่ 4.7d สเปกโตรแกรมเสียงโน้ตลูกที่ 1 เสียงซอล (G2) ที่ได้จากการสังเคราะห์เสียงด้วยโปรแกรม MAX/MSP



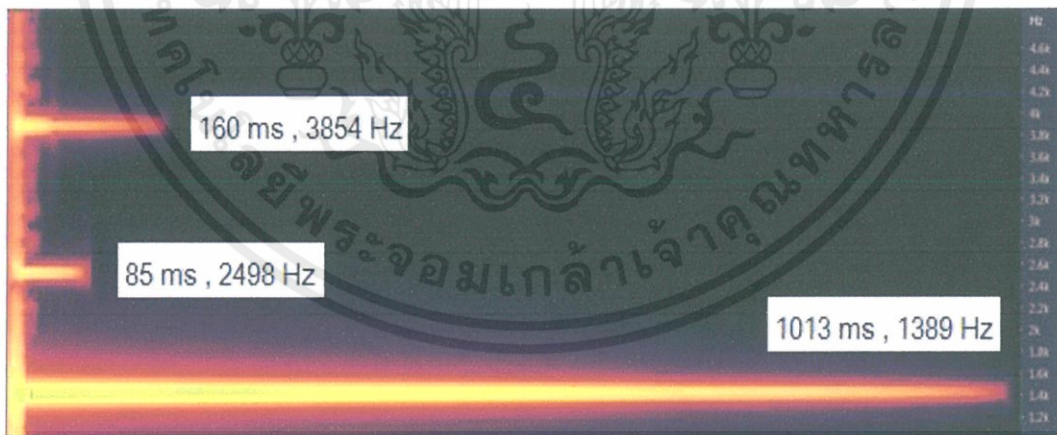
รูปที่ 4.8a สเปกตรัมเสียงโน้ตลูกที่ 22 เสียงซอล (G5) ที่ได้จากการเลื่อนความถี่



รูปที่ 4.8b สเปกโตรแกรมเสียงโน้ตลูกที่ 22 เสียงซอล (G5) ที่ได้จากการเลื่อนความถี่



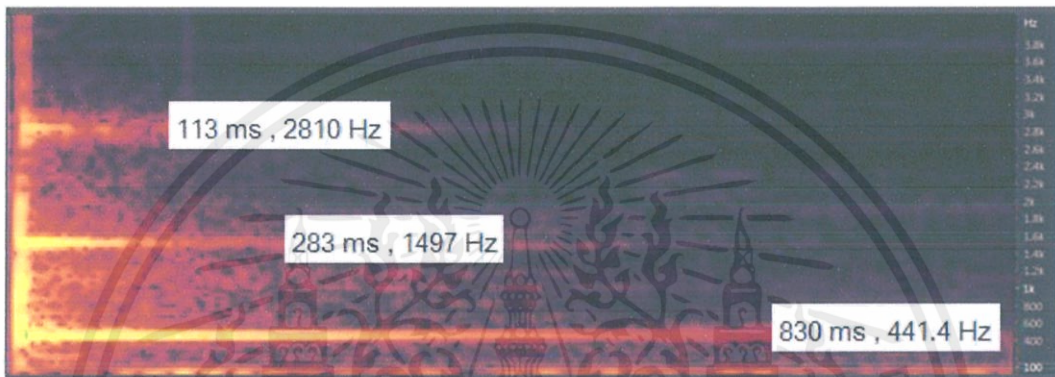
รูปที่ 4.8c สเปกตรัมเสียงโน้ตลูกที่ 22 เสียงซอล (G5) ที่ได้จากการสังเคราะห์เสียงด้วยโปรแกรม MAX/MSP



รูปที่ 4.8d สเปกโตรแกรมเสียงโน้ตลูกที่ 22 เสียงซอล (G5) ที่ได้จากการสังเคราะห์เสียงด้วยโปรแกรม MAX/MSP

จากการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.6a – 4.8d จะเห็นได้ว่าสเปกตรัมความถี่ของแต่ละฮาร์โมนิกส์ของทั้ง 3 เสียงโน้ต จะมีลักษณะที่คล้ายคลึงกับสเปกตรัมที่ได้จากการเลื้อยความถี่ของเสียงโน้ตนั้นๆ อีกทั้งความสัมพันธ์ของทั้ง 3 ฮาร์โมนิกส์ก็เป็นอัตราส่วนต่อกัน ตรงกับหลักทฤษฎีที่ว่า เสียงที่ไม่มีความผิดเพี้ยนจะมีลักษณะกรอบของโทนที่เหมือนกัน แตกต่างกันที่ความถี่ และแต่ละเสียงมีความสัมพันธ์ของฮาร์โมนิกส์ที่เหมือนกันทั้ง 22 เสียงโน้ต

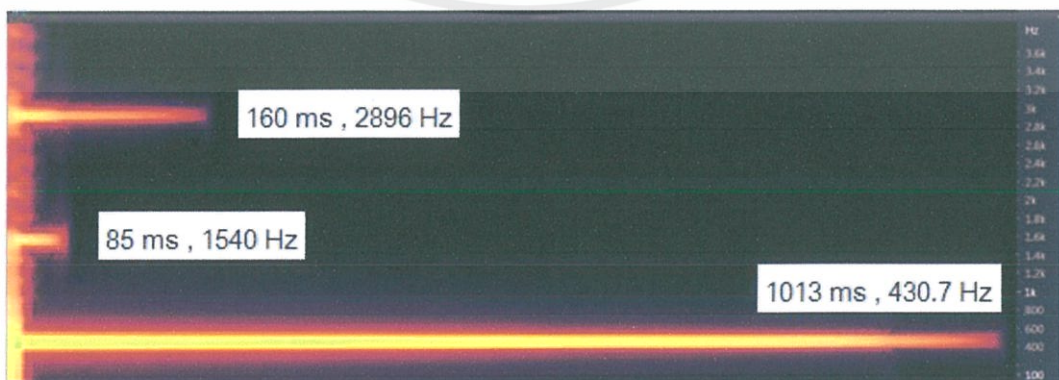
อย่างเช่นโน้ตลูกที่ 10 จากเสียงโน้ตเริ่มต้นที่มีความผิดเพี้ยน ฮาร์โมนิกส์ไม่มีความสัมพันธ์ที่เป็นอัตราส่วนต่อกัน เมื่อทำการเลื้อยหาความถี่จากเสียงอ้างอิงที่มีความสัมพันธ์ของฮาร์โมนิกส์แล้วนำมาทำการสังเคราะห์ ทำให้ได้เสียงโน้ตลูกที่ 10 ที่มีความไพเราะมากขึ้น ชัดเจน กังวาน แสดงได้ดังรูปที่ 4.9a – 4.9f



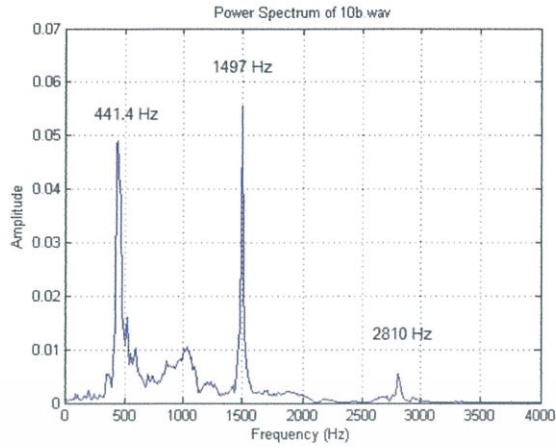
รูปที่ 4.9a สเปกโตรแกรมเสียงโน้ตต้นฉบับลูกที่ 10



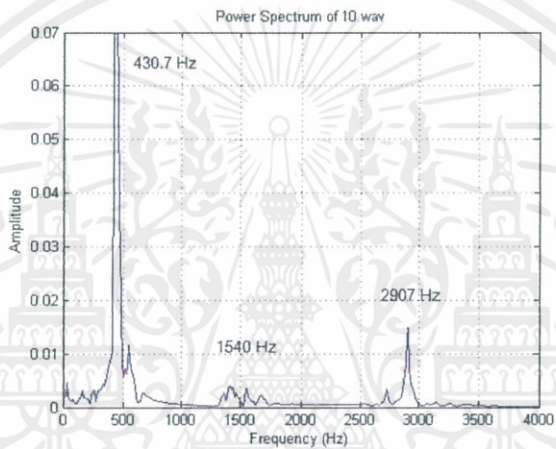
รูปที่ 4.9b สเปกโตรแกรมเสียงโน้ตลูกที่ 10 ที่ได้จากการเลื้อยความถี่



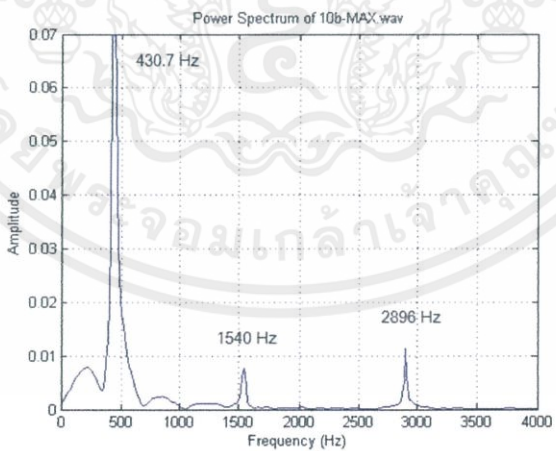
รูปที่ 4.9c สเปกโตรแกรมเสียงโน้ตต้นฉบับลูกที่ 10 จากการสังเคราะห์บนโปรแกรม MAX/MSP



รูปที่ 4.9d สเปกตรัมเสียงโน้ตต้นฉบับลูทที่ 10



รูปที่ 4.9e สเปกตรัมเสียงโน้ตลูทที่ 10 ที่ได้จากการเลื่อนความถี่



รูปที่ 4.9f สเปกตรัมเสียงโน้ตต้นฉบับลูทที่ 10 จากการสังเคราะห์บนโปรแกรม MAX/MSP

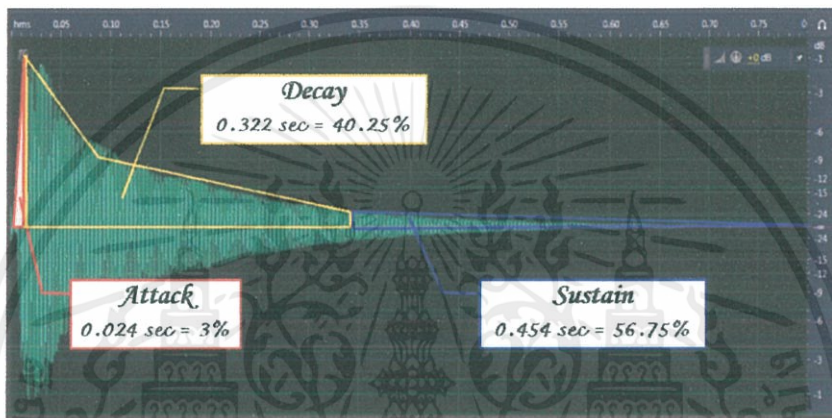
ดังนั้น เสียงที่ออกมาจากการสังเคราะห์ด้วยเทคนิคแอดดีทีฟจึงมีความไพเราะมากกว่าเสียงต้นฉบับที่จัดเก็บมา และสามารถแก้ไขปัญหาเสียงที่ผิดเพี้ยนอันเกิดจากกายภาพของเครื่องดนตรี ผู้ตี รวมถึงสภาพแวดล้อมต่างๆที่ทำให้เสียงระนาดมีความผิดเพี้ยนจนทำให้ไม่เกิดความไพเราะได้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการวิเคราะห์ (Analysis) โน้ตของระนาด ซึ่งเป็นเครื่องดนตรีประเภทเครื่องตีที่เป็นไม้ ในแต่ละโน้ตจะเห็นว่าโดยทั่วไปแล้ว ถ้าพิจารณาในโดเมนเวลา (Time Domain) จะเห็นว่ามีลักษณะกรอบของโทนเสียง (Envelope) เป็นไปตามกรอบของโทนเสียงทั่วไป (ADSR Shape) ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 แสดงกรอบของโทนเสียง (Envelope) ของโน้ตลูกที่ 11 (เสียงโต)

เมื่อพิจารณาแถบความถี่ในโดเมนความถี่ (Frequency Domain) จะมีแถบความถี่ 3 แถบ โดยประกอบไปด้วยความถี่มูลฐาน (Fundamental Frequency), ความถี่ฮาร์โมนิกที่ 2 และ 3 ตามลำดับ ซึ่งถ้าพิจารณาค่าความถี่แต่ละฮาร์โมนิกเทียบกับความถี่มูลฐานแล้ว จะพบว่าความสัมพันธ์ของฮาร์โมนิกมีอัตราส่วนที่ไม่เป็นสัดส่วนต่อกันตามทฤษฎี หรือเรียกว่า *Enharmonic* ดังตารางที่ 5.1

จากนั้น จึงนำเสียงโน้ตอ้างอิงจากเสียงต้นฉบับ (ลูกที่ 11 เสียงโต) เลื่อนไปยังความถี่ที่ต้องการ โดยผ่านการแปลงฮิลเบิร์ต (Hilbert Transform) ตามขั้นตอนการทดลอง พบว่าเสียงที่ผ่านกระบวนการดังกล่าว มีแถบความถี่ที่รักษาอัตราส่วนของฮาร์โมนิกของทุกโน้ตได้เท่ากันทุกเสียงโน้ต ซึ่งเมื่อฟังเสียงที่ได้จะมีลักษณะเสียงที่มีการรักษาเอกลักษณ์ของเสียงระนาดต้นฉบับ โดยเสียงของโน้ตตัวต้นๆ และท้ายๆ ของรางจะมีลักษณะที่มีความไพเราะกว่าเสียงต้นฉบับมากขึ้น

ตารางที่ 5.1 ตารางแสดงค่าความถี่และอัตราส่วนฮาร์โมนิกส์แต่ละตัวของแต่ละโน้ต

ลูกที่	โน้ต	ความถี่มูลฐาน (Hz)	ฮาร์โมนิกส์ที่ 1 (Hz)	ฮาร์โมนิกส์ที่ 2 (Hz)	อัตราส่วน	
					ความถี่มูลฐาน : ฮาร์โมนิกส์ที่ n	
					ฮาร์โมนิกส์ที่ 1	ฮาร์โมนิกส์ที่ 2
1	ซอล	175	934	2342	5.33714286	13.3828571
2	ลา	188.4	971.7	2353	5.15764331	12.4893843
3	ที	209.9	1042	2471	4.9642687	11.7722725
4	โด	236.9	1139	2490	4.80793584	10.510764
5	เร	266.5	1179	2522	4.42401501	9.46341463
6	มี	293.4	1249	2600	4.25698705	8.86162236
7	ฟา	320.3	1319	2622	4.11801436	8.18607555
8	ซอล	347.2	1362	2716	3.92281106	7.82258065
9	ลา	382.2	1424	2799	3.72579801	7.32339089
10	ที	433.4	1494	2810	3.44716198	6.4836179
11	โด	473.7	1583	2939	3.3417775	6.20434874
12	เร	524.9	1736	3125	3.30729663	5.95351496
13	มี	573.3	1779	3233	3.10308739	5.63928135
14	ฟา	670.2	1876	3375	2.79916443	5.03581021
15	ซอล	707.9	1978	3531	2.79417997	4.98799265
16	ลา	772.5	2110	3709	2.73139159	4.8012945
17	ที	850.6	2226	3548	2.61697625	4.17117329
18	โด	944.8	2336	4107	2.47248095	4.34695174
19	เร	1044	2541	-	2.43390805	-
20	มี	1163	2772	-	2.38349097	-
21	ฟา	1287	3004	5076	2.33411033	3.94405594
22	ซอล	1392	3227	5405	2.31824713	3.8829023

เมื่อนำไปวิเคราะห์เพื่อดูสเปคโตรแกรมแบบ 3 มิติ จะทำให้สามารถเห็นกรอบของโทนเสียงของแต่ละฮาร์โมนิกส์เพื่อนำไปสังเคราะห์เสียง (Synthesis) บนโปรแกรม MAX/MSP ผลที่ได้จากการทดลองนี้สามารถสร้างเพื่อเลียนแบบสัญญาณเสียงระนาดข้างต้น ทำให้ได้สัญญาณเสียงระนาดที่ชัดเจนและมีความไพเราะของเสียงมากกว่าเสียงต้นฉบับ ทำให้รักษาเอกลักษณ์ทางเสียงของระนาดได้ตรงตามวัตถุประสงค์ของโครงการที่วางไว้ทุกประการ

5.2 ปัญหาและอุปสรรค

5.2.1 ปัญหาจากการวิเคราะห์สัญญาณเสียง

- การบันทึกเสียงขนาดที่จะใช้ในการวิเคราะห์ที่มีสัญญาณเสียงอื่นรบกวน เนื่องจากไม่ได้บันทึกจากห้องอัดเสียงโดยตรง จึงต้องมีการตัดย่านความถี่ที่ไม่ต้องการทิ้งก่อนนำไปวิเคราะห์
- ต้องมีการบันทึกเสียงหลายครั้งจึงจะได้สัญญาณเสียงที่เหมาะสมกับการวิเคราะห์
- การวิเคราะห์สัญญาณเสียงด้วย MATLAB โดยการพลอตกราฟสเปกตรัมแบบ 3 มิติ ทำได้ยากเพราะต้องคำนึงถึงมิติของเมทริกซ์ให้เหมาะสมจึงจะสามารถพลอตทั้งแกนความถี่ (Frequency), แกนเวลา (Time) และแกนแอมพลิจูด (Power) ได้อย่างถูกต้อง

5.2.2 ปัญหาจากการใช้งานโปรแกรม

- โปรแกรม MAX/MSP เป็นโปรแกรมที่มีราคาแพงและมีลิขสิทธิ์ เปิดให้ทดลองใช้งานในเวลาจำกัด ทำให้เป็นอุปสรรคต่อการศึกษา
- โปรแกรม MAX/MSP เป็นโปรแกรมทางเสียงที่ยังไม่มีการใช้งานที่แพร่หลายมากนัก ทำให้การสืบค้นเอกสารอ้างอิงสามารถทำได้ยาก จึงมีความยุ่งยากต่อการใช้งานในเบื้องต้น

5.3 แนวทางการพัฒนาต่อ

โปรแกรม MAX/MSP สามารถประยุกต์การใช้งานได้กับฮาร์ดแวร์หลายอย่าง ในอนาคตอาจพัฒนาเป็นระนาดอิเล็กทรอนิกส์ได้เช่นเดียวกับ การสังเคราะห์เสียงเปียโน (Piano Synthesis) หรือการสังเคราะห์เสียงกีตาร์ไฟฟ้า (Virtual Air Guitar) ก็ได้ เพื่อให้ระนาดสามารถปรับแต่งเสียงได้หลากหลาย และสร้างทางเลือกให้ผู้ใช้ได้อีกด้วย

บรรณานุกรม

- [1] A. Bruce Carson, Paul B. Crilly, Janet C. Rutledge. *Communication Systems* 4th ed : McGraw-Hill, 2002.
- [2] David W. Kammler, *A First Course in Fourier Analysis* : Cambridge University Press, 2008.
- [3] E. R. Miranda. *Computer Sound Design Synthesis techniques and programming* 2^{ed} ed : Focal Press, 2002.
- [4] F. Richard Moore. *Elements in Computer Music* : Prentice-Hall, 1990.
- [5] Gordon, John W. and Smith, J.O. "A Sine Generation Algorithm for VLSI Applications". *ICMC Proceedings*, 1985.
- [6] Haykin, Simon. *Communication Systems*. New York : John Wiley & Sons, 1978.
- [7] Julius O. Smith III, *Mathematics of the Discrete Fourier Transform (DFT), with Audio Applications* 2^{ed} Ed : W3K Publishing, 2007.
- [8] Julius O. Smith III, *SPECTRAL AUDIO SIGNAL PROCESSING* : W3K Publishing, 2011.
- [9] Justice, James H. "Analytic Signal Processing in Music Computation". *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Volume ASSP-27, Number 6, December 1979.
- [10] Oppenheim, A.V. and Schaffer, R.W. *Discrete Time Signal Processing*. New Jersey : Prentice-Hall, Inc.
- [11] Regalia, Phillip A. 1993. "Special Filter Designs" in S.K. Mitra and J.F.Kaiser, Editors, *Handbook for Digital Signal Processing*, New York: John Wiley & Sons, pp. 909-931.
- [12] Vaidyanathan, P.P. *Multirate Systems and Filter Banks*. New Jersey : PTR Prentice-Hall, Inc., 1993.
- [13] Wylie , C.R. , *Advanced Engineering Mathematics* 5th ed. : McGraw-Hill, 1982.
- [14] ณิชารีย์ ลี้ชาญสกุล. การปรับแต่งเสียงแบบดิจิทัล. *ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต*. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2554.
- [15] สราวุฒิ สุจิตจร. *การวิเคราะห์เสียงดนตรีไทย*. กรุงเทพฯ : เลิศศิลป์, 2545.
- [16] <ftp://arts.ucsc.edu/pub/ems/maxtutors/>
- [17] <http://cycling74.com/>
- [18] <http://www.mathworks.com>
- [19] <http://www.pianoteq.com/>
- [20] <http://www.virtualguitar.com/>
- [21] <https://ccrma.stanford.edu/~jos/pasp/>