

การวิเคราะห์เสียงโน้ตหลักของขลุ่ยเพียงออ

นางสาวฤดีรัตน์ ชินเวชกิจวานิชย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-533-386-7

**SOUND ANALYSIS OF PRINCIPAL NOTES
OBTAINED FROM A MIDDLE PITCH THAI FLUTE**

Miss Rudeerat Chinvejitvanich

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the

Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Suranaree University of Technology

Academic Year 2004

ISBN 974-533-386-7

ฤดีรัตน์ ชินเวชกิจวานิชย์ : การวิเคราะห์เสียงโน้ตหลักของขลุ่ยเพียงออ (SOUND ANALYSIS OF PRINCIPAL NOTES OBTAINED FROM A MIDDLE PITCH THAI FLUTE) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.สรารุณี สุจิตจร, 95 หน้า.
ISBN 974-533-386-7

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ได้ดำเนินการวิเคราะห์สัญญาณเสียงขลุ่ยเพียงออและระนาดเอกเหล็ก ในระดับเสียงกลางที่เรียกกันว่า “ทางเพียงออ” โดยทำการวิเคราะห์ทั้งในกรณีเสียงโน้ตเดี่ยวและเสียงหลายโน้ต เพื่อให้ทราบถึงค่าความถี่ฟอร์แมนท์ของระดับเสียงกลางทางดนตรีไทยในหนึ่งทาบเสียง และศึกษาการประยุกต์เทคนิคการกระจายทางเวลา-ความถี่กับเสียงหลายโน้ต ทำการวิเคราะห์สัญญาณที่บันทึกไว้ด้วยเทคนิคการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลวิธีเพื่อเปรียบเทียบผล ได้แก่ การแปลงฟูริเยร์เต็มหน่วย การแปลงฟูริเยร์ในช่วงเวลาสั้น แบบจำลองเออาร์ และการกระจายเชิงโมด ผลการวิเคราะห์เสียงโน้ตเดี่ยวพบว่า วิธีการกระจายเชิงโมดให้ผลค่าความถี่ฟอร์แมนท์ของเสียงจากเครื่องดนตรีทั้งสองชิ้นในหนึ่งทาบเสียงเป็นลำดับจากเสียงต่ำไปยังเสียงสูง และมีค่าความถี่ของเสียงโคสูงใกล้เคียงกับสองเท่าของเสียงโคต่ำ อัตราส่วนความถี่และระยะพิตช์ของแต่ละระดับเสียงมีค่าไม่เท่ากันและปรากฏอาการแกว่งขึ้นลง ไม่เป็นไปตามสมมุติฐานดั้งเดิมของ Morton ผลการวิเคราะห์เสียงหลายโน้ตพบว่า วิธีการกระจายเชิงโมดแสดงฟอร์แมนท์ของแต่ละเสียงโน้ตที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลาได้ถูกต้องสอดคล้องกับลักษณะการบรรเลงในรูปแบบต่างๆ ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่า วิธีการกระจายเชิงโมดสามารถนำมาประยุกต์กับการวิเคราะห์เสียงดนตรีไทยได้ดี

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2547

ลายมือชื่อนักศึกษา _____
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม _____

RUDEERAT CHINVEJKITVANICH : SOUND ANALYSIS OF PRINCIPAL
NOTES OBTAINED FROM A MIDDLE PITCH THAI FLUTE. THESIS
ADVISOR : ASSOC. PROF. SARAWUT SUJITJORN, Ph. D. 95 PP.
ISBN 974-533-386-7

TRADITIONAL THAI MUSIC/MUSICAL SIGNAL ANALYSIS/FORMANTS/
FREQUENCY RATIOS/PITCH INTERVALS/MODAL DISTRIBUTION

This thesis presents the sound analysis of a middle pitch Thai flute and a Thai metal tenor xylophone. The analysis made is for the middle pitch Thai octave called “Thang Phiang Aw”. The work includes single note and multi-note cases in order to characterize the formants of a Thai octave and to study the application of time-frequency distribution. For comparison purposes, four digital signal processing techniques are used. These include Fourier transform, short-time Fourier transform, autoregressive model and modal distribution. For the single-note analysis within one octave, the modal distribution reveals that (i) the formants gradually increase from low to high pitches, (ii) the high-pitch-do formant is twice as much of the low-pitch-do formant, and (iii) the frequency ratios and pitch intervals are not constant and exhibit some oscillation. The later is against the previous hypothesis of Morton’s. For the multi-note analysis, the modal distribution unfolds correct formants of the notes corresponding to each different playing technique. The results confirm that the modal distribution can be appropriately applied to analyze Thai musical sound.

School of Electrical Engineering

Academic Year 2004

Student’s Signature_____

Advisor’s Signature_____

Co-advisor’s Signature_____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บุคคลต่างๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ช่วยเหลือ อย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัย อาทิเช่น

รองศาสตราจารย์ ดร.สราวุฒิ สุจิตจร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่เป็นแรงกระตุ้นให้ผู้วิจัยตั้งใจทำงาน และยังเป็นผู้บรรเลงเครื่องดนตรีทั้งหลายเพียงออ และระนาดเอกเหล็ก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติ อรรถกัจจิมงคล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม และ พล.อ.ต. ดร.เพียร โตท่าโรง ที่ได้ให้คำแนะนำด้านวิชาการอันเป็นประโยชน์

คุณประพล จาระตะคุ, คุณประพันธ์ คัทวี, คุณฉัตรชัย ถาจอหอ และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่อำนวยความสะดวกในส่วนของอุปกรณ์และสถานที่ดำเนินงานวิจัย

คุณจรินทร์ เปลื้องทุกข์ บุคลากรด้านดนตรีไทย งานทำนุบำรุงศิลปวัฒนธรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

พี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน

ขอขอบพระคุณมูลนิธิโทเร เพื่อการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ ประเทศไทย และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัยและการนำเสนอผลงานในที่ประชุมวิชาการนานาชาติ

ท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่ให้การเลี้ยงดูอบรมและส่งเสริมการศึกษาเป็นอย่างดี จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จ

ฤดีรัตน์ ชินเวชกิจวานิชย์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย	2
1.3 ขีดตกลงเบื้องต้น.....	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	4
2 เทคนิคการวิเคราะห์สัญญาณ	5
2.1 กล่าวนำ	5
2.2 การแปลงฟูรีเยร์เต็มหน่วย	5
2.3 การแปลงฟูรีเยร์ในช่วงเวลาสั้น	8
2.4 วิธีแบบจำลองเออาร์	12
3 การกระจายเชิงโมด.....	16
3.1 กล่าวนำ	16
3.2 การกระจายเชิงโมด (MD).....	17
3.3 การกำหนดค่าพารามิเตอร์	21
3.4 โปรแกรมการคำนวณ MD.....	24

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	29
4.1 กล่าวนำ	29
4.2 การบันทึกเสียง	29
4.3 ผลการวิเคราะห์เสียงโน้ตเดี่ยว.....	32
4.3.1 เสียงโน้ตเดี่ยวในสถานะอยู่ตัว.....	33
4.3.2 เสียงโน้ตเดี่ยวในสถานะชั่วครู่.....	40
4.4 ผลการวิเคราะห์เสียงหลายโน้ต	45
4.4.1 เสียงหลายโน้ตของขลุ่ยเพียงออ.....	45
4.4.2 เสียงหลายโน้ตของระนาดเอกเหล็ก.....	50
4.5 สรุปผลการทดลอง	53
5 บทสรุป	54
5.1 กล่าวนำ	54
5.2 สรุปผลการวิจัย.....	54
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	56
เอกสารอ้างอิง	57
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก เสียง การได้ยิน และไมโครโฟน	59
ภาคผนวก ข ระบบเสียงดนตรีไทย.....	68
ภาคผนวก ค โปรแกรมการคำนวณ MD.....	75
ภาคผนวก ง ผลการวิเคราะห์เสียงโน้ตเดี่ยวของขลุ่ยเพียงออและระนาดเอกเหล็ก.....	82
ภาคผนวก จ บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	93
ประวัติผู้เขียน	95

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1	อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความดันในการบันทึกเสียง 31
4.2	ค่าพารามิเตอร์ของแต่ละเทคนิคสำหรับวิเคราะห์เสียงโน้ตเดี่ยวในสถานะอยู่ตัว 33
4.3	ฟอร์มเม้นท์ของเสียงโน้ตเดี่ยวในสถานะอยู่ตัวของขลุ่ยเพียงออ..... 36
4.4	ฟอร์มเม้นท์ของเสียงโน้ตเดี่ยวในสถานะอยู่ตัวของระนาดเอกเหล็ก 36
4.5	อัตราส่วนความถี่และระยะพิตช์ของเสียงขลุ่ยเพียงออ 37
4.6	อัตราส่วนความถี่และระยะพิตช์ของเสียงระนาดเอกเหล็ก..... 38
4.7	อัตราส่วนความถี่และระยะพิตช์ของเสียงเป็ยโน 39
4.8	ค่าพารามิเตอร์ของเทคนิค MD สำหรับวิเคราะห์เสียงโน้ตเดี่ยวในสถานะชั่วคราว ของขลุ่ยเพียงออ 40
4.9	ฟอร์มเม้นท์ของเสียงโน้ตเดี่ยวในสถานะชั่วคราวของขลุ่ยเพียงออ..... 45
4.10	ค่าพารามิเตอร์ของเทคนิค MD สำหรับวิเคราะห์เสียงหลายโน้ตของขลุ่ยเพียงออ 46
4.11	ฟอร์มเม้นท์ของเสียงหลายโน้ตที่มีเทคนิคการบรรเลงแตกต่างกันของขลุ่ยเพียงออ 49
4.12	ฟอร์มเม้นท์ของเสียงระนาดเอกเหล็ก บรรเลงแบบตีเก็บและตีกรอ คู่ 4 โด ฟา 52
5.1	ฟอร์มเม้นท์ของเสียงโน้ตเดี่ยวในสถานะอยู่ตัวของขลุ่ยเพียงออและระนาดเอกเหล็ก 55
ข.1	ความถี่ของเสียงเป็ยโน (บางส่วน) 70
ข.2	ความถี่ของเสียงดนตรีไทยเทียบกับเสียงเป็ยโน (บางส่วน) 72

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างของ (ก) สัญญาณ $\tilde{x}(n)$ และ (ข) สัญญาณ $x(n)$	6
2.2 กราฟของการคำนวณ DFT จำนวน 2 จุด (บัตเตอร์ฟลาย).....	7
2.3 กราฟของการคำนวณ DFT จำนวน 4 จุด.....	7
2.4 ผลการวิเคราะห์สัญญาณ $y(n)$ ด้วย DFT.....	8
2.5 สัญญาณเซิร์ป จำนวน 800 จุด	9
2.6 สัญญาณเซิร์ปที่ถูกแบ่งออกเป็นส่วนสั้นๆ.....	9
2.7 สัญญาณ $f(t)$	11
2.8 ผลการวิเคราะห์สัญญาณ $f(t)$ ด้วย STFT	11
2.9 การประมาณเชิงเส้นและแบบจำลองเออาร์	13
2.10 สัญญาณ $g(t)$	15
2.11 ผลการวิเคราะห์สัญญาณ $g(t)$ ด้วย AR.....	15
(ข) ผลจากเทคนิค WD	18
3.2 ผลการวิเคราะห์เสียงโคลของขลุ่ยเพียงออด้วยเทคนิค STFT	22
3.3 ลักษณะการคำนวณ MD.....	24
3.4 แผนภาพแสดงลำดับการคำนวณ MD.....	25
3.5 แผนภาพฟังก์ชันย่อยที่เป็นส่วนหนึ่งในการคำนวณ MD.....	26
3.6 สัญญาณ $s(t)$	27
3.7 ผลการวิเคราะห์สัญญาณ $s(t)$ ด้วย DFT STFT และ MD.....	27
4.1 การจัดวางอุปกรณ์บันทึกเสียงขลุ่ยเพียงออ	30
4.2 ตำแหน่งไมโครโฟนในการบันทึกเสียงระนาดเอกเหล็ก	30
4.3 สัญญาณรบกวนพื้นหลัง (ก) ที่บันทึกได้ (ข) ผลการวิเคราะห์ด้วย DFT	31
4.4 สัญญาณเสียงซอลของขลุ่ยเพียงออ (ก) บันทึกด้วยออสซิลโลสโคป (ข) สัญญาณ หลังจากผ่านการกรองแบบบัตเตอร์เวิร์ทผ่านแถบ.....	32
4.5 ผลการวิเคราะห์โน้ตเดี่ยวเสียงซอลในสถานะอยู่ตัวของขลุ่ยเพียงออ ด้วยเทคนิค (ก) DFT (ข) STFT (ค) AR และ (ง) MD	34

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 ผลการวิเคราะห์โน้ตเดี่ยวเสียงซอลในสถานะอยู่ตัวของระนาดเอกเหล็ก ด้วยเทคนิค (ก) DFT (ข) STFT (ค) AR และ (ง) MD.....	35
4.7 ระยะเวลาพิชัของเสียงขลุ่ยเพียงออ ระนาดเอกเหล็ก และค่าตามสมมุติฐานของ Morton.....	39
4.8 ผลการวิเคราะห์โน้ตเดี่ยวเสียงโดในสถานะชั่วคราวของขลุ่ยเพียงออ (ก) สัญญาณเสียงที่ผ่านการกรองแล้ว (ข) ผลจากเทคนิค STFT (ค) ผลจากเทคนิค MD และ (ง) ความถี่ที่เกิดขึ้นเทียบกับเวลา.....	41
4.9 ผลการวิเคราะห์โน้ตเดี่ยวเสียงซอลในสถานะชั่วคราวของขลุ่ยเพียงออ (ก) สัญญาณเสียงที่ผ่านการกรองแล้ว (ข) ผลจากเทคนิค STFT (ค) ผลจากเทคนิค MD และ (ง) ความถี่ที่เกิดขึ้นเทียบกับเวลา.....	42
4.10 ผลการวิเคราะห์โน้ตเดี่ยวเสียงโดในสถานะชั่วคราวของขลุ่ยเพียงออ (ก) สัญญาณเสียงที่ผ่านการกรองแล้ว (ข) ผลจากเทคนิค STFT (ค) ผลจากเทคนิค MD และ (ง) ความถี่ที่เกิดขึ้นเทียบกับเวลา.....	43
4.11 ผลการวิเคราะห์โน้ตเดี่ยวเสียงเรในสถานะชั่วคราวของขลุ่ยเพียงออ (ก) สัญญาณเสียงที่ผ่านการกรองแล้ว (ข) ผลจากเทคนิค STFT (ค) ผลจากเทคนิค MD และ (ง) ความถี่ที่เกิดขึ้นเทียบกับเวลา.....	44
4.12 ผลการวิเคราะห์โน้ตเรียงกันเสียง ลา ซอล ฟา ของขลุ่ยเพียงออ (ก) สัญญาณเสียงที่ผ่านการกรองแล้ว (ข) ผลจากเทคนิค STFT (ค) ผลจากเทคนิค MD และ (ง) ความถี่ที่เกิดขึ้นเทียบกับเวลา.....	47
4.13 ผลการวิเคราะห์เสียง มี เร โด (บรรเลงแบบสะบัด) ของขลุ่ยเพียงออ (ก) สัญญาณเสียงที่ผ่านการกรองแล้ว (ข) ผลจากเทคนิค STFT (ค) ผลจากเทคนิค MD และ (ง) ความถี่ที่เกิดขึ้นเทียบกับเวลา.....	48
4.14 ผลการวิเคราะห์เสียงการบรรเลงแบบพรม “นิ้วฟา” ของขลุ่ยเพียงออ (ก) สัญญาณเสียงที่ผ่านการกรองแล้ว (ข) ผลจากเทคนิค STFT (ค) ผลจากเทคนิค MD และ (ง) ความถี่ที่เกิดขึ้นเทียบกับเวลา.....	49

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 ผลการวิเคราะห์เสียงระนาดเอกเหล็กบรรเลงแบบตีเก็บคู่ 4 โด ฟา (ก) สัญญาณเสียงที่ผ่านการกรองแล้ว (ข) ผลจากเทคนิค STFT (ค) ผลจากเทคนิค MD และ (ง) ความถี่ที่เกิดขึ้นเทียบกับเวลา.....	51
4.16 ผลการวิเคราะห์เสียงระนาดเอกเหล็กบรรเลงแบบตีกรอคู่ 4 โด ฟา (ก) สัญญาณเสียงที่ผ่านการกรองแล้ว (ข) ผลจากเทคนิค STFT (ค) ผลจากเทคนิค MD และ (ง) ความถี่ที่เกิดขึ้นเทียบกับเวลา.....	52
ก.1 การเคลื่อนที่ของโมเลกุลของอากาศเทียบกับลักษณะของคลื่น	61
ก.2 จำนวนโมเลกุลของอากาศกับแอมพลิจูดของคลื่นเสียง.....	62
ก.3 ส่วนประกอบของหู.....	64
ก.4 การแปลงคลื่นเสียงให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าของไมโครโฟน	65
ก.5 พิสัยพลวัตและผลตอบสนองทางความถี่ของไมโครโฟน	66
ข.1 การแบ่งช่วงความถี่ใน 1 ทบเสียงของคนตรีไทยเทียบกับคนตรีสากล	70
ข.2 การคำนวณหาอัตราส่วนระหว่างตัวโน้ตที่ติดกันของเสียงเปียโน.....	71
ข.3 การคำนวณหาอัตราส่วนระหว่างตัวโน้ตที่ติดกันของเสียงคนตรีไทย.....	73
ข.4 ตำแหน่งของลูกฆ้องของฆ้องวงใหญ่.....	74
ง.1 สัญญาณเสียงขลุ่ยเพียงออในสถานะอยู่ตัวที่ผ่านการกรองสัญญาณแล้ว.....	83
ง.2 สัญญาณเสียงระนาดเอกเหล็กในสถานะอยู่ตัวที่ผ่านการกรองสัญญาณแล้ว.....	84
ง.3 ผลการวิเคราะห์เสียงโน้ตเดี่ยวในสถานะอยู่ตัวของขลุ่ยเพียงออด้วยเทคนิคการแปลงฟูริเยร์เต็มหน่วย	85
ง.4 ผลการวิเคราะห์เสียงโน้ตเดี่ยวในสถานะอยู่ตัวของขลุ่ยเพียงออด้วยเทคนิคสเปกโตรแกรม.....	86
ง.5 ผลการวิเคราะห์เสียงโน้ตเดี่ยวในสถานะอยู่ตัวของขลุ่ยเพียงออด้วยแบบจำลองเออาร์	87
ง.6 ผลการวิเคราะห์เสียงโน้ตเดี่ยวในสถานะอยู่ตัวของขลุ่ยเพียงออด้วยเทคนิคการกระจายเชิงโมด	88
ง.7 ผลการวิเคราะห์เสียงโน้ตเดี่ยวในสถานะอยู่ตัวของระนาดเอกเหล็กด้วยเทคนิคการแปลงฟูริเยร์เต็มหน่วย	89

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ง.8 ผลการวิเคราะห์เสียงโน้ตเดี่ยวในสถานะอยู่ตัวของระนาดเอกเหล็กด้วยเทคนิค สเปกโตรแกรม.....	90
ง.9 ผลการวิเคราะห์เสียงโน้ตเดี่ยวในสถานะอยู่ตัวของระนาดเอกเหล็กด้วย แบบจำลองเออาร์.....	91
ง.10 ผลการวิเคราะห์เสียงโน้ตเดี่ยวในสถานะอยู่ตัวของระนาดเอกเหล็กด้วยเทคนิค การกระจายเชิงโมด	92

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

t	คือ เวลาต่อเนื่อง (s)
ω	คือ ความถี่ต่อเนื่อง (rad/s)
τ	คือ ค่าล่าช้าทางเวลาต่อเนื่อง (s)
ξ	คือ ค่าล่าช้าทางความถี่ต่อเนื่อง (rad/s)
$\bar{s}(t)$	คือ แบบจำลองสัญญาณเสียงคนตรี
$s(t)$	คือ แบบจำลองสัญญาณเสียงคนตรีในสถานะอยู่ตัว
$\phi_\ell(t)$	คือ เฟสที่เปลี่ยนตามเวลาของพาร์เซี่ยล (ตัวที่ ℓ)
B_ℓ	คือ แอมพลิจูดของพาร์เซี่ยล (ตัวที่ ℓ)
$\bar{B}_\ell(t)$	คือ แอมพลิจูดที่เปลี่ยนตามเวลาของพาร์เซี่ยล (ตัวที่ ℓ)
ϕ_ℓ	คือ เฟสของพาร์เซี่ยล (ตัวที่ ℓ)
ω_ℓ	คือ ความถี่ขณะหนึ่ง (instantaneous frequency) (ตัวที่ ℓ) (rad/s)
ℓ และ k	คือ จำนวนเต็ม ซึ่ง ℓ ไม่เท่ากับ k (ปกติใช้เป็นตัวห้อย)
B_k^2	คือ ขนาดของออตโทม (ตัวที่ k)
ω_k	คือ ความถี่ของพาร์เซี่ยล (ตัวที่ k)
$\delta(\omega)$	คือ เดลตาฟังก์ชัน
$B_k B_\ell$	คือ ขนาดของครอสโทม
ϕ_k	คือ เฟสของพาร์เซี่ยล (ตัวที่ k)
$(\omega_k + \omega_\ell)/2$	คือ ตำแหน่งที่เกิดครอสโทม
$\delta(\xi)$	คือ เดลตาฟังก์ชัน
$\varphi_M(\tau, \xi)$	คือ เคอเนลเชิงโหมด (modal kernel)
$h_{LP}(\tau)$	คือ วงจรกรองแบบผ่านต่ำทางเวลา
$G_{LP}(\xi)$	คือ วงจรกรองแบบผ่านต่ำทางความถี่
n	คือ เวลาเต็มหน่วย
k	คือ ความถี่เต็มหน่วย
ℓ	คือ ค่าล่าช้าทางเวลาเต็มหน่วย
$h_{LP}(n)$	คือ การแปลงฟูรีเยร์ผกผันของ $h_{LP}(\tau)$

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$g_{LP}(n)$	คือ การแปลงฟูริเยร์ผกผันของ $G_{LP}(\zeta)$
$h_t(n)$	คือ ฟังก์ชันหน้าต่างแบบแฮมมิงสำหรับการกรองสัญญาณทางเวลา
$h_\omega(r)$	คือ ฟังก์ชันหน้าต่างแบบแฮมมิงสำหรับการกรองสัญญาณทางความถี่
P	คือ ความยาวครึ่งหนึ่งของฟังก์ชัน $h_{LP}(n)$
L	คือ ความยาวครึ่งหนึ่งของฟังก์ชัน $g_{LP}(n)$ หรือค่าต่ำลงมากที่สุด หรือจำนวนจุดครึ่งหนึ่งในการคำนวณ DFT

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เสียง (sound) เกิดจากการสั่นของวัตถุหรือแหล่งกำเนิดเสียง ซึ่งทำให้โมเลกุลของอากาศรอบๆตัวมันเคลื่อนที่ (Rumsey and McCormick, 1994) โมเลกุลของอากาศนี้จะเคลื่อนที่ไปชนกับโมเลกุลที่อยู่ติดกันเกิดการถ่ายโอนโมเมนตัมขึ้น และจะแยกออกจากกันด้วยแรงปฏิกิริยาเป็นอย่างนี้สลับกันไปมา ขณะที่โมเลกุลมีการชนกัน ความดันของอากาศบริเวณนั้นจะเพิ่มขึ้น เสมือนเป็นช่วงการบีบอัด (compression) และขณะที่โมเลกุลแยกออกจากกัน ความดันของอากาศบริเวณนั้นจะลดลง เสมือนเป็นช่วงการขยายตัว (rarefaction) (Alten, 1999) จึงทำให้เสียงเดินทางจากแหล่งกำเนิดเสียงไปยังผู้ฟังได้โดยการบีบอัดและขยายตัวของอากาศ เมื่อเสียงเคลื่อนที่มาถึงผู้ฟังซึ่งใช้หูเป็นอวัยวะสำหรับรับฟังเสียง ใบหูจะทำหน้าที่รวมเสียงแล้วส่งผ่านเข้าไปยังหูชั้นใน ที่หูชั้นในนี้นักวิทยาศาสตร์ได้สมมุติว่าเสียงถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้า แล้วนำมาวิเคราะห์หาความถี่และความหนาแน่น หูชั้นในจึงเปรียบเสมือนตัววิเคราะห์สเปกตรัม (spectrum analyzer) จากนั้นเส้นประสาทจะรวบรวมสัญญาณจากหูทั้งสองข้าง ส่งไปยังสมอง ซึ่งจะทำการรวมสัญญาณทั้งหมดและตีความ การทำงานส่วนหนึ่งของสมองจึงเปรียบเสมือนคอมพิวเตอร์ (Alten, 1999) ทำให้เรารู้ว่าเสียงที่ได้ยินคือเสียงอะไร เสียงดังหรือเสียงค่อย เป็นต้น (รายละเอียดแสดงไว้ในภาคผนวก ก) เสียงที่เราได้ยินมาจากแหล่งกำเนิดเสียงที่มีการสั่นหลายลักษณะหรือมีหลายความถี่รวมกัน เสียงดนตรีเป็นเสียงชนิดหนึ่งเกิดจากการสั่นเชิงกล ซึ่งมีสาเหตุมาจากการกระตุ้นของตัวสั่น (oscillator) เป็นผลทำให้ส่วนต่างๆของเครื่องดนตรีสั่น (Mitra, 2001) เสียงดนตรีจึงเกิดจากการสั่นทั้งหมดที่รวมกันอยู่ในเครื่องดนตรีชิ้นหนึ่ง ดังนั้นเสียงดนตรีจะประกอบด้วยความถี่หลายความถี่ ซึ่งหูไม่สามารถแยกแยะได้ว่ามีค่าความถี่ใดบ้าง ดนตรีไทยยังไม่มีการประกาศระดับเสียงที่เป็นมาตรฐานสำหรับเทียบเสียง งานวิจัยที่ทำการวิเคราะห์เสียงดนตรีไทยที่สืบค้นได้กระทำไว้เมื่อประมาณ 40 ปีก่อนนี้โดย Morton (1967) ซึ่งได้ตั้งสมมุติฐานว่าระดับเสียงดนตรีไทยมีค่าระยะพิชต์คงที่เท่ากับ 171.43 เซนต์ (cents) และนอกจากนี้ อุทิศ นาคสวัสดิ์ (2514) ยังได้ทำการคำนวณค่าความถี่ของเสียงดนตรีไทยโดยอ้างอิงจากเสียงเปียโน รายละเอียดแสดงไว้ในภาคผนวก ข

งานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะทำการวิเคราะห์สัญญาณเสียงดนตรีไทยในระดับเสียงกลางที่เรียกกันว่า “ทางเพียงออ” ซึ่งมีขลุ่ยเพียงออและระนาดเอกเหล็กเป็นเครื่องดนตรีหลักสำหรับการเทียบเสียง

(มนตรี ตราโมท, 2540) เพื่อต้องการแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณทั้งในทางเวลาและทางความถี่พร้อมๆกัน โดยเลือกใช้วิธีการวิเคราะห์สัญญาณด้วยเทคนิคที่แตกต่างกัน 4 วิธี ได้แก่ การแปลงฟูรีเยร์เต็มหน่วย (discrete Fourier transform หรือ DFT) การแปลงฟูรีเยร์ในช่วงเวลาสั้น (short-time Fourier transform หรือ STFT) หรือ สเปกโตรแกรม (spectrogram) แบบจำลองเออาร์ (autoregressive หรือ AR) และการกระจายเชิงโหมด (modal distribution หรือ MD) วิธีการวิเคราะห์สัญญาณของฟูรีเยร์สามารถแยกสัญญาณให้เห็นองค์ประกอบทางความถี่ (frequency components) เท่านั้น ซึ่งไม่ได้บอกว่าความถี่เหล่านั้นเกิดขึ้นเมื่อใด เทคนิคสเปกโตรแกรมเป็นวิธีพื้นฐานในการวิเคราะห์สัญญาณที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Cohen, 1989) โดยจะนำฟังก์ชันหน้าต่าง (window function) มาคูณกับสัญญาณ เพื่อจะแบ่งสัญญาณออกเป็นช่วง ซึ่งการเลือกฟังก์ชันหน้าต่างให้เหมาะสมยังคงเป็นปัญหาอยู่ เพราะจะต้องเลือกระหว่างความสามารถแยกเวลา (time resolution) กับความสามารถแยกความถี่ (frequency resolution) กล่าวคือถ้าต้องการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงตามเวลาอย่างรวดเร็วของสัญญาณ (ต้องการความสามารถในการแยกเวลาสูง) จำเป็นต้องใช้ฟังก์ชันหน้าต่างในช่วงแคบๆ ซึ่งจะทำให้เทคนิคสเปกโตรแกรมมีความสามารถแยกความถี่ไม่ดีนัก งานวิจัยนี้จึงได้นำเทคนิคการกระจายเชิงโหมดมาใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณ เนื่องจากเทคนิคดังกล่าวได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อลดข้อจำกัดของเทคนิคสเปกโตรแกรม และยังสามารถตรวจจับองค์ประกอบทางความถี่ของสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาอย่างรวดเร็วได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคอื่นๆ (Pielemeier and Wakefield, 1996) นอกจากนี้ยังได้นำเทคนิคการวิเคราะห์สัญญาณด้วยแบบจำลองเออาร์มาใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณด้วย เนื่องจากยังคงให้ความสามารถสูงในการแยกความถี่ ถึงแม้ว่าจะใช้ข้อมูลที่ถูกแบ่งออกเป็นช่วง (windowed data) ในช่วงแคบๆก็ตาม จึงได้ส่งผลทำให้เทคนิคการวิเคราะห์สัญญาณด้วยแบบจำลองเออาร์มีความสามารถในการตรวจจับความถี่ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาอย่างรวดเร็วของสัญญาณเสียงได้ดี (Pian Totarong, 1983)

การวิเคราะห์สัญญาณเสียงขลุ่ยเพียงออและระนาดเอกเหล็กนี้ จะแบ่งออกเป็นกรณีเสียงโน้ตเดี่ยว และกรณีเสียงหลายโน้ต ผลการวิเคราะห์จากทั้ง 4 วิธีข้างต้นจะนำมาเปรียบเทียบกันเพื่อแสดงค่าความถี่หลักของระดับเสียงดนตรีไทย และยังนำไปสู่การระบุถึงเทคนิคที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์สัญญาณเสียงดนตรีไทย

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

- 1 เพื่อวิเคราะห์ระบบเสียงของดนตรีไทยด้วยหลักวิชาทางการวิเคราะห์สัญญาณ
- 2 เพื่อวิเคราะห์เสียงโน้ตเดี่ยวที่ได้จากขลุ่ยเพียงออและระนาดเอกเหล็ก ซึ่งเป็นเครื่องดนตรีหลักสำหรับการเทียบเสียงในวงเครื่องสายไทยและมโหรี

3 เพื่อศึกษาในขั้นต้นว่าเทคนิคการวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้นจะสามารถประยุกต์กับเสียงที่ได้จากการบรรเลงโน้ตหลายเสียงติดต่อกันได้ดีเพียงใด

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

- 1 การเก็บข้อมูลสัญญาณเสียงขลุ่ยเพียงออทำในห้องปิดโดยรอบ เพื่อกันเสียงรบกวนจากภายนอก
- 2 ห้องที่ดำเนินการเก็บข้อมูลมีพื้นที่กว้างมากจนเสียงจากการสะท้อนไม่มีผลใดๆ ต่อสัญญาณที่บันทึกได้
- 3 ไมโครโฟนเป็นชนิดที่ใช้ติดกับเนคไท (tiepin microphone) ซึ่งมีลักษณะสมบัติใกล้เคียงกับไมโครโฟนที่ใช้กับเครื่องลมไม้ (woodwind) โดยเฉพาะ
- 4 เสียงของขลุ่ยเพียงออและระนาดเอกเหล็กที่จะนำมาวิเคราะห์เป็นเสียงโน้ตเดี่ยว 7 ตัว ซึ่งเป็นระบบเสียงดนตรีไทย

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- 1 เก็บข้อมูลสัญญาณเสียงขลุ่ยเพียงออและระนาดเอกเหล็กในห้องปิด โดยใช้ไมโครโฟนและออสซิลโลสโคป
- 2 วิเคราะห์ข้อมูลด้วยเทคนิคที่แตกต่างกัน 4 แบบเพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้
- 3 ประยุกต์เทคนิควิธีที่ได้พัฒนาขึ้นกับการวิเคราะห์เสียงขลุ่ยเพียงออที่เป่าโน้ต 3 ถึง 4 เสียงติดต่อกันและเสียงระนาดเอกเหล็กที่บรรเลงหลายโน้ต

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1 สามารถทราบองค์ประกอบทางความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาของสัญญาณเสียงขลุ่ยเพียงออและระนาดเอกเหล็ก
- 2 สามารถระบุเครื่องมือ เทคนิค และกระบวนการที่ถูกต้องเหมาะสมตามหลักวิชาการสำหรับการวิเคราะห์สัญญาณเสียงดนตรีไทย
- 3 สามารถแจกแจงรายละเอียดระบบเสียงดนตรีไทยที่เป็นเสียงกลางหลัก เรียกกันว่า “ทางเพียงออ”

1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 5 บท และ 5 ภาคผนวก

บทที่ 1 เป็นบทนำกล่าวถึง ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของการวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยวิทยานิพนธ์ รวมทั้งกล่าวถึงเนื้อหาพอสังเขปของงานวิจัยวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงรายละเอียดของเทคนิคที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณ ได้แก่ การแปลงฟูริเยร์เต็มหน่วย (discrete Fourier transform หรือ DFT) การแปลงฟูริเยร์ในช่วงเวลาสั้น (short-time Fourier transform หรือ STFT) และแบบจำลองเออาร์ (autoregressive หรือ AR) พร้อมทั้งตัวอย่างการคำนวณของแต่ละวิธีการ

บทที่ 3 กล่าวถึงรายละเอียดของเทคนิคการกระจายเชิงโหมด (modal distribution หรือ MD) ซึ่งประกอบด้วย การออกแบบ MD การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของตัวกรองความถี่ และขั้นตอนการคำนวณ (รายละเอียดของสัญลักษณ์และตัวแปรที่ใช้รวบรวมไว้ในคำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ) รวมทั้งยังได้กล่าวถึงการพัฒนาโปรแกรม MATLAB เพื่อคำนวณและแสดงผล และการทดสอบโปรแกรม MD เปรียบเทียบกับ DFT และ STFT

บทที่ 4 กล่าวถึงรายละเอียดของการบันทึกเสียง และผลการวิเคราะห์เสียงขลุ่ยเพียงออและระนาดเอกเหล็กด้วยวิธีการทั้ง 4 วิธีข้างต้น ซึ่งแบ่งออกเป็นกรณีเสียงโน้ตเดี่ยว และกรณีเสียงหลายโน้ต พร้อมด้วยการอภิปรายผลการทดลอง

บทที่ 5 เป็นการสรุปและให้ข้อเสนอแนะ

ภาคผนวกมีทั้งหมด 5 ส่วน กล่าวคือ ภาคผนวก ก กล่าวถึง การเกิดเสียง การได้ยิน และไมโครโฟนที่ใช้ในงานวิจัย ภาคผนวก ข กล่าวถึง ความแตกต่างของระดับเสียงดนตรีไทยกับดนตรีสากล และความถี่ของเสียงดนตรีไทยที่นำเสนอโดย อูทิศ นาคสวัสดิ์ (2514) ภาคผนวก ค แสดงรายละเอียดโปรแกรมการคำนวณ MD และโปรแกรมวาดกราฟ 3 มิติ ภาคผนวก ง แสดงผลการวิเคราะห์เสียงโน้ตเดี่ยวของขลุ่ยเพียงออและระนาดเอกเหล็กด้วยวิธีการทั้ง 4 วิธีข้างต้น นอกจากนี้ยังได้รวบรวมบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ไว้ในภาคผนวก จ

บทที่ 2

เทคนิคการวิเคราะห์สัญญาณ

2.1 กล่าวนำ

สัญญาณเสียงคนตรีที่จะทำการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ มาจากการบันทึกสัญญาณโดยใช้ ไมโครโฟนเป็นตัววัดและบันทึกรูปคลื่นด้วยออสซิลโลสโคป Tektronic รุ่น TDS 420A เทคนิคที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์มี 4 วิธี ได้แก่ การแปลงฟูริเยร์เต็มหน่วย (discrete Fourier transform หรือ DFT) การแปลงฟูริเยร์ในช่วงเวลาสั้น (short-time Fourier transform หรือ STFT) แบบจำลองเออาร์ (autoregressive หรือ AR) และ การกระจายเชิงโหมด (modal distribution หรือ MD) ในบทนี้จะกล่าวถึงเทคนิค DFT STFT และ AR พร้อมทั้งตัวอย่างการคำนวณของแต่ละวิธีการ ส่วนเทคนิค MD มีรายละเอียดค่อนข้างมาก จะได้กล่าวถึงต่อไปในบทที่ 3

2.2 การแปลงฟูริเยร์เต็มหน่วย

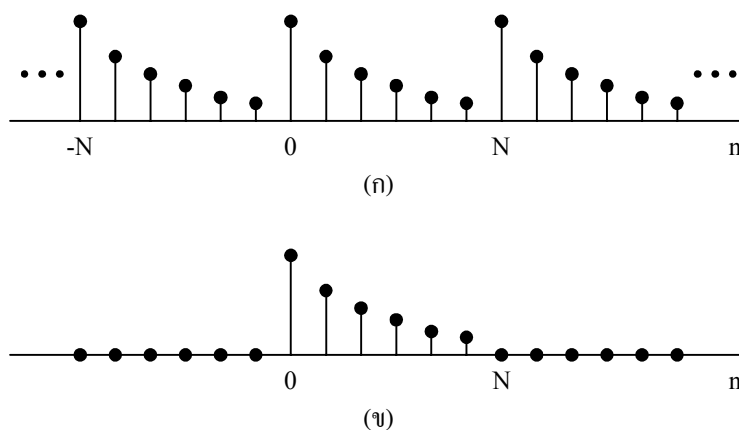
ผลการแปลงฟูริเยร์เต็มหน่วยของสัญญาณ $x(n)$ พิจารณาได้จากอนุกรมฟูริเยร์เต็มหน่วย (discrete Fourier series หรือ DFS) ของสัญญาณเป็นคาบ $\tilde{x}(n)$ ที่มีคาบเท่ากับ N แสดงได้ดังสมการ (2.1) โดยที่ $\tilde{X}(k)$ คือค่าสัมประสิทธิ์ของอนุกรมฟูริเยร์ ซึ่งคำนวณได้จาก $\tilde{x}(n)$ ตามความสัมพันธ์ดังสมการ (2.2) เมื่อพิจารณา $x(n)$ ให้เป็นหนึ่งคาบของ $\tilde{x}(n)$ แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 2.1

$$\tilde{x}(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \tilde{X}(k) e^{j\left(\frac{2\pi}{N}\right)kn} \quad (2.1)$$

$$\tilde{X}(k) = \sum_{n=0}^{N-1} \tilde{x}(n) e^{-j\left(\frac{2\pi}{N}\right)kn} \quad (2.2)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ฟูริเยร์ของ $x(n)$ จึงมีค่าเท่ากับหนึ่งคาบของ $\tilde{X}(k)$ แสดงดังสมการ (2.3) ซึ่งเรียกว่า ผลการแปลงฟูริเยร์เต็มหน่วย หรือ DFT (Oppenheim and Schaffer, 1989) สเปกตรัมขนาดของ $X(k)$ จะแสดงองค์ประกอบทางความถี่ของสัญญาณ $x(n)$ ที่ให้พลังงานสูงสุด หรือเรียกว่า ฟอर्मแนนท์ (formant) ในกรณีสัญญาณเสียงคนตรี (สราวุฒิ สุจิตจร, 2545) นำอัลกอริทึมการแปลง

ฟูรีเยร์อย่างรวดเร็ว (fast Fourier transform หรือ FFT) มาใช้ในการคำนวณ DFT โดยที่กำหนดให้ N เป็นค่ากำลังของสอง และ $W_N = e^{-j(2\pi/N)}$ จะได้ $X(k)$ มีค่าตามสมการ (2.4) อัลกอริทึม



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างของ (ก) สัญญาณ $\tilde{x}(n)$ และ (ข) สัญญาณ $x(n)$

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j\left(\frac{2\pi}{N}\right)kn}, \quad 0 \leq k \leq N-1 \quad (2.3)$$

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{kn}, \quad 0 \leq k \leq N-1 \quad (2.4)$$

FFT จะทำการแบ่ง $x(n)$ ออกเป็นสองลำดับเท่าๆกัน คือลำดับของเลขคู่ (แทน $n = 2r$) และลำดับของเลขคี่ (แทน $n = 2r + 1$) โดย $0 \leq r \leq (N/2) - 1$ ดังสมการ (2.5) ให้ $W_N^2 = W_{N/2}$ จะได้ DFT จำนวน N จุด เป็นผลรวมของ DFT จำนวน $N/2$ จุด สองลำดับ แสดงดังสมการ (2.6) ซึ่งแต่ละลำดับ สามารถแยกออกเป็นผลรวมของ DFT จำนวน $N/4$ จุด สองลำดับ จนกระทั่งแยก

$$X(k) = \sum_{r=0}^{(N/2)-1} x(2r) W_N^{2rk} + \sum_{r=0}^{(N/2)-1} x(2r+1) W_N^{(2r+1)k} \quad (2.5)$$

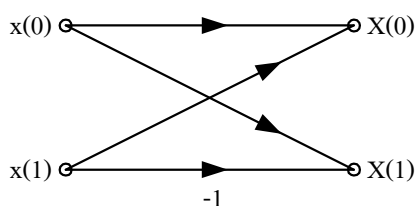
$$X(k) = \sum_{r=0}^{(N/2)-1} x(2r) W_{N/2}^{rk} + W_N^k \sum_{r=0}^{(N/2)-1} x(2r+1) W_{N/2}^{rk} \quad (2.6)$$

ได้เป็น DFT จำนวน 2 จุด $N/2$ ลำดับ กระบวนการนี้จะสิ้นสุด การคำนวณ DFT จำนวน 2 จุด แสดงได้ดังสมการ (2.7) และเนื่องจาก $W_1^{0k} = 1$ และ $W_2^k = (-1)^k$ จะได้ค่าของ $X(k)$ แสดงดังสมการ (2.8) และ (2.9) แทนด้วยกราฟที่เรียกว่า บัตเตอร์ฟลาย (butterfly) ได้ดังรูปที่ 2.2 และการคำนวณ DFT จำนวน 4 จุด แสดงดังรูปที่ 2.3 (Oppenheim and Schaffer, 1989)

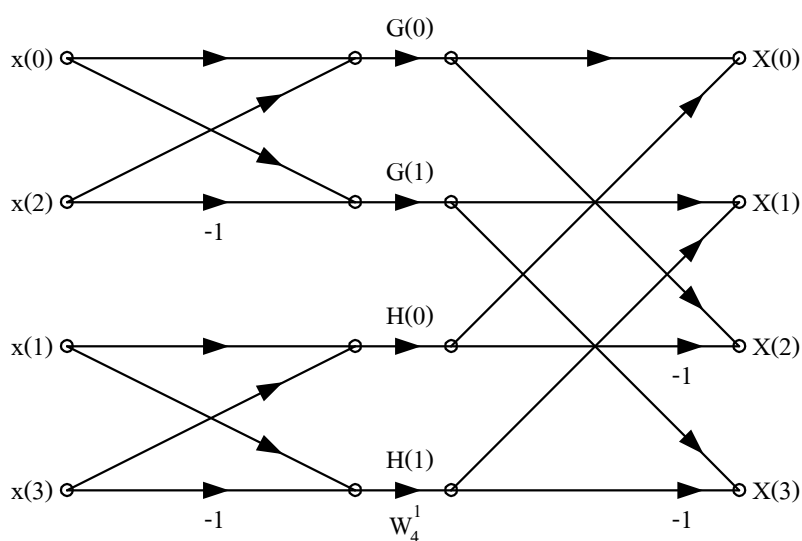
$$X(k) = x(0)W_1^{0k} + W_2^k [x(1)W_1^{0k}] \quad , \quad k = 0, 1 \quad (2.7)$$

$$X(0) = x(0) + x(1) \quad (2.8)$$

$$X(1) = x(0) - x(1) \quad (2.9)$$



รูปที่ 2.2 กราฟของการคำนวณ DFT จำนวน 2 จุด (บัตเตอร์ฟลาย)

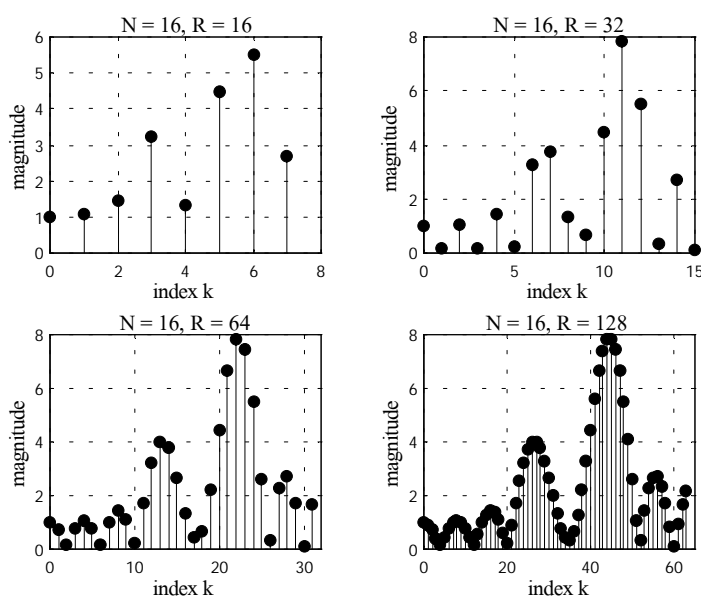


รูปที่ 2.3 กราฟของการคำนวณ DFT จำนวน 4 จุด

สำหรับการวิเคราะห์สัญญาณด้วย DFT การเพิ่มความถูกต้องของตำแหน่งเส้นสเปกตรัม ทำได้โดยเพิ่มขนาดของการคำนวณ DFT ให้เป็น R จุด ซึ่งจำนวนจุดที่เพิ่มขึ้นจะเป็นค่าศูนย์ ตัวอย่างต่อไปนี้จะแสดงการคำนวณ DFT ของสัญญาณไซน์ซอซด์ $y(n)$ มีค่าตามสมการ (2.10) โดยกำหนดให้ $N = 16$, $f_1 = 0.22$ Hz, $f_2 = 0.34$ Hz และ R มีค่าเปลี่ยนแปลงจาก 16 จุด ถึง 128 จุด ซึ่ง

$$y(n) = \frac{1}{2} \sin(2\pi f_1 n) + \sin(2\pi f_2 n), \quad 0 \leq n \leq N-1 \quad (2.10)$$

จากรูปที่ 2.4 จะสังเกตได้ว่า ที่ R เท่ากับ 64 จุด ขนาดสูงสุดปรากฏที่ตำแหน่ง k เท่ากับ 13 และ 22 ซึ่งตรงกับความถี่ 0.2031 Hz และ 0.3438 Hz ตามลำดับ และที่ R เท่ากับ 128 จุด ขนาดสูงสุดปรากฏที่ตำแหน่ง k เท่ากับ 27 และ 44 ซึ่งตรงกับความถี่ 0.2109 Hz และ 0.3438 Hz ตามลำดับ นั่นคือเมื่อ R เพิ่มมากขึ้น สเปกตรัมของ $y(n)$ ปรากฏขนาดสูงสุดที่สองความถี่อย่างชัดเจน และมีค่าใกล้เคียงกับความถี่จริงของสัญญาณ (Mitra, 2001)



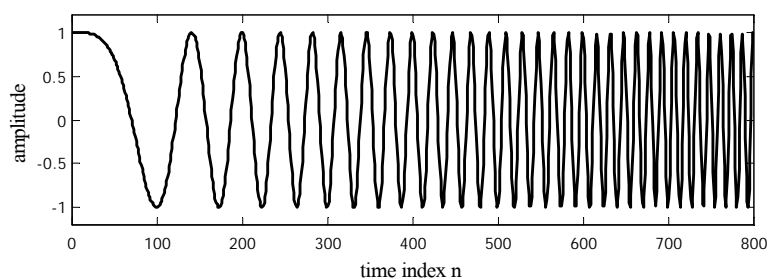
รูปที่ 2.4 ผลการวิเคราะห์สัญญาณ $y(n)$ ด้วย DFT

2.3 การแปลงฟูริเยร์ในช่วงเวลาสั้น

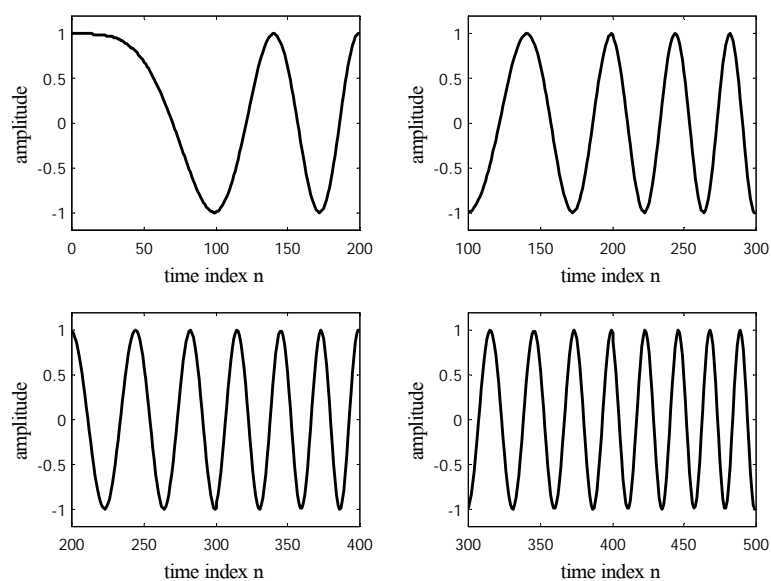
สัญญาณที่มีองค์ประกอบของไซน์ซอซด์และมีพารามิเตอร์ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา สามารถวิเคราะห์สเปกตรัมของสัญญาณได้ด้วยวิธี DFT แต่เสียงดนตรีเป็นสัญญาณไม่นิ่ง (nonstationary

signal) จึงได้นำไปสู่แนวคิดของการแปลงฟูรีเยร์ไม่อิสระทางเวลา (time-dependent Fourier transform) หรือเรียกว่า การแปลงฟูรีเยร์ในช่วงเวลาสั้น (short-time Fourier transform หรือ STFT) แสดงดังสมการ (2.11) (Mitra, 2001) โดยฟังก์ชันหน้าต่าง (window function) $w(n)$ ทำการแบ่ง $x(n)$ ออกเป็นส่วนสั้นๆ ซึ่งแต่ละส่วนนี้พิจารณาให้เป็นสัญญาณที่ไม่ผันแปรตามเวลา เช่น พิจารณาสัญญาณเชิร์ป (chirp signal) ดังรูปที่ 2.5 แบ่งสัญญาณนี้ออกเป็นส่วนๆ ดังรูปที่ 2.6

$$X_{\text{STFT}}(e^{j\omega}, n) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} x(n-m)w(m)e^{-j\omega m} \quad (2.11)$$



รูปที่ 2.5 สัญญาณเชิร์ป จำนวน 800 จุด



รูปที่ 2.6 สัญญาณเชิร์ปที่ถูกแบ่งออกเป็นส่วนสั้นๆ

ด้วย $w(n)$ แบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีความยาว 200 จุด และมีการเหลื่อม (overlap) กันจำนวน 100 จุด ซึ่งสามารถพิจารณาได้ว่า $w(n)$ ถูกเลื่อนไปทางขวามือ (Goswami and Chan, 1999) ครั้งละ 100 จุด จากสมการ (2.11) n คือตัวแปรทางเวลา และ ω คือตัวแปรทางความถี่ต่อเนื่อง เมื่อทำการซัดตัวอย่าง $X_{\text{STFT}}(e^{j\omega}, n)$ ที่ความถี่ซึ่งมีระยะห่างเท่าๆ กัน N จำนวน จะได้ $X_{\text{STFT}}(k, n)$ มีค่าตามสมการ (2.12) (Mitra, 2001) โดยที่ $0 \leq k \leq N-1$ N คือจำนวนจุดในการคำนวณ DFT และ $w(n)$ มีความยาว R จำนวน ซึ่ง $N \geq R$ การแสดงสเปกตรัมขนาดของ $X_{\text{STFT}}(k, n)$ จะเรียกว่าสเปกโตรแกรม (spectrogram) ซึ่งมีค่าอยู่ในทิศทาง z บนระนาบ x - y สเปกโตรแกรมแถบกว้าง

$$\begin{aligned} X_{\text{STFT}}(k, n) &= X_{\text{STFT}}(e^{j\omega}, n) \Big|_{\omega=2\pi k/N} \\ &= \sum_{m=0}^{R-1} x(n-m)w(m)e^{-j\left(\frac{2\pi}{N}\right)km} \end{aligned} \quad (2.12)$$

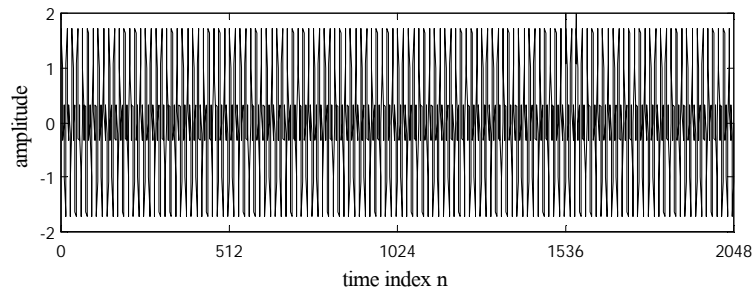
(wideband) เกิดจาก $w(n)$ ที่มีความยาวน้อย ซึ่งจะมีความสามารถแยกเวลาได้ดี ในทางตรงข้าม สเปกโตรแกรมแถบแคบ (narrowband) เกิดจาก $w(n)$ ที่มีความยาวมาก ซึ่งก็จะมีความสามารถแยกความถี่ได้ดี (Mitra, 2001)

ตัวอย่างต่อไปนี้จะแสดงถึงผลกระทบของความยาวของ $w(n)$ ในการคำนวณ STFT ของสัญญาณ ซึ่งประกอบด้วยไซนูซอยด์สองความถี่และมีเคลตาฟังก์ชันเกิดขึ้นที่เวลาใกล้เคียงกัน แสดงดังสมการ (2.13) โดยที่ $\nu_1 = 500$ Hz, $\nu_2 = 1,000$ Hz, $t_1 = 192$ ms, $t_2 = 196$ ms และ $K = 3$ สัญญาณ $f(t)$ มีอัตราการซัดตัวอย่าง 8 kHz และมีความยาว 2,048 จุด $w(n)$ เป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีความยาวต่างกันคือ 128 จุด 64 จุด 32 จุด และ 16 จุด ตามลำดับ โดยที่ $w(n)$ เลื่อนไปทางขวามือครั้งละ 1 จุด และ $N = 128$ รูปที่ 2.7 และ 2.8 แสดงสัญญาณ $f(t)$ และผลจาก

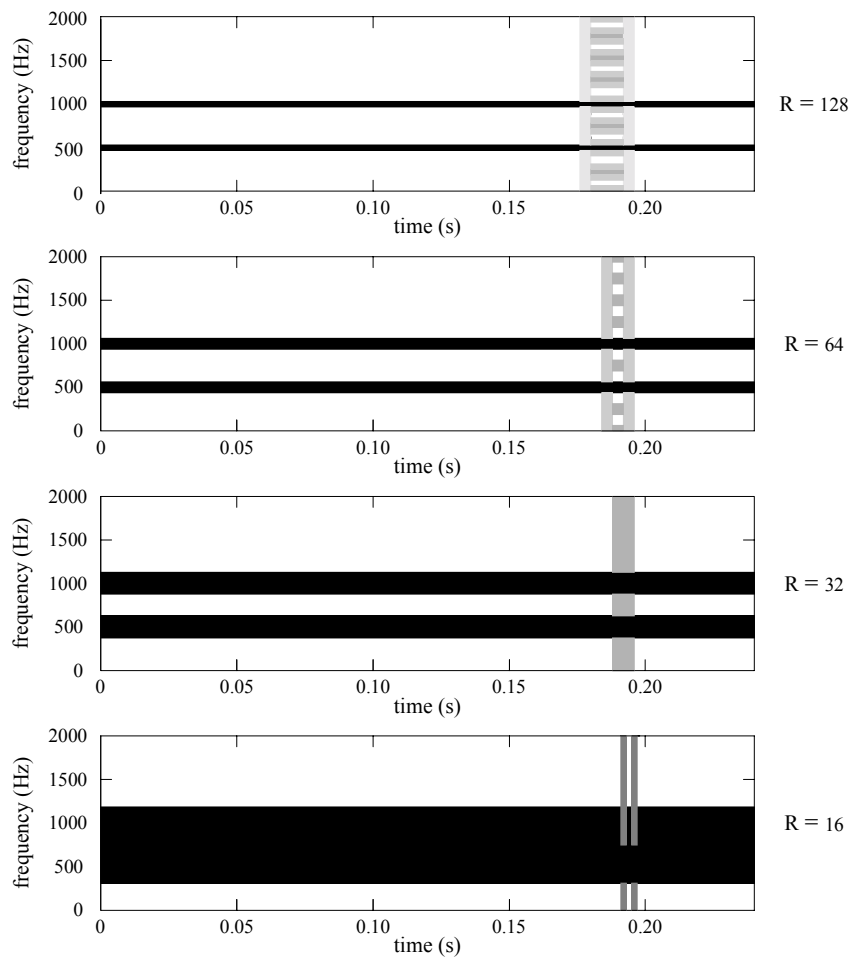
$$f(t) = \sin 2\pi\nu_1 t + \sin 2\pi\nu_2 t + K[\delta(t-t_1) + \delta(t-t_2)] \quad (2.13)$$

การคำนวณ STFT เมื่อความยาวของ $w(n)$ มีค่าแตกต่างกันบนแกนเวลา-ความถี่ เพื่อเปรียบเทียบระหว่างความสามารถแยกเวลาและความสามารถแยกความถี่ จากรูปที่ 2.8 สังเกตได้ว่า เมื่อ $w(n)$ มีความยาว 128 และ 64 จุด ทั้งสองความถี่ของไซนูซอยด์ปรากฏชัดเจน แต่ไม่สามารถระบุเวลาที่เกิดขึ้นของเคลตาฟังก์ชันได้ ในทางกลับกัน เมื่อ $w(n)$ มีความยาวลดลงเป็น 16 จุด จะไม่สามารถแยกค่าความถี่ได้ แต่เคลตาฟังก์ชันทั้งสองเวลาปรากฏชัดเจน เนื่องจาก เคลตาฟังก์ชันเกิดขึ้นห่างกัน

4 ms ซึ่งคิดเป็น 32 จุด ความยาวของ $w(n)$ ที่มีจำนวนเท่ากับหรือมากกว่า 32 จุด จึงไม่แคบพอที่จะแยกแยะเดลตาฟังก์ชันได้ (Goswami and Chan, 1999)



รูปที่ 2.7 สัญญาณ $f(t)$



รูปที่ 2.8 ผลการวิเคราะห์สัญญาณ $f(t)$ ด้วย STFT

2.4 วิธีแบบจำลองเออาร์

วิธี AR เป็นการจำลองสัญญาณด้วยแบบจำลองเออาร์ (หรือ all pole model) การออกแบบทำได้ง่าย และมีสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าพารามิเตอร์เป็นเชิงเส้น การจำลองสัญญาณ $x(n)$ จะพิจารณาจากการประมาณเชิงเส้นของ $x(n)$ กล่าวคือการประมาณค่าปัจจุบันของ $x(n)$ ซึ่งมีความยาวของข้อมูล N จำนวน อาศัยผลรวมเชิงเส้นของ $x(n)$ M จำนวนที่ปรากฏขึ้นก่อนหน้า สมการ (2.14) แสดงค่าประมาณของ $x(n)$ และสมการ (2.15) แสดงผลต่างของ $x(n)$ และ $\hat{x}(n)$ ซึ่ง e_n คือค่าผิดพลาดจากการประมาณเชิงเส้น (linear prediction error) ทำการแปลง z สมการ (2.15)

$$\hat{x}(n) = -\sum_{i=1}^M a_i x(n-i) \quad (2.14)$$

$$x(n) - \hat{x}(n) = \sum_{i=0}^M a_i x(n-i) = e_n \quad (2.15)$$

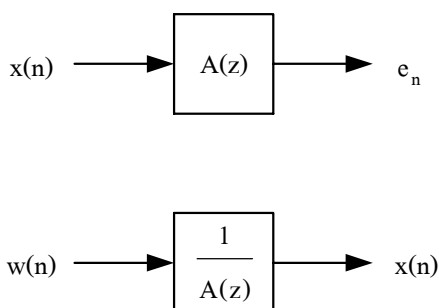
โดยให้ $a_0 = 1$ และ $Z[e_n]$ คือผลการแปลง z ของ e_n แสดงได้ดังสมการ (2.16) (2.17) (2.18) และ (2.19) ตามลำดับ (Totarong, 1983) กำหนดให้ $A(z) = 1 + \sum_{i=1}^M a_i z^{-i}$ สมการ (2.18) หมายถึงถึงการประมาณเชิงเส้นที่มีทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน $A(z)$ มีอินพุต $x(n)$ และมีเอาต์พุต e_n ในกรณีที่ M มาก e_n จะประมาณให้เป็นสัญญาณรบกวนขาว (white noise) ในทางกลับกันสมการ

$$Z\left[\sum_{i=0}^M a_i x(n-i)\right] = Z[e_n] \quad (2.16)$$

$$X(z) + a_1 z^{-1} X(z) + a_2 z^{-2} X(z) + \dots + a_M z^{-M} X(z) = Z[e_n] \quad (2.17)$$

$$X(z) \left(1 + \sum_{i=1}^M a_i z^{-i} \right) = Z[e_n] \quad (2.18)$$

$$X(z) = \frac{Z[e_n]}{1 + \sum_{i=1}^M a_i z^{-i}} \quad (2.19)$$



รูปที่ 2.9 การประมาณเชิงเส้นและแบบจำลองเออาร์

(2.19) หมายถึงแบบจำลองเออาร์ที่มีทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน $1/A(z)$ มีอินพุตคือสัญญาณรบกวนขาว $w(n)$ ซึ่งมีค่าความผันแปร (variance) เท่ากันกับค่าความผันแปรของ e_n และมีเอาต์พุต $x(n)$ แสดงอยู่ในรูปที่ 2.9 (Therrien, 1992) จากสมการ (2.19) M คืออันดับของแบบจำลองเออาร์ ซึ่ง $M \leq N-1$ และ a_i คือค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลอง ค่าความถี่ของสัญญาณ $x(n)$ คำนวณได้จากสเปกตรัมขนาดของ $X(z)$ โดยที่ให้ $z = e^{j\omega}$ ตามสมการ (2.20) ซึ่งจะไม่มีผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงขนาดแอมพลิจูดในสัญญาณ (Griffiths, 1975)

$$|X(z)| = \frac{1}{\left| 1 + \sum_{i=1}^M a_i z^{-i} \right|} \quad (2.20)$$

การประมาณค่า a_i เลือกใช้อัลกอริทึมของเบิร์ก (Burg algorithm) เพราะเป็นการประมาณพารามิเตอร์ของแบบจำลองโดยตรงจากสัญญาณและนำมาประยุกต์ใช้กับงานต่างๆ ได้ดี (Therrien, 1992) อัลกอริทึมของเบิร์กเป็นกระบวนการทำซ้ำ โดยในแต่ละรอบจะประมาณค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (reflection coefficient, $a_{M,M}$) เพื่อลดผลรวมของค่าผิดพลาดจากการประมาณเชิงเส้น (e_M) จากสมการ (2.15) ซึ่ง e_n คือค่าผิดพลาดจากการประมาณเชิงเส้นแบบไปหน้า (forward) แทนด้วย $f_{M,k}$ แสดงดังสมการ (2.21) $b_{M,k}$ คือค่าผิดพลาดจากการประมาณเชิงเส้นแบบย้อนกลับ (backward) แสดงดังสมการ (2.22) และ e_M แสดงได้ดังสมการ (2.23) (Marple, 1980) โดยที่ $1 \leq k \leq N-M$ และ $0 \leq m \leq M$ สัญลักษณ์ * หมายถึงค่าสังยุคเชิงซ้อน ค่าสัมประสิทธิ์ a_i จะ

$$f_{M,k} = \sum_{i=0}^M a_{M,i} x_{k+M-i} \quad (2.21)$$

$$b_{M,k} = \sum_{i=0}^M a_{M,i}^* x_{k+i} \quad (2.22)$$

$$e_M = \sum_{k=1}^{N-M} |f_{M,k}|^2 + \sum_{k=1}^{N-M} |b_{M,k}|^2 \quad (2.23)$$

เป็นไปตามเลฟวินสัน รีเคอร์ชัน (Levinson recursion) ดังสมการ (2.24) ตั้งแต่อันดับ 1 ถึง M ทำให้แบบจำลองเออาร์ที่อาจพิจารณาได้ว่าเป็นตัวกรองความถี่เออาร์นั้นมีเสถียรภาพ (Marple, 1980) รูปแบบซ้ำของความสัมพันธ์ระหว่าง $f_{M,k}$ และ $b_{M,k}$ แสดงได้ดังสมการ (2.25) และ (2.26) ตามลำดับ โดยที่ $1 \leq k \leq N-M$ และสัญลักษณ์ * หมายถึงค่าสังยุคเชิงซ้อน แทนค่าสมการ (2.25) และ (2.26) ลงในสมการ (2.23) จะได้ความสัมพันธ์สำหรับคำนวณ $a_{M,M}$ เป็นดังสมการ (2.27) (Marple, 1980) และเนื่องจาก $|a_{M,M}| \leq 1$ จึงทำให้ตัวกรองความถี่ที่คำนวณได้จากอัลกอริทึมของเบิร์กมีเฟสต่ำสุด (Therrien, 1992)

$$a_{M,k} = a_{M-1,k} + a_{M,M} a_{M-1,M-k}^* \quad (2.24)$$

$$f_{M,k} = f_{M-1,k+1} + a_{M,M} b_{M-1,k} \quad (2.25)$$

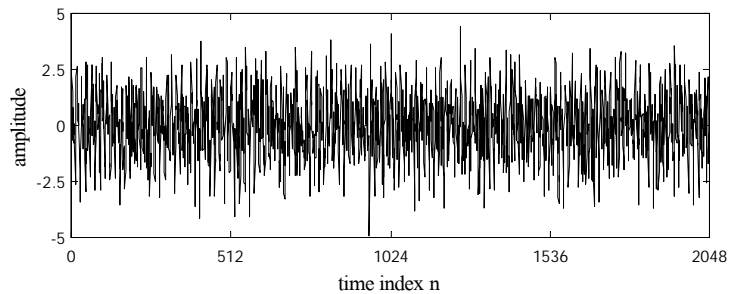
$$b_{M,k} = b_{M-1,k} + a_{M,M}^* f_{M-1,k+1} \quad (2.26)$$

$$a_{M,M} = -\frac{2 \sum_{k=1}^{N-M} b_{M-1,k}^* f_{M-1,k+1}}{\sum_{k=1}^{N-M} [|b_{M-1,k}|^2 + |f_{M-1,k+1}|^2]} \quad (2.27)$$

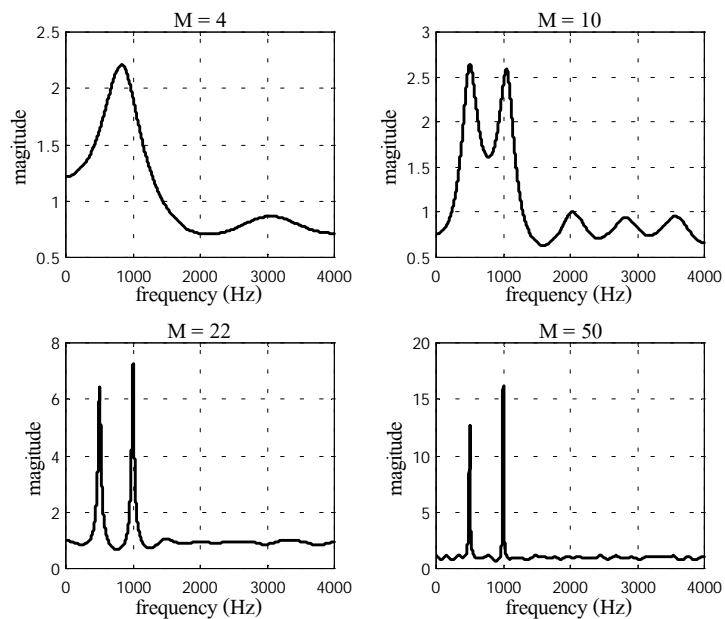
การประมาณสเปกตรัมของสัญญาณด้วยแบบจำลองเออาร์ ซึ่งใช้อัลกอริทึมของเบิร์กในการคำนวณสัมประสิทธิ์ของแบบจำลอง อาจเรียกได้เป็นการประมาณสเปกตรัมของสัญญาณแบบเอนโทรปีสูงสุด (maximum entropy หรือ ME) (Therrien, 1992) การเลือกอันดับของแบบจำลองให้เหมาะสมนั้นจะมีผลต่อการประมาณที่ถูกต้อง ตัวอย่างต่อไปนี้ แสดงการจำลองสัญญาณ $g(t)$ ซึ่งประกอบด้วยไซนูซอยด์สองความถี่และสัญญาณสุ่ม อันดับของแบบจำลองเออาร์ที่เลือกใช้ คือ 4 10 22 และ 50 ตามลำดับ สัญญาณ $g(t)$ มีความยาว 2,048 จุด และมีอัตราการซีกตัวอย่าง 8 kHz

$$g(t) = \sin 2\pi v_1 t + \sin 2\pi v_2 t + r(t) \quad (2.28)$$

แสดงได้ดังสมการ (2.28) โดยที่ $v_1 = 500$ Hz, $v_2 = 1,000$ Hz และ $r(t)$ คือสัญญาณสุ่มที่มีการแจกแจงแบบเกาส์ (Gaussian distribution) รูปที่ 2.10 และ 2.11 แสดงสัญญาณ $g(t)$ และผลการประมาณสเปกตรัมจากทรานสเฟอร์ฟังก์ชันที่มีอันดับของแบบจำลองแตกต่างกัน จะสังเกตได้ว่า เมื่อ M มีค่าเพิ่มมากขึ้น สเปกตรัมที่ได้จะมีความถูกต้องและชัดเจนมากยิ่งขึ้น โดยที่ $M = 22$ จะปรากฏค่าความถี่ของสัญญาณในหูชอยด์สองชุดเท่ากับ 502 Hz และ 998.54 Hz ตามลำดับ และที่ $M = 50$ จะปรากฏค่าความถี่เท่ากับ 499.03 Hz และ 1,000 Hz ตามลำดับ



รูปที่ 2.10 สัญญาณ $g(t)$



รูปที่ 2.11 ผลการวิเคราะห์สัญญาณ $g(t)$ ด้วย AR

บทที่ 3

การกระจายเชิงโมด

3.1 กล่าวนำ

เนื่องจาก DFT ไม่สามารถอธิบายถึงลักษณะของเสียงดนตรีซึ่งเป็นสัญญาณที่แปรตามเวลาได้อย่างสมบูรณ์เพราะขาดส่วนประกอบทางเวลา และจากข้อจำกัดของ STFT ในการเลือกระหว่างความยาวของฟังก์ชันหน้าต่างและแบนด์วิดท์ (bandwidth) ดังที่ได้กล่าวถึงมาแล้วในบทก่อน พัฒนาการทางทฤษฎีของการแปลงสัญญาณทั้งในมิติเวลาและมิติความถี่จึงเกิดขึ้น เราเรียกการแปลงเหล่านี้ว่าการกระจายทางเวลา-ความถี่ (time-frequency (TF) distribution) (Pielemeier, Wakefield and Simoni, 1996) เช่น การกระจายวิกเนอร์ (Wigner distribution หรือ WD) และการกระจายชอย-วิลเลียมส์ (Choi-Williams distribution) เป็นต้น ซึ่งจัดอยู่ในตระกูลของโคเฮน (Cohen's class) (Cohen, 1989) เทคนิคการกระจายสัญญาณในตระกูลของโคเฮน ช่วยให้สามารถออกแบบเคอร์เนล⁺ (kernel) สำหรับสัญญาณเสียงดนตรี เรียกว่า เคอร์เนลเชิงโมด (modal kernel) และสร้างได้เป็นการกระจายเชิงโมด (modal distribution หรือ MD) ซึ่งมีคุณสมบัติอยู่ระหว่าง STFT และ WD มีข้อดีในการลดไบแอสแบบเรียบ (smoothing bias) ของ STFT และไม่เกิดผลคูณเชิงเวกเตอร์แบบไขว้ข้าม (cross product) ดังเช่นกรณีของ WD (Pielemeier, Wakefield and Simoni, 1996) บทนี้จึงอธิบายเกี่ยวกับ MD และการประยุกต์ซึ่งเกี่ยวข้องกับการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของตัวกรองความถี่และขั้นตอนการคำนวณ ซึ่งอ้างอิงมาจากบทความของ Pielemeier and Wakefield (1996) การออกแบบ MD มีความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์และตัวแปรที่เกี่ยวข้องเป็นจำนวนมาก รายละเอียดความหมายของสัญลักษณ์และตัวแปรต่างๆ จะปรากฏอยู่ในคำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ นอกจากนี้ บทที่ 3 ยังได้กล่าวถึงการพัฒนาโปรแกรม MATLAB เพื่อคำนวณและแสดงผล และการทดสอบโปรแกรม MD เปรียบเทียบกับ DFT และ STFT

⁺ เคอร์เนล (kernel หรือ arbitrary function) ซึ่งโดยทั่วไป เคอร์เนลอาจจะขึ้นอยู่กับเวลาและความถี่อย่างชัดเจน และยังเป็นฟังก์ชันของสัญญาณอีกด้วย การเลือกใช้เคอร์เนลที่ต่างกัน ก็จะทำให้ได้การกระจายที่แตกต่างกันไป (Cohen, 1989)

3.2 การกระจายเชิงโมด (MD)

โดยทั่วไป เทคนิคการกระจายสัญญาณในตระกูลของโคเฮนประกอบด้วยการแปลงเชิงเส้นของ WD แสดงดังสมการ (3.1) โดย $\varphi(\tau, \xi; t, \omega)$ คือเคอเนลสำหรับการแปลงเชิงเส้น ซึ่ง t คือเวลาต่อเนื่อง (s) ω คือความถี่ต่อเนื่อง (rad/s) τ คือค่าล่าหลัง (lag) ทางเวลาต่อเนื่อง (s) และ ξ คือค่าล่าหลังทางความถี่ต่อเนื่อง (rad/s) W_s คือ WD ของสัญญาณ $s(t)$ ใดๆ แสดงดังสมการ (3.2) และ $R_s(t, \tau)$ คือ ฟังก์ชันอัตโนมัติสหสัมพันธ์ขณะหนึ่ง (instantaneous autocorrelation function) มีค่าตามสมการ (3.3) ซึ่งสัญลักษณ์ * หมายถึงค่าสังยุคเชิงซ้อน

$$C(t, \omega; \varphi) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} W_s(\tau, \xi) \varphi(t - \tau, \omega - \xi; t, \omega) d\tau d\xi \quad (3.1)$$

$$W_s(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R_s(t, \tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (3.2)$$

$$R_s(t, \tau) = s(t - \tau/2) s^*(t - \tau/2) \quad (3.3)$$

เราสามารถจำลองสัญญาณเสียงดนตรีได้เป็น $\bar{s}(t)$ แสดงดังสมการ (3.4) (Pielemeier and Wakefield, 1996) โดยที่ $\bar{s}(t)$ อาจจะประกอบด้วยเสียงของเครื่องดนตรีมากกว่าหนึ่งชิ้น M คือจำนวนของความถี่พาร์เซี่ยล⁺⁺ แบบบวก (positive partial frequency) จากเครื่องดนตรีทั้งหมดที่มีอยู่ $\bar{B}_\ell(t)$ และ $\phi_\ell(t)$ คือ แอมพลิจูดและเฟสที่เปลี่ยนตามเวลาของแต่ละพาร์เซี่ยลเฉพาะเครื่องดนตรีนั้นๆ พิจารณาสัญญาณ $\bar{s}(t)$ ในสถานะอยู่ตัวจะได้เป็น $s(t)$ แสดงดังสมการ (3.5) โดยที่ ω_ℓ คือค่าความถี่ขณะหนึ่ง (instantaneous frequency) B_ℓ และ ϕ_ℓ คือแอมพลิจูดและเฟสของแต่ละพาร์เซี่ยล

$$\bar{s}(t) = \sum_{\ell=1}^M \bar{B}_\ell(t) e^{j\phi_\ell(t)} \quad (3.4)$$

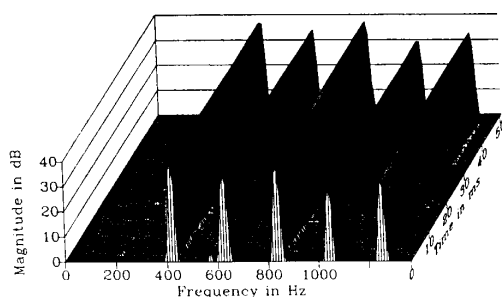
$$s(t) = \sum_{\ell=1}^M B_\ell e^{j(\omega_\ell t + \phi_\ell)} \quad (3.5)$$

⁺⁺ พาร์เซี่ยล (partial) คือความถี่ที่รวมกันอยู่ในสัญญาณ ซึ่งในกรณีเสียงดนตรีจะเรียกว่าพาร์เซี่ยล

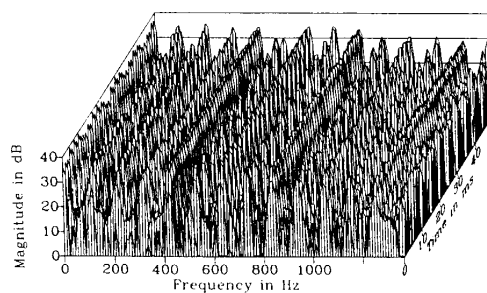
สมการ (3.6) แสดง WD ของสัญญาณ $s(t)$ โดยผลบวกส่วนแรกเรียกว่า ออโตเทอม (auto term) เป็นผลคูณตัวเองของแต่ละพาร์เซิลของแบบจำลอง B_k^2 คือขนาดของออโตเทอมตัวที่ k ซึ่งมีค่าเท่ากับแอมพลิจูดของพาร์เซิลตัวที่ k (B_k) ยกกำลังสอง ω_k คือตำแหน่งที่เกิดออโตเทอมตัวที่ k ซึ่งตรงกับความถี่พาร์เซิลตัวที่ k ของแบบจำลอง และ $\delta(\omega)$ คือเดลตาฟังก์ชัน ผลบวกสองครั้งเรียกว่าครอสเทอม (cross term) หรือผลคูณเชิงเวกเตอร์แบบไขว้ข้าม (cross product) ซึ่งเกิดจากผลคูณระหว่างพาร์เซิลที่แตกต่างกัน โดยที่ $B_k B_\ell$ คือขนาดของครอสเทอมซึ่งเป็นผลคูณ

$$W_s(t, \omega) = \sum_{k=1}^M B_k^2 \delta(\omega - \omega_k) + \sum_{k=1}^M \sum_{\substack{\ell=1 \\ \ell \neq k}}^M B_k B_\ell \cos([\omega_k - \omega_\ell]t + \phi_k - \phi_\ell) \delta(\omega - (\omega_k + \omega_\ell)/2) \quad (3.6)$$

ระหว่างแอมพลิจูดขององค์ประกอบ k และ ℓ และ $(\omega_k + \omega_\ell)/2$ คือตำแหน่งที่เกิดครอสเทอม ซึ่งอยู่ระหว่างความถี่ขององค์ประกอบ k และ ℓ ตามลำดับ ครอสเทอมนี้ก่อให้เกิดผลกระทบในการกระจาย กล่าวคือ ทำให้ปรากฏพาร์เซิลที่ความถี่ซึ่งไม่มีพาร์เซิลอยู่ในสัญญาณเดิมและครอสเทอมบางส่วนจะไปปรากฏที่ความถี่เดียวกันกับแอมพลิจูดของออโตเทอมซึ่งมีพาร์เซิลอยู่ รูปที่ 3.1



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.1 ผลการวิเคราะห์สัญญาณเสียงไวโอลิน โน้ต G#3

(ก) ผลจากเทคนิค STFT และ (ข) ผลจากเทคนิค WD

หมายเหตุ จาก “A high-resolution time-frequency representation for musical instrument signals”, โดย Pielemeier and Wakefield, 1996, The Journal of the Acoustical Society of America, 99, 2383.

แสดงผลการวิเคราะห์เสียงไวโอลินโน้ต G#3 โดย (ก) แสดงผลจากเทคนิค STFT และ (ข) แสดงผลจากเทคนิค WD ซึ่งเราจะสังเกตเห็นผลกระทบของคrosstomปรากฏอยู่ในผลการวิเคราะห์ด้วย WD การกระจายทางเวลา-ความถี่ของสัญญาณ $s(t)$ โดยปราศจากคrosstomจึงเป็นดังสมการ (3.7) ซึ่ง $\varphi(\tau, \xi)$ คือเคอเนลสำหรับการกระจายนี้แสดงได้ดังสมการ (3.8) โดยที่ $h_{LP}(\tau)$ คือวงจรรองแบบผ่านต่ำ (low pass filter) และ $\delta(\xi)$ คือเดลตาฟังก์ชัน $h_{LP}(\tau)$ มีค่าความถี่ตัดบน (upper cutoff frequency) ต่ำกว่าระยะห่างทางความถี่ต่ำสุด ($\Delta\omega_{\min}$) ที่แสดงดังสมการ (3.9) ซึ่ง ω_k และ ω_ℓ คือค่าความถี่พาร์เซิลขององค์ประกอบ k และ ℓ ที่อยู่ชิดกันมากที่สุด เมื่อพิจารณา

$$C(t, \omega; \varphi) = \sum_{k=1}^M B_k^2 \delta(\omega - \omega_k) \quad (3.7)$$

$$\varphi(\tau, \xi) = h_{LP}(\tau) \delta(\xi) \quad (3.8)$$

$$\Delta\omega_{\min} = \min(|\omega_k - \omega_\ell|), \quad \left\{ \begin{array}{l} 1 \leq (k \text{ and } \ell) \leq M \\ k \neq \ell \end{array} \right\} \quad (3.9)$$

สัญญาณเสียงดนตรี $s(t)$ ในสมการ (3.4) ซึ่งค่าความถี่ขณะหนึ่งของแต่ละพาร์เซิลมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา คrosstom ที่เกิดขึ้นจะไม่ถูกลดทอนลงทั้งหมดโดยเคอเนล $\varphi(\tau, \xi)$ (สมการ (3.8)) ของ WD ในทางเวลาและควรทำการกรองแบบผ่านต่ำในทางความถี่ด้วย ดังนั้น เคอเนลเชิงโมด (modal kernel, $\varphi_M(\tau, \xi)$) จะมีฟังก์ชันของตัวกรองความถี่ที่แตกต่างกัน 2 ฟังก์ชัน แสดงได้ดังสมการ (3.10) $h_{LP}(\tau)$ ที่ปรากฏอยู่ใน (3.10) จะทำการลดคrosstomทางเวลา และ $G_{LP}(\xi)$ ที่ปรากฏใน (3.10) จะทำการลดคrosstomในกรณีของการมอดูเลตความถี่ $\varphi_M(\tau, \xi)$ จึงลดคrosstom ของ WD ตลอดทั้งสัญญาณ $\bar{s}(t)$ เมื่อนำ $\varphi_M(\tau, \xi)$ แทนลงในสมการ (3.1) จะได้เป็นการกระจายเชิงโมด (modal distribution หรือ MD) แสดงดังสมการ (3.11)

$$\varphi_M(\tau, \xi) = h_{LP}(\tau) G_{LP}(\xi) \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned} M(t, \omega) &= C(t, \omega; \varphi_M) \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} W_s(\tau, \xi) h_{LP}(t - \tau) G_{LP}(\omega - \xi) d\tau d\xi \end{aligned} \quad (3.11)$$

จากที่กล่าวผ่านมา อาจสังเกตได้ว่าเคอเนลเชิงโมดเป็นผลคูณของตัวประกอบที่เป็นอิสระต่อกันในทางเวลาและในทางความถี่ ซึ่งแตกต่างไปจากเคอเนลอื่น ๆ ในตระกูลของโคเสน ทำให้การคำนวณ MD มีความรวดเร็วมากกว่าการกระจายที่มีเคอเนลไม่เป็นอิสระต่อกัน

การคำนวณ MD แบบเต็มหน่วยนั้น จะมีพื้นฐานมาจากการกระจายวิกเนอร์เทียมเต็มหน่วย (discrete pseudo-Wigner distribution หรือ DPWD) สมการ (3.12) แสดง DPWD ของสัญญาณเต็มหน่วย $s(n)$ ซึ่ง n คือเวลาเต็มหน่วย k คือความถี่เต็มหน่วย $R_s(n, \ell)$ คือฟังก์ชันอัตโนมัติสัมพันธ์หนึ่งแบบเต็มหน่วย และ $h(\ell)$ คือฟังก์ชันตัวกรองความถี่แบบต่ำผ่าน DPWD จึงเริ่มต้นด้วยการคำนวณ $R_s(n, \ell)$ ของสัญญาณ $s(n)$ ตามสมการ (3.13) โดย ℓ คือค่าล่าหลังทางเวลาเต็มหน่วย และสัญลักษณ์ $*$ หมายถึงค่าสังยุคเชิงซ้อน การคำนวณ $R_s(n, \ell)$ ของ DPWD จะแตกต่างจากการคำนวณ $R_s(t, \tau)$ ของ WD ในสมการ (3.3) ตรงที่ค่าล่าหลังเป็นจำนวนเต็มกับ

$$W_s(n, k) = \sum_{\ell=-L}^L R_s(n, \ell) h(\ell) e^{\frac{-j2\pi k\ell}{2L}} \quad (3.12)$$

$$R_s(n, \ell) = s(n + \ell) s^*(n - \ell) \quad (3.13)$$

จำนวน $\tau/2$ ส่งผลให้ค่าความถี่ของสัญญาณ $s(n)$ จะต้องไม่เกิน $1/4$ เท่าของอัตราการซีกตัวอย่าง เพื่อให้เป็นไปตามทฤษฎีในควิสต์ (Nyquist theorem) k จึงมีค่าอยู่ในช่วง $0 \leq k \leq L/2$ เมื่อ L คือจำนวนจุดครึ่งหนึ่งในการคำนวณ DFT ฟังก์ชัน $h(\ell)$ ในสมการ (3.12) จะลดผลที่เกิดจากการนำผลบวกจำกัดขอบเขตไปแทนที่อินทิกรัลไม่จำกัดขอบเขตของ WD ในสมการ (3.2) โดยที่ไม่ได้ลดครอสเทอมจากการมอดูเลตความถี่ MD จึงนำฟังก์ชัน $g_{LP}(n)$ ซึ่งได้จากการแปลงฟูริเยร์ผกผันของ $G_{LP}(\xi)$ ในสมการ (3.10) มาแทนที่ฟังก์ชัน $h(\ell)$ และทำการกรอง $R_s(n, \ell)$ ทางเวลาด้วยฟังก์ชัน $h_{LP}(n)$ ซึ่งมาจากการแปลงฟูริเยร์ผกผันของ $h_{LP}(\tau)$ จะได้เป็น $R_{s,t}(n, \ell)$ แสดงดังสมการ (3.14) เมื่อ P คือความยาวครึ่งหนึ่งของฟังก์ชัน $h_{LP}(n)$ การกระจายเชิงโมดเต็มหน่วย ($M_s(n, k)$) ของสัญญาณ $s(n)$ จึงเกิดจากการแทนที่ $R_s(n, \ell)$ และฟังก์ชัน $h(\ell)$ ในสมการ (3.12) ด้วย $R_{s,t}(n, \ell)$ และฟังก์ชัน $g_{LP}(n)$ ตามลำดับ ซึ่งแสดงได้ดังสมการ (3.15) เมื่อ L คือความยาวครึ่งหนึ่งของฟังก์ชัน $g_{LP}(n)$ (หรือจำนวนจุดครึ่งหนึ่งในการคำนวณ DFT) การคำนวณ

$$R_{s,t}(n, \ell) = \sum_{p=-P}^P R_s(n-p, \ell) h_{LP}(p) \quad (3.14)$$

$$M_s(n, k) = \sum_{\ell=-L}^L R_{s,t}(n, \ell) g_{LP}(\ell) e^{\left(\frac{-j2\pi k\ell}{2L}\right)} \quad (3.15)$$

$M_s(n, k)$ ในสมการ (3.15) ก็คือ DFT ของผลคูณระหว่าง $R_{s,t}(n, \ell)$ กับ $g_{LP}(n)$ นั่นเอง ดังนั้น ขั้นตอนการคำนวณ MD จึงเป็นการคำนวณตามสมการ (3.13) (3.14) และ (3.15) เรียงไปตามลำดับ ส่วนรายละเอียดที่มาของฟังก์ชัน $h_{LP}(n)$ $g_{LP}(n)$ และพารามิเตอร์อื่นๆ จะได้กล่าวถึงต่อไปในหัวข้อที่ 3.3

3.3 การกำหนดค่าพารามิเตอร์

การกำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับคำนวณ MD เป็นดังนี้ ตัวกรองสัญญาณทางเวลาและทางความถี่ $h_{LP}(n)$ และ $g_{LP}(n)$ ที่ปรากฏในสมการ (3.14) และ (3.15) ตามลำดับ เกิดจากการนำฟังก์ชันหน้าต่างแบบแฮมมิง (Hamming) มาทำอัตสหสัมพันธ์ (autocorrelation) และทำให้เป็นบรรทัดฐานหรือออร์มัลไลซ์ (normalized) ซึ่งการเลือกใช้ฟังก์ชันหน้าต่างแบบแฮมมิงเพราะเนื่องจากมีลักษณะสมมาตรซึ่งจะให้เฟสเชิงเส้นและมีพิสัยพลวัตที่ดี ฟังก์ชันหน้าต่างแบบแฮมมิงสำหรับการกรองทางเวลา ($h_t(n)$) และทางความถี่ ($h_\omega(r)$) แสดงได้ดังสมการ (3.16) และ (3.17) (Pielemeier and Wakefield, 1996) ตามลำดับ โดยที่ N คือความยาวครึ่งหนึ่งของ $h_t(n)$ และ

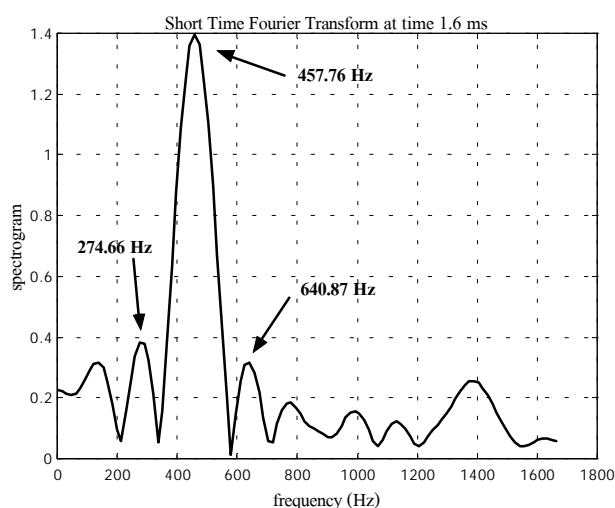
$$h_t(n) = \frac{1}{0.54 \cdot 2N} \begin{cases} \left[0.54 + 0.46 \cos\left(\frac{n2\pi}{2N+1}\right) \right], & |n| \leq N, \\ 0, & \text{else.} \end{cases} \quad (3.16)$$

$$h_\omega(r) = \frac{1}{0.54 \cdot 2R} \begin{cases} \left[0.54 + 0.46 \cos\left(\frac{r2\pi}{2R+1}\right) \right], & |r| \leq R, \\ 0, & \text{else.} \end{cases} \quad (3.17)$$

$$N = \text{grt}(2\pi \times f_s / (\Delta\omega_{\min})) \quad (3.18)$$

R คือความยาวครึ่งหนึ่งของ $h_\omega(r)$ ทำการคำนวณค่า N ได้ตามสมการ (3.18) (Pielemeier and Wakefield, 1996) โดยที่ f_s คืออัตราการซีกตัวอย่างของสัญญาณ $s(n)$ (หน่วย Hz) $\Delta\omega_{\min}$ คือ

ผลต่างทางความถี่ที่น้อยที่สุดระหว่าง 2 องค์ประกอบใดๆในสัญญาณ (หน่วย rad/s) และ ω หมายถึงถึงฟังก์ชันที่ให้ค่าจำนวนเต็มมากที่สุด (ค่าที่ได้จากการคำนวณจะปัดทศนิยมลงให้เป็นเลขจำนวนเต็ม) การประมาณค่า $\Delta\omega_{\min}$ ที่อยู่ในสมการ (3.18) ทำได้โดยคำนวณสเปกโตรแกรมของสัญญาณ $s(n)$ แล้วพิจารณาองค์ประกอบทางความถี่ ณ เวลาที่สเปกตรัมมีค่าสูงสุด ตัวอย่างเช่น เมื่อทำการวิเคราะห์สัญญาณเสียงโคของขลุ่ยเพียงออด้วย STFT ซึ่งมีการคำนวณ DFT จำนวน 16,384 จุด ฟังก์ชันหน้าต่างเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีความยาว 2,000 จุด จำนวนการเลื่อน 1,950 จุด (การเลือกใช้จำนวนจุดดังกล่าว พิจารณาจากการให้ค่าความถี่ของเสียงโด' โกล์เดียงหรือเป็นสองเท่าของเสียงโค) สเปกตรัมจะมีค่าสูงสุด ณ เวลา 1.6 ms แสดงดังรูปที่ 3.2 ซึ่งผลต่างระหว่างค่าความถี่หลักของสัญญาณกับองค์ประกอบที่มีลักษณะค่ายอดชัดเจน (ตรงตำแหน่งลูกศรชี้) คือ 183.1 Hz (มาจาก $457.76 \text{ Hz} - 274.66 \text{ Hz}$) และ 183.11 Hz (มาจาก $640.87 \text{ Hz} - 457.76 \text{ Hz}$) ดังนั้น $\Delta\omega_{\min}$ จะมีค่าเท่ากับ $2\pi \times 183.1 \text{ rad/s}$ เป็นต้น



รูปที่ 3.2 ผลการวิเคราะห์เสียงโคของขลุ่ยเพียงออด้วยเทคนิค STFT

การทำอัตรสหสัมพันธ์ของฟังก์ชัน $h_t(n)$ และ $h_\omega(r)$ คือการคำนวณ DFT แล้วคูณด้วยค่าสังยุคเชิงซ้อนของผลดังกล่าว จากนั้นทำการนอร์มัลไลซ์ และคำนวณ DFT ผกผัน ด้วยความยาวเป็นสองเท่าของฟังก์ชันเดิม $h_{LP}(n)$ และ $g_{LP}(n)$ จึงมีความยาวเท่ากับ $4N$ และ $4R$ ตามลำดับ เมื่อพิจารณาตามการคำนวณ $R_{s,t}(n,\ell)$ และ $M_s(n,k)$ ในสมการ (3.14) และ (3.15) จะได้ว่า $P = 2N$ และ $L = 2R$ หรือ $R = L/2$ ซึ่งจะเลือก L เป็นค่ากำลังของสอง ทำให้คำนวณ DFT จำนวน $2L$ จุด ในสมการ (3.15) ได้ด้วยอัลกอริทึม FFT

สำหรับการคำนวณ $R_s(n, \ell)$ ในสมการ (3.13) n คือจำนวนจุดทั้งหมดของสัญญาณ $s(n)$ (ในที่นี้คือ 2,500 จุด) และคำนวณให้สอดคล้องกับค่า ℓ เพียงด้านบวกเท่านั้น เพราะเนื่องจาก $R_s(n, \ell)$ มีลักษณะสมมาตร เช่นเดียวกับการคำนวณตามค่า ℓ ของ $R_{s,t}(n, \ell)$ ในสมการ (3.14) โดยที่ ℓ จะมีค่ามากที่สุดเท่ากับ L เพื่อให้ $R_{s,t}(n, \ell)$ มีจำนวนหลักเท่ากับความยาวของฟังก์ชัน $g_{LP}(n)$ ส่วนการคำนวณตามค่า n ในสมการ (3.14) จะคำนวณเฉพาะ n ที่ตรงกับตำแหน่งการซัดตัวอย่าง $s(n)$ ด้วยความถี่การซัดตัวอย่างเป็นสองเท่าของ $\Delta\omega_{\min}$ ตัวอย่างเช่น สัญญาณเสียงโคของขลุ่ยเพียงออมีจำนวนข้อมูลที่บันทึกไว้ 2,500 จุด ใช้อัตราการซัดตัวอย่าง 250 kHz จะมีช่วงเวลาซัดตัวอย่าง (sampling interval) 0.004 ms และ $\Delta\omega_{\min} = 2\pi \times 183.1$ rad/s หรือคิดเป็น 183.1 Hz ซึ่ง $2\Delta\omega_{\min}$ มีค่าประมาณ 400 Hz หรือคิดเป็นรายคาบได้ 2.5 ms ค่า n ในสมการ (3.14) จึงมีระยะห่างขั้นละ 625 จำนวน (2.5 / 0.004) นั่นคือ 625 1,250 1,875 และ 2,500 เป็นต้น ซึ่งในโปรแกรมการคำนวณ MD จะแทนระยะห่างแต่ละขั้นของ n ด้วยตัวแปร n_step_size และกรณีที่ต้องการรายละเอียดสูงในทางเวลา เราจะคำนวณตามค่า n ที่ตรงกับความถี่ซึ่งมากกว่าสองเท่าของ $\Delta\omega_{\min}$ (หมายถึงการเลือกใช้ค่า n_step_size ที่มีขนาดเล็ก) แต่ก็ต้องใช้เวลาในการคำนวณเพิ่มมากขึ้น

สำหรับการคำนวณ $M_s(n, k)$ ในสมการ (3.15) n คือเวลาเต็มหน่วย ซึ่งมีระยะห่างในแต่ละขั้นคือ n_step_size เช่นเดียวกับค่า n ในสมการ (3.14) และ k คือความถี่เต็มหน่วย ซึ่ง $0 \leq k \leq L/2$ ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจุดของ DFT ($2L$) f_s และระยะห่างทางความถี่ (bin spacing หรือ B) แสดงดังสมการ (3.19) โดยที่ค่าของ n_step_size และ B คือระยะห่างในแกน

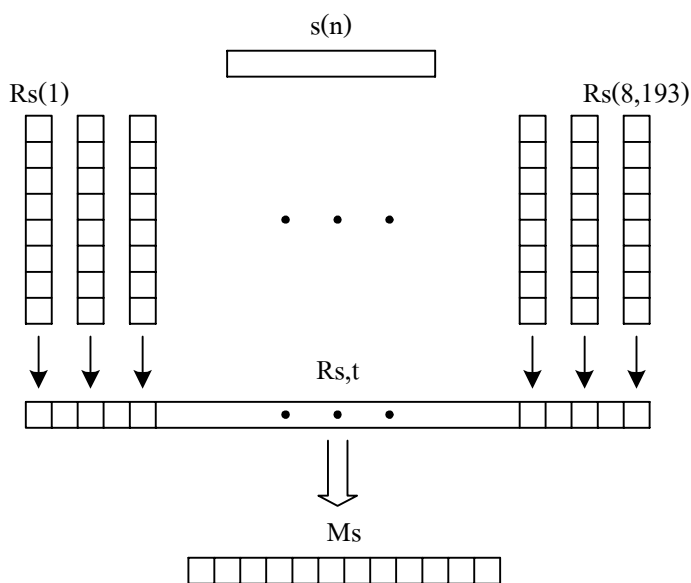
$$B = \frac{f_s}{4L} \quad (3.19)$$

เวลา (เรียกเป็นแกน x) และแกนความถี่ (เรียกเป็นแกน y) ในการวาดกราฟสเปกตรัมขนาดของ $M_s(n, k)$ ซึ่งมีค่าอยู่ในทิศทางแกน z ของภาพสามมิติ จะทำให้เห็นการเปลี่ยนแปลงความถี่ของสัญญาณเสียงตลอดทุกช่วงเวลา กรณีเสียงโน้ตเดี่ยวในสถานะอยู่ตัว ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค MD จะแสดงองค์ประกอบทางความถี่ของสัญญาณ ณ เวลาที่สเปกตรัมขนาดของ $M_s(n, k)$ มีค่าสูงสุด เพื่อให้สังเกตเห็นฟอร์แมนท์⁺⁺⁺ ได้ชัดเจน

⁺⁺⁺ ฟอร์แมนท์ คือสเปกตรัมขนาดที่แสดงความถี่โน้ตหลักของเสียงดนตรี (สรวาวุฒิ สุจิตจร, 2545)

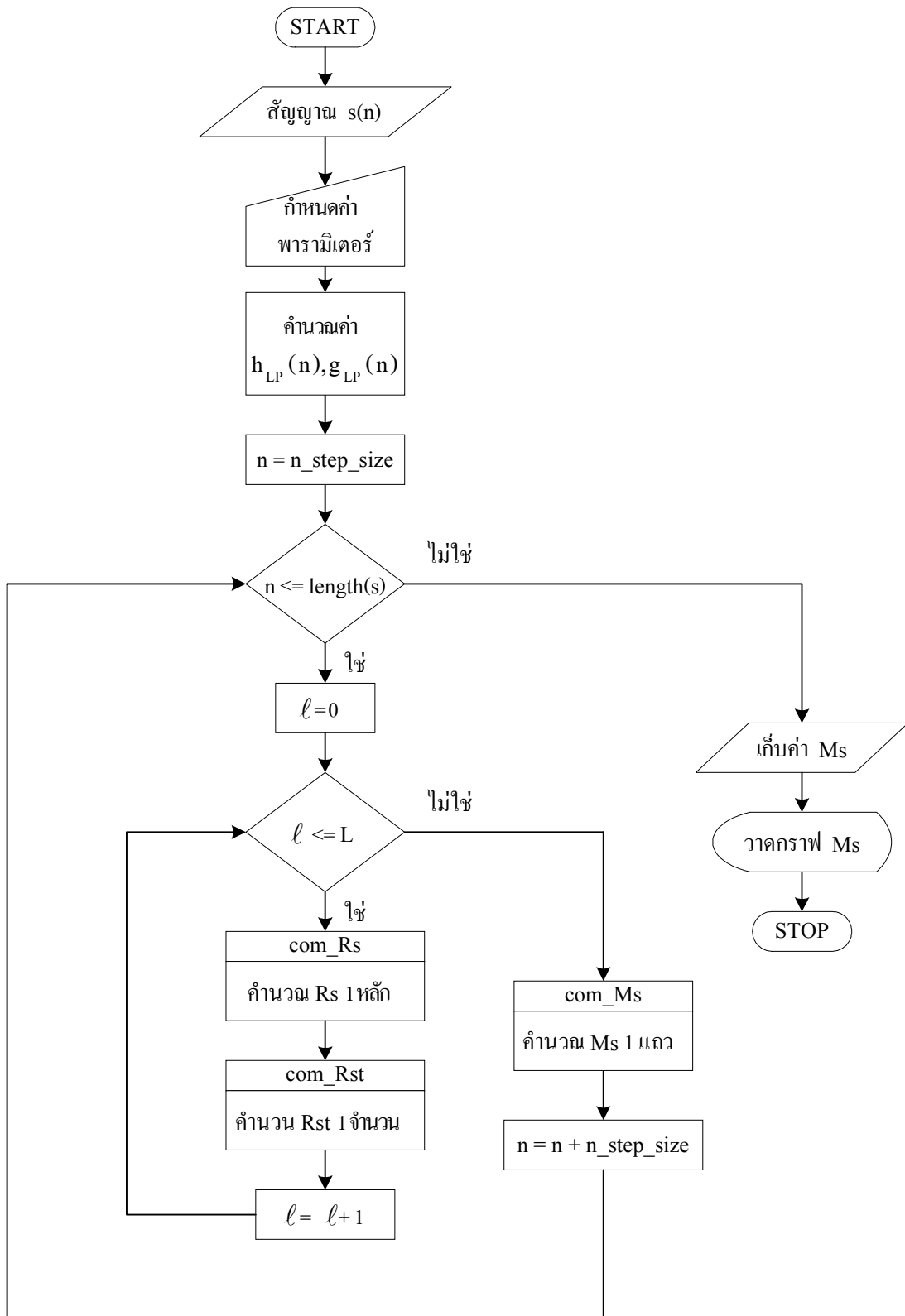
3.4 โปรแกรมการคำนวณ MD

ขั้นตอนการคำนวณ MD เริ่มต้นด้วยการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ต่อไปนี้ f_s $\Delta\omega_{\min}$ N L และ n_step_size ใส่ให้ครบเพื่อนำไปคำนวณ $h_{LP}(n)$ และ $g_{LP}(n)$ ตามความสัมพันธ์ (3.16) และ (3.17) ตามลำดับ จากนั้นคำนวณ $R_s(n, \ell)$ $R_{s,t}(n, \ell)$ และ $M_s(n, k)$ ตามความสัมพันธ์ (3.13) (3.14) และ (3.15) ตามลำดับ เมื่อพิจารณาตามความสัมพันธ์ดังกล่าว จะพบว่า การคำนวณโดยตรงของแต่ละเมตริกซ์ ต้องทำการเก็บข้อมูลเป็นจำนวนมาก ตัวอย่างเช่น กรณีวิเคราะห์เสียงโน้ตเดี่ยวในสถานะอยู่ตัว ข้อมูล $s(n)$ มีจำนวน 2,500 จุด มีอัตราการซีกตัวอย่าง 250 kHz และเลือกใช้ $L = 8,192$ ถ้าคำนวณตามสมการ (3.13) จะได้เมตริกซ์ $R_s(n, \ell)$ ที่มีขนาด 2,500 แถว และ 8,193 หลัก เป็นต้น โปรแกรม MD ในที่นี้ จึงได้ปรับปรุงเป็นการคำนวณแยกทีละส่วน โดยพิจารณาจากความสัมพันธ์ตามสมการ (3.13) (3.14) และ (3.15) กล่าวคือ ในแต่ละหลักของ $R_s(n, \ell)$ จะคำนวณ $R_{s,t}(n, \ell)$ ได้ 1 จำนวน และ $R_{s,t}(n, \ell)$ 1 แถว จะคำนวณ $M_s(n, k)$ ได้ 1 แถว แสดงแผนภาพการคำนวณ MD จำนวน 1 แถว ได้ดังรูปที่ 3.3

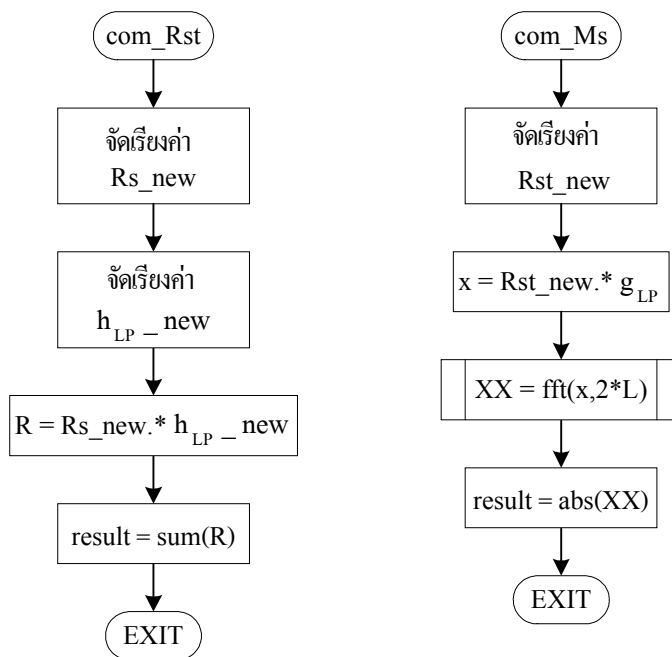
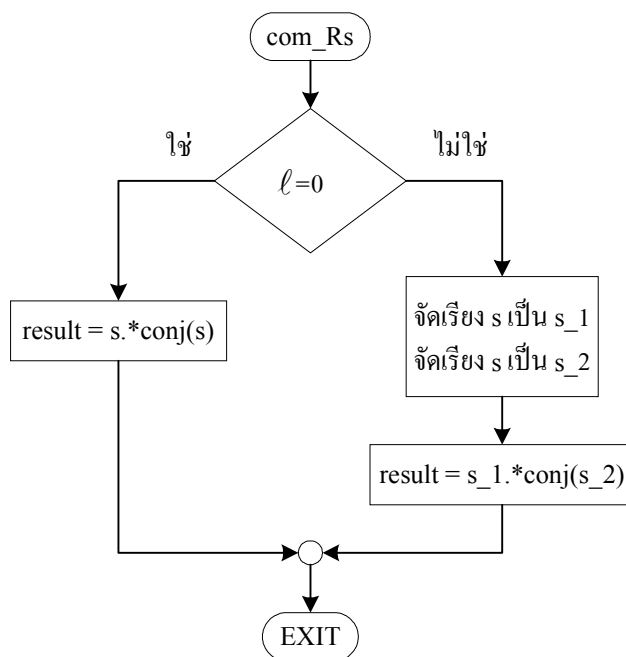


รูปที่ 3.3 ลักษณะการคำนวณ MD

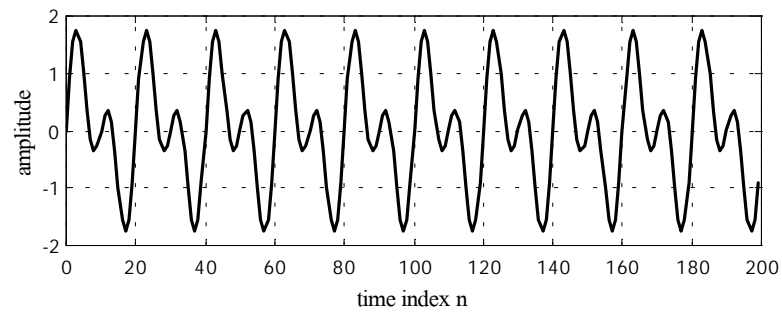
การคำนวณ MD ได้พัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรม MATLAB ซึ่งมีแผนภาพอธิบายโปรแกรมหลักและฟังก์ชันย่อย แสดงดังรูปที่ 3.4 และ 3.5 ตามลำดับ โดยที่ ฟังก์ชัน `com_Rs` `com_Rst` และ `com_Ms` จะใช้สำหรับคำนวณ $R_s(n, \ell)$ $R_{s,t}(n, \ell)$ และ $M_s(n, k)$ ตามลำดับ และส่วนที่เป็นรายละเอียดของโปรแกรมแสดงไว้ในภาคผนวก ค



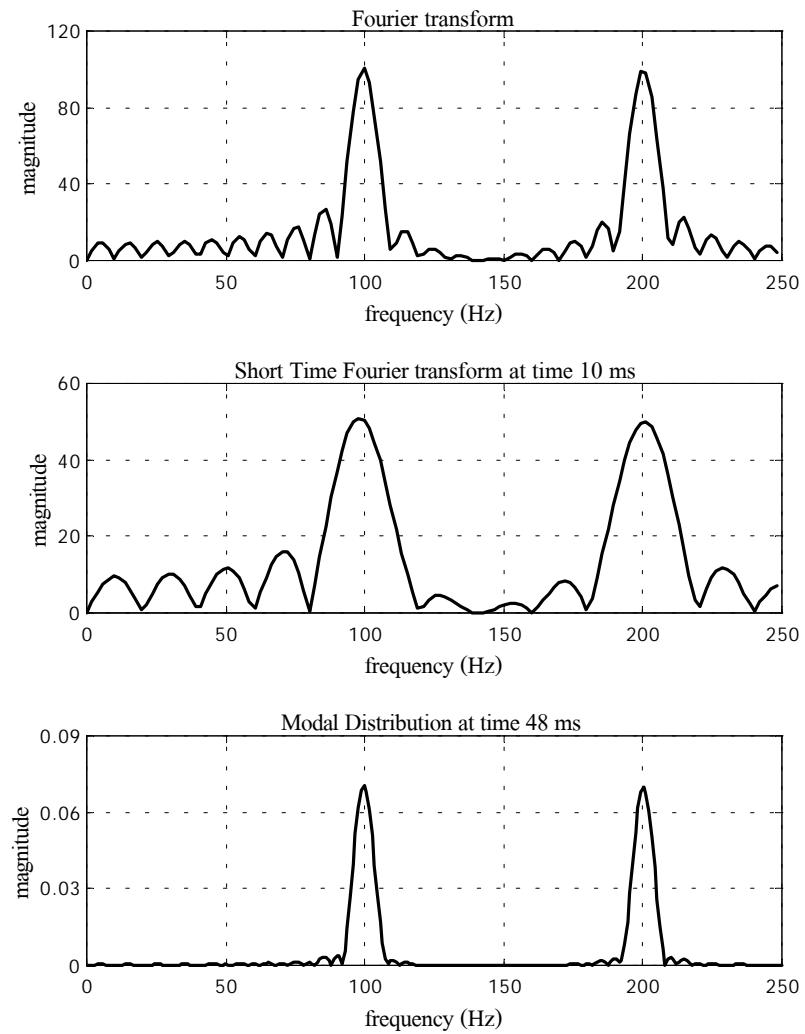
รูปที่ 3.4 แผนภาพแสดงลำดับการคำนวณ MD



รูปที่ 3.5 แผนภาพฟังก์ชันย่อยที่เป็นส่วนหนึ่งในการคำนวณ MD
หมายเหตุ สัญลักษณ์ .* หมายถึง การคูณเวกเตอร์แบบจุดต่อจุด



รูปที่ 3.6 สัญญาณ $s(t)$



รูปที่ 3.7 ผลการวิเคราะห์สัญญาณ $s(t)$ ด้วย DFT STFT และ MD

ทดสอบโปรแกรมการคำนวณ MD เปรียบเทียบกับ DFT และ STFT ของสัญญาณ $s(t)$ ซึ่งเป็นสัญญาณไซน์ซอซด์ แสดงได้ดังสมการ (3.20) โดยที่ $v_1 = 100$ Hz และ $v_2 = 200$ Hz สัญญาณ $s(t)$ มีความยาว 200 จุด และมีอัตราการซัดตัวอย่าง 2 kHz เลือกใช้จำนวนจุดในการคำนวณ DFT 1,024 จุด ฟังก์ชันหน้าต่างเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีความยาว 100 จุด และมีการเลื่อนเป็นจำนวน 80 จุด พารามิเตอร์สำหรับคำนวณ MD เป็นดังนี้ $\Delta\omega_{\min} = 2\pi \times 19.53$ rad/s,

$$s(t) = \sin(2\pi v_1 t) + \sin(2\pi v_2 t) \quad (3.20)$$

$N = 102$ และ $L = 512$ รูปที่ 3.6 และ 3.7 แสดงสัญญาณ $s(t)$ และผลการวิเคราะห์สัญญาณ $s(t)$ ด้วย DFT STFT และ MD ตามลำดับ ซึ่งจะสังเกตเห็นว่า เส้นกราฟของ MD มีความชัดเจนและเรียบมากกว่าเส้นกราฟของทั้ง DFT และ STFT และนอกจากนี้ MD ยังให้ค่าความถี่หลักใกล้เคียงกับค่าความถี่จริงของสัญญาณมากที่สุด โดยที่ DFT ปรากฏค่าความถี่ 99.61 Hz และ 199.22 Hz STFT ปรากฏค่าความถี่ 97.66 Hz และ 201.17 Hz และ MD ปรากฏค่าความถี่ 99.61 Hz และ 200.20 Hz ตามลำดับ

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 กล่าวนำ

งานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์เสียงของขลุ่ยเพียงออและระนาดเอกเหล็ก โดยแบ่งออกได้เป็นกรณีเสียงโน้ตเดี่ยว และกรณีเสียงหลายโน้ต สำหรับกรณีเสียงโน้ตเดี่ยวจะประกอบไปด้วย เสียงขลุ่ยเพียงออและเสียงระนาดเอกเหล็กในสถานะอยู่ตัว (steady state) และเสียงขลุ่ยเพียงออในสถานะชั่วครู่ (transient) และสำหรับกรณีเสียงหลายโน้ตจะวิเคราะห์เสียงจากเครื่องดนตรีทั้งสองชิ้น ที่ได้จากการบรรเลงด้วยเทคนิคต่างๆ ดังที่จะได้อธิบายถึงต่อไป ในบทนี้กล่าวถึงการจัดวางอุปกรณ์ในการบันทึกเสียง ผลการวิเคราะห์สัญญาณด้วยเทคนิคต่างๆ ดังที่ได้อธิบายไว้แล้วในบทที่ 2 และ 3 ต่อจากนั้น จึงกล่าวถึงการวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนความถี่ (frequency ratio) และระยะพิตช์ (pitch interval) จากค่าความถี่หลักของสัญญาณ ซึ่งนำมาแสดงผลในรูปแบบตารางและกราฟเปรียบเทียบ ตลอดจนอภิปรายผลการทดลอง

4.2 การบันทึกเสียง

การบันทึกเสียงขลุ่ยเพียงออและระนาดเอกเหล็ก ได้ดำเนินการที่ห้องดนตรีไทย อาคารส่วนกิจการนักศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยมีอุปกรณ์การทดลองดังต่อไปนี้

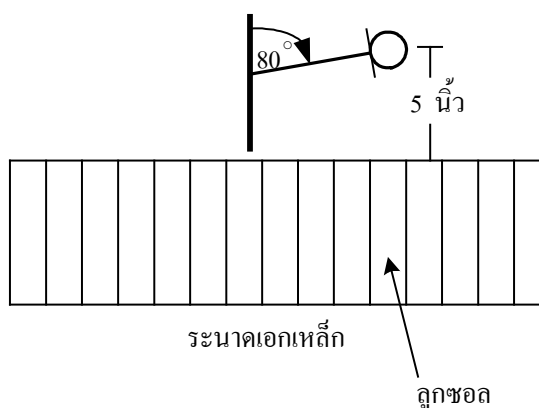
- ขลุ่ยเพียงออ (ไม้มะริด) 1 เล้า
- ระนาดเอกเหล็ก 1 ราง
- ไมโครโฟน AV-JFET รุ่น AVL110EM
- ออสซิลโลสโคป Tektronic รุ่น TDS 420A
- เทอร์โมมิเตอร์ (thermometer)
- ไฮโกรมิเตอร์ (hygrometer)
- มิเตอร์วัดระดับเสียงดิจิทัล (digital sound level meter) รุ่น TES-1352

ในกรณีทำการบันทึกเสียงขลุ่ยเพียงออ ตำแหน่งของการวางอุปกรณ์จะคงที่ แสดงได้ดังรูปที่ 4.1 ไมโครโฟนอยู่ห่างจากขลุ่ยเพียงออ 3 นิ้ว และเครื่องออสซิลโลสโคปจะวางอยู่ห่างเป็นระยะสุด ความยาวสายของไมโครโฟน เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นระหว่างสาย และเสียงจากเครื่องออสซิลโลสโคปขณะทำงาน ในกรณีที่ทำการบันทึกเสียงระนาดเอกเหล็ก ตำแหน่งของไมโครโฟน

จะอยู่ตรงกลางลูกชอล ทำมุม 80° กับแท่นจับและวางอยู่ห่างจากระนาด 5 นิ้ว แสดงได้ดังรูปที่ 4.2 การจัดวางไมโครโฟนในลักษณะตามรูปที่ 4.1 และ 4.2 ก็เพื่อให้ไมโครโฟนอยู่กึ่งกลางของแหล่งกำเนิดเสียง ไมโครโฟนที่ได้นำมาใช้ในงานวิจัยนี้เป็นแบบอิเล็กเทรต (electret) มีค่าความไว -52 dB และมีผลตอบสนองทางความถี่ในช่วง 50 Hz ถึง $18,000$ Hz ซึ่งมีลักษณะสมบัติใกล้เคียงกับไมโครโฟนที่เหมาะสมสำหรับใช้วัดเสียงดนตรีประเภทเครื่องลมไม้ (woodwind instrument) (ภาคผนวก ก)



รูปที่ 4.1 การจัดวางอุปกรณ์บันทึกเสียงขลุ่ยเพียงออ



รูปที่ 4.2 ตำแหน่งไมโครโฟนในการบันทึกเสียงระนาดเอกเหล็ก

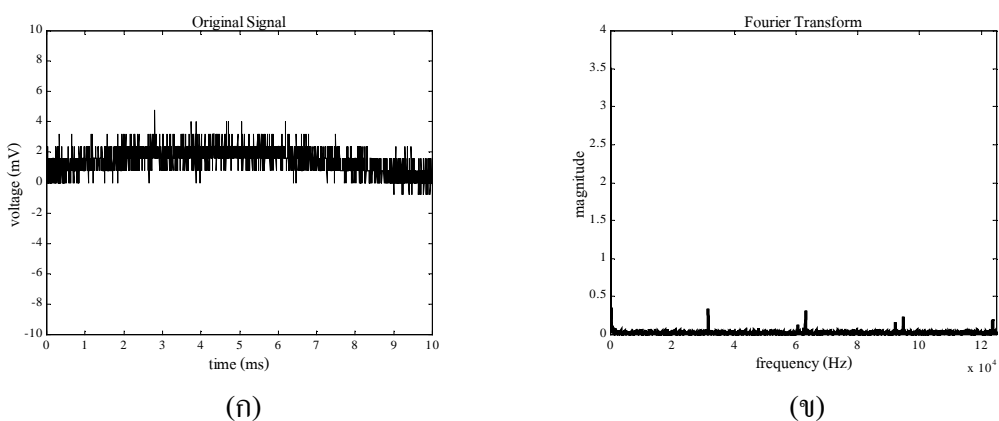
ทำการบันทึกอุณหภูมิภายในห้อง ความชื้นสัมพัทธ์ และความดังเฉลี่ยของแต่ละเสียงขณะบรรเลงเครื่องดนตรีทั้งสองชิ้น แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 4.1 สัญญาณเสียงที่บันทึกได้จากเครื่องออสซิลโลสโคป กำหนดให้มีจำนวน $2,500$ จุด เท่ากันหมดทุกเสียง แต่จะมีอัตราการซักรวอย่าง (sampling rate) แตกต่างกันไปตามการปรับความละเอียดในทางเวลาของออสซิลโลสโคป เพื่อให้

ได้ลักษณะสัญญาณที่สอดคล้องกับเสียงแต่ละแบบ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้ กรณีเสียงโน้ตเดี่ยวในสถานะอยู่ตัวของทั้งขลุ่ยเพียงออและระนาดเอกเหล็กจะมีอัตราการซັกดตัวอย่าง 250 kHz กรณีเสียงโน้ตเดี่ยวในสถานะชั่วคราวและเสียงหลายโน้ตของขลุ่ยเพียงอ้อมีอัตราการซັกดตัวอย่าง 10 kHz และกรณีเสียงหลายโน้ตของระนาดเอกเหล็กจะมีอัตราการซັกดตัวอย่าง 100 kHz

ตารางที่ 4.1 อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความดังในการบันทึกเสียง

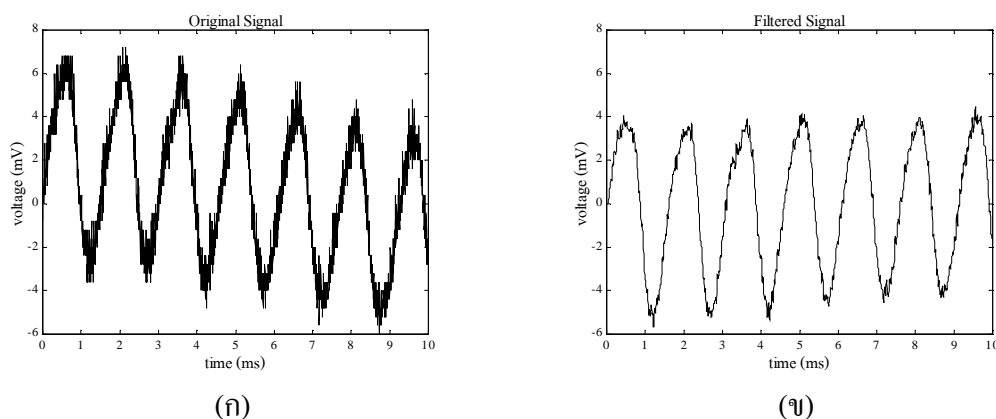
สัญญาณเสียง	อุณหภูมิ (°C)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	ความดังเฉลี่ย (dB)
● ขลุ่ยเพียงออ			
เสียงโน้ตเดี่ยวสถานะอยู่ตัว	27	67	76
เสียงโน้ตเดี่ยวสถานะชั่วคราว	26	72	78
เสียงหลายโน้ต	26	72	78
● ระนาดเอกเหล็ก			
เสียงโน้ตเดี่ยวสถานะอยู่ตัว	28	75	80
เสียงหลายโน้ต	28	75	80

เมื่อพิจารณา DFT ของสัญญาณเสียงที่บันทึกได้และสัญญาณรบกวนพื้นหลัง (background noise) ขณะที่ออสซิลโลสโคปกำลังทำงาน พบว่ามีสัญญาณรบกวนปรากฏอยู่ ตัวอย่างเช่น ขณะบันทึกเสียงโน้ตเดี่ยวในสถานะอยู่ตัว จะปรากฏสัญญาณรบกวนพื้นหลัง แสดงดังรูปที่ 4.3 ซึ่งมีค่าความถี่อยู่ในช่วง 0 ถึง 150 Hz และเกินกว่า 20,000 Hz เป็นต้น ดังนั้นจึงต้องทำการกรองสัญญาณ



รูปที่ 4.3 สัญญาณรบกวนพื้นหลัง (ก) ที่บันทึกได้ (ข) ผลการวิเคราะห์ด้วย DFT

เสียงที่บันทึกได้ก่อนที่จะทำการวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป กรณีสัญญาณเสียงโน้ตเดี่ยวในสถานะอยู่ตัวและเสียงหลายโน้ตของระนาดเอกเหล็ก ทำการกรองแบบบัตเตอร์เวิร์ทช์ผ่านแถบ (bandpass Butterworth filter) มีค่าความถี่ตัดอยู่ที่ 175 Hz และ 25,000 Hz รูปที่ 4.4 แสดงตัวอย่างเสียงซอลของขลุ่ยเพียงออที่นำมาผ่านการกรองสัญญาณ ซึ่งเราจะสังเกตได้ว่าเมื่อผ่านการกรองแล้วรูปคลื่นมีการลาดเอียงลดลงจากเดิมและเส้นกราฟยังมีความราบเรียบมากขึ้น และกรณีสัญญาณเสียงโน้ตเดี่ยวในสถานะชั่วคราวและเสียงหลายโน้ตของขลุ่ยเพียงออ เมื่อพิจารณาผล DFT ของสัญญาณที่บันทึกได้ จะปรากฏสัญญาณรบกวนพื้นหลังซึ่งมีค่าความถี่อยู่ในช่วง 0 ถึง 50 Hz สัญญาณเสียงในกรณีนี้จึงนำมาผ่านการกรองแบบบัตเตอร์เวิร์ทช์ผ่านสูง (highpass Butterworth filter) มีค่าความถี่ตัดอยู่ที่ 100 Hz สัญญาณเสียงที่ได้ผ่านการกรองสัญญาณรบกวนออกแล้ว จะทำการบันทึกเก็บไว้เป็นไฟล์ข้อมูล และกำหนดให้ข้อมูลเป็นชนิดเลขทศนิยม (floating point) จำนวน 32 บิต เพื่อจะทำให้ชุดข้อมูลเหล่านี้มีขนาดเล็กและนำไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม MATLAB ดังที่ได้อธิบายไว้แล้วในบทที่ 2 และ 3 ต่อไป



รูปที่ 4.4 สัญญาณเสียงซอลของขลุ่ยเพียงออ (ก) บันทึกด้วยออสซิลโลสโคป

(ข) สัญญาณหลังจากผ่านการกรองแบบบัตเตอร์เวิร์ทช์ผ่านแถบ

4.3 ผลการวิเคราะห์เสียงโน้ตเดี่ยว

การวิเคราะห์เสียงโน้ตเดี่ยวนี้จะแบ่งออกเป็นการวิเคราะห์เสียงในสถานะอยู่ตัวและในสถานะชั่วคราว เสียงโน้ตเดี่ยวในสถานะอยู่ตัวแบ่งออกเป็นเสียงของขลุ่ยเพียงออและระนาดเอกเหล็ก โดยการบรรเลงขลุ่ยเพียงออจะเป่าแต่ละโน้ตด้วยลมยาวอย่างสม่ำเสมอ และการบรรเลงระนาดเอกเหล็กจะเป็นแบบตีรัว ส่วนเสียงโน้ตเดี่ยวในสถานะชั่วคราวจะวิเคราะห์เพียงเสียงขลุ่ยเพียงออ ซึ่งการบรรเลงจะเป่าด้วยลมสั้นๆ เป็นช่วงหรือเรียกว่าการเป่าสะอึก การวิเคราะห์เสียงโน้ตเดี่ยวในสถานะ

อยู่ตัวจะแสดงผลเพียงเสียงโน้ตซอลจากการวิเคราะห์ทั้งสี่เทคนิค ซึ่งภาพของสัญญาณเสียงขลุ่ยเพียงออและระนาดเอกเหล็กที่ผ่านการกรองสัญญาณแล้ว และผลการวิเคราะห์โน้ตทั้งแปดเสียงของแต่ละเทคนิคสามารถดูได้ในภาคผนวก ง และในส่วนของ การวิเคราะห์เสียงโน้ตเดี่ยวในสถานะชั่วคราว ได้แสดงผลการวิเคราะห์เพียงเสียงโน้ต โด ซอล โด' เร' ส่วนเสียงโน้ตอื่นก็จะมีผลไปในแนวทางเดียวกัน

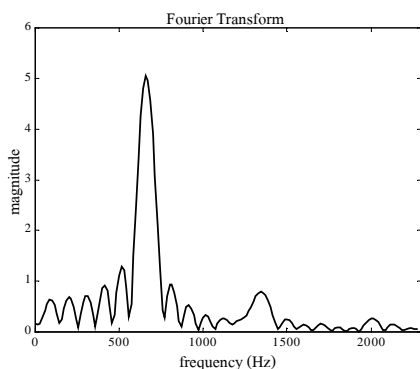
4.3.1 เสียงโน้ตเดี่ยวในสถานะอยู่ตัว

การวิเคราะห์เสียงโน้ตเดี่ยวในสถานะอยู่ตัวของทั้งสี่เทคนิค จะใช้ค่าพารามิเตอร์ชุดเดียวกันกับโน้ตทั้งแปดเสียงของทั้งขลุ่ยเพียงออและระนาดเอกเหล็ก ซึ่งในกรณีของเทคนิค DFT STFT และ AR การเลือกค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมนั้น พิจารณาจากการให้ค่าความถี่ของเสียงโด' มีสัดส่วนใกล้เคียงหรือเป็นสองเท่าของเสียงโด การกำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับแต่ละเทคนิค แสดงไว้ในตารางที่ 4.2 โดยที่ f_s คืออัตราการซัดตัวอย่างของสัญญาณเสียงขลุ่ยเพียงออหรือระนาดเอกเหล็ก (หน่วย Hz) n_{fft} คือจำนวนจุดในการคำนวณ DFT ฟังก์ชันหน้าต่างที่เลือกใช้เป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งมี $long$ คือความยาวของฟังก์ชันหน้าต่าง และ $n_{overlap}$ คือจำนวนการเหลื่อม M คืออันดับของแบบจำลองเออาร์ L คือจำนวนจุดครึ่งหนึ่งในการคำนวณ DFT $\Delta\omega_{min}$ แทนด้วย dw_{min} (หน่วย Hz) และ n_{step_size} คือระยะห่างในแต่ละขั้นของ n สำหรับคำนวณ MD ($M_s(n, k)$) ซึ่งจะเลือกใช้ค่า n_{step_size} ที่มีขนาดเล็ก เพื่อให้ผลการวิเคราะห์ในทางเวลามีความละเอียดมาก แต่จะส่งผลให้การคำนวณใช้เวลานาน

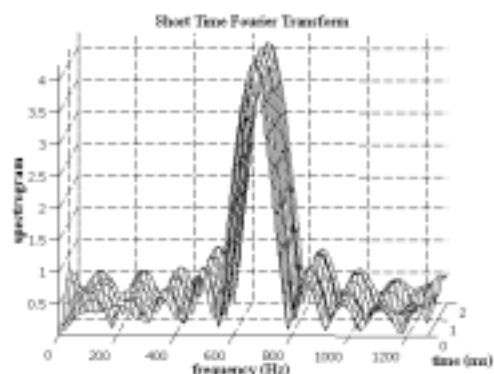
ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ของแต่ละเทคนิคสำหรับวิเคราะห์เสียงโน้ตเดี่ยวในสถานะอยู่ตัว

DFT	STFT	AR	MD
$f_s = 250,000$ Hz	$f_s = 250,000$ Hz	$f_s = 250,000$ Hz	$f_s = 250,000$ Hz
$n_{fft} = 17,500$ จุด	$n_{fft} = 17,500$ จุด	$n_{fft} = 17,500$ จุด	$L = 8,192$ จุด
	$long = 2,000$ จุด	$M = 18$	$dw_{min} = 183.11$ Hz
	$n_{overlap} = 1,950$ จุด		$n_{step_size} = 4$ จุด

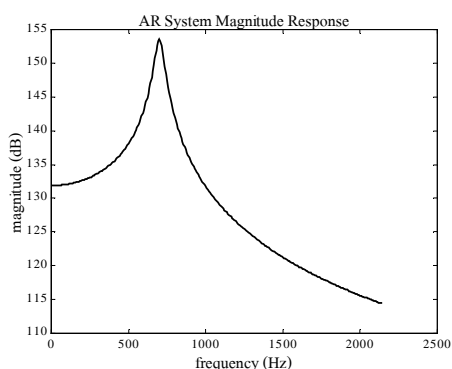
รูปที่ 4.5 และ 4.6 แสดงผลจากการวิเคราะห์เสียงโน้ตซอลในสถานะอยู่ตัวของขลุ่ยเพียงออและระนาดเอกเหล็กด้วยเทคนิค DFT STFT AR และ MD ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าแต่ละเทคนิคแสดงฟอร์มแมนท์ของเสียงซอลได้อย่างชัดเจน ค่าความถี่ฟอร์มแมนท์ในหนึ่งทบเสียงที่ได้จากการวิเคราะห์ทั้งสี่เทคนิคของขลุ่ยเพียงออและระนาดเอกเหล็ก ได้นำมาสรุปรวมไว้ในตารางที่ 4.3 และ 4.4 ซึ่งในส่วนที่เป็นผลจากเทคนิค STFT และ MD จะระบุเวลาที่สเปกตรัมมีขนาดสูงสุดมาด้วย



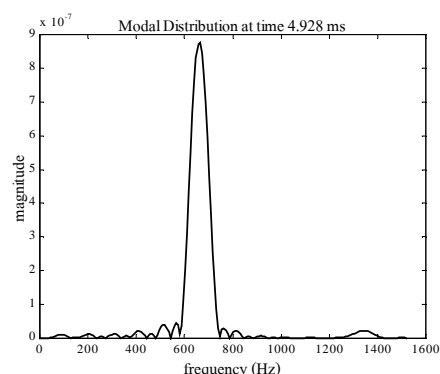
(ก)



(ข)



(ค)

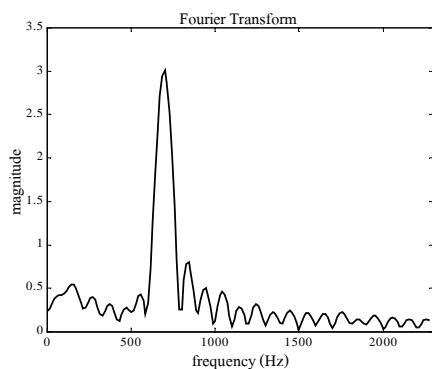


(ง)

รูปที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์โน้ตเดี่ยวเสียงซอลในสถานะอยู่ตัวของขลุ่ยเพียงออด้วยเทคนิค

(ก) DFT (ข) STFT (ค) AR และ (ง) MD

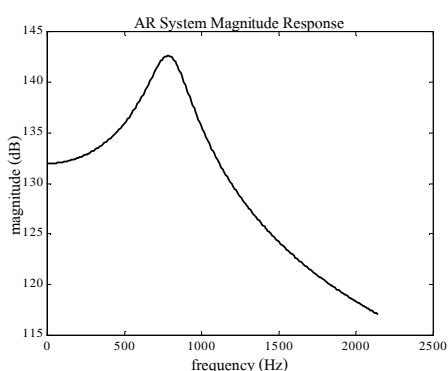
พิจารณาฟอร์แมนท์ในหนึ่งทบเสียงของขลุ่ยเพียงออตามตารางที่ 4.3 จะสังเกตได้ว่าเทคนิค DFT และ STFT มีเพียงค่าความถี่ฟอร์แมนท์ของเสียงเรที่แตกต่างกัน และมีความถี่เพิ่มขึ้นจากเสียงต่ำไปยังเสียงสูงเป็นลำดับ แต่ทั้งสองเทคนิคให้ค่าความถี่ของบางเสียงโน้ตเป็นเลขลงตัวคือ 500 Hz 600 Hz และ 900 Hz ซึ่งไม่เป็นไปตามธรรมชาติของคนตรีไทย เนื่องจากการปรับตั้งเสียงของคนตรีไทยจะใช้การฟังเทียบเครื่องดนตรีสองชิ้นเข้าด้วยกัน มิได้ใช้เครื่องมือวัดละเอียดอย่างเช่นการผลิตเครื่องดนตรีสากล ส่วนผลจากเทคนิค AR นั้น มีค่าความถี่ไม่เป็นไปตามการไล่ระดับเสียง คือความถี่ของเสียงมี (657.14 Hz) สูงกว่าเสียงฟา (650 Hz) เมื่อพิจารณาฟอร์แมนท์ในหนึ่งทบเสียงของระนาดเอกเหล็กตามตารางที่ 4.4 จะพบว่ามีลักษณะเดียวกันกับเสียงขลุ่ยเพียงออ ถึงแม้ทั้งเทคนิค DFT และ STFT จะให้ค่าความถี่ของเสียงโด' เป็นสองเท่าของเสียงโดพอดิ แต่ผลจากเทคนิค DFT มีค่าความถี่ของเสียงซอลเป็นเลขลงตัว คือ 700 Hz และผลจากเทคนิค STFT สเปกตรัมของเสียงมี และเสียงโด' มีขนาดสูงสุดที่เวลา 0 ms ซึ่งเป็นไปไม่ได้ ส่วนผลจากเทคนิค



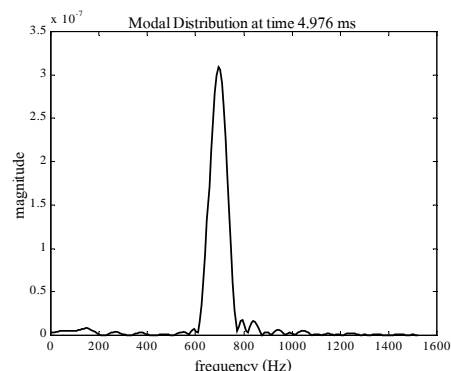
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์โน้ตเดี่ยวเสียงซอลในสถานะอยู่ตัวของระนาดเอกเหล็กด้วยเทคนิค

(ก) DFT (ข) STFT (ค) AR และ (ง) MD

AR นั้น ค่าความถี่ของเสียงมี (650 Hz) สูงกว่าเสียงฟา (621.43 Hz) และค่าความถี่ของเสียงซอล (778.57 Hz) สูงกว่าเสียงลา (721.43 Hz) การที่เทคนิค AR ให้ผลค่าความถี่ไม่เป็นไปตามการไล่ระดับเสียง เนื่องจากการวิเคราะห์แต่ละเสียงโน้ตโดยเลือกใช้อันดับของแบบจำลองที่มีค่าเท่ากันนั้น ยังไม่เหมาะสม สังเกตได้จากผลการวิเคราะห์เสียงโน้ตเดี่ยวทั้งแปดเสียงที่แสดงอยู่ในภาคผนวก ง ซึ่งผลจากเทคนิค AR แสดงฟอร์มแมนท์ที่มีลักษณะค่ายอดชัดเจนได้เพียงบางเสียงโน้ตเท่านั้น แต่หากจะทำการวิเคราะห์แต่ละเสียงโน้ต โดยการเลือกใช้อันดับของแบบจำลองที่มีค่าแตกต่างกันก็ทำได้ยาก เพราะเราไม่ทราบว่าแต่ละเสียงโน้ตควรจะมีค่าความถี่เป็นเท่าใด การเลือกใช้อัลกอริทึมและพารามิเตอร์ของเทคนิค AR จึงยังไม่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์เสียงดนตรีไทย ดังนั้น ในการวิเคราะห์เสียงโน้ตเดี่ยวของทั้งขลุ่ยเพียงออและระนาดเอกเหล็ก เราจะพิจารณาผลที่ได้จากเทคนิค MD ซึ่งมีค่าความถี่ฟอร์มแมนท์เป็นลำดับเรียงจากเสียงต่ำไปยังเสียงสูง และมีความถี่ของเสียงโด' โกล้เคียงกับสองเท่าของเสียงโด นอกจากนั้น MD ยังเป็นเทคนิคเดียวในสี่เทคนิคของการวิเคราะห์

ที่เรานำมาประยุกต์ และให้ผลการวิเคราะห์ที่มีได้แสดงถึงการจัดธรรมชาติของการปรับเทียบเสียงเครื่องดนตรีไทยเลย

ตารางที่ 4.3 พอร์แมนซ์ของเสียงโน้ตเดี่ยวในสถานอยู่ตัวของขลุ่ยเพียงออ

ระดับเสียง	DFT	STFT		AR	MD	
	ความถี่ (Hz)	ความถี่ (Hz)	เวลา (ms)	ความถี่ (Hz)	ความถี่ (Hz)	เวลา (ms)
โด	457.14	457.14	1.6	442.86	465.39	5.28
เร	514.29	500	0.6	557.14	511.17	5.42
มี	557.14	557.14	1.0	657.14	556.95	5.17
ฟา	600	600	0.6	650	602.72	5.10
ซอล	657.14	657.14	1.0	700	663.76	4.93
ลา	714.29	714.29	1.8	785.71	717.16	5.15
ที	814.29	814.29	1.6	864.29	816.35	5.10
โด'	900	900	0.6	914.29	892.64	5.06

ตารางที่ 4.4 พอร์แมนซ์ของเสียงโน้ตเดี่ยวในสถานอยู่ตัวของระนาดเอกเหล็ก

ระดับเสียง	DFT	STFT		AR	MD	
	ความถี่ (Hz)	ความถี่ (Hz)	เวลา (ms)	ความถี่ (Hz)	ความถี่ (Hz)	เวลา (ms)
โด	471.43	471.43	1.2	421.43	465.39	5.57
เร	528.57	514.29	1.6	535.71	518.80	5.50
มี	571.43	571.43	0	650	572.20	4.82
ฟา	628.57	614.29	0.6	621.43	625.61	5.34
ซอล	700	685.71	1.8	778.57	694.27	4.98
ลา	757.14	771.43	0.4	721.43	762.94	4.70
ที	842.86	842.86	0.2	778.57	846.86	4.91
โด'	942.86	942.86	0	921.43	938.42	4.80

ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี MD ได้นำมาคำนวณค่าอัตราส่วนความถี่ (frequency ratio) และระยะพิตช์ (pitch interval) โดยการคำนวณอัตราส่วนความถี่ จะนำค่าความถี่ของเสียงที่ติดกันมาหารกันเช่น ซอล : ฟา เป็นต้น และระยะพิตช์คำนวณได้ตามสมการ (4.1) ซึ่งระยะพิตช์จะมีหน่วยเป็น cents เมื่อ $K = 1,200$ (Wood, 1975) f_1 และ f_2 คือค่าความถี่ที่จะคำนวณเปรียบเทียบกับใน

$$\text{ระยะพิตช์} = K \log_2 \frac{f_1}{f_2} \quad (4.1)$$

หน่วย Hz กรณีที่ทำการคำนวณระยะพิตช์ของเสียงที่ติดกัน f_1/f_2 ก็คือค่าอัตราส่วนความถี่ ระยะพิตช์ของเสียงโด' เทียบกับเสียงโดหรือเมื่อครบหนึ่งทบเสียง ในทางทฤษฎีมีค่าเท่ากับ 1,200 cents พอดี ตารางที่ 4.5 และ 4.6 แสดงอัตราส่วนความถี่และระยะพิตช์ของเสียงขลุ่ยเพียงออและระนาดเอกเหล็กตามลำดับ

พิจารณาค่าอัตราส่วนความถี่ และระยะพิตช์ของเสียงขลุ่ยเพียงออตามตารางที่ 4.5 จะสังเกตได้ว่าอัตราส่วนความถี่และระยะพิตช์ของแต่ละระดับเสียงมีค่าไม่เท่ากัน โดยอัตราส่วนความถี่มีค่าอยู่ที่ประมาณ 1.1 และอัตราส่วนของเสียง ที:ลา มีค่ามากที่สุดประมาณ 1.14 ซึ่งทำให้ได้ระยะพิตช์มีค่ามากที่สุดประมาณ 224 cents ค่าระยะพิตช์ของขลุ่ยเพียงออยังปรากฏอาการแกว่งขึ้นลงอีกด้วย เมื่อพิจารณาค่าอัตราส่วนความถี่และระยะพิตช์ของเสียงระนาดเอกเหล็กตามตารางที่ 4.6 จะสังเกตได้ว่า อัตราส่วนความถี่และระยะพิตช์ของแต่ละระดับเสียงมีค่าไม่เท่ากัน เช่นเดียวกับผลที่

ตารางที่ 4.5 อัตราส่วนความถี่และระยะพิตช์ของเสียงขลุ่ยเพียงออ

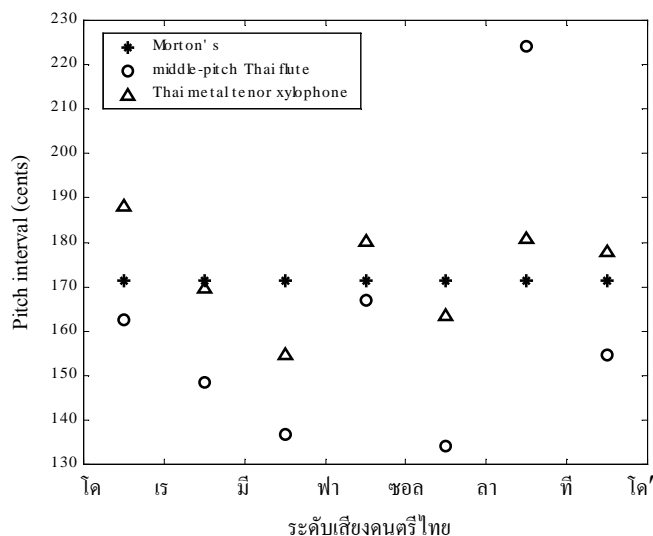
ระดับเสียง	ความถี่ (Hz)	อัตราส่วนความถี่	ระยะพิตช์ (cents)
โด	465.39		
เร	511.17	$1.0984 \cong 1.10$	$162.4355 \cong 162$
มี	556.95	$1.0896 \cong 1.10$	$148.4936 \cong 149$
ฟา	602.72	$1.0822 \cong 1.10$	$136.7281 \cong 137$
ซอล	663.76	$1.1013 \cong 1.10$	$167.0085 \cong 167$
ลา	717.16	$1.0805 \cong 1.10$	$133.9600 \cong 134$
ที	816.35	$1.1383 \cong 1.14$	$224.2714 \cong 224$
โด'	892.64	$1.0935 \cong 1.10$	$154.6688 \cong 155$

ตารางที่ 4.6 อัตราส่วนความถี่และระยะพิตช์ของเสียงระนาดเอกเหล็ก

ระดับเสียง	ความถี่ (Hz)	อัตราส่วนความถี่	ระยะพิตช์ (cents)
โด	465.39	1.1147 \cong 1.12	188.0859 \cong 188
เร	518.80		
มิ	572.20		
ฟา	625.61		
ซอล	694.27		
ลา	762.94		
ที	846.86		
โด'	938.42		
		1.0933 \cong 1.10	154.4929 \cong 155
		1.1097 \cong 1.11	180.2799 \cong 180
		1.0989 \cong 1.10	163.2873 \cong 163
		1.1100 \cong 1.11	180.6647 \cong 181
		1.1081 \cong 1.11	177.7323 \cong 178

ได้จากการคำนวณเสียงขลุ่ยเพียงออ ค่าอัตราส่วนความถี่ของทั้งขลุ่ยเพียงออและระนาดเอกเหล็กนี้ไม่เป็นไปตามที่ ดร.อุทิศ นาคสวัสดิ์ ได้กล่าวไว้ว่ามีค่าเท่ากับ 1.09745 เท่ากันทุกระดับเสียง (ดูรายละเอียดภาคผนวก ข) และค่าระยะพิตช์ยังปรากฏการแกว่งไม่เป็นไปตามสมมุติฐานค่าระยะพิตช์คงที่ซึ่งได้นำเสนอโดย Morton (Morton, 1976) ที่กำหนดให้ระยะพิตช์เท่ากับ 171.43 cents (มาจาก $1,200 \div 7$) เมื่อลองคำนวณค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนความถี่และระยะพิตช์ที่ยังไม่ปิดทศนิยมของขลุ่ยเพียงออจะได้เท่ากับ 1.09769 และ 161.08 cents ตามลำดับ และของระนาดเอกเหล็กจะได้เท่ากับ 1.10537 และ 173.45 cents ตามลำดับ ซึ่งพบว่าค่าอัตราส่วนความถี่เฉลี่ยของขลุ่ยเพียงออใกล้เคียงกับค่าอัตราส่วนความถี่ที่นำเสนอโดย ดร.อุทิศ นาคสวัสดิ์ (1.09769 กับ 1.09745) และค่าระยะพิตช์เฉลี่ยของระนาดเอกเหล็กใกล้เคียงกับค่าระยะพิตช์ที่นำเสนอโดย Morton (173.45 cents กับ 171.43 cents) รูปที่ 4.7 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าระยะพิตช์ที่คำนวณมาจากผลของเทคนิค MD ของเสียงขลุ่ยเพียงออและระนาดเอกเหล็ก และค่าตามสมมุติฐานของ Morton ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าระยะพิตช์ของเสียงขลุ่ยเพียงอามีการแกว่งขึ้นลงห่างจากค่าตามสมมุติฐานของ Morton มากกว่าเสียงของระนาดเอกเหล็กอย่างชัดเจน กราฟในรูปที่ 4.7 ยังบ่งชี้ว่าระยะพิตช์ของเสียงโน้ตดนตรีไทยมีแนวโน้มลดลงในช่วงของเสียงโดถึงเสียงฟาและจะมีการแกว่งขึ้นลงไปจนถึงเสียงโด'

เมื่อพิจารณาอัตราส่วนความถี่และระยะพิตช์ของเสียงขลุ่ยเพียงออและระนาดเอกเหล็กตามตารางที่ 4.5 และ 4.6 เทียบกับดนตรีสากล ดังข้อมูลของเสียงเปียโน (ตารางที่ 4.7) ในความถี่ที่ใกล้เคียงกับเสียงของเสียงขลุ่ยเพียงออและระนาดเอกเหล็ก จะสังเกตเห็นได้ว่าเสียงดนตรีไทยมีค่าความถี่ที่ต่ำกว่าเสียงดนตรีสากล ระยะพิตช์เมื่อครบหนึ่งทาบเสียงของเสียงขลุ่ยเพียงออ ระนาด-



รูปที่ 4.7 ระยะพิตช์ของเสียงขลุ่ยเพียงออ ระนาดเอกเหล็ก และค่าตามสมมุติฐานของ Morton

ตารางที่ 4.7 อัตราส่วนความถี่และระยะพิตช์ของเสียงเป็ยโน

ระดับเสียง	ความถี่ (Hz)	อัตราส่วนความถี่	ระยะพิตช์ (cents)
โศ	523.25		
เร	587.33	$1.1225 \cong 1.12$	200.01
มี	659.26	$1.1225 \cong 1.12$	200.01
ฟา	698.46	$1.0595 \cong 1.06$	100.00
ซอล	783.99	$1.1225 \cong 1.12$	200.00
ลา	880.00	$1.1225 \cong 1.12$	200.00
ที	987.77	$1.1225 \cong 1.12$	200.01
โศ'	1,046.50	$1.0595 \cong 1.06$	100.00

เอกเหล็ก และเป็ยโน จะมีค่าเท่ากับ 1,127.57 cents 1,214.15 cents และ 1,200 cents ตามลำดับ การที่ระยะพิตช์เมื่อครบหนึ่งทวนเสียงของเสียงเป็ยโนมีค่า 1,200 cents พอดี เป็นเพราะเทคโนโลยีการสร้างเครื่องดนตรีสากลในปัจจุบัน ได้มีการใช้เครื่องมือวัดละเอียดช่วยในการปรับตั้งเสียง และตารางที่ 4.7 ยังแสดงให้เห็นว่า ดนตรีสากลแบ่งออกเป็นห้าเสียงเต็มและสองครึ่งเสียงอย่างชัดเจน (เสียงเต็มมีค่าอัตราส่วนความถี่ 1.12 และระยะพิตช์ 200 cents และครึ่งเสียงมีค่าอัตราส่วนความถี่

1.06 และระยะพิตช์ 100 cents) นอกจากนั้น การที่ระยะพิตช์เมื่อครบหนึ่งทบเสียงของเสียงขลุ่ยเพียงอ้อมีค่าต่างไปจาก 1,200 cents มากกว่าเสียงระนาดเอกเหล็ก เพราะเนื่องจากเครื่องดนตรีทั้งสองมีฐานกำเนิดเสียงที่ต่างกัน กล่าวคือเสียงขลุ่ยเกิดจากการสั่นของลำอากาศในกระบอกขลุ่ย ซึ่งอากาศนั้นไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความชื้น ทำให้เสียงที่เกิดขึ้นมีความเข้มข้นน้อยกว่าเสียงระนาดเอกเหล็กที่เกิดจากการกระทบกันของของแข็ง คือไม้ระนาดกับตุ้มนระนาดที่เป็นโลหะ เสียงที่เกิดขึ้นจึงมีความเข้มข้นสม่ำเสมอมากกว่า และประกอบกับการดำเนินงานในกระบวนการผลิตและปรับตั้งเสียงของดนตรีไทย ที่อาศัยความสามารถในการได้ยินของมนุษย์ จึงส่งผลให้ค่าความถี่ของเสียงขลุ่ยเพียงอ้อมไม่เท่ากันพอดีกับเสียงระนาดเอกเหล็ก เพียงแต่มีค่าใกล้เคียงกัน

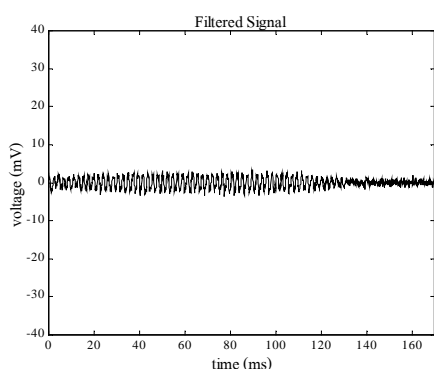
4.3.2 เสียงโน้ตเดี่ยวในสถานะชั่วคราว

การวิเคราะห์เสียงโน้ตเดี่ยวในสถานะชั่วคราวของขลุ่ยเพียงอ้อมจะนำข้อมูลมาเพียงบางส่วนจากที่บันทึกไว้จำนวน 2,500 จุด เพื่อศึกษาในช่วงที่เสียงก่อดำ คงตัว และกำลังจะหายไป ทำให้ความยาวของข้อมูลแต่ละเสียงไม่เท่ากัน และในการวิเคราะห์นี้จะประยุกต์เพียงเทคนิค STFT และ MD กล่าวคือจะทำการคำนวณสเปกโตรแกรมของสัญญาณเพื่อให้ได้ค่า $\Delta\omega_{\min}$ ซึ่งจะต้องใช้ในการคำนวณ MD ต่อไป พารามิเตอร์ของการคำนวณสเปกโตรแกรมคือ nfft จำนวน 8,192 จุด ฟังก์ชันหน้าต่างเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งมีความยาว 250 จุด และจำนวนการเลื่อน 200 จุด ค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดสำหรับการวิเคราะห์ MD ของโน้ตแต่ละเสียง แสดงไว้ในตารางที่ 4.8 ซึ่ง l_s คือจำนวนข้อมูลบางส่วนจาก 2,500 จุด f_s คืออัตราการซีกตัวอย่าง (หน่วย Hz) L คือจำนวนจุดครึ่งหนึ่งในการคำนวณ DFT การเลือก L ให้มีค่าน้อยลงกว่าค่า L ที่ใช้ในการวิเคราะห์เสียงโน้ตเดี่ยวในสถานะอยู่ตัวเนื่องจากเสียงโน้ตเดี่ยวในสถานะชั่วคราวมี f_s ไม่สูงมาก dw_{\min} คือค่า $\Delta\omega_{\min}$ (หน่วย Hz) และ n_step_size คือระยะห่างแต่ละขั้นของ n สำหรับคำนวณ $M_s(n, k)$ ซึ่งจะเลือกใช้ค่า n_step_size ที่มีขนาดเล็ก เพื่อให้ได้รายละเอียดในทางเวลามากขึ้น

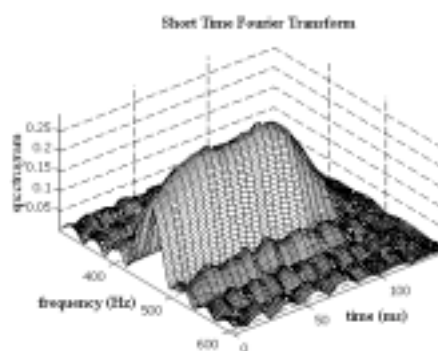
ตารางที่ 4.8 ค่าพารามิเตอร์ของเทคนิค MD สำหรับวิเคราะห์เสียงโน้ตเดี่ยวในสถานะชั่วคราวของขลุ่ยเพียงอ้อม

เสียงโด	เสียงซอล	เสียงโด'	เสียงเร'
$l_s = 1,700$ จุด	$l_s = 1,200$ จุด	$l_s = 1,700$ จุด	$l_s = 2,000$ จุด
$f_s = 10,000$ Hz	$f_s = 10,000$ Hz	$f_s = 10,000$ Hz	$f_s = 10,000$ Hz
$L = 4,096$ จุด	$L = 4,096$ จุด	$L = 4,096$ จุด	$L = 4,096$ จุด
$dw_{\min} = 56.15$ Hz	$dw_{\min} = 57.38$ Hz	$dw_{\min} = 57.37$ Hz	$dw_{\min} = 57.37$ Hz
$n_step_size = 10$ จุด	$n_step_size = 10$ จุด	$n_step_size = 10$ จุด	$n_step_size = 10$ จุด

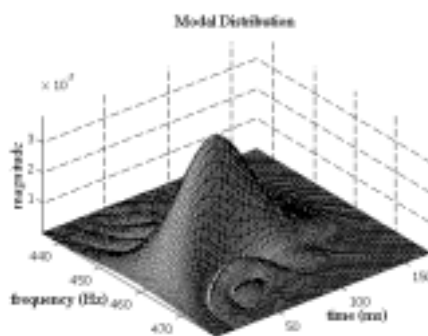
รูปที่ 4.8 แสดงผลการวิเคราะห์เสียงโค โดย (ก) คือสัญญาณเสียงที่บันทึกได้และผ่านการกรองสัญญาณแล้วจำนวน 1,700 จุด นำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค STFT และ MD แสดงดังรูป (ข) และ (ค) ตามลำดับ และ (ง) คือผลจากเทคนิค MD ที่เปรียบเทียบกันระหว่างค่าความถี่ของเสียงที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลา เมื่อพิจารณาสัญญาณเสียงโคตามรูปที่ 4.8 (ก) ซึ่งแสดงสัญญาณเสียงที่บันทึกได้ในช่วงคงตัวและกำลังจะหายไป กับผลการวิเคราะห์จากเทคนิค MD ตามรูปที่ 4.8 (ง) ซึ่ง



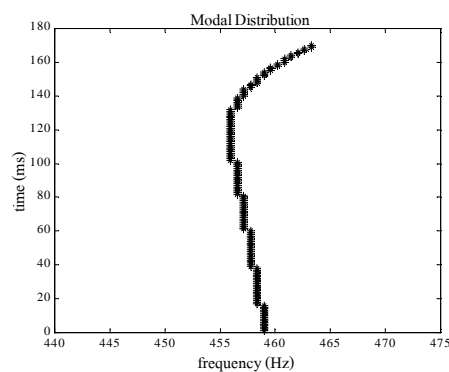
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

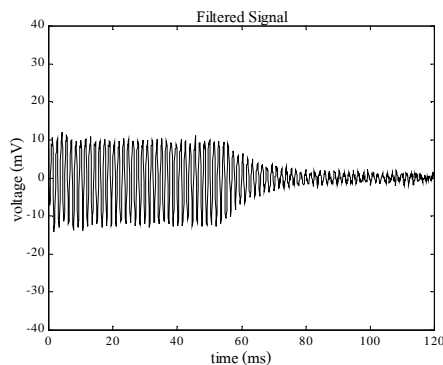
รูปที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์โน้ตเดี่ยวเสียงโคในสถานะชั่วคราวของขลุ่ยเพียงออ

(ก) สัญญาณเสียงที่ผ่านการกรองแล้ว (ข) ผลจากเทคนิค STFT

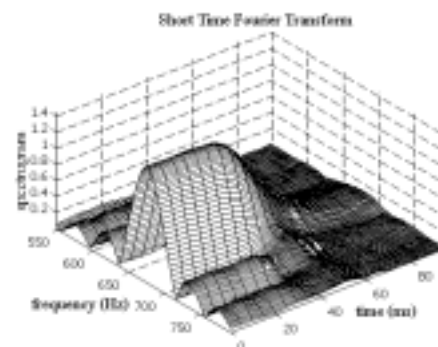
(ค) ผลจากเทคนิค MD และ (ง) ความถี่ที่เกิดขึ้นเทียบกับเวลา

แสดงผลระหว่างค่าความถี่กับเวลา จะสังเกตได้ว่าในช่วงเวลาที่เสียงโคคงตัว (20 ms ถึง 100 ms) ความถี่ของเสียงจะเปลี่ยนแปลงจากค่าความถี่ที่สูงกว่าไปยังต่ำกว่า และในช่วงเวลาที่เสียงโคกำลังจะหายไป (100 ms ถึง 170 ms) ความถี่ของเสียงจะเปลี่ยนแปลงจากค่าความถี่ที่ต่ำกว่าไปยังสูงกว่า การเปลี่ยนแปลงของความถี่ในลักษณะนี้คล้ายกันกับผลการวิเคราะห์เสียงซอล แสดงดังรูปที่ 4.9 โดย (ก) คือสัญญาณเสียงที่บันทึกได้และผ่านการกรองสัญญาณแล้วจำนวน 1,200 จุด (ข) และ (ค)

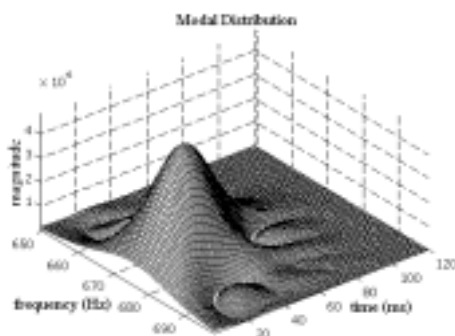
คือผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค STFT และ MD ตามลำดับ และ (ง) คือผลจากเทคนิค MD ที่เปรียบเทียบกันระหว่างค่าความถี่ของเสียงที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลา เมื่อพิจารณาในช่วงเวลาที่เสียงซอลคงตัว (1 ms ถึง 60 ms) และในช่วงเวลาที่เสียงซอลกำลังจะหายไป (60 ms ถึง 120 ms) ก็จะมีการเปลี่ยนแปลงจากค่าความถี่ที่สูงกว่าไปยังต่ำกว่า และค่าความถี่ที่ต่ำกว่าไปยังสูงกว่า ตามลำดับ



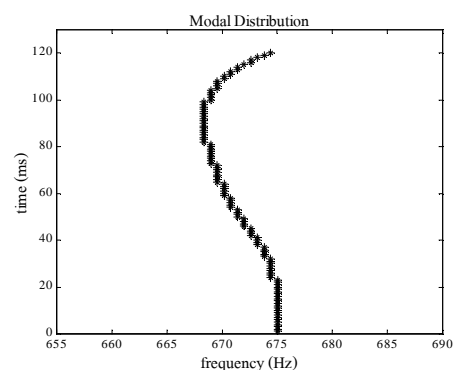
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

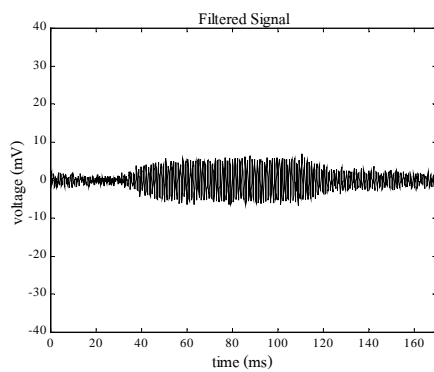
รูปที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์โน้ตเดี่ยวเสียงซอลในสถานะชั่วคราวของขลุ่ยเพียงออ

(ก) สัญญาณเสียงที่ผ่านการกรองแล้ว (ข) ผลจากเทคนิค STFT

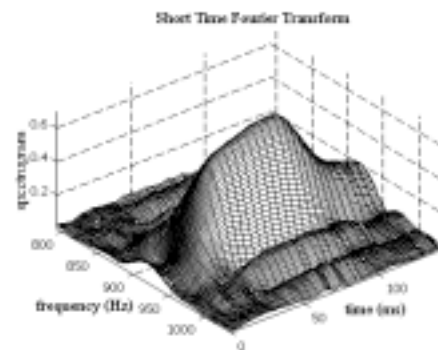
(ค) ผลจากเทคนิค MD และ (ง) ความถี่เทียบกับเวลา

รูปที่ 4.10 แสดงผลการวิเคราะห์สัญญาณเสียงโด่ ซึ่งเป็นสัญญาณเสียงในช่วงก่อดัวและคงตัว โดย (ก) คือสัญญาณเสียงที่บันทึกได้และผ่านการกรองสัญญาณแล้วจำนวน 1,700 จุด (ข) และ (ค) คือผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค STFT และ MD ตามลำดับ และ (ง) คือผลที่ได้จากเทคนิค MD ที่เปรียบเทียบกันระหว่างค่าความถี่ของเสียงที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลา เมื่อพิจารณาสัญญาณเสียงโด่ตามรูปที่ 4.10 (ก) กับ (ง) จะสังเกตได้ว่าในช่วงเวลาที่เสียงโด่ก่อดัว (20 ms ถึง 60 ms)

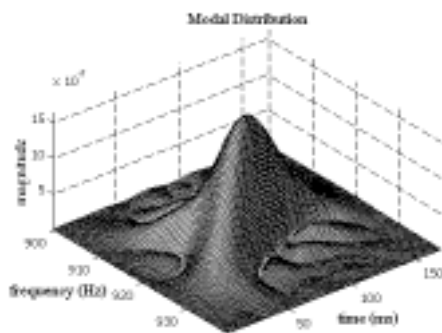
ความถี่ของเสียงจะเปลี่ยนแปลงจากค่าความถี่ที่สูงกว่าไปยังต่ำกว่า และในช่วงเวลาที่เสียงโด่คงตัว (60 ms ถึง 140 ms) ความถี่ของเสียงจะเปลี่ยนแปลงจากค่าความถี่ที่สูงกว่าไปยังต่ำกว่า การเปลี่ยนแปลงของความถี่ในลักษณะนี้คล้ายกันกับผลการวิเคราะห์เสียงเร่ แสดงดังรูปที่ 4.11 โดยที่ (ก) คือ



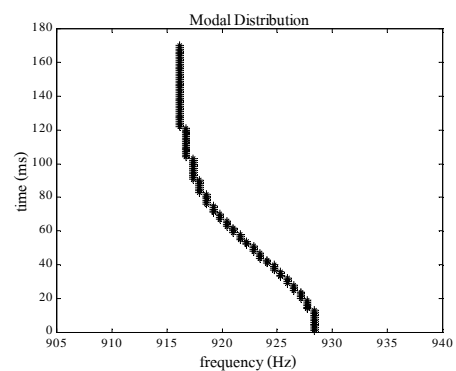
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

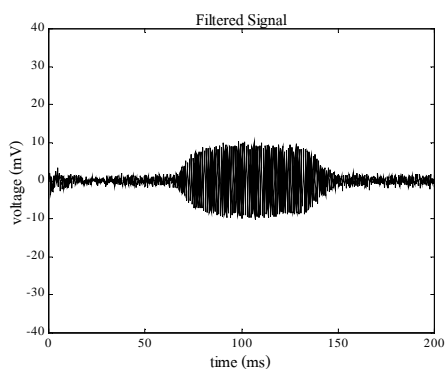
รูปที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์โน้ตเดี่ยวเสียงโด่ในสถานะชั่วคราวของขลุ่ยเพียงออ

(ก) สัญญาณเสียงที่ผ่านการกรองแล้ว (ข) ผลจากเทคนิค STFT

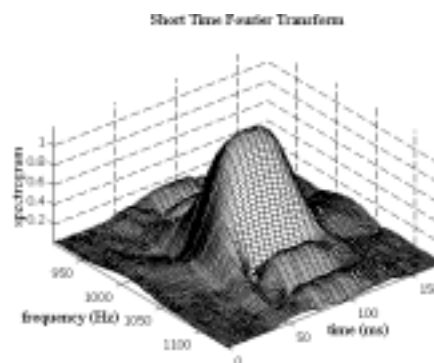
(ค) ผลจากเทคนิค MD และ (ง) ความถี่ที่เกิดขึ้นเทียบกับเวลา

สัญญาณเสียงที่บันทึกได้และผ่านการกรองสัญญาณแล้วจำนวน 2,000 จุด (ข) และ (ค) คือผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค STFT และ MD ตามลำดับ และ (ง) คือผลจากเทคนิค MD ที่เปรียบเทียบกันระหว่างค่าความถี่ของเสียงที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลา เมื่อพิจารณาในช่วงเวลาที่เสียงเร่ก่อตัว (20 ms ถึง 80 ms) และในช่วงเวลาที่เสียงเร่คงตัว (80 ms ถึง 130 ms) ก็จะมีการเปลี่ยนแปลงจากค่าความถี่ที่สูงกว่าไปยังต่ำกว่าเหมือนกันทั้งสองช่วงเวลา การเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ในช่วงที่เสียงคงตัวของทั้งเสียงโด่ เสียงซอล เสียงโด่ และเสียงเร่ จะมีลักษณะเดียวกัน และนอกจากนี้ ในช่วงเวลา

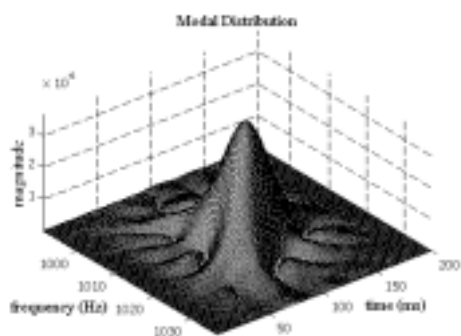
ที่เสียงเร่ กำลังจะหายไป (130 ms ถึง 200 ms) ความถี่ก็มีการเปลี่ยนแปลงจากค่าความถี่ที่ต่ำกว่าไป ยังสูงกว่า เช่นเดียวกันกับเสียงโดและเสียงซอลอีกด้วย



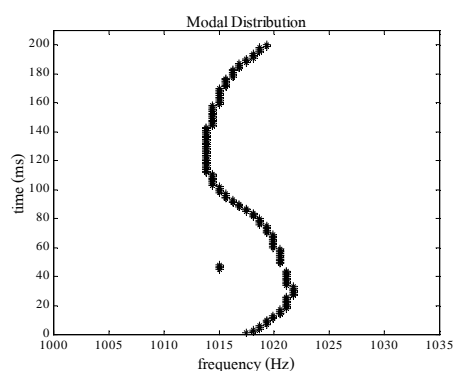
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์โน้ตเดี่ยวเสียงเร่ในสถานะชั่วคราวของขลุ่ยเพียงออ

(ก) สัญญาณเสียงที่ผ่านการกรองแล้ว (ข) ผลจากเทคนิค STFT

(ค) ผลจากเทคนิค MD และ (ง) ความถี่ที่เกิดขึ้นเทียบกับเวลา

ดังนั้น เราจะพิจารณาลักษณะของเสียงขลุ่ยเพียงออในสถานะชั่วคราวได้จากเสียงเร่ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในช่วงที่เสียงก่อตัว คงตัว และกำลังจะหายไป ความถี่จะมีค่าไม่คงที่ตลอดทั้งช่วงเวลา และจะมีการเปลี่ยนแปลงจากค่าความถี่ที่สูงกว่าไปยังต่ำกว่าและวกกลับไปยังสูงกว่าอีกครั้ง การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวนี้จะมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 10 Hz ค่าความถี่ของเสียงโน้ตเดี่ยวในสถานะชั่วคราว รวมทั้งเวลาที่สเปกตรัมมีขนาดสูงสุดและขนาด (magnitude) ของสเปกตรัม ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 4.9 (ขนาดของสเปกตรัมเป็นผลจากการแปลงฟูรีเยร์จึงไม่มีหน่วย) จะมีค่าไม่เท่ากันพอดีกับค่าความถี่ในสถานะอยู่ตัว แต่ก็จะมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากการบรรเลงเสียงโน้ตเดี่ยวในสถานะ

อยู่ตัว เป็นการเป่าด้วยลมต่อเนื่อง แตกต่างกับการบรรเลงเสียงโน้ตเดี่ยวในสถานะชั่วคราว ซึ่งจะเป็นการเป่าด้วยลมที่ไม่ต่อเนื่อง ประกอบกับการที่เสียงขลุ่ยเกิดจากการสั่นของลำอากาศในกระบอกขลุ่ย ซึ่งไวต่อรูปแบบของการบรรเลงและค่าความถี่ของแต่ละเสียง

ตารางที่ 4.9 พอร์แมนท์ของเสียงโน้ตเดี่ยวในสถานะชั่วคราวของขลุ่ยเพียงออ

ระดับเสียง	MD		
	ความถี่ (Hz)	เวลา (ms)	ขนาด ($\times 10^{-6}$)
โด	457.15	67	0.386
ซอล	674.44	31	4.867
โด'	917.97	88	1.638
เร'	1,014.40	108	3.659

4.4 ผลการวิเคราะห์เสียงหลายโน้ต

การวิเคราะห์เสียงหลายโน้ตจะแบ่งออกเป็นเสียงขลุ่ยเพียงออและระนาดเอกเหล็กที่มีเทคนิคการบรรเลงแตกต่างกัน การบรรเลงขลุ่ยเพียงออจะมี 3 รูปแบบ คือแบบโน้ตเรียงกัน แบบสะบัด และแบบพรม การบรรเลงโน้ตเรียงกันคือการเป่าด้วยลมไม่ต่อเนื่องทีละเสียงโน้ต เช่น โด เร มี เป็นต้น การบรรเลงแบบสะบัดคือการเป่าด้วยลมยาวต่อเนื่องพร้อมกับปิดเปิดนิ้วหลายเสียงโน้ตเรียงต่อกันอย่างรวดเร็ว และการบรรเลงแบบพรมคือการเป่าด้วยลมยาวต่อเนื่องพร้อมกับปิดเปิดนิ้วที่โน้ตเสียงใดเสียงหนึ่งอย่างรวดเร็ว ส่วนการบรรเลงระนาดเอกเหล็กจะเป็นแบบตีเก็บและตีกรอ ตีเก็บคือการเคาะไม้ระนาดลงบนลูกกระนาดทั้งสองเสียงโน้ตพร้อมๆกัน ส่วนตีกรอคือการเคาะไม้ระนาดลงบนลูกกระนาดทั้งสองเสียงโน้ตสลับกัน ในการวิเคราะห์เสียงหลายโน้ตนี้จะประยุกต์ใช้เพียงเทคนิค STFT และ MD เช่นเดียวกับการวิเคราะห์เสียงโน้ตเดี่ยวในสถานะชั่วคราว

4.4.1 เสียงหลายโน้ตของขลุ่ยเพียงออ

ในการวิเคราะห์เสียงหลายโน้ตของขลุ่ยเพียงออ ได้บันทึกเสียงในรูปแบบต่างๆ กล่าวคือ บรรเลงแบบโน้ตเรียงกัน เสียง ลา ซอล ฟา บรรเลงแบบสะบัดในเสียง มี' เร' โด' และบรรเลงแบบพรมที่ “นิ้วฟา” เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค STFT จะมีค่าพารามิเตอร์ชุดเดียวกันดังนี้คือ $nfft = 8,192$ จุด พังก์ชันหน้าต่างเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีความยาว 250 จุด และมีจำนวนการเลื่อน 200 จุด ทำให้ได้ค่า $\Delta\omega_{\min}$ ของแต่ละเสียงแตกต่างกันไป ค่าพารามิเตอร์ต่างๆสำหรับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค MD จึงมี 3 ชุดดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 4.10 โดยที่ f_s คืออัตราการซัดตัวอย่าง (หน่วย Hz) L คือจำนวนจุดครึ่งหนึ่งในการคำนวณ DFT ซึ่งค่า L ที่ใช้กำหนดให้มีค่าเท่ากับค่า

L ที่ใช้ในการวิเคราะห์เสียงโน้ตเดี่ยวในสถานะชั่วคราวเนื่องจากมี f_s เท่ากัน dw_{min} คือค่า $\Delta\omega_{min}$ (หน่วย Hz) และ n_{step_size} คือระยะห่างแต่ละขั้นของ n สำหรับคำนวณ $M_s(n, k)$ ซึ่งจะเลือกใช้ค่า n_{step_size} ที่มีขนาดใหญ่กว่าที่ใช้ในการวิเคราะห์เสียงโน้ตเดี่ยวในสถานะอยู่ตัวและชั่วคราว เพื่อให้การคำนวณใช้เวลาน้อยลง

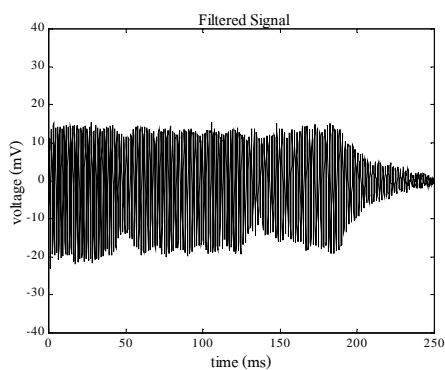
ตารางที่ 4.10 ค่าพารามิเตอร์ของเทคนิค MD สำหรับวิเคราะห์เสียงหลายโน้ตของขลุ่ยเพียงออ

เสียง ลา ซอล ฟา	เสียง มี' เร' โด'	เสียง พรม ฟา
$f_s = 10,000$ Hz	$f_s = 10,000$ Hz	$f_s = 10,000$ Hz
$L = 4,096$ จุด	$L = 4,096$ จุด	$L = 4,096$ จุด
$dw_{min} = 56.15$ Hz	$dw_{min} = 56.76$ Hz	$dw_{min} = 57.36$ Hz
$n_{step_size} = 25$ จุด	$n_{step_size} = 25$ จุด	$n_{step_size} = 25$ จุด

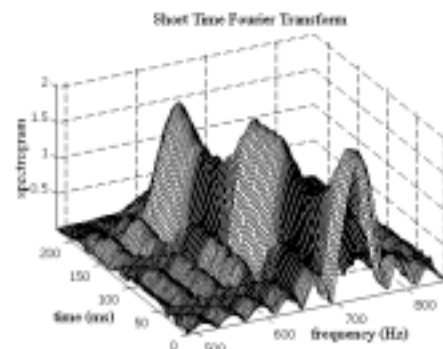
รูปที่ 4.12 แสดงผลการวิเคราะห์เสียง ลา ซอล ฟา โดย (ก) แสดงสัญญาณเสียงที่ผ่านการกรองแล้ว (ข) และ (ค) แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค STFT และ MD และ (ง) แสดงผลจากเทคนิค MD ที่เปรียบเทียบกันระหว่าง ค่าความถี่ของเสียงที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลา ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค MD ตามรูปที่ 4.12 (ค) แสดงให้เห็นว่าเสียงลาปรากฏขึ้นมาก่อนตามด้วยเสียงซอลและเสียงฟาอย่างชัดเจน พิจารณาสัญญาณเสียง ลา ซอล ฟา ตามรูปที่ 4.12 (ก) กับผลการวิเคราะห์จากเทคนิค MD ระหว่างค่าความถี่และเวลาตามรูปที่ 4.12 (ง) สเปกตรัมของเสียงลาปรากฏขึ้นมาก่อนในช่วงเวลา 1 ms ถึง 45 ms ตามด้วยเสียงซอลในช่วงเวลา 45 ms ถึง 130 ms และเสียงฟาในช่วงเวลา 130 ms ถึง 200 ms ตามลำดับ จะสังเกตได้ว่าช่วงรอยต่อระหว่างโน้ตเสียงหนึ่งไปยังอีกเสียงหนึ่ง ปรากฏลักษณะการก่อตัวและกำลังจะหายไปของเสียงดังที่ได้กล่าวไปแล้ว ในการวิเคราะห์เสียงโน้ตเดี่ยวในสถานะชั่วคราว นอกจากนี้ การที่สเปกตรัมของแต่ละเสียงโน้ตดังรูปที่ 4.12 (ค) มีขนาดไม่เท่ากัน เนื่องจากกำลังลมที่เป่าขลุ่ยไม่สม่ำเสมอ จากการเป่าที่ไม่ต่อเนื่อง

รูปที่ 4.13 แสดงผลการวิเคราะห์เสียง มี' เร' โด' โดย (ก) แสดงสัญญาณเสียงที่ผ่านการกรองแล้ว (ข) และ (ค) แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค STFT และ MD และ (ง) แสดงผลจากเทคนิค MD ที่เปรียบเทียบกันระหว่าง ค่าความถี่ของเสียงที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลา พิจารณาสัญญาณเสียง มี' เร' โด' ตามรูปที่ 4.13 (ก) กับผลการวิเคราะห์จากเทคนิค MD ระหว่างค่าความถี่และเวลาตามรูปที่ 4.12 (ง) สเปกตรัมของเสียงมี' ปรากฏขึ้นมาก่อนในช่วงเวลา 1 ms ถึง 70 ms ตามด้วยเสียงเร' ในช่วงเวลา 70 ms ถึง 170 ms และเสียงโด' ในช่วงเวลา 170 ms ถึง 250 ms ตามลำดับ ซึ่งจะสังเกตได้ว่าในช่วงรอยต่อระหว่างโน้ตเสียงหนึ่งไปยังอีกเสียง ปรากฏลักษณะการก่อตัวและ

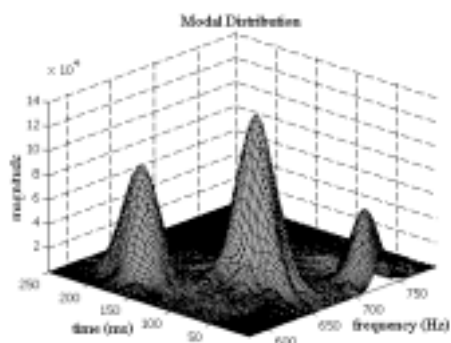
กำลังจะหายไปของเสียง เช่นเดียวกับกับผลการวิเคราะห์เสียง ลา ซอล ฟา ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค MD ดังรูปที่ 4.13 (ค) แสดงขนาดของสเปกตรัมซึ่งเป็นไปตามเทคนิคของการบรรเลงแบบสลับที่เป่าด้วยลมต่อเนื่องพร้อมกับปิดเปิดนิ้วอย่างรวดเร็ว ทำให้สเปกตรัมของเสียงมี ' มีขนาดสูงที่สุดเนื่องจากเป็นช่วงเริ่มต้นของลมเป่า สเปกตรัมของเสียงเร่'ก็จะมีขนาดลดต่ำลง และสเปกตรัมของเสียงโด'มีขนาดต่ำที่สุดตามกำลังของลมเป่าที่ลดลง



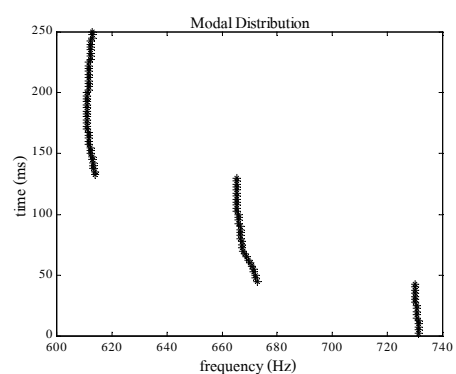
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

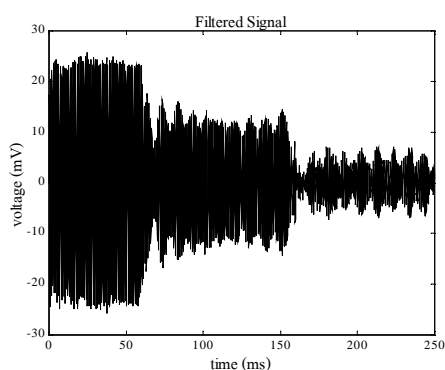
รูปที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์โน้ตเรียงกันเสียง ลา ซอล ฟา ของขลุ่ยเพียงออ

(ก) สัญญาณเสียงที่ผ่านการกรองแล้ว (ข) ผลจากเทคนิค STFT

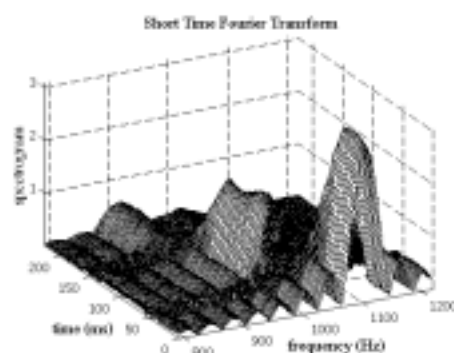
(ค) ผลจากเทคนิค MD และ (ง) ความถี่เทียบกับเวลา

รูปที่ 4.14 แสดงผลการวิเคราะห์เสียงขลุ่ยที่บรรเลงแบบพรม “นิ้วฟา” โดย (ก) แสดงสัญญาณเสียงที่ผ่านการกรองแล้ว (ข) และ (ค) แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค STFT และ MD และ (ง) แสดงผลจากเทคนิค MD ที่เปรียบเทียบกันระหว่างค่าความถี่ของเสียงที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลา พิจารณาผลการวิเคราะห์จากเทคนิค MD ตามรูปที่ 4.14 (ค) กับ (ง) จะสังเกตได้ว่า

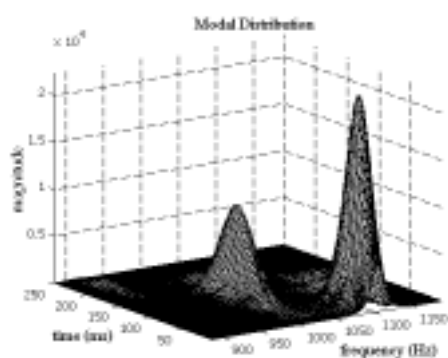
สเปกตรัมของเสียงฟาและเสียงซอลที่ปรากฏขึ้น สะท้อนให้เห็นถึงลักษณะของการบรรเลงแบบพรม กล่าวคือในการบรรเลงจะเป่าเสียงโน้ตฟาขึ้นมาด้วยลมที่ต่อเนื่อง ก่อนที่จะปิดเปิดนิ้วที่เสียงโน้ตฟาไปพร้อมๆกัน สเปกตรัมของเสียงฟาจึงปรากฏขึ้นก่อน สังเกตได้ในช่วงเวลา 1 ms ถึง 50 ms และการปิดเปิดนิ้วที่เสียงโน้ตฟาก็จะทำให้สเปกตรัมของเสียงฟาปรากฏอยู่อย่างสม่ำเสมอ และมีการแทรกสอดด้วยสเปกตรัมของเสียงซอลสลับกันไป



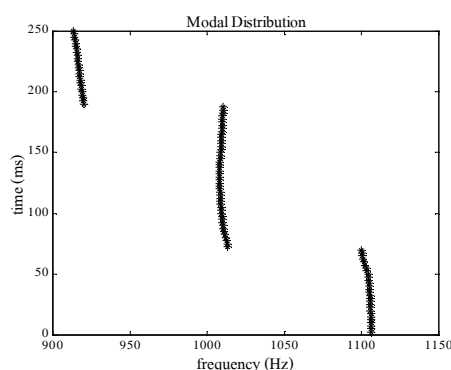
(ก)



(ข)



(ค)



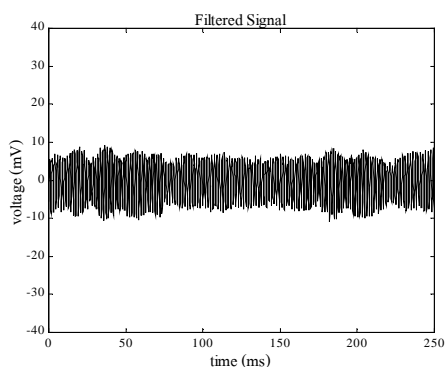
(ง)

รูปที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์เสียงมี 'เร' โด' (บรรเลงแบบสะบัด) ของขลุ่ยเพียงออ

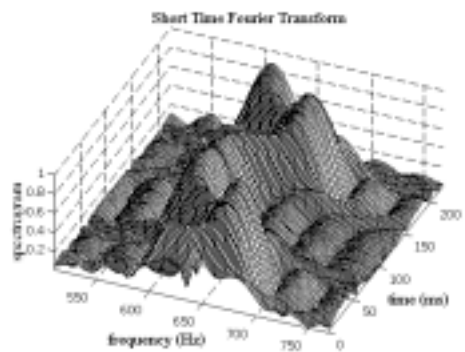
(ก) สัญญาณเสียงที่ผ่านการกรองแล้ว (ข) ผลจากเทคนิค STFT

(ค) ผลจากเทคนิค MD และ (ง) ความถี่เทียบกับเวลา

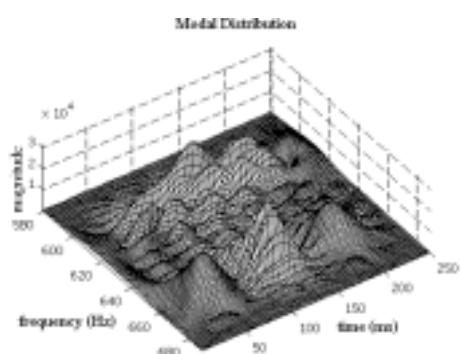
ค่าความถี่และเวลาที่สเปกตรัมมีขนาดสูงสุดของแต่ละเสียงโน้ต ที่อยู่ในตารางที่ 4.11 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์กันอย่างเป็นลำดับก่อนหลัง เมื่อพิจารณาค่าความถี่เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์เสียงโน้ตเดี่ยวในสถานะอยู่ตัว จะพบว่าไม่เท่ากันพอดี เพียงแต่มีค่าใกล้เคียงกัน



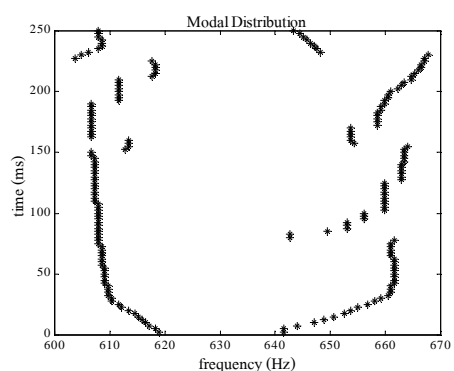
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.14 ผลการวิเคราะห์เสียงการบรรเลงแบบพรม “นิ้วฟ้า” ของขลุ่ยเพียงออ

(ก) สัญญาณเสียงที่ผ่านการกรองแล้ว (ข) ผลจากเทคนิค STFT

(ค) ผลจากเทคนิค MD และ (ง) ความถี่เทียบกับเวลา

ตารางที่ 4.11 พอร์แมนท์ของเสียงหลายโน้ตที่มีเทคนิคการบรรเลงแตกต่างกันของขลุ่ยเพียงออ

การบรรเลง	โน้ต	ระดับเสียง	ความถี่ (Hz)	เวลา (ms)
โน้ตเรียงกัน	ลา ซอล ฟา	ลา	730.59	22.5
		ซอล	666.50	87.5
		ฟา	610.96	170
สะบัด	มี' เร' โด'	มี'	1,105.35	32.5
		เร'	1,008.30	110
		โด'	917.97	207.5
พรม	ฟา	ฟา	607.30	120
		ซอล	659.79	117.5

เนื่องจากเสียงของขลุ่ยจะเพี้ยนไปได้บ้างตามลักษณะของการบรรเลงที่แตกต่างกัน เพียงแต่ความสามารถในการได้ยินเสียงของมนุษย์ไม่อาจแยกแยะได้

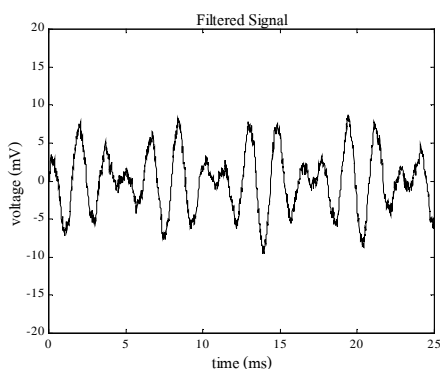
4.4.2 เสียงหลายโน้ตของระนาดเอกเหล็ก

เสียงหลายโน้ตของระนาดเอกเหล็กที่ใช้ในการวิเคราะห์นี้ เป็นเสียงที่บันทึกในการบรรเลงแบบตี เก็บ คู่ 4 โด ฟา และแบบตีกรอ คู่ 4 โด ฟา เมื่อทำการวิเคราะห์ทั้งสองสัญญาณที่บันทึกได้ด้วยเทคนิค STFT จะใช้ค่าพารามิเตอร์ชุดเดียวกัน กล่าวคือ อัตราการชักตัวอย่าง (fs) 100,000 Hz จำนวนจุดในการคำนวณ DFT (nfft) 16,384 จุด ฟังก์ชันหน้าต่างเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งมีความยาวของฟังก์ชันหน้าต่าง (long) 750 จุด และจำนวนการเหลื่อม (noverlap) 700 จุด ผลจากเทคนิค STFT จะได้ค่า $\Delta\omega_{\min}$ (dw min) ของทั้งสองเสียงเท่ากันคือ 164.795 Hz ทำให้ค่าพารามิเตอร์สำหรับเทคนิค MD ที่ใช้ในการวิเคราะห์เสียงทั้งแบบตีเก็บและตีกรอเป็นชุดเดียวกัน โดยจะเลือกใช้จำนวนจุดครึ่งหนึ่งในการคำนวณ DFT (L) 8,192 จุด และระยะห่างแต่ละขั้นของ n สำหรับคำนวณ $M_s(n, k)$ (n_step_size) 4 จุด การเลือก L และ n_step_size ให้มีค่าเท่ากับในการวิเคราะห์เสียงโน้ตเดี่ยวในสถานะอยู่ตัว เนื่องจากมี fs สูงมากเช่นเดียวกัน

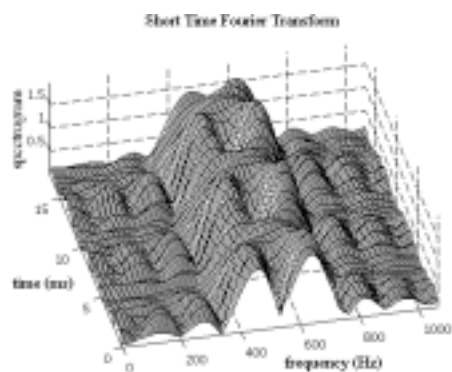
ผลการวิเคราะห์เสียงระนาดเอกเหล็กแบบตีเก็บแสดงได้ดังรูปที่ 4.15 โดย (ก) แสดงสัญญาณเสียงที่ผ่านการกรองแล้ว (ข) และ (ค) แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค STFT และ MD ตามลำดับ และ (ง) แสดงผลจากเทคนิค MD ที่เปรียบเทียบกันระหว่างค่าความถี่ของเสียงที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลา เมื่อพิจารณาถึงลักษณะการบรรเลงระนาดเอกเหล็กแบบตีเก็บคู่ 4 โด ฟา ซึ่งเป็นการเคาะไม้ระนาดลงบนลูกระนาดทั้งเสียงโด และ เสียงฟา พร้อมๆกัน เสมือนว่ามี 2 แหล่งกำเนิดเสียง พลังงานที่เกิดขึ้นจากการเคาะแต่ละครั้งก็จะรวมเข้ากับครั้งก่อนหน้า ผลการวิเคราะห์จากเทคนิค MD ตามรูปที่ 4.15 (ค) จึงแสดงสเปกตรัมของเสียงโด และเสียงฟา ที่ปรากฏขึ้นอย่างชัดเจน นอกจากนี้ ผลจากเทคนิค MD ระหว่างค่าความถี่และเวลาตามรูปที่ 4.15 (ง) ยังแสดงให้เห็นว่าความถี่ที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลามีลักษณะคงตัวที่ค่าหนึ่ง

รูปที่ 4.16 แสดงผลจากการวิเคราะห์เสียงระนาดเอกเหล็กแบบตีกรอ โดยที่ (ก) แสดงสัญญาณเสียงที่ผ่านการกรองแล้ว (ข) และ (ค) แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค STFT และ MD ตามลำดับ และ (ง) แสดงผลจากเทคนิค MD ที่เปรียบเทียบกันระหว่างค่าความถี่ของเสียงที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลา จะเห็นได้ว่าผลการวิเคราะห์เสียงระนาดเอกเหล็กทั้งแบบตีเก็บและแบบตีกรอมีลักษณะเป็นเช่นเดียวกัน ถึงแม้ว่าเทคนิคการบรรเลงจะแตกต่างกัน เพราะการบรรเลงแบบตีกรอคู่ 4 โด ฟา เป็นการเคาะไม้ระนาดลงบนลูกระนาดเสียงโด และเสียงฟา สลับกันไป ก็จะทำให้เสมือนมี 2 แหล่งกำเนิดเสียง พลังงานที่เกิดจากการเคาะแต่ละครั้งก็จะมารวมเข้าด้วยกัน ผลการวิเคราะห์จากเทคนิค MD ตามรูปที่ 4.16 (ค) และ (ง) จึงแสดงสเปกตรัมของเสียงโด และเสียงฟา ที่ปรากฏขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ยังชี้ให้เห็นว่า เสียงที่เกิดขึ้นจากรนาดเอกเหล็กมีความเข้มข้น

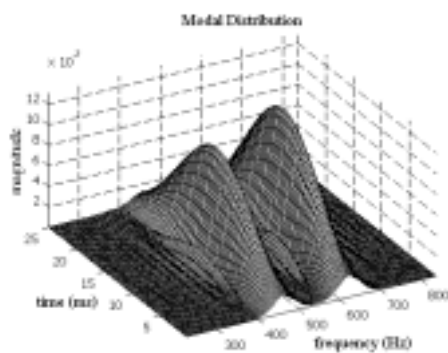
สม่ำเสมอมากกว่าเสียงของขลุ่ย จะสังเกตได้ว่าสัญญาณเสียงระนาดเอกเหล็กแบบตีเก็บตามรูปที่ 4.15 (ก) มีแอมพลิจูดสูงกว่าสัญญาณเสียงแบบตีกรอตามรูปที่ 4.16 (ก) และผลจากเทคนิค MD ทั้งในรูปที่ 4.15 (ค) และ 4.16 (ค) มีขนาดสเปกตรัมของเสียงโคและเสียงฟาไม่เท่ากัน ขนาดของสเปกตรัมในลักษณะดังกล่าวนี้แสดงไว้ในตารางที่ 4.12



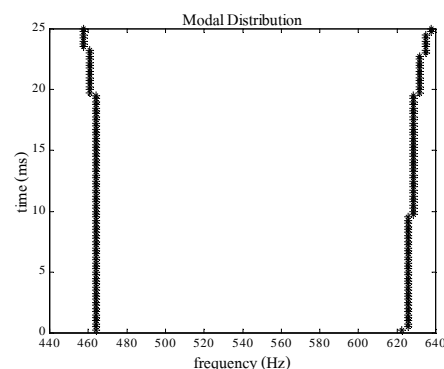
(ก)



(ข)



(ค)



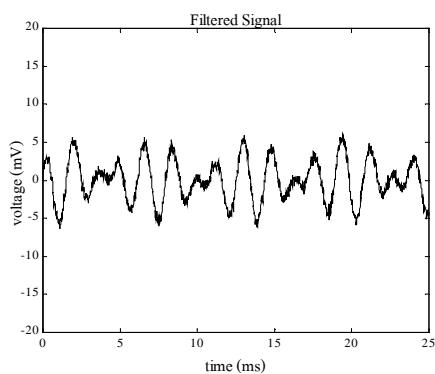
(ง)

รูปที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์เสียงระนาดเอกเหล็ก บรรเลงแบบตีเก็บ คู่ 4 โด ฟา

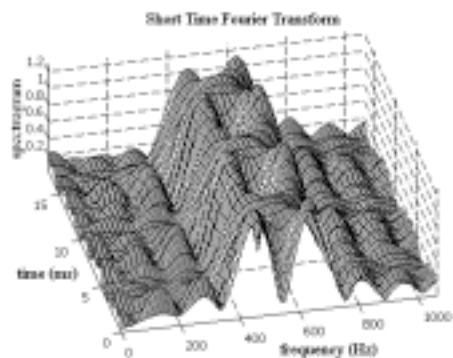
(ก) สัญญาณเสียงที่ผ่านการกรองแล้ว (ข) ผลจากเทคนิค STFT

(ค) ผลจากเทคนิค MD และ (ง) ความถี่ที่เกิดขึ้นเทียบกับเวลา

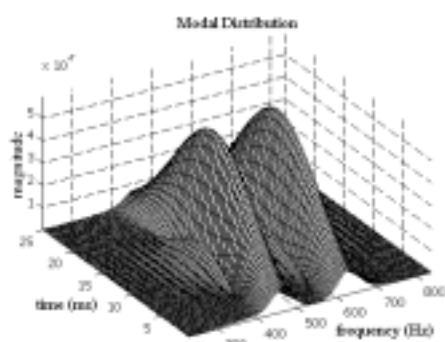
พิจารณาค่าความถี่ของเสียงโคและเสียงฟาที่บรรเลงแบบตีเก็บและตีกรอ เวลาที่สเปกตรัมมีขนาดสูงสุด และขนาดของสเปกตรัม ตามตารางที่ 4.12 (ขนาดของสเปกตรัมเป็นผลจากการแปลงฟูรีเยร์จึงไม่มีหน่วย) จะพบว่าความถี่ของเสียงโคและเสียงฟา จากการบรรเลงทั้งสองแบบมีค่าเท่ากันพอดีคือ 463.87 Hz และ 628.66 Hz ตามลำดับ แต่เวลาที่สเปกตรัมมีขนาดสูงสุดจะแตกต่างกันเล็กน้อย เมื่อนำค่าความถี่ไปเปรียบเทียบกับผลของระนาดเอกเหล็กเสียงโน้ตเดี่ยว ในสถานะ



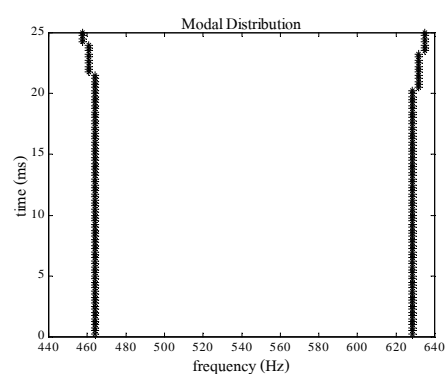
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.16 ผลการวิเคราะห์เสียงขนาดเอกเหล็ก บรรเลงแบบตีกรอ คู่ 4 โด ฟา

(ก) สัญญาณเสียงที่ผ่านการกรองแล้ว (ข) ผลจากเทคนิค STFT

(ค) ผลจากเทคนิค MD และ (ง) ความถี่ที่เกิดขึ้นเทียบกับเวลา

ตารางที่ 4.12 พอร์แมนท์ของเสียงขนาดเอกเหล็ก บรรเลงแบบตีเก็บและตีกรอ คู่ 4 โด ฟา

การบรรเลง	ระดับเสียง	ความถี่ (Hz)	เวลา (ms)	ขนาด ($\times 10^{-6}$)
แบบตีเก็บ คู่ 4 โด ฟา	โด	463.87	12.24	1.092
	ฟา	628.66	12.36	1.308
แบบตีกรอ คู่ 4 โด ฟา	โด	463.87	11.92	0.578
	ฟา	628.66	12.04	0.594

อยู่ตัวของเสียงโดและเสียงฟา คือ 465.39 Hz และ 625.61 Hz ก็จะมีค่าใกล้เคียงกันมาก นอกจากนี้ขนาดของสเปกตรัมในการบรรเลงแบบตีเก็บมีค่าสูงกว่าในการบรรเลงแบบตีกรอ สอดคล้องกับสัญญาณเสียงขนาดเอกเหล็กแบบตีเก็บที่มีแอมพลิจูดสูงกว่า ซึ่งแสดงถึงความแรงในการตีที่ไม่เท่า

กัน และนอกจากนี้ สเปกตรัมของเสียงโคและเสียงฟาในการบรรเลงแบบตีกรอยังมีขนาดที่ใกล้เคียงกันมากกว่าในการบรรเลงแบบตีเก็บ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผู้บรรเลงสามารถควบคุมความแรงของการตีสลับสองเสียงโน้ตให้เท่าๆกันได้

4.5 สรุปผลการทดลอง

จากผลการวิเคราะห์เสียงขลุ่ยเพียงออและระนาดเอกเหล็กทั้งในกรณีเสียงโน้ตเดี่ยว และกรณีเสียงหลายโน้ต ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ สามารถนำมาสรุปรวมไว้ได้ดังนี้

กรณีเสียงโน้ตเดี่ยวในสถานะอยู่ตัวของขลุ่ยเพียงออและระนาดเอกเหล็ก ได้ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DFT STFT AR และ MD ซึ่งแต่ละเทคนิคจะใช้พารามิเตอร์ชุดเดียวกันกับเสียงโน้ตทั้ง 8 เสียง (โค เร มี ฟา ซอล ลา ที โด') ผลการวิเคราะห์จากแต่ละเทคนิคแสดงฟอร์มแมนท์ของเสียงโน้ตได้อย่างชัดเจน เทคนิค MD ให้ค่าความถี่ฟอร์มแมนท์ของทั้งขลุ่ยเพียงออและระนาดเอกเหล็กที่ไม่ซับซ้อนของการเปรียบเทียบเสียงเครื่องดนตรีไทย จึงได้นำมาคำนวณค่าอัตราส่วนความถี่และระยะพิตช์ ผลการคำนวณพบว่าค่าอัตราส่วนความถี่และระยะพิตช์ของแต่ละระดับเสียงปรากฏอาการแกว่ง ไม่เป็นไปตามสมมติฐานค่าอัตราส่วนคงที่ซึ่งได้นำเสนอโดย ดร. อุทิศ นาคสวัสดิ์ และสมมติฐานค่าระยะพิตช์คงที่ซึ่งได้นำเสนอโดย Morton

กรณีเสียงโน้ตเดี่ยวในสถานะชั่วคราวของขลุ่ยเพียงออ ได้ทำการวิเคราะห์ลักษณะของเสียงในช่วงที่เสียงก่อตัวขึ้น คงตัว และกำลังจะหายไป ของเสียงโค เสียงซอล เสียงโด' และเสียงเร' ด้วยเทคนิค STFT และ MD ผลจากการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า ในแต่ละช่วงของเสียง ความถี่มีค่าไม่คงที่ตลอด โดยที่มีการเปลี่ยนแปลงจากค่าความถี่ที่สูงกว่าไปยังต่ำกว่าและจะกลับไปยังความถี่ที่สูงกว่าอีกครั้ง

กรณีเสียงหลายโน้ตของขลุ่ยเพียงออ ได้ทำการวิเคราะห์เสียงที่มีเทคนิคการบรรเลงแตกต่างกัน 3 รูปแบบ คือ แบบโน้ตเรียงกัน เสียงลา ซอล ฟา แบบสะบัด เสียงมี' เร' โด' และแบบพรม"นิ้วฟา" ด้วยเทคนิค STFT และ MD ผลการวิเคราะห์แสดงสเปกตรัมของแต่ละเสียง ซึ่งทั้งขนาดของสเปกตรัมและเวลาที่เกิดขึ้น สอดคล้องกับลักษณะของการบรรเลงที่แตกต่างกัน

กรณีเสียงหลายโน้ตของระนาดเอกเหล็ก ได้ทำการวิเคราะห์เสียงที่บรรเลงแบบตีเก็บคู่ 4 โด ฟา และตีกรอ คู่ 4 โด ฟา ด้วยเทคนิค STFT และ MD ผลการวิเคราะห์ปรากฏลักษณะสเปกตรัมของเสียงโคและเสียงฟาที่เหมือนกัน และความถี่ของเสียงโคและเสียงฟาจากการบรรเลงในแต่ละแบบมีค่าเท่ากัน ซึ่งแสดงความเป็นเอกรูป (uniform) ของเสียงระนาดเอกเหล็ก

บทที่ 5

บทสรุป

5.1 กล่าวนำ

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เป็นการวิเคราะห์สัญญาณเสียงดนตรีไทยในระดับเสียงกลางที่เรียกกันว่า “ทางเพียงออ” โดยทำการวิเคราะห์เสียงจากเครื่องดนตรีหลักที่ใช้สำหรับการเทียบเสียง คือ ขลุ่ยเพียงออและระนาดเอกเหล็ก ทั้งในกรณีเสียงโน้ตเดี่ยว และกรณีเสียงหลายโน้ต เพื่อให้ทราบถึงค่าความถี่ของระดับเสียงกลางทางดนตรีไทย และศึกษาการประยุกต์เทคนิคการกระจายทางเวลา-ความถี่กับเสียงหลายโน้ต สัญญาณเสียงที่บันทึกได้ นำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคที่แตกต่างกันสี่วิธี ได้แก่ การแปลงฟูรีเยร์เต็มหน่วย (DFT) การแปลงฟูรีเยร์ในช่วงเวลาสั้น (STFT) แบบจำลองเออาร์ (AR) และ การกระจายเชิงโมด (MD) สำหรับการวิเคราะห์เสียงโน้ตเดี่ยวในสถานะอยู่ตัว แต่ละเทคนิคจะใช้ค่าพารามิเตอร์ชุดเดียวกันกับโน้ตทั้งแปดเสียง ผลที่ได้นำมาเปรียบเทียบกันแล้วนำไปคำนวณค่าอัตราส่วนความถี่และระยะพิตช์ สำหรับการวิเคราะห์เสียงโน้ตเดี่ยวในสถานะชั่วครู่และเสียงหลายโน้ต จะประยุกต์เพียงเทคนิค STFT และ MD ซึ่งจะเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างกันออกไปตามผลการคำนวณสเปกโตรแกรมและอัตราส่วนการชักตัวอย่าง ผลที่ได้นำมาเปรียบเทียบกับผลจากการวิเคราะห์เสียงโน้ตเดี่ยวในสถานะอยู่ตัว และยังสามารถอธิบายถึงลักษณะการบรรเลงที่แตกต่างกันของเสียงหลายโน้ต

5.2 สรุปผลการวิจัย

การดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้บรรลุวัตถุประสงค์ตามที่ตั้งไว้ทุกประการ โดยมีผลการวิจัยดังนี้

กรณีเสียงโน้ตเดี่ยวในสถานะอยู่ตัว จะพิจารณาผลการวิเคราะห์จากเทคนิค MD ซึ่งค่าความถี่ฟอร์แมนซ์ของขลุ่ยเพียงออและระนาดเอกเหล็กแสดงได้ดังตารางที่ 5.1 ผลจากการคำนวณค่าอัตราส่วนความถี่และระยะพิตช์ของแต่ละระดับเสียงปรากฏอาการแกว่ง โดยมีแนวโน้มลดลงในช่วงของเสียงโดถึงเสียงฟาและจะมีอาการแกว่งขึ้นลงไปจนถึงเสียงโด (แสดงไว้ในรูปที่ 4.7) ขลุ่ยเพียงอามีค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนความถี่และระยะพิตช์เท่ากับ 1.09769 และ 161.08 cents ตามลำดับ และระนาดเอกเหล็กมีค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนความถี่และระยะพิตช์เท่ากับ 1.10537 และ 173.45 cents ตามลำดับ ระยะพิตช์เมื่อครบหนึ่งทบเสียงของขลุ่ยเพียงออและระนาดเอกเหล็ก มีค่าเท่ากับ

1,127.57 cents และ 1,214.15 cents ตามลำดับ

ตารางที่ 5.1 ฟอร์แมนทของเสียงโน้ตเดี่ยวในสถานะอยู่ตัวของขลุ่ยเพียงออและระนาดเอกเหล็ก

ระดับเสียง	ผลการวิเคราะห์จากเทคนิค MD	
	ขลุ่ยเพียงออ (Hz)	ระนาดเอกเหล็ก (Hz)
โด	465.39	465.39
เร	511.17	518.80
มี	556.95	572.20
ฟา	602.72	625.61
ซอล	663.76	694.27
ลา	717.16	762.94
ที	816.35	846.86
โด'	892.64	938.42

กรณีเสียงโน้ตเดี่ยวในสถานะชั่วคราว เสียงขลุ่ยเพียงออมีค่าความถี่ไม่คงที่ตลอดทั้งช่วงที่เสียงก่อตัวขึ้น คงตัว และกำลังจะหายไป โดยมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงประมาณ 10 Hz จากค่าความถี่ที่สูงกว่าไปยังต่ำกว่าและวกกลับไปยังความถี่ที่สูงกว่าอีกครั้ง ค่าความถี่ฟอร์แมนทของเสียงโด เสียงซอล เสียงโด' และ เสียงเร' มีค่าเท่ากับ 457.15 Hz, 674.44 Hz, 917.97 Hz และ 1,014.40 Hz ตามลำดับ

กรณีเสียงหลายโน้ต การบรรเลงขลุ่ยเพียงออมี 3 รูปแบบ คือ แบบโน้ตเรียงกัน แบบสะบัด และแบบพรม ส่วนการบรรเลงระนาดเอกเหล็กมี 2 รูปแบบ คือ แบบตีเก็บ และแบบตีกรอ ผลการวิเคราะห์จากเทคนิค MD แสดงฟอร์แมนทของแต่ละเสียงโน้ตที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับลักษณะการบรรเลงในรูปแบบต่างๆ ของทั้งขลุ่ยเพียงออและระนาดเอกเหล็ก ค่าความถี่ฟอร์แมนทของแต่ละเสียงโน้ตซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 4.11 และ 4.12 มีค่าใกล้เคียงกับฟอร์แมนทของเสียงโน้ตเดี่ยวในสถานะอยู่ตัว

จากผลการวิจัยดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า เทคนิค MD สามารถนำมาประยุกต์กับการวิเคราะห์เสียงของขลุ่ยเพียงออและระนาดเอกเหล็กได้ดี ทั้งในกรณีเสียงโน้ตเดี่ยวและเสียงหลายโน้ต

5.3 ข้อเสนอแนะ

1 การวิเคราะห์สัญญาณด้วยเทคนิคการกระจายเชิงโมด (MD) อาจใช้โปรแกรมด้วยภาษาอื่น อย่างเช่น ภาษาซี หรือใช้เทคนิคการประมวลผลแบบขนาน เพื่อแก้ปัญหาค่าการประมวลผลซ้ำของโปรแกรม MATLAB และภาษาซี ยังสามารถนำไปใช้งานได้กว้างขวาง

2 การวิเคราะห์เสียงเครื่องดนตรีไทย อาจทำการบันทึกเสียงในสตูดิโอบันทึกเสียงโดยเฉพาะ เพื่อป้องกันปัญหาของเสียงรบกวนจากเครื่องออสซิลโลสโคป และระบบไฟฟ้าที่ไม่เสถียร และยังใช้ไมโครโฟนในการบันทึกได้หลายตัว จึงสามารถรับเสียงได้จากทุกทิศทาง ในกรณีที่แหล่งกำเนิดเสียงมีมากกว่าหนึ่งแหล่งกำเนิด เช่น เสียงจากระนาดและฆ้อง เป็นต้น ทำให้สัญญาณเสียงที่บันทึกได้มีคุณภาพมากขึ้น

3 ในอนาคต อาจทำการบันทึกเสียงเครื่องดนตรีไทย โดยขอความร่วมมือจากองค์กรต่างๆ เช่น วังสวนผักกาด วิทยาลัยดุริยางคศิลป์ มหาวิทยาลัยมหิดล วิทยาลัยนาฏศิลป์ และมูลนิธิศรีศิลป์ บรรเลง เป็นต้น และนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบผลลัพธ์ เพื่อนำไปสู่การประกาศระดับเสียงที่เป็นมาตรฐานสำหรับเทียบเสียงของดนตรีไทย

เอกสารอ้างอิง

- มนตรี ตราโมท. (2540). **คู่มือวิทยาศาสตร์ไทย: ภาควิชาการ**. กรุงเทพฯ: มติชน.
- ศราวุฒิ สุจิตจร. (2545). **การวิเคราะห์เสียงดนตรีไทย**. นครราชสีมา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- อุทิศ นาคสวัสดิ์. (2514). **ทฤษฎีและการปฏิบัติดนตรีไทย**. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์คุรุสภา.
- Alten, S. R. (1999). **Audio in media**. USA: Wadsworth.
- Cohen, L. (1989). Time-frequency distribution: A review. **Proceedings of the IEEE**. 77 (7): 941-981.
- Goswami, J. C., and Chan, A. K. (1999). **Fundamentals of wavelets: Theory, algorithms, and applications**. New York: John Wiley & sons.
- Griffiths, L. J. (1975). Rapid measurement of digital instantaneous frequency. **IEEE trans. on acoustics, speech and signal processing**. ASSP-23 (2):207-222.
- Marple, L. (1980). A new autoregressive spectrum analysis algorithm. **IEEE trans. on acoustics, speech and signal processing**. ASSP-28 (4):441-454.
- Mitra, S. K. (2001). **Digital signal processing: A computer-based approach**. Singapore: McGraw-Hill.
- Morton, D. (1976). **The traditional music of Thailand**. USA: University of California Press.
- Oppenheim, A. V., and Schaffer, R. W. (1989). **Discrete-time signal processing**. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- Pian Totarong. (1983). **Frequency tracking and its application in speech analysis**. M.S. thesis, Ohio University.
- Pielemeier, W. J., and Wakefield, G. H. (1996). A high-resolution time-frequency representation for musical instrument signals. **The Journal of the Acoustical Society of America**. 99 (4): 2382-2396.
- Pielemeier, W. J., Wakefield, G. H., and Simoni, M. H. (1996). Time-frequency analysis of musical signals. **Proceedings of the IEEE**. 84 (9): 1216-1229.

Rumsey, F., and McCormick, T. (1994). **Sound & recording: An introduction.** Great Britain: Focal Press.

Therrien, C. W. (1992). **Discrete random signals and statistical signal processing.** USA: Prentice Hall.

Wood, A. (1975). **The physics of music** (7th ed.). USA: John Wiley & Son.

ภาคผนวก ก

เสียง การได้ยิน และไมโครโฟน

เสียง การได้ยิน และไมโครโฟน*

กล่าวนำ

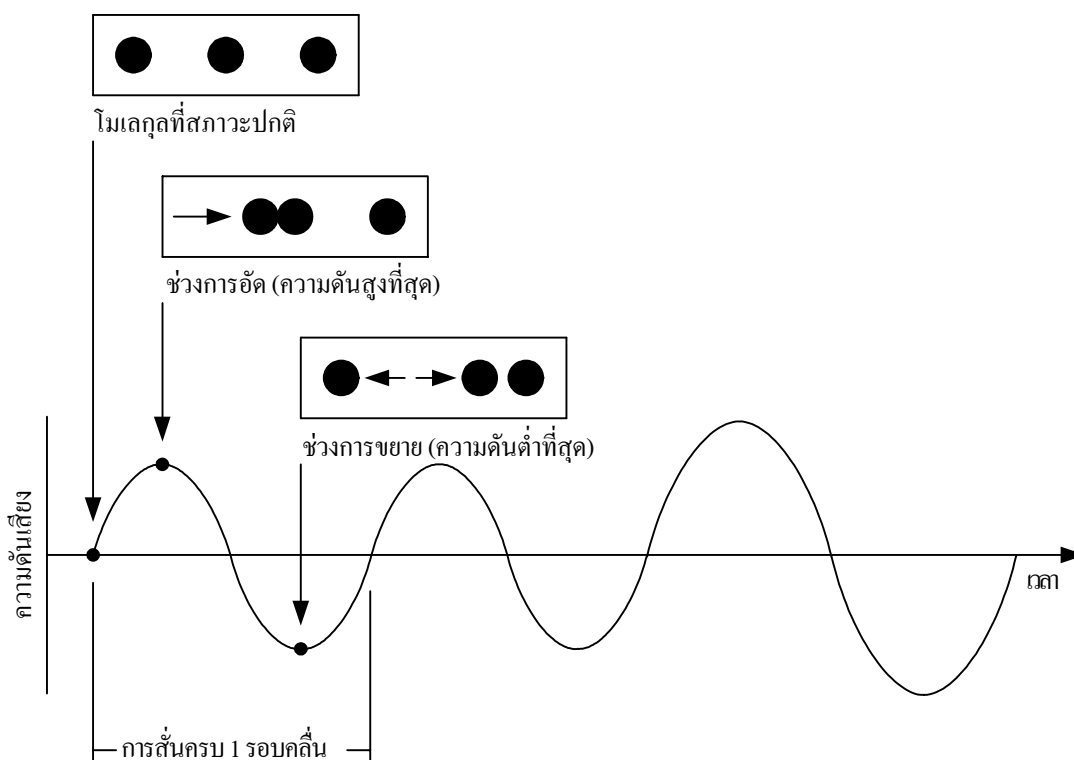
“มนุษย์สามารถได้ยินเสียงต่างๆที่อยู่รอบตัว โดยอาศัยหูเป็นอวัยวะในการรับฟังเสียงซึ่งเกิดจากการสั่นของแหล่งกำเนิดเสียง และพลังงานจากการสั่นนั้นเคลื่อนที่ผ่านอากาศมาถึงหู หูจะทำหน้าที่เปรียบเสมือนตัวเก็บรวบรวมข้อมูลของเสียงที่เข้ามา แล้วส่งต่อไปยังสมอง เพื่อพิจารณาเสียงที่ได้ยินว่าเป็นเสียงอะไร มีความดังมากหรือน้อยอย่างไร ในส่วนนี้จะกล่าวถึงการเกิดของเสียง แหล่งกำเนิดเสียงที่มนุษย์สามารถได้ยิน ซึ่งจะกล่าวถึงแต่เพียงเสียงพูดของมนุษย์ (voice) และเสียงจากเครื่องดนตรีประเภทเครื่องเป่า อธิบายส่วนประกอบของหู และการได้ยินเสียง ทำให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของเสียงที่เกิดขึ้นจริงกับความรู้สึกรับรู้ของการได้ยิน นอกจากนี้ เราได้ใช้ไมโครโฟนเป็นอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณเสียง ไมโครโฟนให้การแปลงเสียงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ในบทนี้จึงกล่าวถึงไมโครโฟนชนิดต่างๆ รวมทั้งลักษณะสมบัติที่สำคัญของไมโครโฟนอีกด้วย”

การเกิดเสียง

“เสียง เริ่มเกิดขึ้นเมื่อวัตถุหรือแหล่งกำเนิดเสียงมีการสั่นสะเทือน ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของอากาศที่อยู่โดยรอบ กล่าวคือโมเลกุลของอากาศเหล่านี้จะเคลื่อนที่จากตำแหน่งเดิม ไปชนกับโมเลกุลที่อยู่ถัดไป ก่อให้เกิดการถ่ายโอนโมเมนตัม จากโมเลกุลที่มีการเคลื่อนที่ให้กับโมเลกุลที่อยู่ในสถานะปกติ จากนั้นโมเลกุลที่ชนกันนี้จะแยกออกจากกัน โดยโมเลกุลที่เคลื่อนที่มา จะถูกดึงกลับไปยังตำแหน่งเดิมด้วยแรงปฏิกิริยา และโมเลกุลที่ได้รับการถ่ายโอนพลังงานจะเคลื่อนที่ไปชนกับโมเลกุลที่อยู่ถัดไป ปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นสลับกันไปมาได้เมื่อสื่อกลาง (ในที่นี้คืออากาศ) มีคุณสมบัติของความยืดหยุ่น (Alten, 1999) การเคลื่อนที่ของโมเลกุลอากาศนี้จึงเกิดเป็นคลื่นเสียง รูปที่ ก.1 แสดงการเคลื่อนที่ของโมเลกุลอากาศ เทียบกับลักษณะของคลื่น เมื่อแหล่งกำเนิดเสียงมีการสั่นสะเทือน อาจสังเกตได้จากภาพว่า ขณะที่แหล่งกำเนิดเสียงไม่มีการสั่นสะเทือน หรือโมเลกุลของอากาศอยู่ในสถานะปกติ ความดันเสียง (sound pressure) ในขณะนี้จะคงที่ที่ค่าหนึ่ง เมื่อโมเลกุลของอากาศมีการชนกัน ความดันอากาศจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นจากปกติ ส่งผลให้ความ

* ข้อความต่างๆที่เป็นเนื้อหาของภาคผนวก ก นี้ ได้คัดลอกมาจาก “สรารวุฒิ สุจิตจร, การวิเคราะห์เสียงดนตรีไทย, 2545.”

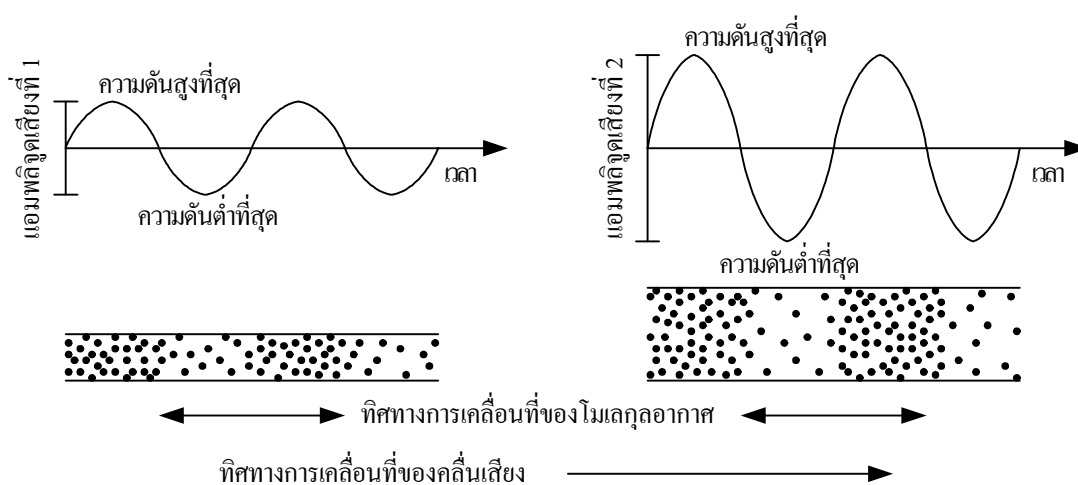
คลื่นเสียง ณ ช่วงเวลานี้เพิ่มมากขึ้นด้วย เสมือนเป็นช่วงการอัด (compression) เกิดเป็นยอดคลื่นที่มีความดันเสียงสูงสุดในคลื่นเสียง และเมื่อโมเลกุลของอากาศแยกออกจากกัน ความดันอากาศจะมีความลดลงจากปกติ ส่งผลให้ความดันเสียง ณ ช่วงเวลานี้ลดลงด้วย เสมือนเป็นช่วงการขยาย (rarefaction) เกิดเป็นจุดที่มีความดันเสียงต่ำที่สุดในคลื่นเสียง (Alten, 1999) ดังนั้น การสั่นสะเทือนของแหล่งกำเนิดเสียงจากช่วงการอัดถึงช่วงการขยาย จึงเปรียบได้กับการเคลื่อนที่ครบหนึ่ง



รูปที่ ก.1 การเคลื่อนที่ของ โมเลกุลของอากาศเทียบกับลักษณะของคลื่น

รอบ (cycle) ของคลื่น ซึ่งจำนวนรอบในเวลาหนึ่งวินาทีนี้หมายถึงความถี่ (frequency) ของคลื่นเสียง มีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ (Hz) หรือรอบต่อวินาที (cps) และนอกจากนี้จำนวนโมเลกุลของอากาศที่เคลื่อนที่ทั้งในช่วงการอัดและช่วงการขยายของโมเลกุลของอากาศ ยังหมายถึงแอมพลิจูด (amplitude) ของคลื่นเสียงด้วย เช่นถ้าจำนวนโมเลกุลของคลื่นเสียงที่หนึ่ง น้อยกว่าของคลื่นเสียงที่สอง ยอดคลื่นของเสียงที่หนึ่ง ย่อมจะต่ำกว่ายอดคลื่นของเสียงที่สอง ซึ่งทำให้แอมพลิจูดของเสียงที่หนึ่ง ต่ำกว่าแอมพลิจูดของเสียงที่สอง เป็นต้น รูปที่ ก.2 แสดงจำนวนโมเลกุลของอากาศกับแอมพลิจูดของคลื่นเสียง เมื่อพิจารณาจากภาพดังกล่าวจะเห็นได้ว่าเสียงเป็นคลื่นตามยาว (longitudinal wave) เนื่องจากโมเลกุลของอากาศเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกันกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียง

คลื่นเสียงจะเคลื่อนที่ออกจากแหล่งกำเนิดเสียงมีลักษณะคล้ายกับคลื่นที่เกิดขึ้นเมื่อโยนก้อนหินลงในน้ำ รูปคลื่นที่ใช้แทนคลื่นเสียงจากรูปที่ ก.1 และ ก.2 นั้นเป็นรูปคลื่นไซน์ ประกอบด้วยพลังงานที่มีเพียงความถี่เดียว จึงเรียกว่าเสียงบริสุทธิ์ (pure tones) ซึ่งในความเป็นจริงแล้ว เสียงที่มนุษย์ได้ยินมิใช่ในรูปของเสียงบริสุทธิ์ แต่อยู่ในรูปของคลื่นความถี่ต่างๆผสมกัน เพราะเสียงที่มนุษย์สามารถได้ยิน เกิดจากแหล่งกำเนิดเสียงที่มีการสั่นในหลายลักษณะหรือมีหลายความถี่รวมกัน ทำให้รูปคลื่นที่เกิดขึ้นมีความซับซ้อนมากกว่าคลื่นรูปไซน์ (Rumsey and McCormick, 1994)”



รูปที่ ก.2 จำนวนโมเลกุลของอากาศกับแอมพลิจูดของคลื่นเสียง

แหล่งกำเนิดเสียง

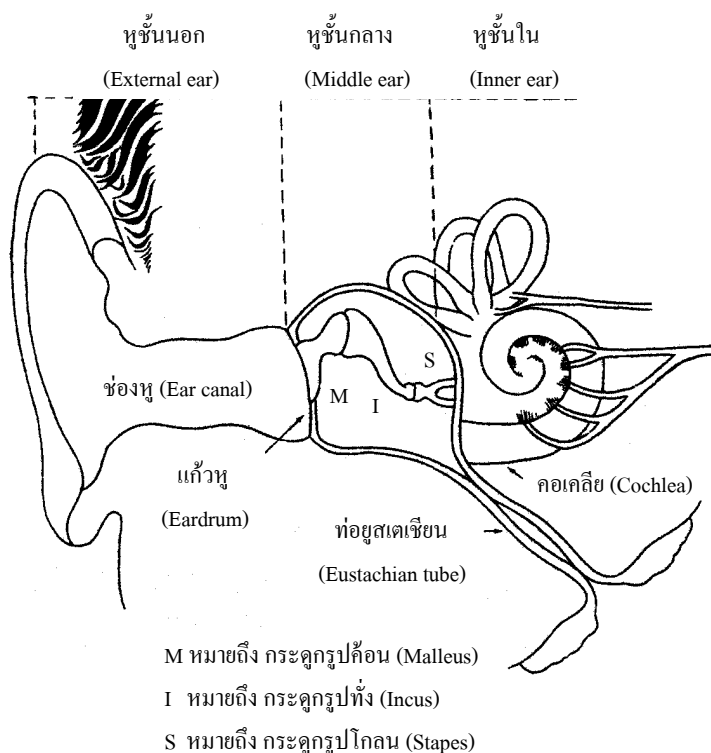
“เสียงที่มนุษย์ได้ยินนั้นมีอยู่มากมาย อาจเกิดจากมนุษย์เองหรือเกิดจากสิ่งแวดล้อม เสียงที่เกิดจากมนุษย์มีทั้งที่เป็นเสียงพูด ไม่เป็นเสียงพูด บ้างก็เป็นเสียงที่สื่อความหมาย บ้างก็ไม่ได้สื่อความหมายใดๆ เสียงพูดของมนุษย์เริ่มต้นจากการหดตัวของกล้ามเนื้อหน้าอก ซึ่งเป็นผลของอากาศจากปอดที่ดันขึ้นมา ผ่านไปยังคู่สายเสียง (vocal cords) ที่อยู่ภายในกล่องเสียง (larynx) ทำให้มีการสั่นสะเทือนที่บริเวณดังกล่าว เกิดเป็นเสียงที่ออกมาจากลำคอ แล้วใช้อวัยวะในช่องปากปรับให้กลายเป็นเสียงพูด ได้แก่เสียงพูดทั้งพยัญชนะและสระรวมทั้งเสียงร้องเพลง ส่วนเสียงที่ไม่ใช่เสียงพูดอาจยกตัวอย่างได้เช่น เสียงถอนหายใจ เสียงผิวปาก เป็นต้น (Kinsler, Frey, Coppens, and Sanders, 1982) และถ้าพิจารณาถึงรูปคลื่นที่เกิดขึ้นเมื่อแหล่งกำเนิดเสียงมีการสั่นสะเทือน แหล่งกำเนิดเสียงที่ให้รูปคลื่นที่มีความซับซ้อนมากและมีลักษณะไม่เป็นระเบียบ (random) เสียงที่เกิดขึ้นนี้จะถูกเรียกว่าเสียงรบกวน (noise) (Rumsey and McCormick, 1994) ซึ่งให้ความรู้สึกไม่น่าฟังและไม่มี ความหมาย เสียงดนตรีเป็นเสียงอีกชนิดหนึ่งที่มนุษย์ให้ความสนใจศึกษารายละเอียด

เสียงที่ถูกสร้างขึ้นโดยเครื่องดนตรีส่วนมากเกิดจากการสั่นเชิงกลของตัวสั่น (oscillator) ที่ได้รับการกระตุ้นในรูปแบบใดรูปแบบหนึ่ง เช่น คีล ดี ดี เป่า เป็นต้น ส่งผลให้ส่วนต่างๆของเครื่องดนตรีสั่น เสียงดนตรีจึงเกิดขึ้นจากการสั่นของส่วนประกอบทั้งหมดที่รวมกันเป็นเครื่องดนตรี สำหรับเครื่องดนตรีประเภทเครื่องเป่า เช่น ขลุ่ยทั้งของฝรั่งและของไทย การสั่นของลำอากาศในการเกิดเสียงเป็นการสั่นตามยาว กล่าวคือ เมื่อเป่าลมเข้าไปในช่องว่างที่อยู่ภายในกระบอก โมเลกุลของอากาศที่อยู่ภายในจะเคลื่อนที่กลับไปกลับมาตามความยาวของกระบอกเกิดเป็นเสียงขึ้น เสียงดังกล่าวหากเราวัดรูปคลื่นได้ พบว่ามีลักษณะของรูปคลื่นใกล้เคียงกับรูปคลื่นไซน์ และการเปลี่ยนระดับเสียงของเครื่องดนตรีชนิดนี้ยังสามารถทำได้โดย การเปลี่ยนแปลงความยาวของลำอากาศ (Cannon, 1967) ด้วยวิธีปิดเปิดนิ้วมือของผู้เล่นเครื่องดนตรีนั้น

เนื่องจากเสียงที่มนุษย์ได้ยินมาจากแหล่งกำเนิดเสียงที่มีหลายความถี่รวมกัน คุณภาพของเสียงจึงขึ้นอยู่กับความเข้มของความถี่เหล่านี้ ในทางฟิสิกส์คุณภาพของเสียงจะขึ้นอยู่กับสเปกตรัมที่เกิดขึ้น แต่สำหรับในทางดนตรีนั้น คุณภาพของเสียงจะเรียกว่าทิมเบรอะ (timbre) (Zitzewitz, Neff, and Davids, 1995) หรือน้ำเสียง (tone color) ซึ่งหมายถึงคุณลักษณะเฉพาะของเสียง ตัวอย่างเช่น นำเครื่องดนตรีชนิดต่างๆมาเล่นโน้ตตัวเดียวกันด้วยความดังเท่ากัน จะพบว่าเสียงที่ได้ยินจากเครื่องดนตรีแต่ละชนิดไม่เหมือนกันเป็นต้น (บริษัท ริดเดอร์ส ไคเจสท์ (ประเทศไทย) จำกัด, 2541)”

หูและการได้ยิน

“มนุษย์มีหูเป็นอวัยวะในการรับฟังเสียง เสียงที่มนุษย์สามารถได้ยินนั้น มีความถี่ในช่วงประมาณ 20 Hz ถึง 20,000 Hz หูประกอบด้วย 3 ส่วนคือ หูชั้นนอก (external ear) หูชั้นกลาง (middle ear) และ หูชั้นใน (inner ear) รูปที่ ก.3 แสดงส่วนประกอบของหู จะเห็นว่าหูชั้นนอกประกอบด้วยใบหูและช่องหู (หรือรูหู) เมื่อเสียงเดินทางจากแหล่งกำเนิดมาถึงหู ใบหูจะทำหน้าที่เป็นเหมือนกรวยนำเสียงส่งเข้าไปยังช่องหู ซึ่งมีลักษณะลาดขึ้นเล็กน้อย ที่ส่วนปลายของช่องหูนี้ จะติดกับเยื่อแก้วหู (tympanic membrane) หรือแก้วหู (eardrum) ที่กั้นแบ่งหูชั้นนอกและหูชั้นกลาง หูชั้นกลางมีลักษณะกลวงและมีขนาดเล็กมาก ภายในประกอบด้วยกระดูกสามชิ้นที่อยู่ติดกัน คือ กระดูกรูปค้อน (malleus หรือ hammer) กระดูกรูปทั่ง (incus หรือ anvil) และกระดูกรูปโกลน (stapes หรือ stirrup) เมื่อคลื่นเสียงตกกระทบแก้วหู จึงเกิดแรงดึงผิวขึ้นทำให้แก้วหูสั่นสะเทือน ส่งผลให้กระดูกทั้งสามชิ้นสั่นสะเทือนตามไปด้วย ซึ่งเป็นการส่งผ่านพลังงานต่อกันไปยังหูชั้นใน และขณะที่เกิดการสั่นของกระดูกทั้งสามชิ้น ความดันอากาศภายในหูจะเพิ่มมากขึ้น จึงต้องอาศัยท่อยูสเตเชียน (Eustachian tube) ปรับให้ความดันอากาศเท่ากับภายนอกหู ท่อยูสเตเชียนนี้เชื่อมต่อยู่ระหว่างหูกับคอส่วนบน ถัดจากหูชั้นกลางเข้าไปเป็นหูชั้นในซึ่งมีทั้งอวัยวะรับเสียงและอวัยวะที่



รูปที่ ก.3 ส่วนประกอบของหู⁺

เกี่ยวกับการทรงตัว คอเคลีย (cochlea) เป็นอวัยวะรับเสียงที่มีขนาดเล็กมาก มีรูปร่างเหมือนหอยโข่งประกอบด้วยเซลล์รับความรู้สึก (sensory cell) จำนวนมากทำหน้าที่เปลี่ยนคลื่นเสียงเป็นกระแสประสาท โดยคลื่นเสียงความถี่ต่ำ จะกระตุ้นเซลล์ที่อยู่ด้านในสุดของคอเคลีย และคลื่นเสียงความถี่สูงจะกระตุ้นเซลล์ที่อยู่ทางด้านนอก เมื่อได้รับการกระตุ้น เซลล์รับความรู้สึกนี้จะเปลี่ยนพลังงานให้เป็นกระแสประสาท แล้วส่งผ่านโสตประสาทไปยังสมอง สมองจะทำหน้าที่แปลความหมายของเสียงที่ได้ยินว่าเป็นเสียงอะไร (บริษัท ริดเดอร์ส ไคเจสท์ (ประเทศไทย) จำกัด, 2541)

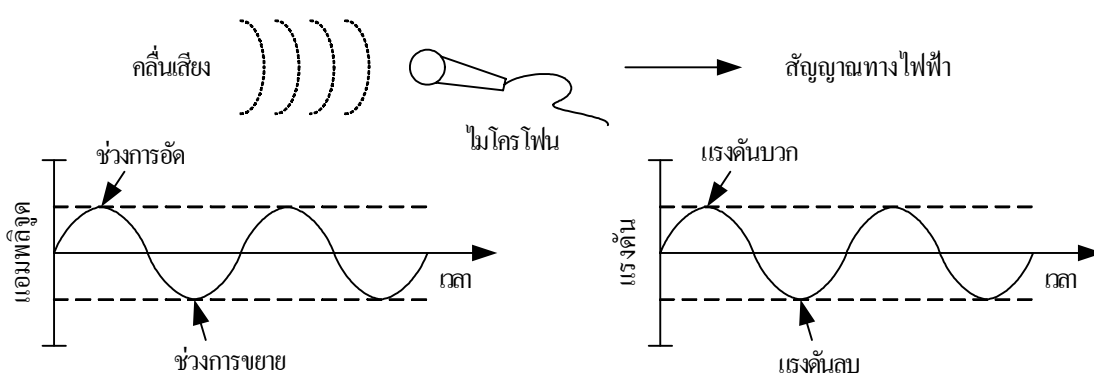
เมื่อพิจารณาส่วนประกอบและหน้าที่ของหู ตามที่ได้อธิบายไปแล้วนั้น สามารถเปรียบเทียบได้ว่า หูชั้นนอกทำหน้าที่เสมือนอุปกรณ์รวบรวมสัญญาณ ส่งต่อไปยังหูชั้นกลางซึ่งทำหน้าที่ขยายสัญญาณแล้วส่งต่อไปยังหูชั้นใน ซึ่งทำหน้าที่เสมือนเป็นตัววิเคราะห์สเปกตรัม (spectrum analyzer) จากนั้นส่งข้อมูลไปยังสมองเพื่อประมวลผล ดังนั้นมนุษย์จึงได้ยินและรับรู้ลักษณะของเสียงด้วยความถี่หรือความสูงของเสียงหรือพิทช์ (pitch) และความดัง (loudness) แทนที่จะเป็นความถี่

⁺ หมายเหตุ จาก ตำราโสต นาสิก ลาริงซ์วิทยา (หน้า 2), โดย ชัย อยู่สวัสดิ์, 2540, กรุงเทพมหานคร : โสตสิก พับลิชชิ่ง.

และแอมพลิจูดของคลื่นเสียง ซึ่งระดับเสียงที่ต่ำหมายถึงคลื่นเสียงที่มีความถี่ต่ำ และระดับเสียงแหลมสูงหมายถึงคลื่นเสียงที่มีความถี่สูง ส่วนความดังนั้นจะขึ้นอยู่กับแอมพลิจูดของคลื่นเสียง”

ไมโครโฟน

“เมื่อต้องการนำเสียงที่ได้ยินมาทำการวิเคราะห์หรือขยายความดัง อุปกรณ์สำคัญซึ่งทำหน้าที่ในการรับพลังงานเสียง และแปลงเสียงให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าคือไมโครโฟน แอมพลิจูดของสัญญาณทางไฟฟ้าที่ได้จากไมโครโฟนเป็นสัดส่วนกับแอมพลิจูดของคลื่นเสียงที่ผ่านเข้ามา และยังขึ้นอยู่กับความสามารถของไมโครโฟนอีกด้วย ในกรณีที่ไมโครโฟนสามารถแปลงคลื่นเสียง ให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าได้ทั้งหมด แอมพลิจูดของสัญญาณทางไฟฟ้าจะมีความสูงเท่ากับแอมพลิจูดของคลื่นเสียง รูปที่ ก.4 แสดงตัวอย่างการแปลงสัญญาณของไมโครโฟนในกรณีนี้ ซึ่งจะเห็นว่า



รูปที่ ก.4 การแปลงคลื่นเสียงให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าของไมโครโฟน

แอมพลิจูดของคลื่นเสียงได้รับการแปลงไปเป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้า กล่าวคือในช่วงการอัดของโมเลกุลของอากาศ ซึ่งมีแอมพลิจูดสูงสุดนั้น จะเกิดแรงดันบวกของสัญญาณทางไฟฟ้าขึ้น และในช่วงการขยายของโมเลกุลของอากาศ ซึ่งมีแอมพลิจูดต่ำสุด จะเกิดแรงดันลบของสัญญาณทางไฟฟ้า (Rumsey and McCormick, 1994)

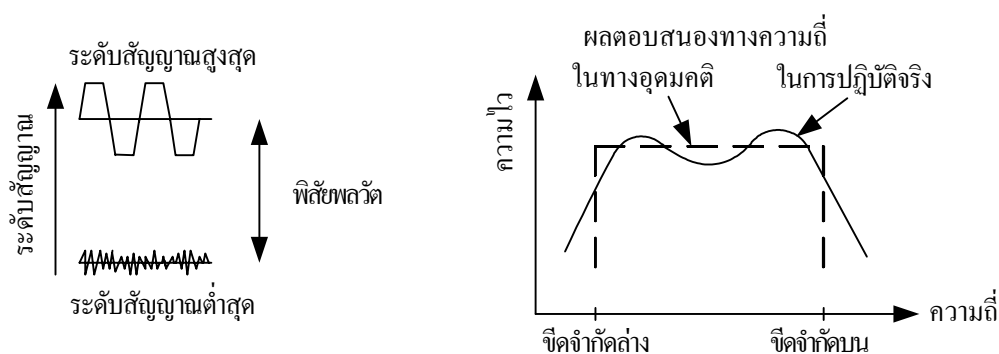
ความสามารถของไมโครโฟน

ความสามารถของไมโครโฟนอาจพิจารณาได้จากลักษณะสมบัติที่สำคัญดังต่อไปนี้

- ความไว (sensitivity) คือ ค่าอัตราส่วนของแรงดันเอาต์พุตที่เกิดจากไมโครโฟน เทียบกับความดันเสียงที่เข้ามา มีหน่วยเป็นโวลต์ ต่อ ปาสคาล (V/Pa) และอาจแสดงในหน่วยเดซิเบล (dB) ก็ได้ ซึ่งไมโครโฟนที่ดีควรมีค่าความไวสูง
- พิสัยพลวัต (dynamic range) คือ พิสัยการวัดของไมโครโฟนซึ่งถูกจำกัดการวัด

ที่ระดับต่ำสุด ด้วยสัญญาณรบกวนทางอิเล็กทรอนิกส์ (electronic noise) ของไมโครโฟน (สัญญาณรบกวนทางอิเล็กทรอนิกส์ คือ เอาต์พุตที่เกิดขึ้นแม้ไม่มีเสียงเข้ามาที่ไมโครโฟนเลย) และถูกจำกัดการวัดที่ระดับสูงสุดด้วยความไม่เป็นเชิงเส้นของไมโครโฟน และการเพี้ยนของรูปคลื่น (Smith and Peters, 1996) พิสัยพลวัตอาจแสดงได้ดังรูปที่ ก.5

- ผลตอบสนองทางความถี่ (frequency response) ของไมโครโฟน คือค่าความไวเทียบกับความถี่ ในทางอุดมคติ ไมโครโฟนควรมีค่าความไวเท่ากันตลอดทุกความถี่ หรือมีผลตอบสนองทางความถี่แบบราบ (flat) แต่ในทางปฏิบัติจริงนั้น ผลตอบสนองทางความถี่ จะเป็นแบบราบหรือค่อนข้างราบ ในช่วงระหว่างขีดจำกัดความถี่บนและล่าง และผลตอบสนองจะลดลงอย่างรวดเร็วที่ขีดจำกัดความถี่บนและล่าง (Smith and Peters, 1996) ดังที่แสดงในรูปที่ ก.5



รูปที่ ก.5 พิสัยพลวัตและผลตอบสนองทางความถี่ของไมโครโฟน

ชนิดของไมโครโฟน

ไมโครโฟนสามารถแบ่งได้ตามชนิดของวัสดุที่ใช้ ดังนี้

- ไมโครโฟนที่ค่าความจุแปรผันได้ (variable-capacitance microphone) ประกอบด้วยแผ่นโลหะขนาดเล็ก 2 แผ่น วางขนานกัน แผ่นหนึ่งสามารถเคลื่อนที่ตามการเปลี่ยนแปลงของความดันเสียง ส่วนอีกแผ่นหนึ่งอยู่กับที่ การเปลี่ยนแปลงของค่าความจุที่เกิดจากความดันเสียง จะถูกแปลงไปเป็นค่าแรงดันที่เปลี่ยนแปลงระหว่างแผ่นโลหะทั้งสอง (Smith and Peters, 1996) เรียกไมโครโฟนชนิดนี้ว่า คอนเดนเซอร์ไมโครโฟน (condenser microphone) หรือในบางครั้งอาจเรียกว่า อิเล็กโตรสแตติกไมโครโฟน (electrostatic

microphone) (Noll, 1995) คอนเดนเซอร์ไมโครโฟนสามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าตามสัญญาณเสียงที่ผ่านเข้ามาได้แม่นยำมาก แต่มีข้อเสียคือต้องการแหล่งจ่ายไฟแรงดันสูงจากภายนอกเพื่อรักษาให้ค่าประจุไฟฟ้าระหว่างแผ่นโลหะทั้งสองคงที่ (Noll, 1995) และไม่สามารถทนต่อสภาพอากาศชื้นได้ดีนัก (Smith and Peters, 1996)

- อิเล็กโทรดไมโครโฟน (electret microphone) ได้รับการพัฒนาขึ้นจากคอนเดนเซอร์ไมโครโฟน โดยใช้แผ่นพอลิเมอร์บางๆเคลือบบนพื้นผิวด้านหนึ่งของแผ่นโลหะ พอลิเมอร์จะทำให้ประจุไฟฟ้ายังคงอยู่บนแผ่นโลหะทั้งสอง จึงไม่ต้องการแหล่งจ่ายไฟแรงดันสูงเหมือนคอนเดนเซอร์ไมโครโฟน และยังทนทานต่อสภาพอากาศชื้นได้ดี จากคุณสมบัติดังกล่าวทำให้อิเล็กโทรดไมโครโฟนเป็นที่นิยมใช้กันมากในการวัดและบันทึกเสียง (Smith and Peters, 1996)
- พิโซอิเล็กทริกไมโครโฟน (piezoelectric microphone) ประกอบด้วยวัสดุพิโซอิเล็กทริก ได้แก่ ผลึก (crystal) และเซรามิก (ceramic) ต่ออยู่กับแผ่นโลหะบางๆ เมื่อความดันเสียงกระทบกับแผ่นโลหะ วัสดุพิโซอิเล็กทริกจะเกิดความเค้น (stress) ขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่ของแผ่นโลหะซึ่งความเค้นนี้จะเปลี่ยนเป็นแรงดันไฟฟ้า เรียกไมโครโฟนชนิดนี้ว่า คริสตัลไมโครโฟน (crystal microphone) หรือเซรามิกไมโครโฟน (ceramic microphone) ตามวัสดุที่ใช้ (Noll, 1995) พิโซอิเล็กทริกไมโครโฟนมีราคาถูกกว่าทั้งคอนเดนเซอร์ไมโครโฟนและอิเล็กโทรดไมโครโฟน แต่มีข้อด้อยตรงที่วัสดุพิโซอิเล็กทริกจะเปลี่ยนไปตามอายุการใช้งาน และพิโซอิเล็กทริกไมโครโฟนยังมีผลตอบสนองทางความถี่ไม่ค่อยดีนัก (Smith and Peters, 1996)

ฉะนั้นการเลือกไมโครโฟนเพื่อนำไปใช้ให้เหมาะกับการวัดต่างๆ ควรพิจารณาก่อนว่าสัญญาณที่จะทำการวัดมีความถี่อยู่ในช่วงใด จากนั้นจึงเลือกไมโครโฟนที่มีผลตอบสนองทางความถี่ใกล้เคียงกับช่วงดังกล่าว และหากสามารถทำได้ ควรทำการเปรียบเทียบไมโครโฟน ในงานวิจัยนี้ใช้ไมโครโฟนแบบอิเล็กโทรด ซึ่งมีค่าความไว -52 dB และมีผลตอบสนองทางความถี่ในช่วง 50 Hz ถึง $18,000$ Hz เพราะเนื่องจากสัญญาณเสียงดนตรีที่จะทำการวัด มีความถี่อยู่ในช่วงประมาณ 200 Hz ถึง $2,000$ Hz และมีลักษณะสมบัติใกล้เคียงกับไมโครโฟนที่สืบค้นได้ว่า เหมาะสำหรับใช้วัดเสียงดนตรีประเภทเครื่องลมไม้ (woodwind instrument) ซึ่งมี ค่าความไว -62 dB และมีผลตอบสนองทางความถี่ในช่วง 40 Hz ถึง $16,000$ Hz (RS Components Ltd., www, 2001) แต่ที่ไม่สามารถใช้ไมโครโฟนชนิดนี้ได้ เนื่องจากมีราคาสูงมาก” (สรวุฒิ สุจิตจร, 2545)

ภาคผนวก ข

ระบบเสียงดนตรีไทย

ระบบเสียงดนตรีไทย*

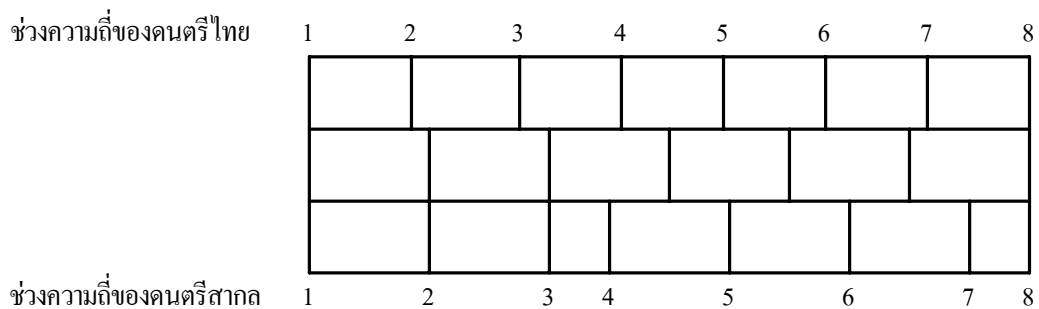
กล่าวนำ

“ดนตรีไทยมีประวัติความเป็นมายาวนาน เป็นศิลปวัฒนธรรมประจำชาติ ที่มีเอกลักษณ์เฉพาะไม่เหมือนชนชาติใด ดนตรีไทยจึงมีความแตกต่างจากดนตรีสากลหลายประการ ไม่ว่าจะเป็นเรื่องเสียง รูปทรงเครื่องดนตรี เทคโนโลยีของการสร้างเครื่องดนตรี เทคนิคการประพันธ์เพลงและอื่นๆ บทนี้บรรยายทบทวนแต่เพียงเรื่องความถี่ของเสียงที่ต่างกัน พร้อมทั้งแสดงค่าความถี่ของเสียงเปียโนที่ได้จากการวัด เทียบกับความถี่ของเสียงดนตรีไทยที่ได้จากการคำนวณ และอธิบายคำว่าทาง ที่หมายถึงระดับเสียงของดนตรีไทย อย่างไรก็ตาม คงต้องย้ำอีกครั้งว่า ความถี่ของเสียงดนตรีไทยที่นำมาตีแผ่ในบทนี้ เป็นสิ่งที่บูรพาจารย์ทางดนตรีไทยได้เคยคำนวณไว้แต่อดีต หรืออาจกล่าวได้ว่า ข้อมูลที่นำเสนอมาจากการคาดการณ์ในเชิงทฤษฎี”

เสียงดนตรีไทยเทียบกับเสียงสากล

“ดนตรีไทยและดนตรีสากลนั้น แต่ละเสียงมีความถี่ไม่เท่ากัน เนื่องจากดนตรีไทยแบ่ง 1 ทบเสียง (octave) ออกเป็น 7 เสียง ที่มีความถี่ห่างเท่าๆกัน (ในความหมายว่า เสียงดนตรีไทยเป็นเสียงเต็ม (whole tone)) ส่วนดนตรีสากลแบ่ง 1 ทบเสียงออกเป็น 7 เสียงเหมือนกัน แต่มีความถี่ห่างไม่เท่ากันทั้งหมด กล่าวคือ จะมีเสียงเต็มอยู่ 5 เสียง และมีครึ่งเสียง (semi tone) อยู่ 2 เสียง ที่เป็นเช่นนี้เพราะดนตรีสากลสามารถแบ่ง 1 ทบเสียงออกเป็น 6 เสียงเต็มที่มีความถี่ห่างเท่าๆกัน และยังแบ่งครึ่ง 1 เสียงเต็มออกเป็น 2 ครึ่งเสียง ดังนั้นใน 1 ทบเสียงจึงแบ่งได้อีกเป็น 12 ครึ่งเสียง รูปที่ ข.1 แสดงการแบ่งช่วงความถี่ใน 1 ทบเสียง (สันทัด ดันชนันท์, 2542) จากภาพจะเห็นได้ว่าใน 1 ทบเสียง ถ้าตั้งให้เสียงที่ 1 ของดนตรีไทย ตรงกับดนตรีสากลแล้ว เสียงที่ 2, 3, 4, 5, 6 และ 7 จะไม่ตรงกันเลย ยกเว้นเสียงที่ 8 ซึ่งซ้ำกับเสียงที่ 1 และยังพบว่าเสียงที่ 2, 3, 5, 6 และ 7 ของสากล มีความถี่สูงกว่าของไทย แต่เสียงที่ 4 ของสากล มีความถี่ต่ำกว่าเสียงที่ 4 ของไทยนอกจากนี้เมื่อพิจารณาช่วงความถี่ของดนตรีสากล จะสังเกตได้ว่ามีครึ่งเสียงอยู่ระหว่างเสียงที่ 3 กับเสียงที่ 4 และระหว่างเสียงที่ 7 กับเสียงที่ 8 (ในการกล่าวถึงเสียงที่ 1 ถึง 8 ต่อไปจากนี้ จะใช้เสียงเรียกเป็น โด, เร, มี, ฟา,

* ข้อความต่างๆที่เป็นเนื้อหาของภาคผนวก ข นี้ ได้คัดลอกมาจาก “สรวุฒิ สุจิตจร, การวิเคราะห์เสียงดนตรีไทย, 2545. ”



รูปที่ ข.1 การแบ่งช่วงความถี่ใน 1 ทบเสียงของดนตรีไทยเทียบกับดนตรีสากล

ตารางที่ ข.1 ความถี่ของเสียงเปียโน (บางส่วน)

ระดับเสียง	ความถี่ (Hz)
โด	130.81
เร	146.83
มิ	164.81
ฟา	174.61
ซอล	196.00
ลา	220.00
ที	246.94
โด	261.63
เร	293.66
มิ	329.63
ฟา	349.23
ซอล	392.00
ลา	440.00
ที	493.88
โด	523.25
เร	587.33
มิ	659.26
ฟา	698.46

ระดับเสียง	ความถี่ (Hz)
ซอล	783.99
ลา	880.00
ที	987.77
โด	1,046.5
เร	1,174.7
มิ	1,318.5
ฟา	1,396.9
ซอล	1,568.0
ลา	1,760.0
ที	1,975.5
โด	2,093.0
เร	2,349.3
มิ	2,637.0
ฟา	2,793.0
ซอล	3,136.0
ลา	3,520.0
ที	3,951.1
โด	4,186.0

หมายเหตุ จาก Audio in Media (หน้าปกใน), โดย Alten, 1999, USA: Wadsworth.

ซอล, ลา, ที และ โด' แทนตามลำดับ) จากตารางที่ ข.1 ที่แสดงความถี่ของเสียงเปียโนในช่วงความถี่ 261.63 Hz ถึง 2,093.0 Hz จะตรงกับช่วงความถี่ของขลุ่ยฝรั่ง (flute) พอดี ซึ่งจะนำไปเทียบกับผลจากการวิเคราะห์ความถี่ของเสียงขลุ่ยเพียงออกไป

พิจารณาความถี่ของเสียงเปียโนใน 1 ทบเสียง จากตารางที่ ข.1 คือช่วงความถี่ตั้งแต่ 261.63 Hz ถึง 523.25 Hz นำความถี่เหล่านี้ มาคำนวณหาอัตราส่วนระหว่างตัวโน้ตที่ติดกัน แสดงการคำนวณและค่าของอัตราส่วนดังรูปที่ ข.2 เมื่อสังเกตอัตราส่วนในรูปที่ ข.2 พบว่า ระหว่าง เรกับโด,

โด 261.63	→	$\frac{293.66}{261.63} = 1.12$	→	เร : โด = 1.12 มี : เร = 1.12 ฟา : มี = 1.06 ซอล : ฟา = 1.12 ลา : ซอล = 1.12 ที : ลา = 1.12 โด' : ที = 1.06
เร 293.66		$\frac{329.63}{293.66} = 1.12$		
มี 329.63		$\frac{349.23}{329.63} = 1.06$		
ฟา 349.23		$\frac{392.00}{349.23} = 1.12$		
ซอล 392.00		$\frac{440.00}{392.00} = 1.12$		
ลา 440.00		$\frac{493.88}{392.00} = 1.12$		
ที 493.88		$\frac{440.00}{493.88} = 1.12$		
โด' 523.25		$\frac{523.25}{493.88} = 1.06$		
		$\frac{493.88}{493.88} = 1.06$		

รูปที่ ข.2 การคำนวณหาอัตราส่วนระหว่างตัวโน้ตที่ติดกันของเสียงเปียโน

มีกับเร, ซอลกับฟา, ลากับซอล และ ทีกับลา มีค่าเท่ากัน คือ 1.12 และอัตราส่วนระหว่าง ฟากับมี และ โด'กับที มีค่าเท่ากันคือ 1.06 ซึ่งเป็นไปตามที่กล่าวข้างต้น จึงสรุปได้ว่าค่าอัตราส่วน 1.12 หมายถึงเสียงเต็มและค่าอัตราส่วน 1.06 หมายถึงครึ่งเสียง แต่สำหรับดนตรีไทยนั้น มีความถี่ห่างเท่าๆกัน ใน 1 ทบเสียง อัตราส่วนระหว่างโน้ตที่ติดกันมีค่าเท่ากันทั้งหมด โดย อุทิศ นาคสวัสดิ์ (2514) ได้กล่าวว่าค่าอัตราส่วนนี้เท่ากับ 1.09745 และทำการคำนวณค่าความถี่ของเสียงดนตรีไทยไว้ ซึ่งอาศัยความถี่ของเสียงเปียโนเป็นหลัก ตารางที่ ข.2 แสดงความถี่ของเสียงดนตรีไทยในเชิงทฤษฎีตามที่กล่าวถึงนี้

พิจารณาความถี่ของเสียงดนตรีไทยใน 1 ทบเสียง โดยใช้ข้อมูลจากตารางที่ ข.2 ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 262 Hz ถึง 524 Hz นำความถี่เหล่านี้ มาคำนวณหาอัตราส่วนระหว่างตัวโน้ตที่ติดกัน แสดงการคำนวณและค่าของอัตราส่วน ดังรูปที่ ข.3 ซึ่งอาจสังเกตได้ว่า ค่าอัตราส่วนระหว่างตัวโน้ตที่ติดกันของเสียงดนตรีไทยไม่เท่ากันทั้งหมด และไม่เท่ากับ 1.09745 ดังนั้น จึงไม่อาจสรุปได้

ตารางที่ ข.2 ความถี่ของเสียงดนตรีไทยเทียบกับเสียงเปียโน (บางส่วน)

ระดับเสียง	ความถี่ (Hz) เสียงเปียโน	ความถี่ (Hz) เสียงดนตรีไทย	ระดับเสียง	ความถี่ (Hz) เสียงเปียโน	ความถี่ (Hz) เสียงดนตรีไทย
โด	65	65	เร	587	579
เร	73	72	มี	659	639
มี	82	80	ฟา	698	705
ฟา	87	88	ซอล	784	779
ซอล	98	97	ลา	880	860
ลา	110	107	ที	988	949
ที	123	119	โด	1,048	1,048
โด	131	131	เร	1,175	1,157
เร	147	145	มี	1,319	1,278
มี	165	160	ฟา	1,397	1,411
ฟา	175	176	ซอล	1,568	1,558
ซอล	196	195	ลา	1,760	1,720
ลา	220	215	ที	1,976	1,899
ที	247	237	โด	2,097	2,097
โด	262	262	เร	2,349	2,315
เร	294	289	มี	2,637	2,556
มี	330	319	ฟา	2,794	2,822
ฟา	349	353	ซอล	3,136	3,116
ซอล	392	389	ลา	3,510	3,440
ลา	440	430	ที	3,951	3,798
ที	494	475	โด	4,194	4,194
โด	524	524			

หมายเหตุ จาก ทฤษฎีและการปฏิบัติดนตรีไทย (หน้า 10-11), โดย อุทิศ นาคสวัสดิ์, 2514, กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์คุรุสภา.

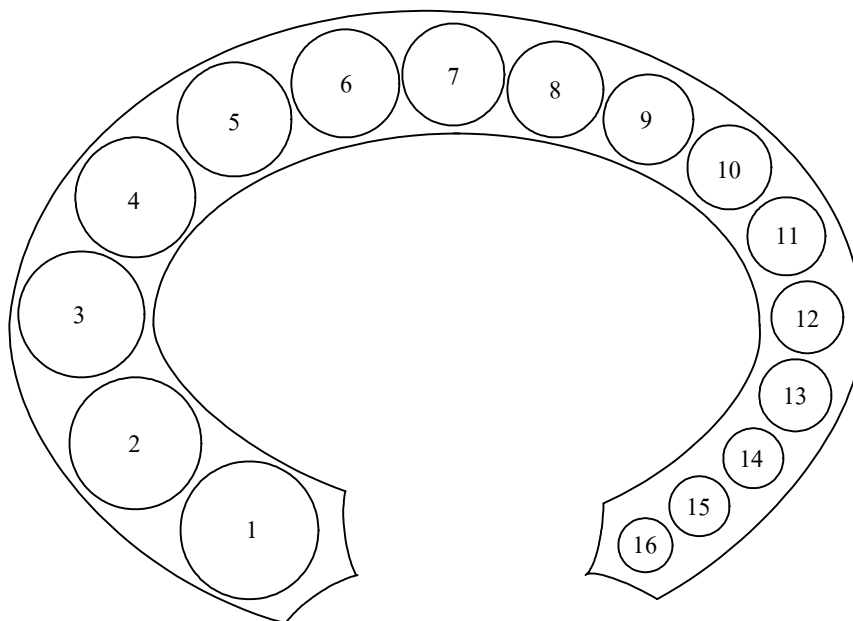
โต	262	→	$\frac{289}{262} = 1.103$	→	เร : โต = 1.103
เร	289		$\frac{319}{289} = 1.104$		มี : เร = 1.104
มี	319		$\frac{353}{319} = 1.107$		ฟา : มี = 1.107
ฟา	353		$\frac{389}{319} = 1.102$		ซอล : ฟา = 1.102
ซอล	389		$\frac{430}{353} = 1.105$		ลา : ซอล = 1.105
ลา	430		$\frac{389}{389} = 1.105$		ที : ลา = 1.105
ที	475		$\frac{475}{430} = 1.105$		โด' : ที = 1.103
โด'	524		$\frac{430}{524} = 1.103$		
			$\frac{524}{475} = 1.103$		

รูปที่ ข.3 การคำนวณหาอัตราส่วนระหว่างตัวโน้ตที่ติดกันของเสียงดนตรีไทย

ว่าค่าความถี่ของเสียงดนตรีไทยเป็นดังตารางที่ ข.2 นอกจากนั้นในเอกสารที่อ้างถึง ก็มีได้แสดงที่มาของข้อมูลตัวเลขของความถี่เสียงดนตรีไทยที่น่าเสนอไว้แต่อย่างใด คงไว้แต่ความสงสัยใคร่รู้ของใคร่รู้ต่อมา”

ระดับเสียงของดนตรีไทย

“ในปัจจุบันการผสมวงของไทยมีอยู่ 3 ประเภทหลักๆ ได้แก่ ปี่พาทย์ เครื่องสาย และ มโหรี การเทียบเสียงของเครื่องดนตรีที่จะผสมเป็นวงเดียวกัน จะยึดเสียงของเครื่องดนตรีในวงที่เลื่อนลงเสียงไม่ได้ เป็นหลักสำหรับเทียบเสียง ในวงปี่พาทย์ ปี่ในกับปี่นอกเป็นเครื่องดนตรีที่มีเสียงตายตัว จึงต้องสร้างให้เสียงเข้ากัน แล้วยึดเสียงปี่ในเป็นหลักเทียบเสียงเครื่องดนตรีอื่นๆ ในวงเครื่องสาย ขลุ่ยเพียงออกับขลุ่ยหลีบเป็นเครื่องดนตรีที่เลื่อนลงเสียงไม่ได้ จึงต้องสร้างให้เสียงเข้ากัน แล้วยึดเสียงขลุ่ยเพียงออเป็นหลัก ในวงมโหรี ใช้ขลุ่ยเทียบเสียงเหมือนกับวงเครื่องสาย (มนตรี ตราโมท, 2540) ดังนั้นการเทียบเสียงจึงเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อให้ในวงบรรเลงที่ระดับเสียงเดียวกัน เพลงจึงจะฟังไพเราะ เนื่องจากเครื่องดนตรีที่เลื่อนลงเสียงไม่ได้เหล่านี้ มีข้อจำกัดในการเล่น จึงได้มีการกำหนดระดับเสียง เพื่อใช้กับเครื่องเป่าต่างๆนี้ โดยจะระบุระดับเสียงด้วยชื่อของ “ทาง” ซึ่งมีอยู่ 7 ทาง แต่ละทางมีเสียงหลักที่แน่นอน และกำหนดด้วยตำแหน่งของลูกฆ้องของฆ้องวงใหญ่ ดังรูปที่ ข.4 ซึ่งเสียงโดถูกกำหนดให้เป็นเสียงหลักของทาง มีการเปลี่ยนตำแหน่งสูงขึ้นทีละหนึ่งเสียง ไปจนครบ 7 ทาง



รูปที่ ข.4 ตำแหน่งของลูกฆ้องของฆ้องวงใหญ่

ทางที่ 1 ทางในลด หรือทางเพียงออล่าง เสียงโคอยู่ที่ฆ้องลูกที่ 3 และ 10 ซึ่งฆ้องลูกที่ 10 นี้มีชื่อว่าลูกเพียงออ จึงเรียกว่าทางเพียงออ

ทางที่ 2 ทางใน เรียกตามชื่อ ปี่ใน ที่ใช้ประกอบในเสียงนี้ เสียงโคอยู่ที่ฆ้องลูกที่ 4 และ 11

ทางที่ 3 ทางกลาง เรียกตามชื่อปี่กลาง ที่ใช้ประกอบในเสียงนี้ เสียงโคอยู่ที่ฆ้องลูกที่ 5 และ 12

ทางที่ 4 ทางนอกต่ำ หรือทางเพียงอบบน หรือทางมโหรี เรียกตามชื่อ ขลุ่ยเพียงออ หรือ ปี่นอกต่ำ ที่ใช้ประกอบในเสียงนี้ ซึ่งทางนี้เป็นทางของมโหรีและเครื่องสาย เสียงโคอยู่ที่ฆ้องลูกที่ 6 และ 13

ทางที่ 5 ทางนอก หรือทางกรวด หรือทางเสภา หรือทางไม้แจ้จ้ง เรียกตามชื่อ ปี่นอก หรือ ขลุ่ยกรวด ที่ใช้ประกอบในเสียงนี้ และทางนี้ยังใช้บรรเลงประกอบกับเสภา เสียงโคอยู่ที่ฆ้องลูกที่ 7 และ 14

ทางที่ 6 ทางแหบหรือทางกลางแหบ เรียกตามการเป่าของ ปี่กลาง ที่ต้องเป่าเป็นทางแหบ เสียงโคอยู่ที่ฆ้องลูกที่ 1, 8 และ 15

ทางที่ 7 ทางขวา เรียกตามชื่อ ปี่ขวา ที่ใช้ประกอบในเสียงนี้ และทางนี้ยังใช้ประกอบการบรรเลงที่ผสมปี่ขวา เสียงโคอยู่ที่ฆ้องลูกที่ 2, 9 และ 16” (สราวุฒิ สุจิตจร, 2545)

ภาคผนวก ค

โปรแกรมการคำนวณ MD

โปรแกรมการคำนวณ MD

1 โปรแกรมหลัก

```
% Modal Distribution for Musical Signal.
% by Rudeerat Chinvejitvanich, School of Electrical Engineering,
% Suranaree University of Technology.
% 3 พฤษภาคม 2547
clear all; clc;
% read signal s                                % อ่านข้อมูลสัญญาณเสียง
pt = fopen('v1ff.dat','rb');                    % พอยเตอร์ pt ที่ไปที่ไฟล์ข้อมูลและระบุเป็นการ
                                                % เปิดอ่าน
s = fread(pt,[1,2500],'float32');              % เก็บข้อมูลใน s จำนวน 2,500 จุด ระบุชนิดข้อมูล
fclose(pt);                                     % ปิดพอยเตอร์ pt
% parameters                                    % กำหนดค่าพารามิเตอร์ในการคำนวณ
fs = 250000;                                   % อัตราการซีกตัวอย่างของสัญญาณ s(n)
ls = length(s);                               % จำนวนข้อมูลของ s(n)
dwmin = 183.11;                               % ค่า  $\Delta\omega_{\min}$  ในหน่วย Hz
N = floor(fs/dwmin);                          % คำนวณค่า N ตามสมการ (3.18) ซึ่งเป็นความยาว
                                                % ครึ่งหนึ่งของ  $h_t(n)$ 
L = 8192;                                     % จำนวนจุดครึ่งหนึ่งในการคำนวณ DFT
R = L/2;                                       % ความยาวครึ่งหนึ่งของ  $h_{\omega}(r)$ 
n_step_size = 625;                            % ระยะห่างแต่ละขั้นของ n ในการคำนวณ  $R_{s,t}$ 
                                                % ตามสมการ (3.14)
% time filtering fuction hlp(n)
for n = -N : N
    a = n+N+1; b = n*2*pi/(2*N+1);
    h_t(a) = (1/(0.54*2*N)) * (0.54+(0.46*cos(b)));
                                                % คำนวณ  $h_t(n)$  ตามสมการ (3.16)
end
```

```

clear a b % ลบค่า a และ b
H_t = fft(h_t,4*N); % ทำอัตสหสัมพันธ์ (autocorrelation)
H1 = H_t.*conj(H_t); % ทำอัตสหสัมพันธ์ (autocorrelation)
H2 = H1/H1(1); % ทำให้เป็นบรรทัดฐาน (normalization)
h = ifft(H2,4*N); % DFT ผกผัน
hlp = abs(h); % ได้เป็น  $h_{LP}(n)$ 
% frequency smoothing function glp(n)
for r = -R : R
    a = r+R+1; b = r*2*pi/(2*R+1);
    h_w(a) = (1/(0.54*2*R)) * (0.54+(0.46*cos(b)));
    % คำนวณ  $h_w(r)$  ตามสมการ (3.17)
end
clear a b % ลบค่า a และ b
H_w = fft(h_w,2*L); % ทำอัตสหสัมพันธ์ (autocorrelation)
G1 = H_w.*conj(H_w); % ทำอัตสหสัมพันธ์ (autocorrelation)
G2 = G1/G1(1); % ทำให้เป็นบรรทัดฐาน (normalization)
g = ifft(G2,2*L); % DFT ผกผัน
glp = abs(g); % ได้เป็น  $g_{LP}(n)$ 
% start to compute MD
Ms = zeros((ls/n_step_size),(2*L)); % สร้างเมตริกซ์ศูนย์ เพื่อเก็บค่า  $M_s$ 
for n = n_step_size : n_step_size : ls % เริ่มต้นวงรอบการคำนวณ  $M_s$ 
    Rst = zeros(1,L+1); % สร้างเมตริกซ์ศูนย์ เพื่อเก็บค่า  $R_{s,t}$ 
    for l = 0 : (ls/2)-1 %  $l$  ที่อยู่นอกขอบเขตนี้จะทำให้  $R_s$  เป็นค่าศูนย์
        Rs = zeros(ls,1); % สร้างเมตริกซ์ศูนย์ เพื่อเก็บค่า  $R_s$ 
        Rs = com_Rs(s,ls,l); % เรียกใช้ฟังก์ชัน com_Rs คำนวณ  $R_s$  1 หลัก
        Rst(1, l+1) = com_Rst(Rs,N,ls,n,hlp);
        % เรียกใช้ฟังก์ชัน com_Rst คำนวณ  $R_{s,t}$  1
        จำนวน
    end
    % แสดงค่า  $l$ 
end % สิ้นสุดวงรอบการคำนวณ  $R_{s,t}$  1 แถว

```

```

Ms((n/n_step_size),:) = com_Ms(Rst,L,glp);
% เรียกใช้ฟังก์ชัน com_Ms จำนวน  $M_s$  1 แถว
end % สิ้นสุดวงรอบการคำนวณ  $M_s$ 
% write Ms % เก็บข้อมูล
pt = fopen('mdv1.dat','wb'); % พอยเตอร์ pt ที่ไปที่ไฟล์ข้อมูลและระบุเป็นการ
% เขียน
fwrite(pt,Ms,'float32'); % เขียน  $M_s$  ไปเก็บที่ pt ที่ระบุระบุชนิดข้อมูล
fclose(pt); % ปิดพอยเตอร์ pt

```

2 โปรแกรมย่อย

```

% com_Rs % ฟังก์ชัน com_Rs
function [result] = com_Rs(s,ls, l) % รับค่า s ls และ l มาและ ส่งค่า result กลับ
result = zeros(ls,1); % สร้างเมตริกซ์ศูนย์เพื่อเก็บค่า result
s = s'; % ทำการสลับเปลี่ยนแถวและหลัก
if l == 0 % กรณี  $l = 0$ 
    result = s.*conj(s); % คูณแบบจุดต่อจุด
else % กรณี  $l > 0$ 
    s_1 = [s(l+1:ls);zeros(l,1)]; % จำนวน  $R_s$  ตามสมการ (3.13)
    s_2 = [zeros(l,1);s(1:ls-l)];
    result = s_1.*conj(s_2); % คูณแบบจุดต่อจุด
end

% com_Rst % ฟังก์ชัน com_Rst
function [result] = com_Rst(Rs,N,ls,n,hlp) % รับค่า Rs N ls n และ hlp มาและส่งค่า result
% กลับ
P = 2*N; result = 0; % กำหนดค่า P และ result
Rs_new = zeros(1,(2*P)+1);
hlp_new = zeros(1,(2*P)+1);
R = zeros(1,(2*P)+1); % สร้างเมตริกซ์ศูนย์เพื่อเก็บค่า

```

```

% negative part
c = 1; a = 0; b = 0;
for p = -P : -1                                % วงรอบด้านลบ
    a = n-p; b = 2*P+p+1;                       % คำนวณตามสมการ (3.14)
    if a <= ls
        Rs_new(1,c) = Rs(a);
    end
    hlp_new(1,c) = hlp(b);                       % จัดเรียง Rs_new และ hlp_new ในส่วนด้านลบ
    c = c+1;
end                                              % สิ้นสุดวงรอบด้านลบ
% positive part
a = 0; b = 0;
for p = 0 : P                                    % วงรอบด้านบวก
    a = n-p; b = p+1;                           % คำนวณตามสมการ (3.14)
    if a >= 1
        Rs_new(1,c) = Rs(a);
    end
    hlp_new(1,c) = hlp(b);                       % จัดเรียง Rs_new และ hlp_new ในส่วนด้านบวกและที่ศูนย์
    c = c+1;
end                                              % สิ้นสุดวงรอบด้านบวก
R = Rs_new.*hlp_new;                            % คูณแบบจุดต่อจุด
result = sum(R);                                % ผลบวกทั้งหมด

% com_Ms                                        % ฟังก์ชัน com_Ms
function [result] = com_Ms(Rst,L,glp)           % รับค่า Rst L และ glp มาและส่งค่า result กลับ
result = zeros(1,2*L);
Rstn = zeros(1,L-1);
Rst_new = zeros(1,2*L);
x = zeros(1,2*L);

```

```

XX = zeros(1,2*L);           % สร้างเมทริกซ์ศูนย์เพื่อเก็บค่า
for i = 1 : L-1
    Rstn(i) = Rst(L+1-i);    % จัดเรียง Rstn ให้เป็นด้านลบของ Rst ตาม
                             % ลักษณะสมมาตร
end
Rst_new = [Rst Rstn];      % จัดเรียง Rst_new
x = Rst_new.*glp;          % คูณแบบจุดต่อจุด
XX = fft(x,2*L);           % XX คือ DFT ของ x
result = abs(XX);          % ค่าสัมบูรณ์ของ XX

```

3 โปรแกรมวาดกราฟ 3 มิติ

```

% Plot Ms in 3 dimensions
clear all; clc;
% parameters                % กำหนดค่าพารามิเตอร์
fs = 250000;                % อัตราการซีกตัวอย่างของสัญญาณ s(n)
L = 8192;                   % จำนวนจุดครึ่งหนึ่งในการคำนวณ DFT
ls = 2500;                  % จำนวนข้อมูลของสัญญาณ s(n)
n_step_size = 625;         % ระยะห่างแต่ละขั้นของ n ที่ใช้ในการคำนวณ
                             %  $M_s(n, k)$ 
% read Ms                   % เปิดอ่านข้อมูลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม
                             % MD
pt = fopen('mdv1.dat','rb'); % พอยเตอร์ pt ซีไฟล์ที่ต้องการเปิดอ่าน
Ms = fread(pt,[(ls/n_step_size),2*L],'float32');
                             % ระบุจำนวนและชนิดข้อมูลให้ตรงกัน
fclose(pt);                 % ปิดพอยเตอร์ pt
Ms = Ms';                   % ทำการสลับเปลี่ยนแถวและหลัก
% time axis
n = n_step_size/fs : n_step_size/fs : ls/fs;
                             % ค่าของแกนทางเวลา
n = n*1000;                 % ทำให้มีหน่วยเป็น ms
% frequency axis

```

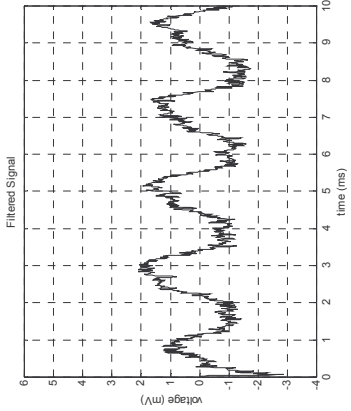
```

k = 0 : fs/(4*L) : (L/2)*fs/(4*L);           % ค่าของแกนทางความถี่
% mesh plot Ms
mesh(n,k(1:201),Ms(1:201,:));                % วาดกราฟแบบเมชโดยระบุช่วงเวลาหรือความถี่
                                           % ได้
title('Modal Distribution');                  % ชื่อกราฟ
xlabel('time (ms)');                          % ชื่อแกน x
ylabel('frequency (Hz)');                     % ชื่อแกน y
zlabel('magnitude');                          % ชื่อแกน z
axis tight;                                   % กำหนดแกนพอดีกับข้อมูล
colormap([0 0 0]);                            % ปรับเส้นกราฟเป็นสีดำ
set(gca,'YDir','reverse','GridLineStyle','--');
                                           % กำหนดให้แกน y ผกผันและกริดเป็นเส้นประ
view(-90,1);                                  % กำหนดมุมมองของภาพ
% Find location of maximum MD                 % หาค่าแห่งที่สเปกตรัมมีขนาดสูงสุด
ref = 0; a = 0; b = 0; c = 0;                 % กำหนดค่าเริ่มต้น
for row = 1 : length(k)                       % ขอบเขตแถวของ Ms
for column = 1 : length(n)                    % ขอบเขตหลักของ Ms
    c = Ms(row,column);                       % ค่าของขนาดที่ตำแหน่งใดๆ
    if c > ref                                 % เปรียบเทียบกับค่าอ้างอิง ref
        ref = c;                               % กำหนดค่าอ้างอิงใหม่
        a = row;                               % แถวที่มีขนาดสูงสุด
        b = column;                           % หลักที่มีขนาดสูงสุด
    end                                         % สิ้นสุดการเปรียบเทียบ
end                                             % สิ้นสุดวงรอบแต่ละแถว
end                                             % สิ้นสุดวงรอบการหาตำแหน่ง
y = k(a);                                       % ความถี่ที่มีขนาดของ Ms สูงสุด
z = n(b);                                       % เวลาที่มีขนาดของ Ms สูงสุด
sprintf('maximum magnitude = %.15f\n',ref)
sprintf('frequency = %.10f Hz, time = %.10g ms',y,z)
                                           % แสดงผล

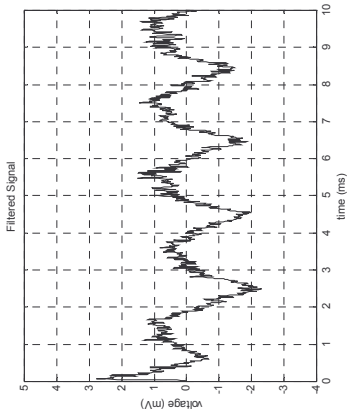
```


ภาคผนวก ง

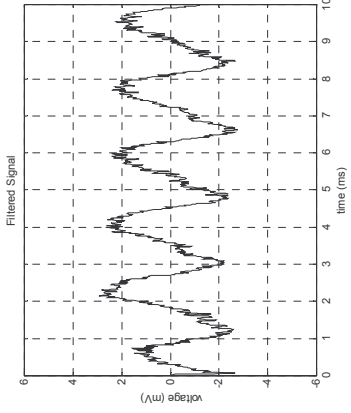
ผลการวิเคราะห์เสียงโน้ตเดี่ยวของขลุ่ยเพียงออและระนาดเอกเหล็ก



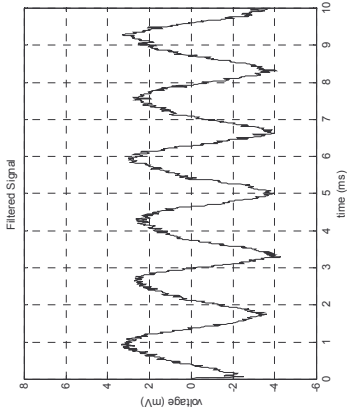
เสียงโต



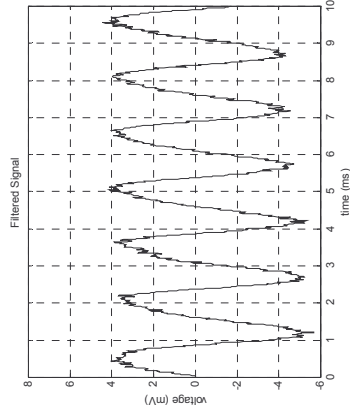
เสียงเร



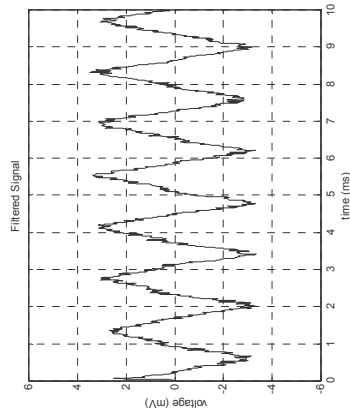
เสียงมี



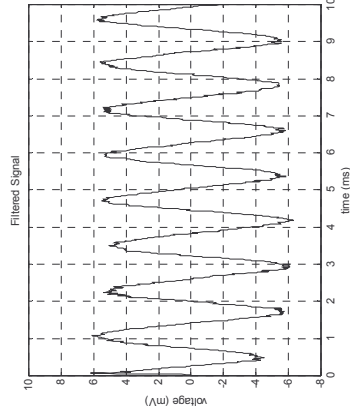
เสียงฟา



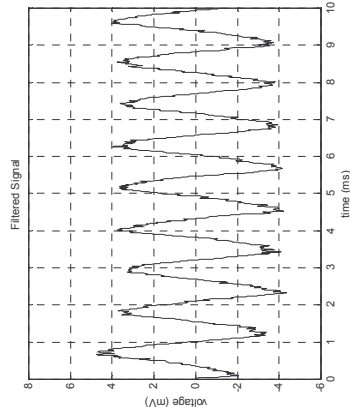
เสียงชอด



เสียงตา

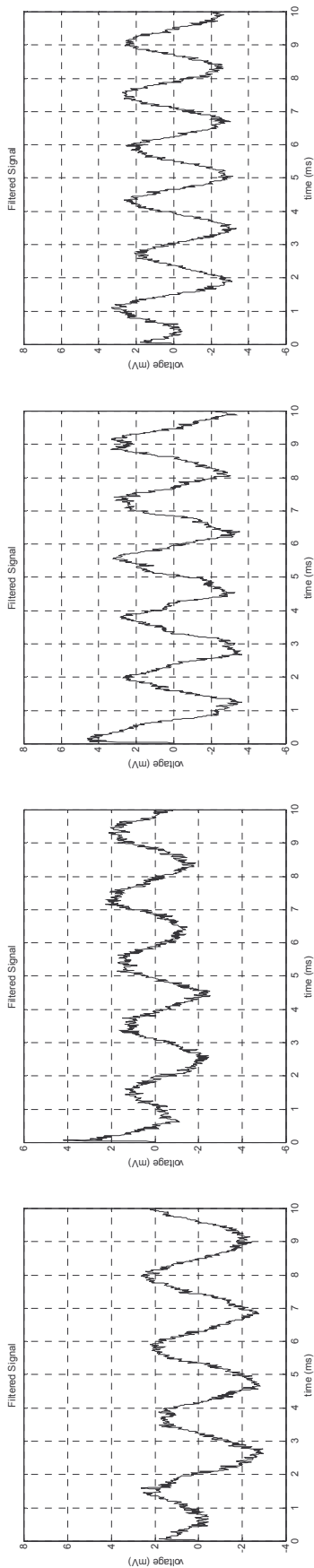


เสียงที



เสียงโต

รูปที่ 1.1 สัญญาณเสียงสุ่เพียงอยู่ในสถานะอยู่ตัวที่ผ่านการกรองสัญญาณแล้ว

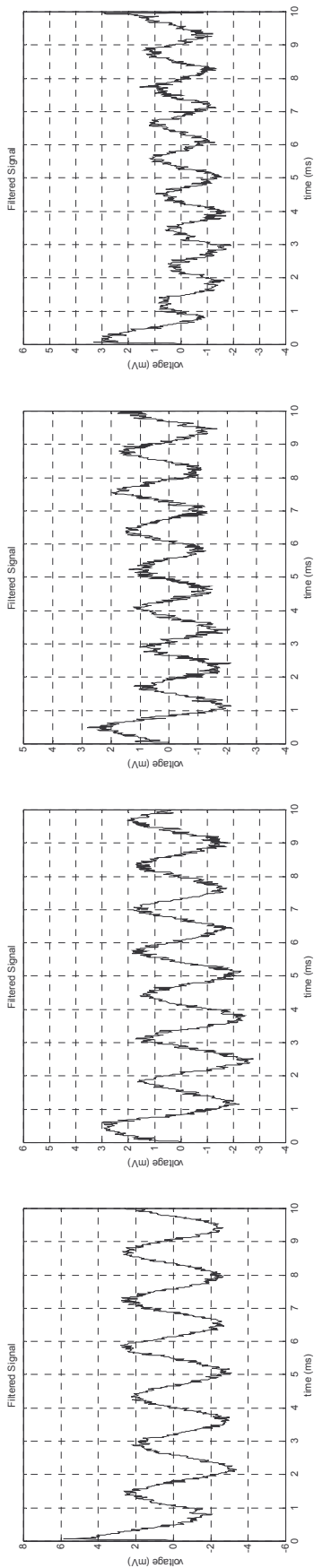


เสียงใจ

เสียงเร

เสียงมี

เสียงฟา



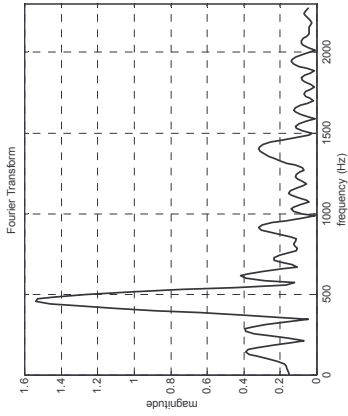
เสียงซอด

เสียงดา

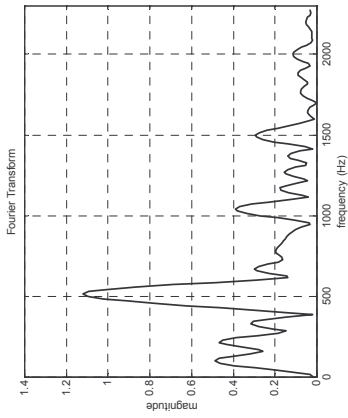
เสียงที

เสียงโต

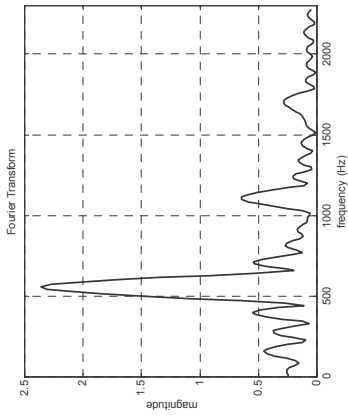
รูปที่ ๖.2 สัญญาณเสียงระนาดเอกเหล็กในสถานะอยู่ตัวที่ผ่านการกรองสัญญาณแล้ว



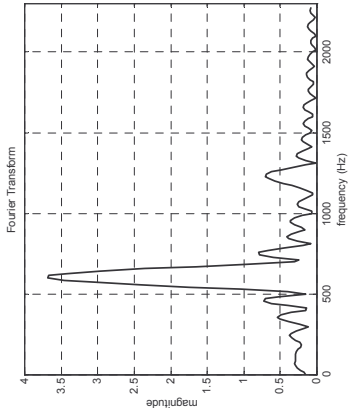
เสียงโต



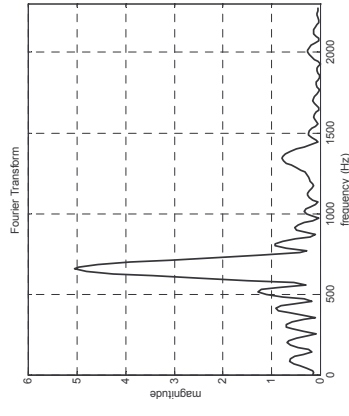
เสียงแร



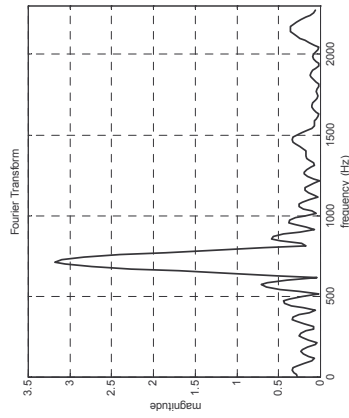
เสียงมี



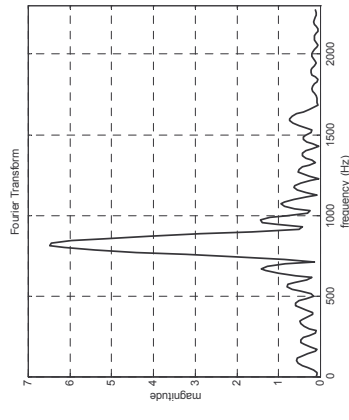
เสียงฟา



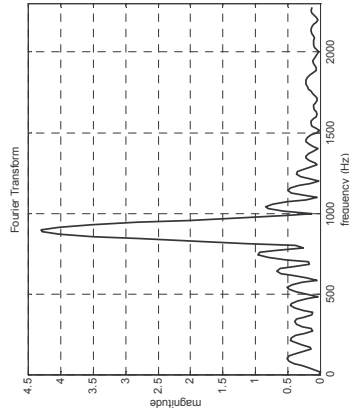
เสียงซอด



เสียงลา

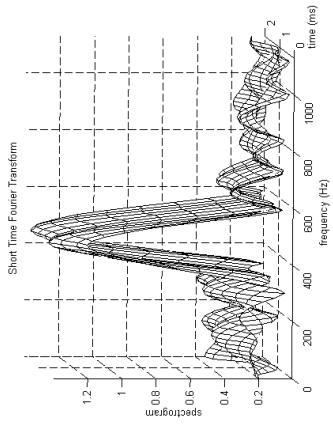


เสียงที

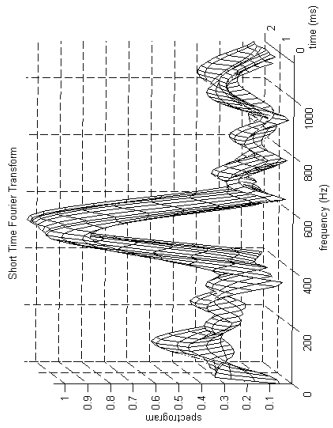


เสียงโต

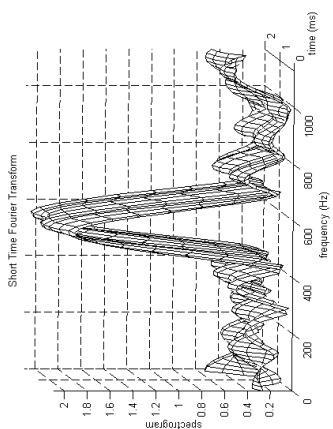
รูปที่ ง.3 ผลการวิเคราะห์เสียง โน้ตเดี่ยวในสถานะอยู่ตัวของกลุ่มเพียงออกด้วยเทคนิคการแปลงฟูริเยร์เต็มหน่วย



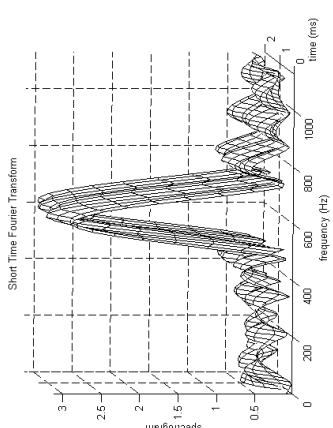
เสียงโต



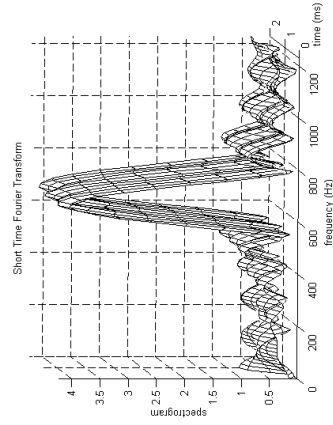
เสียงร



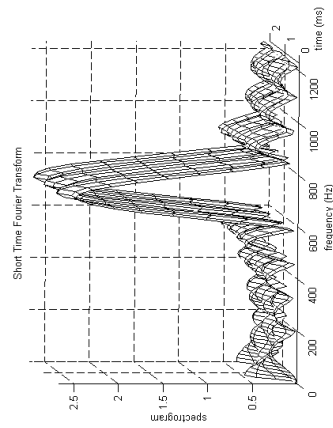
เสียงมี



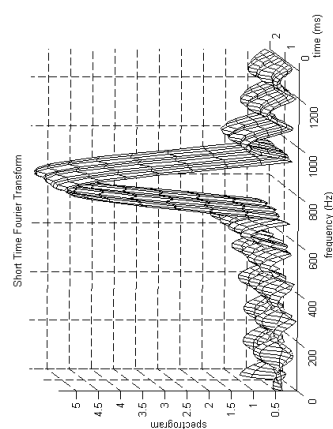
เสียงฟา



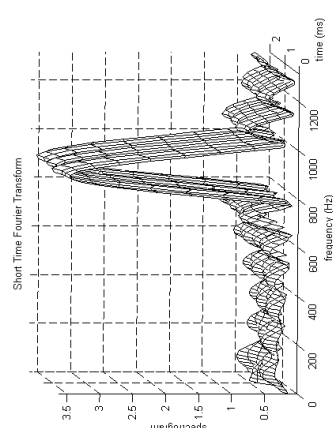
เสียงชอด



เสียงลก

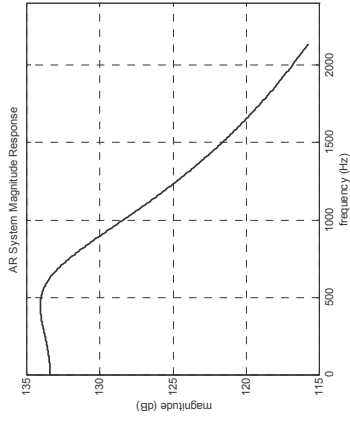


เสียงที

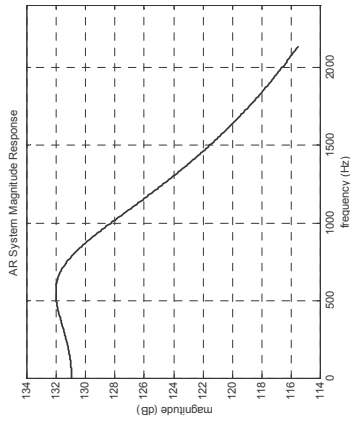


เสียงโจ้

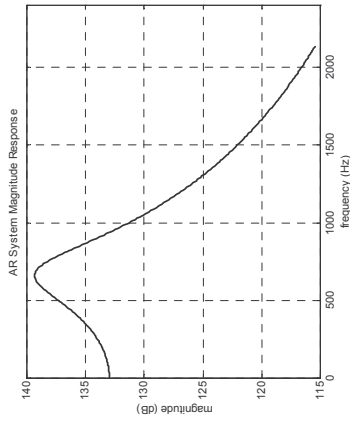
รูปที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์เสียง โน้ตเดี่ยว ในสถานะของคู่พยางค์ของเทคนิคสเปกโตรแกรม



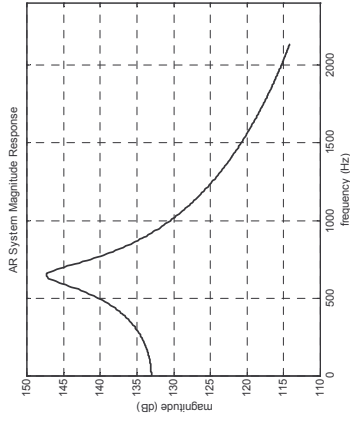
เสียงดี



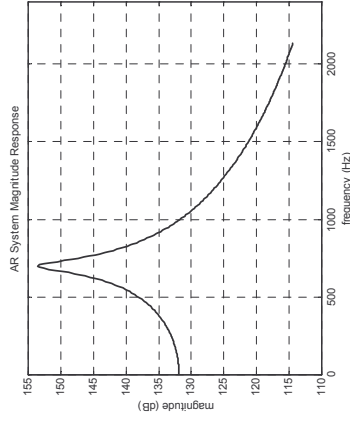
เสียงร



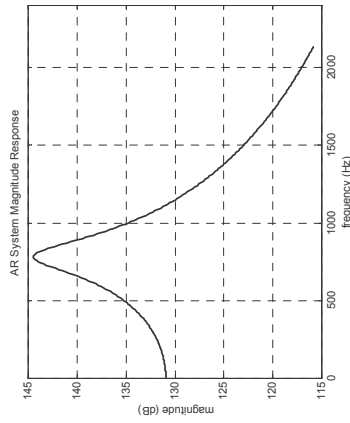
เสียงมี



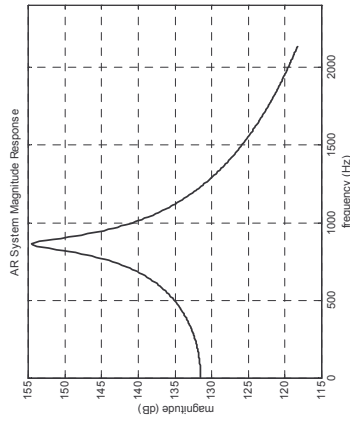
เสียงฟา



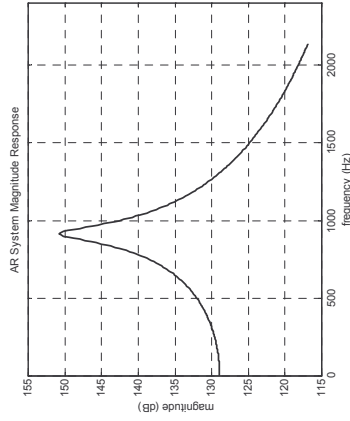
เสียงชอด



เสียงลา

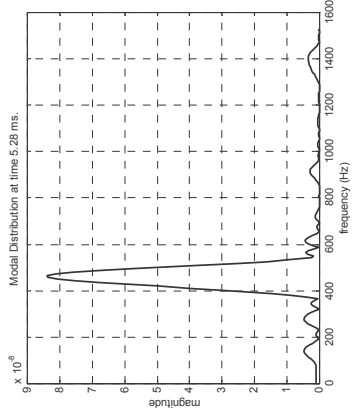


เสียงที

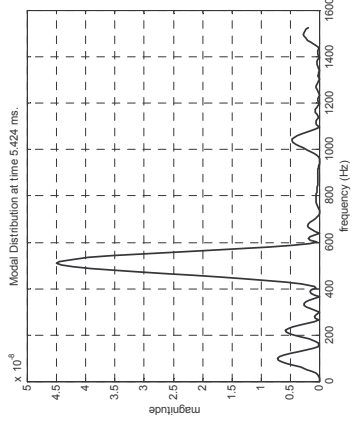


เสียงโด

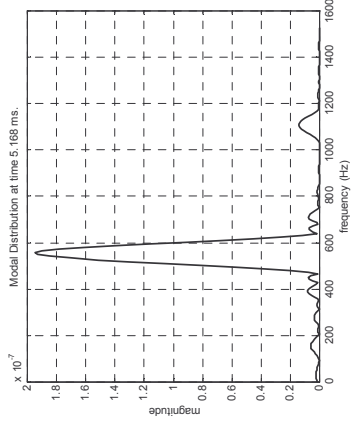
รูปที่ ๖.5 ผลการวิเคราะห์เสียงโน้ตเดี่ยวในสถานะอยู่ตัวของขลุ่ยเพียงออด้วยแบบจำลองเออาร์



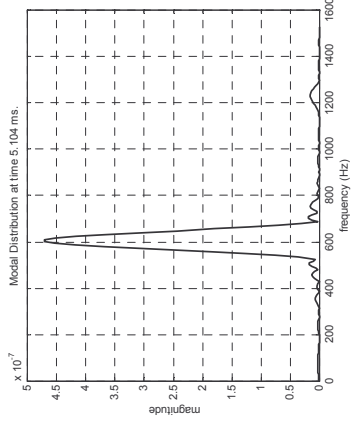
เสียงโต



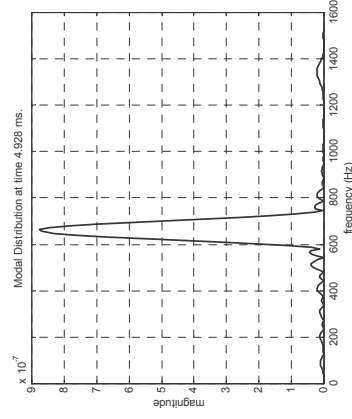
เสียงเร



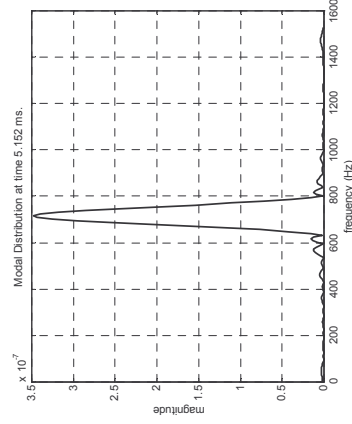
เสียงมี



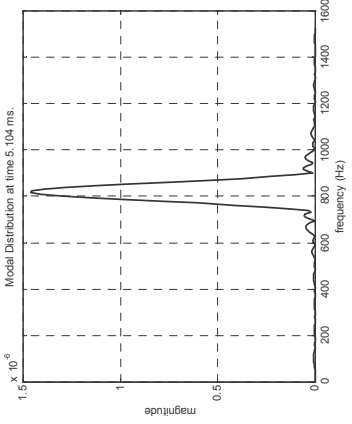
เสียงฟา



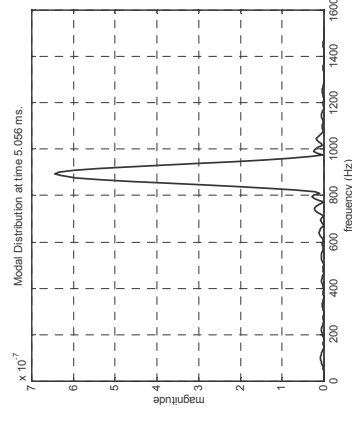
เสียงชอด



เสียงลา

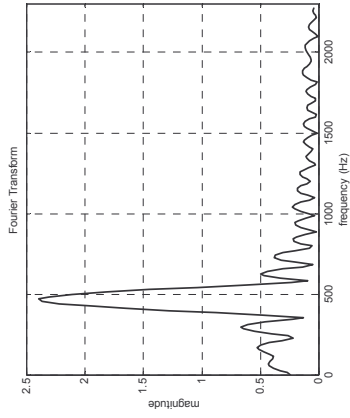


เสียงที

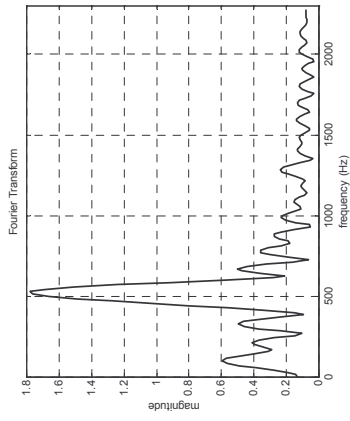


เสียงโต'

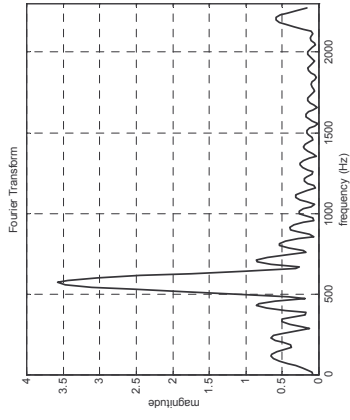
รูปที่ ๖.6 ผลการวิเคราะห์เสียงโน้ตเดี่ยวในสถานะอยู่ตัวของผู้เล่นเพียงด้วยเทคนิคการกระจายโมด



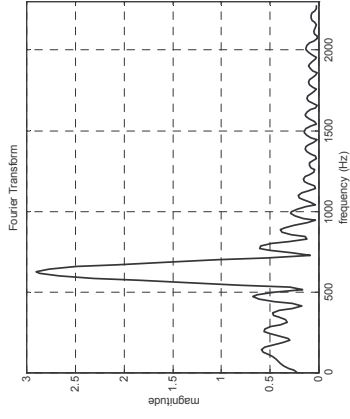
เสียงโต



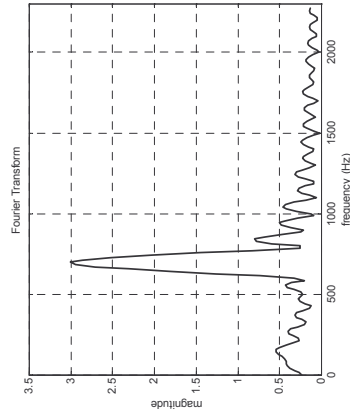
เสียงแร



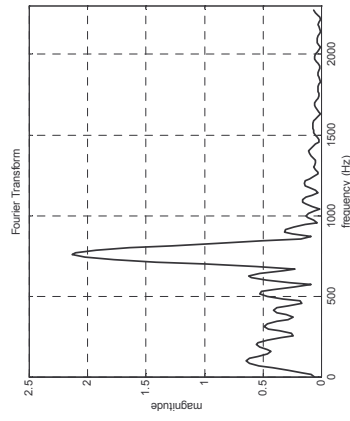
เสียงมี



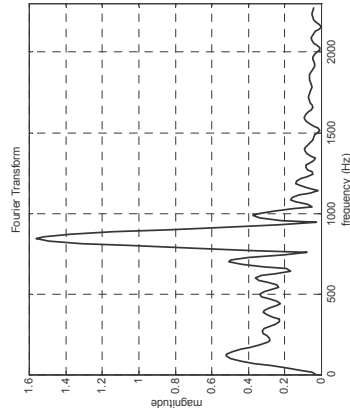
เสียงฟา



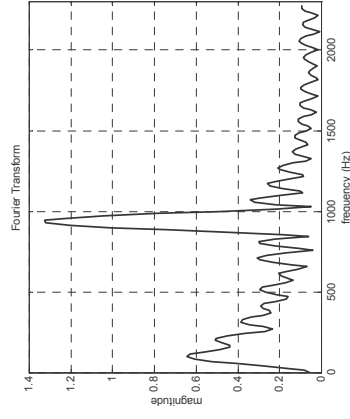
เสียงซอด



เสียงลา

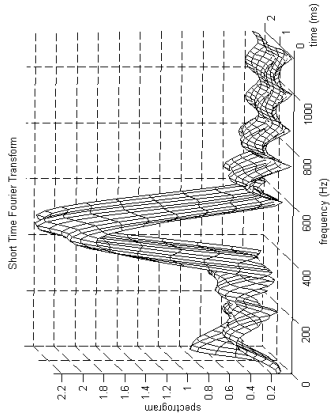


เสียงที

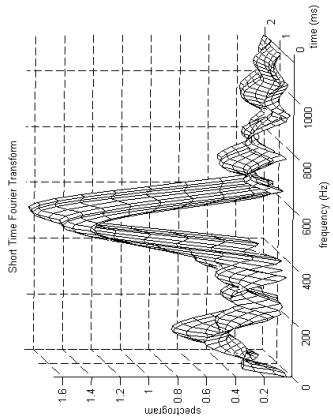


เสียงโต

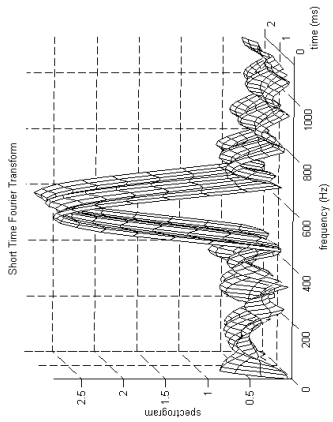
รูปที่ ๓.๗ ผลการวิเคราะห์เสียง โน้ตเดี่ยวในสถานะอยู่ตัวของขนาดเอกเหล็กด้วยเทคนิคการแปลงฟูริเยร์เต็มหน่วย



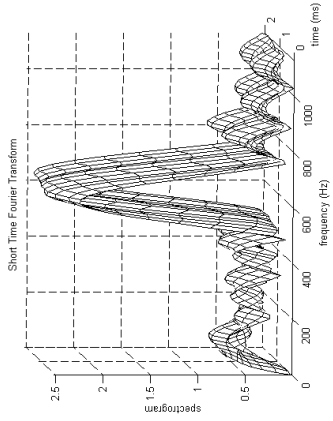
เสียงโต๋



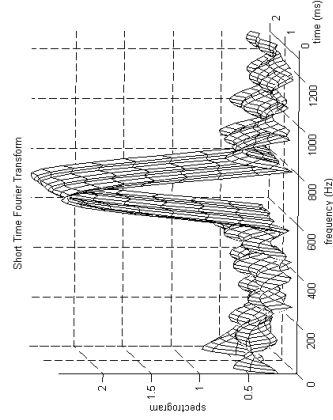
เสียงร



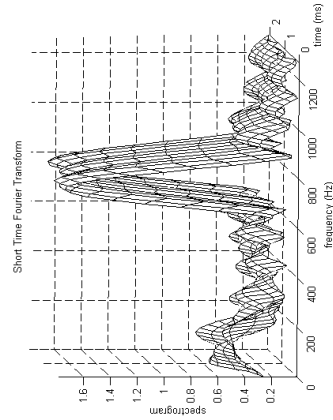
เสียงมี



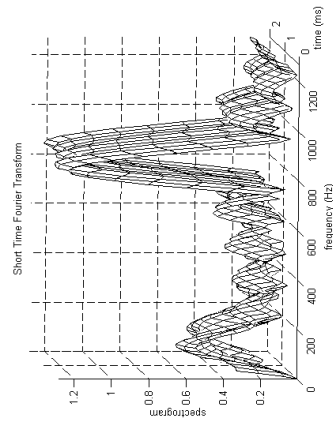
เสียงฟา



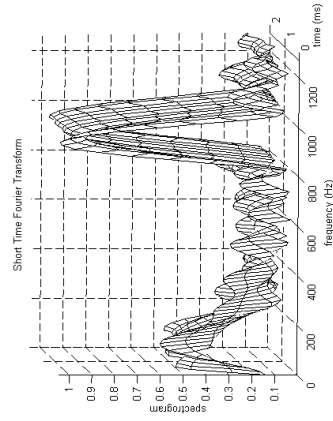
เสียงชอล



เสียงลา

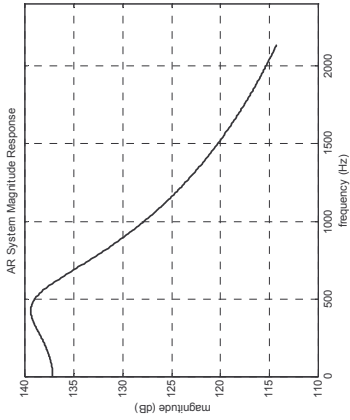


เสียงที

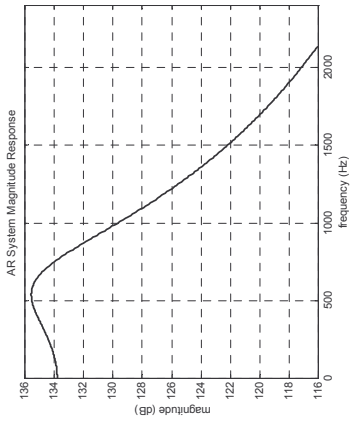


เสียงโด่

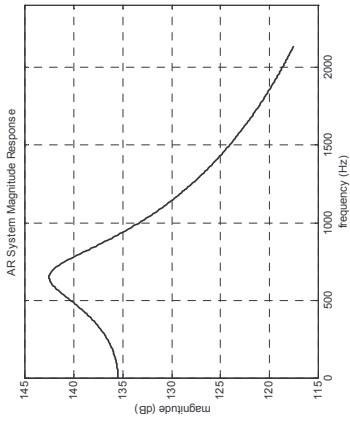
รูปที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ที่เสียง โน้ตเดี่ยวในสถานะอยู่ตัวของระนาบออกเหล็กด้วยเทคนิคสเปกโทรแกรม



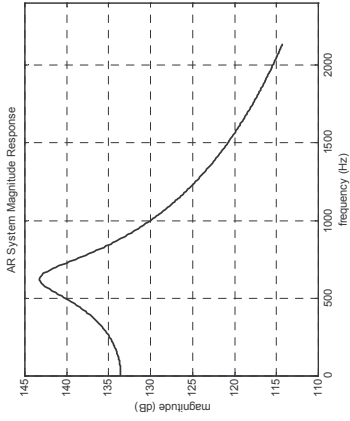
เสียงโศก



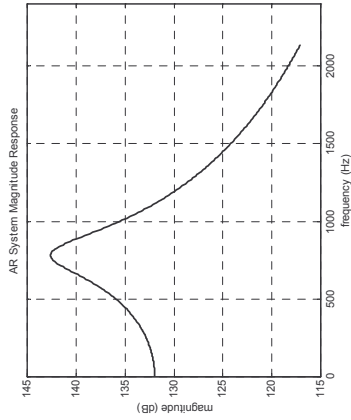
เสียงร



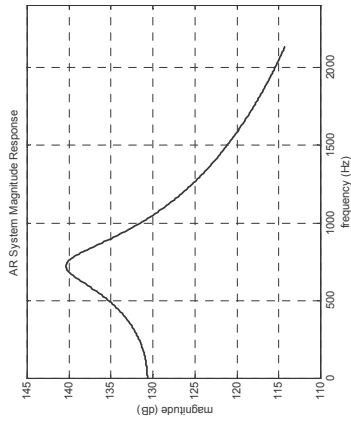
เสียงมี



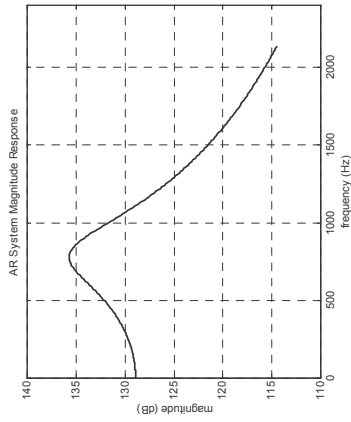
เสียงฟา



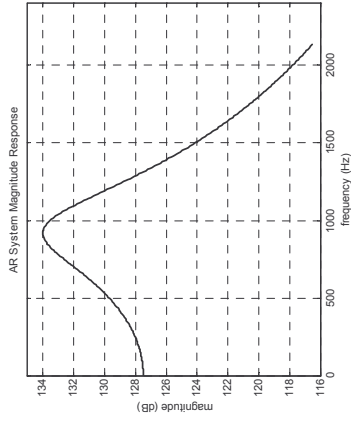
เสียงชอด



เสียงลา

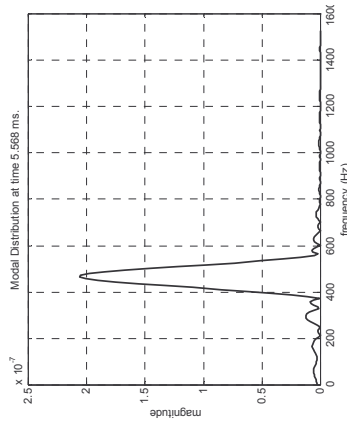


เสียงที

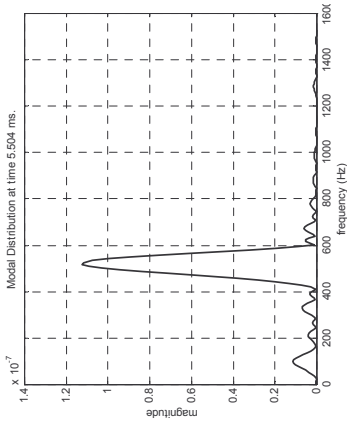


เสียงโด

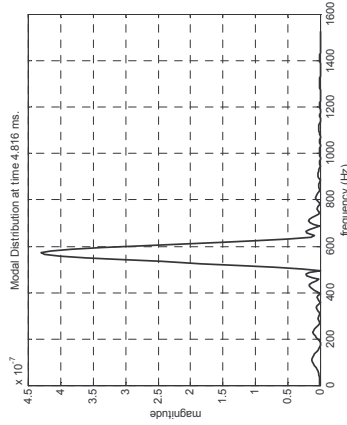
รูปที่ ง.9 ผลการวิเคราะห์เสียงโน้ตเดี่ยวในสถานะอยู่ตัวของระนาดเอกเหล็กด้วยแบบจำลองเออาร์



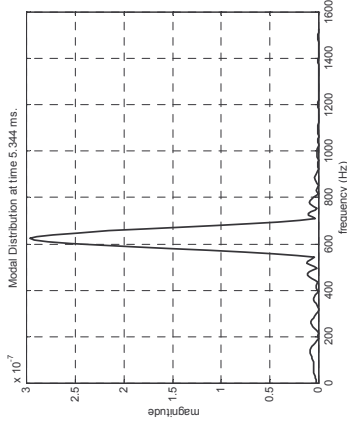
เสียงโต



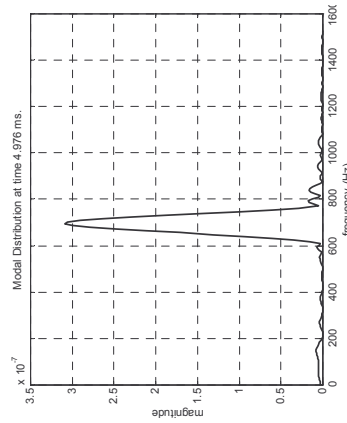
เสียงเร



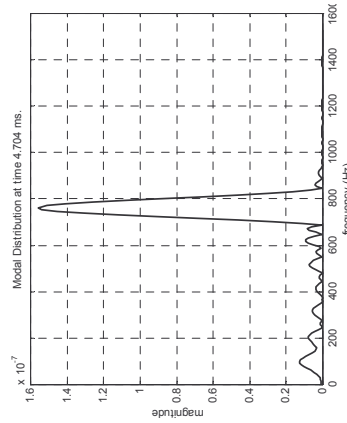
เสียงมี



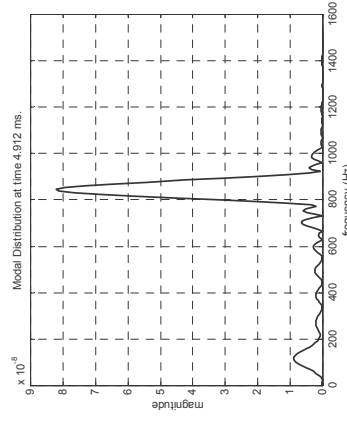
เสียงฟา



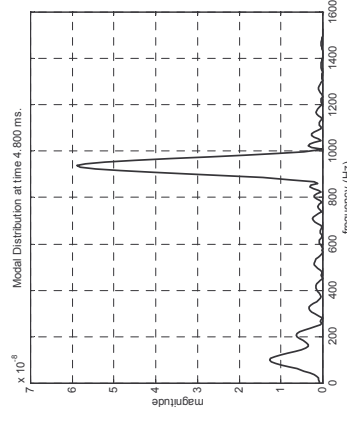
เสียงชอต



เสียงลา



เสียงที



เสียงโด

รูปที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์เสียง โน้ตเดี่ยวในสถานะอยู่ตัวของระนาดเอกเหล็กด้วยเทคนิคการกระจายเชิงโมด

ภาคผนวก จ

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

- 1 “การวิเคราะห์ระดับเสียงดนตรีไทย”, วารสารเทคโนโลยีสุรนารี 11 (3): 179-192.
- 2 “Characterization of Traditional Thai Musical Scale”, **WSEAS Transactions on Acoustics and Music** 1 (2): 90-95.

ประวัติผู้เขียน

นางสาวฤดีรัตน์ ชินเวชกิจวานิชย์ เกิดเมื่อวันที่ 22 มีนาคม พ.ศ. 2521 ที่กรุงเทพมหานคร เริ่มเข้าศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำเร็จการศึกษาเมื่อปี พ.ศ. 2543 โดยมีผลงานวิจัยซึ่งเป็นโครงการ วิศวกรรมโทรคมนาคม เรื่อง การอนุวัตตัวชดเชยอันดับสูง ด้วยหน่วยประมวลผลสัญญาณดิจิทัล TMS320C542 DSKplus. (Telecommunication Engineering Project: “High-Order Compensator Implementation by TMS320C542 DSKplus DSP.”) จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อ ในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ขณะศึกษาได้สอน วิชาปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีผลงาน วิจัยตีพิมพ์ 2 บทความดังที่แสดงไว้ในภาคผนวก จ