

การวิเคราะห์ระดับเสียงดนตรีไทย

ฤดีรัตน์ ชินเวชกิจวานิชย์^{1*}, สรารวุฒิ สุจิตจร², กิตติ อັตถกิจมงคล³ และ เพ็ญโร โศทาโรง⁴

Chinvejkitvanich, R.^{1}, Sujitjorn, S.², Attakitmongcol, K.³, and Totarong, P.⁴ (2004). Thai Musical Signal Analysis. Suranaree J. Sci. Technol. 11:179-192.*

Received: Mar 4, 2004; Revised: Aug 10, 2004; Accepted: Aug 14, 2004

Abstract

Analysis of Thai principal notes was carried out for the octave referred to as “Thang Phiang Aw”. Four different techniques of digital processing, namely discrete Fourier transform (DFT), short-time Fourier transform (STFT), autoregressive model (AR), and modal distribution (MD) were used. The results indicated that the modal distribution technique was superior to the others. The main Phiang Aw octave covered the frequencies of 465-940 Hz. The pitches were not constant, which was in contrast to the previous hypothesis of Morton’s.

Keywords: Musical signal analysis, traditional Thai music

บทคัดย่อ

การวิเคราะห์ระดับเสียงเสียงดนตรีไทย ดำเนินงานกับทบเสียงกลางทางดนตรีไทย ที่เรียกว่า “ทางเพียงออ” ได้นำเทคนิคการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลสี่แบบมาประยุกต์ ได้แก่ เทคนิคการแปลงฟูรีเยร์เต็มหน่วย เทคนิคการแปลงฟูรีเยร์ในช่วงเวลาสั้น แบบจำลองเออาร์ และการกระจายเชิงโมด เมื่อเปรียบเทียบผลพบว่า การกระจายเชิงโมดให้ผลดีที่สุด เสียงเพียงออของไทยในหนึ่งทบเสียง มีความถี่ย่าน 465-940 เฮิรตซ์ มีระยะพิทช์ไม่คงที่มิได้เป็นไปตามสมมุติฐานดั้งเดิมของมอร์ตัน

¹ นักศึกษามัธยมศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000 โทรศัพท์ 0-4422-4400 E-mail: neung_chin@yahoo.com

² Ph.D., รองศาสตราจารย์ หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

³ Ph.D., ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

⁴ พลอากาศตรี ผู้อำนวยการสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ

* ผู้เขียนที่ให้การติดต่อ

บทนำ

เสียงเริ่มเกิดขึ้นเมื่อวัตถุหรือแหล่งกำเนิดเสียงมีการสั่น ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลอากาศที่อยู่โดยรอบ เกิดการเคลื่อนที่เข้าชนกันและแยกออกจากกัน ทำให้ความดันของอากาศเพิ่มขึ้นและลดลงจากปกติ ซึ่งการเคลื่อนที่นี้เกิดสลับกันไปมา ก่อกำเนิดเป็นคลื่นเสียงขึ้น (Alten, 1999) มนุษย์ได้ยินเสียงที่มีความถี่อยู่ในช่วงประมาณ 20 ถึง 20,000 เฮิรตซ์ และรับรู้ลักษณะของเสียงด้วยความถี่หรือความสูงของเสียงหรือพิตช์ (pitch) และความดังของเสียง (loudness) (บริษัท ริดเดอร์ส ไดเจสท์ (ประเทศไทย) จำกัด, 2541) เสียงดนตรีเป็นเสียงชนิดหนึ่งเกิดจากการสั่นเชิงกลของตัวสั่น (oscillator) ซึ่งได้รับการกระตุ้นในรูปแบบใดรูปแบบหนึ่ง ส่งผลทำให้ส่วนต่าง ๆ ของเครื่องดนตรีสั่น (Mitra, 2001) สำหรับเครื่องดนตรีประเภทเครื่องเป่า เช่น ขลุ่ย ทั้งของต่างประเทศและของไทย เมื่อเป่าลมเข้าไปในช่องว่างภายในกระบอก โมเลกุลของอากาศที่อยู่ภายในจะเคลื่อนที่กลับไปกลับมาตามความยาวของกระบอกเกิดเป็นเสียง ซึ่งเสียงดังกล่าวนี้หากวัดรูปคลื่นได้ จะพบว่ามัลักษณะใกล้เคียงกับรูปคลื่นไซน์ (Cannon, 1976) เสียงดนตรีจึงเกิดจากการสั่นทั้งหมดที่รวมกันอยู่ในเครื่องดนตรีชิ้นนั้น ๆ ทำให้เสียงดนตรีประกอบด้วยหลายความถี่ที่หูไม่สามารถแยกแยะได้ว่ามีค่าความถี่ใดบ้าง แต่จะได้ยินเสียงโดยรวมที่เป็นผลของหลายความถี่พร้อม ๆ กัน

เสียงดนตรีเป็นเสียงที่มนุษย์ให้ความสนใจศึกษารายละเอียด งานวิจัยที่ทำการวิเคราะห์เสียงดนตรีที่สืบค้นได้เป็นของดนตรีตะวันตกเกือบทั้งหมด ดนตรีไทยและดนตรีสากลมีความถี่ของแต่ละเสียงตัวโน้ตไม่เท่ากัน เนื่องจากดนตรีสากลแบ่งหนึ่งทบเสียง (octave) ออกเป็นห้าเสียงเต็ม (whole tone) และสองครึ่งเสียง (semi tone) ส่วนดนตรีไทยนั้น แบ่งหนึ่งทบเสียงออกเป็นเจ็ดเสียงเต็ม ซึ่งมีความเชื่อว่าโน้ตแต่ละเสียงมีระยะห่างทางความถี่เท่า ๆ กันหมด (สัมพัทธ์ ตันจันท์, 2542) ดนตรีไทยยังไม่มีมีการประกาศระดับเสียงที่เป็น

มาตรฐานในเชิงวิทยาศาสตร์ทำนองเดียวกับของดนตรีสากลสำหรับการเทียบเสียง แต่มีการกล่าวถึงโดย อุทิศ นาคสวัสดิ์ (2514) ว่า อัตราส่วนความถี่ระหว่างเสียงโน้ตที่ติดกัน (รายละเอียดปรากฏในผลการทดลองและวิจารณ์) มีค่าเท่ากับ 1.09745 แต่มีได้อธิบายที่มาของตัวเลขดังกล่าว อย่างไรก็ตาม หากใช้การประมาณอาจพิจารณาว่าค่าดังกล่าวเท่ากับ 1.1 โดยประมาณ (ผู้เขียน) นอกจากนี้ในเอกสารดังกล่าวก็ได้แนะนำเสนอค่าความถี่ในเชิงทฤษฎีซึ่งอ้างอิงจากความถี่ของเสียงเปียโน (ตารางที่ 1) โดยมีได้แสดงที่มา ตามปกติแล้วดนตรีไทยเทียบเสียงด้วยความถี่และค่าความถี่ของผู้เป็นหลักของวงดนตรี การเทียบเสียงของเครื่องดนตรีที่จะผสมเป็นวงเดียวกันนั้น ยึดเสียงของเครื่องดนตรีในวงที่เลื่อนลดเสียงไม่ได้เป็นหลักเพื่อเทียบเสียง เช่น ขลุ่ย ปี่ ระนาดเหล็ก เป็นต้น (มนตรี ตราโมท, 2540) และได้มีการใช้ส้อมเสียง (turning fork) เช่นเดียวกับดนตรีสากล

บทความนี้นำเสนอวิธีการวิเคราะห์ระดับเสียงของสัญญาณเสียงดนตรีไทย โดยมุ่งไปที่เสียงโน้ตหลักของขลุ่ยเพียงออและระนาดเอกเหล็ก ซึ่งเป็นเครื่องดนตรีหลักสำหรับการเทียบเสียงวงเครื่องสายไทยและมโหรี ด้วยเทคนิคการแปลงฟูริเยร์เต็มหน่วย (discrete Fourier transform หรือ DFT) เทคนิคการแปลงฟูริเยร์ในช่วงเวลาสั้น (short-time Fourier transform หรือ STFT) เทคนิคการวิเคราะห์สัญญาณด้วยแบบจำลองออโต้เรกเรสซีฟ (autoregressive model หรือ AR) และเทคนิคการกระจายเชิงโหมด (modal distribution หรือ MD) แล้วนำผลที่ได้จากการคำนวณมาเปรียบเทียบกันเพื่อความถูกต้องแม่นยำ เนื่องจากเสียงดนตรีเป็นสัญญาณที่ผันแปรตามเวลาและไม่มีรายคาบชัดเจน เทคนิค DFT จึงอาจไม่เหมาะที่จะใช้กับสัญญาณเสียงประเภทนี้ (Pielemeier et al., 1996) แต่ถ้าการเล่นเครื่องดนตรีผู้เล่นตั้งใจทำให้เกิดเสียงโน้ตเดี่ยวอย่างต่อเนื่องสม่ำเสมอ เสียงนั้นอาจแสดงความเป็นรายคาบ เทคนิค DFT จึงอาจนำมาประยุกต์ได้ในเบื้องต้น เทคนิค STFT เป็นวิธีพื้นฐานในการวิเคราะห์

สัญญาณที่แปรตามเวลาและความถี่ (Cohen, 1989) โดยจะนำฟังก์ชันหน้าต่าง (window function) มาคูณกับสัญญาณเพื่อแบ่งสัญญาณออกเป็นช่วง การเลือกฟังก์ชันหน้าต่างให้เหมาะสมยังคงเป็นปัญหาอยู่ เพราะต้องเลือกระหว่างความสามารถแยกเวลา (time resolution) กับความสามารถแยกความถี่ (frequency resolution) กล่าวคือถ้าต้องการความสามารถที่ดีในการแยกความถี่ จำเป็นต้องใช้ฟังก์ชันหน้าต่างที่มีความกว้างมาก ๆ จะทำให้เทคนิค STFT มีความสามารถแยกเวลาได้ไม่ดีนัก (Pielemeier *et al.*, 1996) เทคนิค MD ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อลดข้อจำกัดของเทคนิค STFT และเทคนิคการกระจายวิกเนอร์ (Wigner distribution หรือ WD) และสามารถตรวจจับองค์ประกอบทางความถี่ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาอย่างรวดเร็วของสัญญาณเสียงดนตรีได้ดี (Pielemeier and Wakefield, 1996) ส่วนเทคนิค AR นั้นมีความสามารถในการตรวจจับความถี่ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาอย่างรวดเร็วของสัญญาณเสียงพูดได้ดี (Totarong, 1983) ซึ่งอาจให้ผลดีต่อการวิเคราะห์เสียงดนตรีได้ อย่างไรก็ตาม การเลือกอันดับของแบบจำลอง AR ให้เหมาะสมยังไม่มีหลักเกณฑ์ที่แน่นอน ผลที่ได้จากการวิจัยนี้จะช่วยให้ทราบได้ว่าเทคนิคการวิเคราะห์รูปแบบใดจะให้ผลดีกว่าแบบอื่น ๆ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการนำไปประยุกต์เพื่อวิเคราะห์เสียงดนตรีไทยที่ซับซ้อนยิ่งขึ้น เช่น เสียงการบรรเลงด้วยเทคนิคพิเศษต่าง ๆ

เป็นต้น นอกจากนั้นผลวิจัยจะให้ข้อมูลรายละเอียดของความถี่ในหนึ่งทบเสียง ตลอดจนลักษณะเฉพาะของเสียงดนตรีไทยที่บรรเลงโน้ตเดี่ยว

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บข้อมูลมีดังนี้

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

ดำเนินการเก็บข้อมูลที่ห้องดนตรีไทย อาคารส่วนกิจการนักศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งเป็นห้องปิดเพื่อป้องกันเสียงรบกวน อุณหภูมิภายในห้องเฉลี่ยอยู่ที่ 27 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 67 เปอร์เซ็นต์ ความดังของเสียงขณะบรรเลงขลุ่ยเพียงออและระนาดเอกเหล็กควบคุมไว้ให้อยู่ที่ประมาณ 76 เดซิเบล และ 80 เดซิเบล ตามลำดับ การเป่าขลุ่ยใช้การรักษาความต่อเนื่องของลม และรักษาความสม่ำเสมอของความแรงลม โดยไม่จำเป็นต้อง “ระบายลม” การตี

Table 1. Comparison of Thai and Western notes in one octave (previous results).
(อุทิศ นาคสวัสดิ์, 2514)

One octave of Thai musical notes	Frequency of piano (Hz)	Frequency of Thai music (Hz)
do	524	524
rae	587	579
mee	659	639
fa	698	705
sol	784	779
la	880	860
tee	988	949
dó	1,048	1,048

ระนาดเหล็กใช้การ “รัว” รักษาความสม่ำเสมอของแรงโดยรัวไล่ไปที่ละลูกระนาดจนครบทบเสียง ในขณะที่ทำการเก็บข้อมูล ตำแหน่งของการวางอุปกรณ์ ดังที่ (รูปที่ 1) ไมโครโฟนที่ใช้เป็นชนิดอิเล็กทเรต (electret) มีแบบรูปการแผ่พลังงาน (radiation pattern) รอบทิศทาง (omnidirection) มีค่าความไว -52 เดซิเบล และมีผลตอบสนองทางความถี่ในช่วง 50 เฮิรตซ์ ถึง 18,000 เฮิรตซ์ ซึ่งมีลักษณะสมบัติใกล้เคียงกับไมโครโฟนที่สืบค้นได้ว่าเหมาะสำหรับใช้วัดเสียงดนตรีประเภทเครื่องลมไม้ (woodwind instrument) (สรวาภูมิ สุจิตจร, 2545) กรณีบันทึกเสียงขลุ่ยเพียงออไมโครโฟนจะวางทำมุม 50 องศา กับแท่นจับ อยู่ห่างจากขลุ่ย 3 นิ้ว และกรณีบันทึกเสียงระนาดเอกเหล็ก ไมโครโฟนจะวางทำมุม 80 องศา กับแท่นจับและอยู่ตรงตำแหน่งลูกซอด ห่างจากตัวระนาด 5 นิ้ว การวางตำแหน่งของไมโครโฟนในลักษณะดังกล่าวก็เพื่อให้

ไมโครโฟนอยู่กึ่งกลางของแหล่งกำเนิดเสียง ส่วนออสซิลโลสโคปวางห่างเป็นระยะสุดความยาวสายของไมโครโฟนเพื่อป้องกันการเกิดสัญญาณรบกวนระหว่างสาย และป้องกันไม่ให้ความดังของเสียงเครื่องออสซิลโลสโคปขณะทำงานแทรกสอดลงไมโครโฟนได้ การบันทึกรูปคลื่นเสียงโน้ตเดี่ยวของขลุ่ยเพียงออ และระนาดเอกเหล็กทั้งแปดเสียง (โด เร มิ ฟา ซอล ลา ที โด) ในกรณีนี้ถือได้ว่า เสียงที่เกิดขึ้นมีความสม่ำเสมอ การบันทึกได้ใช้ออสซิลโลสโคปทำการเก็บข้อมูลจำนวน 2,500 จุด ที่อัตราการซิกตัวอย่าง (sampling rate) 250 กิโลแซมเปิลต่อวินาที (kS/sec) ข้อมูลที่บันทึกได้นี้นำไปประมวลผลโดยอาศัยโปรแกรม MATLAB™

รูปที่ 2 (a) แสดงภาพรูปคลื่นเสียงซอลของขลุ่ยเพียงออที่บันทึกได้จะสังเกตเห็นว่ารูปคลื่นเสียงลาดลง ปรากฏการแทรกสอดจากสัญญาณรบกวนพื้นหลัง (background noise) ความถี่ต่ำในช่วง 0 ถึง



Figure 1. Instruments setup.

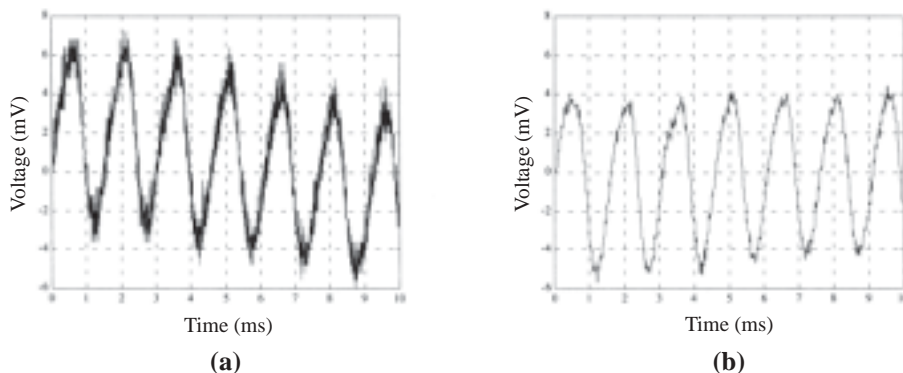


Figure 2. Signal of “sol” note played by a middle pitch Thai flute recorded signal (a) and filtered signal (b).

150 เฮิรตซ์ และความถี่สูงเกิน 20,000 เฮิรตซ์ (พิจารณาจากผลการแปลงฟูริเยร์) ดังนั้นก่อนที่จะทำการวิเคราะห์แต่ละเสียง จึงต้องนำข้อมูลที่บันทึกได้ไปผ่านการกรองสัญญาณแบบบัตเตอร์เวิร์ธผ่านแถบ (bandpass Butterworth filtering) มีค่าความถี่ตัด (cutoff frequency) อยู่ที่ 175 และ 25,000 เฮิรตซ์ สัญญาณเสียงหลังจากที่ผ่านการกรองสัญญาณรบกวนทิ้งแล้ว มีรูปลักษณะคงที่ (รูปที่ 2 (b))

เทคนิคการวิเคราะห์สัญญาณ

เทคนิคการวิเคราะห์สัญญาณที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้ ต้องการค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ถูกกำหนดขึ้นอย่างเหมาะสม ความเหมาะสมนั้นดูได้จากผลวิเคราะห์ที่จะให้ค่าฟอร์แมนท์ของเสียงโดและโด่ มีสัดส่วนเป็นสองเท่าแก่กันตามความหมายของหนึ่งทบเสียง

เทคนิค DFT (Oppenheim and Schaffer, 1989)

สัญญาณเต็มหน่วยที่เป็นรายคาบ มีลักษณะของข้อมูลเป็นลำดับและมีคาบเท่ากับ N $x(n)$ อาจเขียนแทนได้ด้วยผลรวมของลำดับเอกซ์โพเนนเชียลเชิงซ้อน $e_k(n)$ ซึ่ง $e_k(n) = e^{j(2\pi/N)kn}$ เมื่อ k เป็นจำนวนเต็ม ดังสมการ (1) ผลรวมนี้เรียกว่าอนุกรมฟูริเยร์เต็มหน่วย (discrete Fourier series หรือ DFS) $X(k)$ คือค่าสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูริเยร์เต็มหน่วย โดยคำนวณได้จาก $x(n)$ ในรูปแบบความสัมพันธ์ตามสมการ (2)

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

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

เมื่อพิจารณาสัญญาณเต็มหน่วยที่มีลักษณะของข้อมูลเป็นลำดับ $x(n)$ และมีจำนวน N ข้อมูล ซึ่งถูกกำหนดให้เป็นหนึ่งคาบของ $x(n)$ และ $x(n)$ มีค่าอยู่ในช่วง $0 \leq n \leq N-1$ ค่าสัมประสิทธิ์ของ $x(n)$ จึงหาได้จากการประยุกต์ DFS ของ $x(n)$ โดย

คำนวณ เพียงหนึ่งคาบ แสดงดังสมการ (3)

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}, 0 \leq k \leq N-1 \quad (3)$$

เรียกว่าการแปลงฟูริเยร์เต็มหน่วย (discrete Fourier transform หรือ DFT) $X(k)$ เป็นปริมาณเชิงซ้อน สเปกตรัมขนาดของ $X(k)$ ให้ข้อมูลค่า $x(n)$ ซึ่งแสดงถึงความถี่โน้ตหลักของเสียงดนตรี ซึ่งเรียกกันว่า ฟอร์แมนท์ (formant) (สราวุฒิ สุจิตจร, 2545) กราฟของสเปกตรัมขนาดของ $X(k)$ จึงตีแผ่ฟอร์แมนท์ของโน้ตแต่ละเสียง การคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB™ กำหนดจำนวนจุดในการคำนวณ DFT เท่ากับ 17,500 จุด ซึ่งเป็นการเพิ่มจำนวนจุดในการคำนวณ DFT ให้มากกว่าจำนวนของข้อมูลโดยจำนวนจุดที่เพิ่มขึ้นคือค่าศูนย์ ทำให้ตำแหน่งของเส้นสเปกตรัมมีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น จำนวน 17,500 จุดนี้มาจากการสุ่มเลือกค่าต่าง ๆ เช่น 5,000 7,500 8,192 10,000 และ 16,384 เป็นต้น นำมาทดลองคำนวณ DFT ของโน้ตทั้งแปดเสียง และเลือกจำนวนจุดที่ให้ค่าความถี่ของเสียงโด่ โกล้เสียงหรือเป็นสองเท่าของเสียงโด

เทคนิค STFT (Mitra, 2001)

เมื่อทำการวิเคราะห์สัญญาณที่ไม่นิ่ง (stationary signal) การแปลงที่นำมาใช้เพื่อวิเคราะห์เป็นการแปลงฟูริเยร์ไม่อิสระทางเวลา (time-dependent Fourier transform) หรือที่อาจเรียกว่าการแปลงฟูริเยร์ในช่วงเวลาสั้น (short-time Fourier transform หรือ STFT) การแปลงดังกล่าวจะแบ่งสัญญาณ $x(n)$ ออกเป็นส่วนสั้น ๆ ซึ่งแต่ละส่วนมีช่วงเวลาที่เท่ากัน โดยนำฟังก์ชันหน้าต่าง $w(n)$ มาคูณกับ $x(n)$ แต่ละส่วนที่แยกออกมานี้จะพิจารณาว่าเป็นสัญญาณที่ไม่แปรตามเวลา จากนั้นคำนวณ DFT ของสัญญาณแต่ละส่วน ตำแหน่งของ $w(n)$ ในช่วงเวลาต่าง ๆ สัมพันธ์กับ $x(n)$ และความถี่แสดงดังสมการ (4)

$$X_{\text{STFT}}(e^{j\omega}, n) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} x(n-m)w(m)e^{-j\omega m} \quad (4)$$

n คือตัวแปรเวลาเป็นจำนวนเต็ม และ ω คือตัวแปรความถี่ต่อเนื่อง ทำการชักตัวอย่าง $X_{STFT}(e^{j\omega}, n)$ ด้วยความถี่ที่มีระยะห่างเท่า ๆ กัน N จำนวน จะได้ $\omega_k = 2\pi k / N$ และ $w(n)$ มีความยาว R จำนวน ซึ่ง $N \geq R$ ได้เป็น $X_{STFT}(k, n)$ ดังสมการ (5)

$$X_{STFT}(k, n) = \sum_{m=0}^{R-1} x(n-m)w(m) e^{-j(\frac{2\pi}{N})km} \quad (5)$$

$X_{STFT}(k, n)$ ก็คือ DFT ของ $x(n-m)w(m)$ และ k มีค่าอยู่ในช่วง $0 \leq k \leq N-1$ การเลือกใช้ $w(n)$ ให้เหมาะสมมีความสำคัญกล่าวคือ ถ้าสัญญาณมีพารามิเตอร์ของสเปกตรัมที่แปรผันในช่วงกว้าง ๆ ควรลดจำนวนความยาวของ $w(n)$ ลงเพื่อเพิ่มความสามารถแยกเวลา แต่ในขณะเดียวกันการเพิ่มความยาวของ $w(n)$ จะทำให้ความสามารถแยกความถี่เพิ่มขึ้น การคำนวณด้วยโปรแกรม MATLABTM กำหนดจำนวนข้อมูลในการคำนวณ DFT เท่ากับ 17,500 จุด $w(n)$ ที่เลือกใช้เป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าจำนวน 2,000 จุด นั่นคือ $x(n)$ จะไม่ถูกขยายและลดทอน ในการคำนวณดังกล่าวนี้ $w(n)$ จะเลื่อนไปจนสุดความยาวของข้อมูล ซึ่งกำหนดให้มีการเหลื่อม (overlap) กัน 1,950 จุด ค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวมาจากการทดลองคำนวณ STFT ของโน้ตทั้งแปดเสียงโดยเปลี่ยนค่าจำนวนความยาวของ $w(n)$ และจำนวนการเหลื่อม เช่น 500 กับ 25 500 กับ 450 1,000 กับ 500 และ 1,500 กับ 1,000 เป็นต้น ซึ่งจำนวนการเหลื่อมที่มีค่ามากจะส่งผลให้ขนาดของ $X_{STFT}(k, n)$ มีค่ามากไปด้วย จากนั้นจะพิจารณาเลือกค่าพารามิเตอร์ที่ให้ความถี่ของเสียงได้ใกล้เคียงหรือเป็นสองเท่าของเสียงได้ $X_{STFT}(k, n)$ เป็นฟังก์ชันสองตัวแปร มีค่าทั้งในโดเมนเวลา (n) และโดเมนความถี่ (k) การแสดงขนาดของ $X_{STFT}(k, n)$ เรียกว่า สเปกโตรแกรม (spectrogram) มีลักษณะเป็นภาพสามมิติแสดงให้เห็นองค์ประกอบทางความถี่ของ $x(n)$ ที่แปรตามเวลา ซึ่งขนาดของ $X_{STFT}(k, n)$ อยู่ในทิศทาง z บนระนาบ x - y พอร์แมนซ์ของเสียงคนตรีจึงปรากฏเด่นชัดตรง

บริเวณที่สเปกโตรแกรมมีขนาดสูงสุด

เทคนิค AR

การจำลองข้อมูล $x(n)$ ซึ่งมีจำนวนข้อมูลเท่ากับ N ด้วยแบบจำลอง AR (หรือ all pole model) จะพิจารณาจากการประมาณค่า $x(n)$ กล่าวคือการประมาณค่าปัจจุบันของ $x(n)$ อาศัยผลรวมเชิงเส้นของข้อมูล M จำนวนที่ปรากฏขึ้นก่อนหน้า เขียนแสดงได้ดังสมการ (6) (Totarong, 1983)

$$\hat{x}(n) = - \sum_{i=1}^M a_i x(n-i) \quad (6)$$

$\hat{x}(n)$ คือค่าประมาณของ $x(n)$ M คืออันดับของแบบจำลอง และ a_i คือค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลอง ผลต่างของ $x(n)$ และ $\hat{x}(n)$ คือค่าผิดพลาดจากการประมาณเชิงเส้น (linear prediction error, e_n) แสดงดังสมการ (7) (Totarong, 1983)

$$x(n) - \hat{x}(n) = \sum_{i=0}^M a_i x(n-i) = e_n \quad (7)$$

ผลการแปลง z ของสมการ (7) โดยให้ $a_0 = 1$ จะได้ทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของแบบจำลอง AR มีค่าดังสมการ (8) (Totarong, 1983)

$$X(z) = \frac{Z[e_n]}{1 + \sum_{i=1}^M a_i z^{-i}} \quad (8)$$

$Z[e_n]$ หมายถึงผลการแปลง z ของ e_n ค่าความถี่ของ $x(n)$ ประมาณได้จากสเปกตรัมขนาดของ $X(z)$ ซึ่ง $z = e^{j\omega}$ และเพื่อหลีกเลี่ยงกรณีที่ $Z[e_n] = 0$ จึงคำนวณสเปกตรัมขนาดของ $X(z)$ ตามสมการ (9) (Griffiths, 1975)

$$|X(z)| = \frac{1}{\left| 1 + \sum_{i=1}^M a_i z^{-i} \right|} \quad (9)$$

ในการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลอง จะเลือกใช้อัลกอริทึมของเบิร์ก (Burg Algorithm) ซึ่งมีการคำนวณเป็นกระบวนการทำซ้ำโดยลดผลรวมของค่าผิดพลาดจากการประมาณเชิงเส้น (e_n)

ทั้งแบบย้อนกลับ (backward) และแบบไปหน้า (forward) และยังคงให้ค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองเป็นไปตามเลฟวินสัน รีเคอร์ชัน (Levinson recursion) ตั้งแต่อันดับ 1 ถึง M เพื่อให้ตัวกรองความถี่ AR มีเสถียรภาพ (Marple, 1980) สมการ (10) แสดงความสัมพันธ์สำหรับค่านวณ $a_{M,M}$ หรือเรียกว่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (reflection coefficient) โดยที่ $b_{M,k}$ และ $f_{M,k}$ คือค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการประมาณเชิงเส้นแบบย้อนกลับและแบบไปหน้าตามลำดับ และสัญลักษณ์ * หมายถึงค่าสังยุคเชิงซ้อน ในแต่ละรอบที่ M มีค่าเพิ่มขึ้น e_M ซึ่งคำนวณตามสมการ (11) จะมีขนาดลดลงและค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองคำนวณได้จากสมการ (12) (Marple, 1980)

$$a_{M,M} = -\frac{2 \sum_{k=1}^{N-M} b_{M-1,k}^* f_{M-1,k+1}}{\sum_{k=1}^{N-M} [|b_{M-1,k}|^2 + |f_{M-1,k+1}|^2]} \quad (10)$$

$$e_M = e_{M-1} [1 - |a_{M,M}|^2] \quad (11)$$

$$a_{M,k} = a_{M-1,k} + a_{M,M} a_{M-1,M-k}^* \quad (12)$$

เมื่อใช้โปรแกรม MATLAB™ $x(n)$ จะเป็นเสมือนเอาต์พุตของระบบ AR ที่มีอินพุตเป็นสัญญาณรบกวนขาว (white noise) และกำหนดให้อันดับของแบบจำลองเท่ากับ 18 อันดับของแบบจำลองนี้ได้มาจากการทดลองวิเคราะห์เสียงโน้ตทั้งแปดเสียง โดยคำนวณตั้งแต่อันดับ 1, 2, 3, ..., 50 และทดลองสุ่มเลือกค่าอันดับ เช่น 100, 500, 1,000 และ 1,500 เป็นต้น ซึ่งพบว่าอันดับของแบบจำลองที่มากขึ้นและมากเกินไปไม่ได้ให้ผลที่ดีขึ้น การพิจารณาเลือกอันดับ 18 เพราะให้ผลการวิเคราะห์ที่แสดงความเป็นทบเสียงของโดและได้ได้ใกล้เคียงที่สุด องค์ประกอบทางความถี่ของ $x(n)$ แสดงด้วยกราฟของสเปกตรัมขนาดของ $X(z)$

เทคนิค MD (Pielemeier and Wakefield, 1996)

การคำนวณ MD มีพื้นฐานมาจากการ

กระจายวิกเนอร์เทียมเต็มหน่วย (discrete pseudo-Wigner distribution หรือ DPWD) โดยเริ่มจากการคำนวณฟังก์ชันอัตโนมัติสัมพันธ์ขณะหนึ่งแบบเต็มหน่วย (discrete instantaneous autocorrelation function, $R_s(n, \ell)$) ของข้อมูล $s(n)$ แสดงดังสมการ (13)

$$R_s(n, \ell) = s(n + \ell) s^*(n - \ell) \quad (13)$$

สัญลักษณ์ * หมายถึงค่าสังยุคเชิงซ้อนนำ $R_s(n, \ell)$ ผ่านการกรองสัญญาณด้วย $h_{LP}(n)$ จะได้เป็น $R_{s,t}(n, \ell)$ มีค่าตามสมการ (14)

$$R_{s,t}(n, \ell) = \sum_{p=-P}^P R_s(n-p, \ell) h_{LP}(p) \quad (14)$$

โดยสัญลักษณ์ t หมายถึงการกรองสัญญาณทางเวลาและ P มีค่าเท่ากับ $2N$ ตัวแปร ℓ ในสมการ (13) และ (14) มีค่าอยู่ในช่วง $0 \leq \ell \leq L$ เนื่องจาก $R_s(n, \ell)$ และ $R_{s,t}(n, \ell)$ มีลักษณะสมมาตร จึงคำนวณแต่เพียงด้านบวกเท่านั้น ℓ คือค่าล่าหลัง (lag) และมีค่ามากที่สุดเท่ากับ L จากนั้นนำ $R_{s,t}(n, \ell)$ ผ่านการกรองสัญญาณทางความถี่ด้วย $g_{LP}(n)$ และทำการแปลงฟูริเยร์เต็มหน่วย ได้เป็นดังสมการ (15)

$$M_s(n, k) = \sum_{\ell=-L}^L R_{s,t}(n, \ell) g_{LP}(\ell) e^{\frac{-j2\pi k \ell}{2L}} \quad (15)$$

ซึ่งแสดงรูปแบบเต็มหน่วยของ MD ($M_s(n, k)$) ของข้อมูล $s(n)$ k มีค่าในช่วง $0 \leq k \leq L/2$ ตัวแปร n ในสมการ (13) คือจำนวนข้อมูลทั้งหมด ส่วนในสมการ (14) และ (15) จะคำนวณเฉพาะ n เพียงบางค่าที่ตรงตำแหน่งการซัดตัวอย่างข้อมูล $s(n)$ ด้วยความถี่การซัดตัวอย่างเป็นสองเท่าของ $\Delta\omega_{\min}$ (คือผลต่างทางความถี่ที่น้อยที่สุดระหว่างสององค์ประกอบใด ๆ ในสัญญาณ หน่วยเฮิรตซ์) $h_{LP}(n)$ และ $g_{LP}(n)$ คือฟังก์ชันหน้าต่างแบบแฮมมิง (Hamming) ซึ่งมีความยาวในช่วง $-N$ ถึง N และ $-R$ ถึง R ตามลำดับ โดยที่ R เท่ากับ $L/2$ ค่าคงที่ต่าง ๆ ในการคำนวณได้แก่ $L = 8,192$, $\Delta\omega_{\min} = 183.11$ rad/sec, $N = 1,365$ และ n เพิ่มขึ้นละ 4 จำนวน การเลือกค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ

ดังกล่าว พิจารณาดังนี้ กล่าวคือ เลือก L เป็นค่ากำลังของสอง ทำให้ใช้อัลกอริทึมการแปลงฟูริเยร์อย่างรวดเร็ว (FFT) จำนวนสมการ (15) ได้ $\Delta\omega_{\min}$ มาจากผลสเปกโตรแกรมของ $s(n)$ N เกิดจากผลหารระหว่างอัตราการซีกตัวอย่างของ $s(n)$ กับ $\Delta\omega_{\min}$ แล้วปัดให้เป็นจำนวนเต็ม และเลือก n ตรงตำแหน่ง ซึ่งมีความถี่การซีกตัวอย่าง $s(n)$ มากกว่าสองเท่าของ $\Delta\omega_{\min}$ เพื่อจะได้รายละเอียดของผลการวิเคราะห์ทางเวลามากขึ้น $M_s(n,k)$ ในสมการ (15) เป็นฟังก์ชันสองตัวแปร มีค่าทั้งในโดเมนเวลา n และโดเมนความถี่ k องค์ประกอบทางความถี่ของ $s(n)$ ที่แปรตามเวลาแสดงด้วยภาพสามมิติ ซึ่งขนาดของ $M_s(n,k)$ จะอยู่ในทิศทาง z บนระนาบ $x-y$ และบริเวณที่สเปกตรัมขนาดของ $M_s(n,k)$ มีค่าสูงสุดจะแสดงถึงฟอร์แมนทซ์ของเสียงดนตรี

ผลการทดลองและวิจารณ์

เมื่อทำการประมวลผลสัญญาณเสียงขลุ่ยเพียงออด้วยเทคนิคต่าง ๆ ที่ได้นำเสนอไปแล้ว ผลการดำเนินงานบางส่วนอาจนำมาแสดงได้ดังรูปที่ 3, 4, 5 และ 6 ตามลำดับ ทั้งสี่รูปแสดงฟอร์แมนทซ์ของเสียง โด มี ซอล และ โด' อย่างชัดเจน ฟอร์แมนทซ์ของเสียงดนตรีไทยในช่วงหนึ่งทบเสียงของขลุ่ยเพียงออได้รับการนำไปสรุปรวมไว้ในตารางที่ 2 ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์เสียงจริงดังตารางที่ 2 นี้

เป็นเครื่องยืนยันว่าค่าความถี่ของเสียงดนตรีไทยดังตารางที่ 1 คลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริงมาก และยังสามารถสังเกตได้ว่าเสียงดนตรีไทยนั้นต่ำกว่าเสียงดนตรีสากล วิธี DFT และ STFT ให้ค่าความถี่ฟอร์แมนทซ์แตกต่างกันเพียงบางเสียงเท่านั้นซึ่งไม่มากนักและมีความถี่เพิ่มขึ้นจากเสียงต่ำไปยังเสียงสูงเป็นลำดับ เพียงแต่ว่าผลการวิเคราะห์จากสองวิธีนี้ให้ความถี่บางโน้ตเป็นเลขลงตัว ได้แก่ 500, 600 และ 900 เฮิรตซ์ นับว่าเป็นสิ่งผิดปกติทางธรรมชาติของดนตรีไทยเป็นอย่างยิ่ง เพราะการตั้งเสียงเครื่องดนตรีไทยเมื่อผลิต ไม่มีการใช้เทคโนโลยีเครื่องมือวัดละเอียดอย่างเช่นการผลิตเครื่องดนตรีของตะวันตก หากแต่ดนตรีไทยใช้ธรรมชาติของการฟังเทียบเครื่องดนตรีสองชิ้นด้วยกันและปรับตั้งเสียง ผลจากวิธี AR นั้น ค่าความถี่ของเสียงมี (657.14 เฮิรตซ์) สูงกว่าเสียงฟา (650 เฮิรตซ์) ซึ่งไม่เป็นไปตามการไล่ระดับเสียง วิธี AR และอัลกอริทึมตลอดจนพารามิเตอร์ที่เลือกใช้ จึงยังไม่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์เสียงดนตรีไทย วิธี MD จึงให้ผลการวิเคราะห์ที่น่าเชื่อถือมากกว่า เพราะฟอร์แมนทซ์ที่ได้มีการไล่เรียงไปตามลำดับค่าสูงของเสียง และหนึ่งทบเสียงก็ปรากฏความถี่ใกล้เคียงสองเท่าต่อกัน

จากการที่วิธี MD ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด จึงได้คำนวณอัตราส่วนความถี่ (frequency ratio) และระยะพิตช์ (pitch interval) ของผลดังกล่าว แสดงข้อมูลที่คำนวณได้เปรียบเทียบไว้ในตารางที่ 3

Table 2. Formants of the Thai notes played by a middle pitch Thai flute.

One octave of Thai musical notes	Frequency (Hz)			
	DFT	STFT	AR	MD
do	457.14	457.14	442.86	465.39
rae	514.29	500.00	557.14	511.17
mee	557.14	557.14	657.14	556.95
fa	600.00	600.00	650.00	602.72
sol	657.14	657.14	700.00	663.76
la	714.29	714.29	785.71	717.16
tee	814.29	814.29	864.29	816.35
do'	900.00	900.00	914.29	892.64

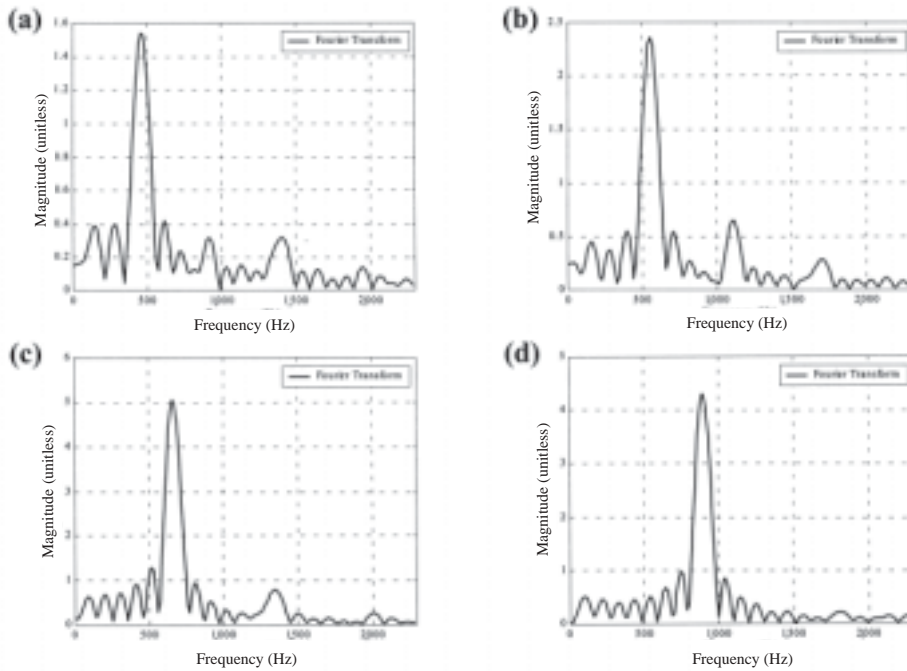


Figure 3. Formants of the notes (a) “do” (b) “mee” (c) “sol” (d) “do” obtained from DFT (original sound played by a middle pitch Thai flute).

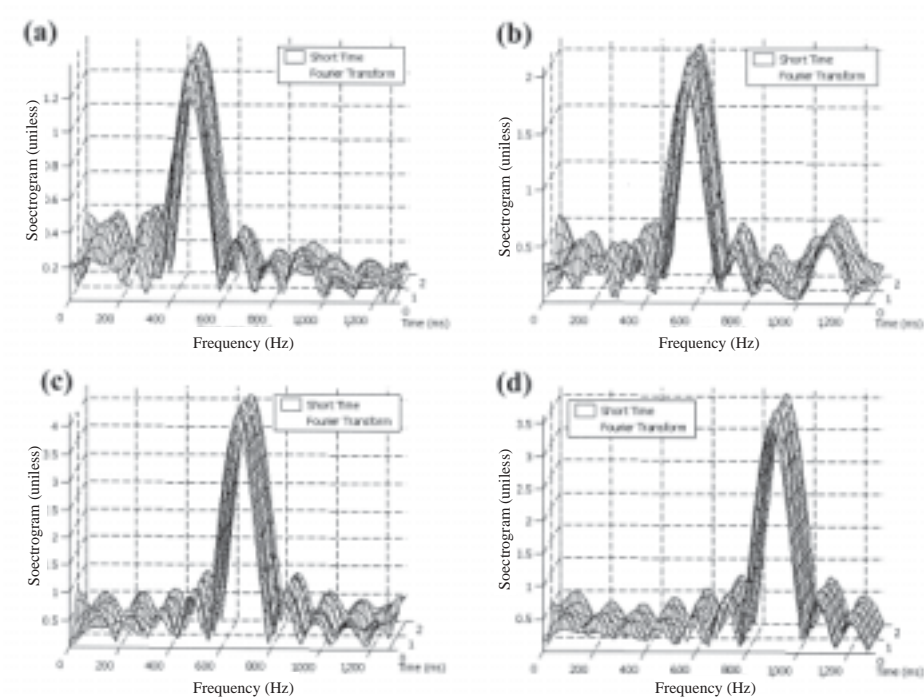


Figure 4. Formants of the notes (a) “do” (b) “mee” (c) “sol” (d) “do” obtained from STFT (original sound played by a middle pitch Thai flute).

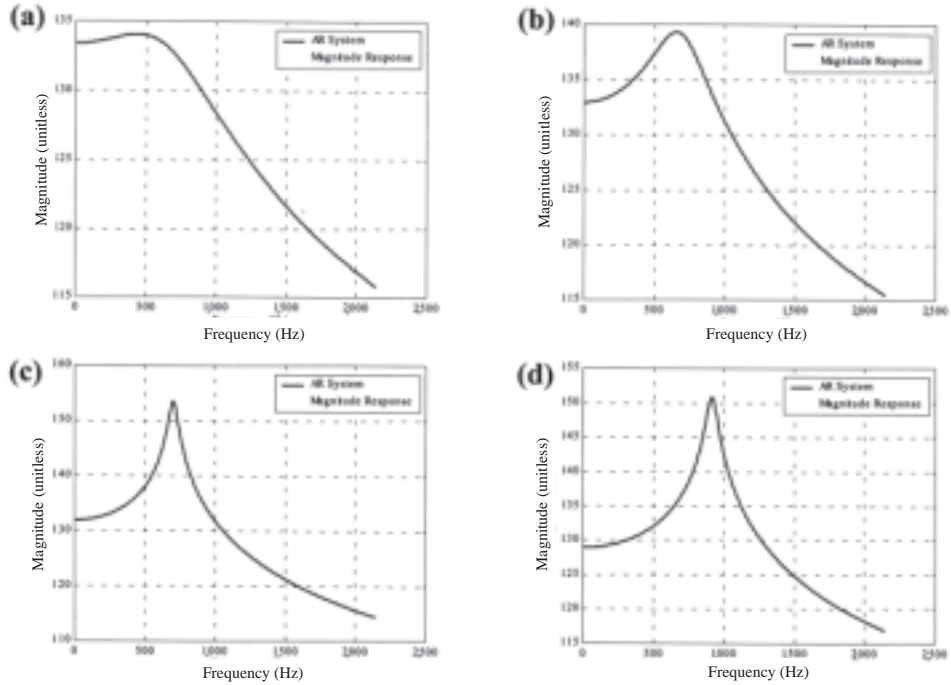


Figure 5. Formants of the notes (a) “do” (b) “mee” (c) “sol” (d) “do” obtained from AR (original sound played by a middle pitch Thai flute).

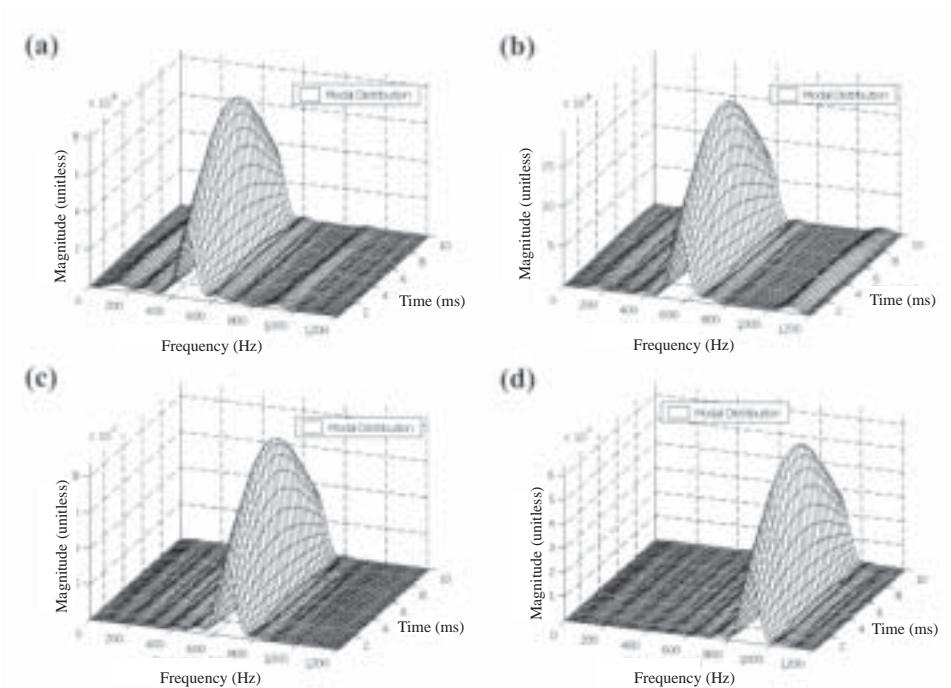


Figure 6. Formants of the notes (a) “do” (b) “mee” (c) “sol” (d) “do” obtained from MD (original sound played by a middle pitch Thai flute).

อัตราส่วนความถี่ที่กล่าวถึงนี้คำนวณได้โดยนำค่าความถี่ของเสียงที่คิดกันมาหารกัน เช่น มี : เร เป็นต้น จากนั้นคำนวณระยะพิชช ตามสมการ (16)

$$\text{ระยะพิชช} = K \log_2 \frac{f_1}{f_2} \quad (16)$$

ระยะพิชชจะมีหน่วยเป็นเซ็นต์ (cent) เมื่อ $K = 1,200$ (Wood, 1975) f_1 และ f_2 คือความถี่ที่จะนำมาคำนวณเปรียบเทียบกัน มีหน่วยเฮิรตซ์ (Hz) ซึ่ง f_1 / f_2 ในที่นี้ก็คือค่าอัตราส่วนความถี่นั่นเอง ระยะพิชชเมื่อเสียงโดเทียบกับเสียงโด (หรือเมื่อครบนหนึ่งทบเสียง) ในทางทฤษฎีจะเท่ากับ 1,200 เซนต์พอดี

ข้อมูลในตารางที่ 3 แสดงอัตราส่วนความถี่และระยะพิชชที่คำนวณได้จากข้อมูลฟอร์แมนที่เป็นผลลัพธ์ของวิธี MD อัตราส่วนความถี่มีค่าเท่า ๆ กัน ประมาณ 1.10 มีเพียงอัตราส่วนของ ที : ลา ซึ่งเท่ากับ 1.14 และระยะพิชชมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 161.08 เซนต์ อย่างไรก็ตาม ระยะพิชชที่คำนวณได้ปรากฏอาการแกว่งจนไม่อาจยอมรับในสมมติฐานค่าระยะพิชชคงที่ได้ (Morton, 1976) นอกจากนี้ระยะพิชชเมื่อครบนหนึ่งทบเสียงมีค่าเท่ากับ 1,127.57 เซนต์ ซึ่งรูปที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าระยะพิชชที่คำนวณจากผลของวิธี MD และค่าตามสมมติฐานของ Morton ที่กำหนดให้เท่ากับ 171.43 เซนต์ เมื่อพิจารณาอัตราส่วนความถี่และระยะพิชชของเสียงขลุ่ยเพียงออเทียบกับดนตรีสากล ซึ่งตารางที่ 4

แสดงค่าความถี่ของเสียงเปียโน ในช่วงที่ใกล้เคียงกับความถี่ของขลุ่ยเพียงออที่วิเคราะห์ได้ จะสังเกตเห็นได้ว่าระยะพิชชเมื่อเสียงโดเทียบกับเสียงโด มีค่าเท่ากับ 1,200 เซนต์พอดี ที่เป็นเช่นนี้เพราะเทคโนโลยีการสร้างเครื่องดนตรีสากลในปัจจุบันมีการใช้เครื่องมือวัดละเอียดช่วยในการปรับตั้งเสียง และยังแสดงให้เห็นว่าดนตรีสากลแบ่งออกเป็นห้าเสียงเต็ม และสองครึ่งเสียงชัดเจน (หมายถึงอัตราส่วนเท่ากับ 1.12 และ 1.06 ระยะพิชชเท่ากับ 200 เซนต์ และ 100 เซนต์ ตามลำดับ)

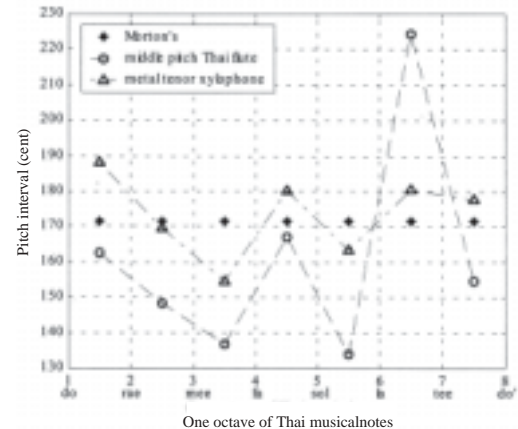


Figure 7. Pitch intervals analyzed by MD (original sound played by a middle pitch Thai flute and a metal tenor xylophone).

Table 3. Frequency ratios and pitch intervals by MD (middle pitch Thai flute).

One octave of Thai musical notes	Frequency (Hz)	Frequency ratio (unitless)	Pitch interval (cent)
do	465.39	1.10	162.44
rae	511.17	1.09	148.49
mee	556.95	1.08	136.73
fa	602.72	1.10	167.01
sol	663.76	1.08	133.96
la	717.16	1.14	224.27
tee	816.35	1.09	154.67
do'	892.64		

สำหรับผลอีกส่วนหนึ่งเป็นของกรณีการวิเคราะห์เสียงระนาดเอกเหล็ก การดำเนินงานกระทำในลักษณะเดียวกันกับกรณีการดำเนินงานวิเคราะห์เสียงขลุ่ยเพียงออ ตั้งแต่การบันทึกเสียง นำข้อมูลมาผ่านการกรองสัญญาณ ตลอดจนเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ ผลการวิเคราะห์ในขั้นต้นปรากฏลักษณะที่คล้ายคลึงกันกับกรณีขลุ่ยเพียงออ จึงนำเสนอผลที่ได้จากวิธี MD และผลการคำนวณที่สัมพันธ์กันดังแสดงไว้ในตารางที่ 5 จะสังเกตเห็นว่าอัตราส่วนความถี่มีค่าเท่า ๆ กันอยู่ที่ประมาณ 1.11 ระยะเวลาของเสียงก็ปรากฏอาการแกว่งชัดเจน ระยะเวลาพิตช์เมื่อเสียงโด่เทียบกับเสียงโดมีค่าเท่ากับ 1,214.15 เซนส์ และจากข้อมูลในตารางที่ 5 ยังพบว่า ค่าเฉลี่ยของระยะเวลาพิตช์เท่ากับ 173.45 เซนส์ อย่างไรก็ตาม ผลจากข้อมูลการทดลองที่นำมาคำนวณระยะเวลาพิตช์ดังที่แสดงด้วยกราฟในรูปที่ 7 บ่งชี้ว่าระยะเวลาพิตช์

ของเสียงโน้ตดนตรีไทย มีแนวโน้มลดลงในช่วงของเสียงโดถึงฟา ต่อจากนั้นแล้วระยะเวลาพิตช์มีอาการแกว่งขึ้นลงไปจนเสียงโด่ นอกจากนั้น การที่ความถี่ของเสียงระนาดเอกเหล็กไม่เท่ากันพอดีกับค่าความถี่ของเสียงขลุ่ยเพียงออ เพียงแต่มีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องมาจากการดำเนินงานในกระบวนการผลิตส่วนหนึ่ง และความถี่เสียงที่ต่างกันเพียงเล็กน้อยเช่นนี้ ก็เกินความสามารถในการได้ยินของมนุษย์ที่จะแยกแยะความแตกต่างได้ และนอกจากนั้น เครื่องดนตรีทั้งสองยังมีฐานกำเนิดเสียงที่ต่างกัน กล่าวคือเสียงระนาดเอกเหล็กเกิดจากการกระทบกันของของแข็ง คือไม้ระนาดกับลูกกระนาดที่เป็นโลหะ ทำให้เสียงที่เกิดขึ้นมีความเข้มข้นสม่ำเสมอ มากกว่าเสียงขลุ่ยที่เกิดจากการสั่นของลำอากาศในกระบอกขลุ่ย อากาศนั้นมีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิและความชื้นได้ง่าย

Table 4. Frequency ratios and pitch intervals (piano).

One octave of Thai musical notes	Frequency (Hz)	Frequency ratio (unitless)	Pitch interval (cent)
do	523.25		
rae	587.33	1.12	200
mee	659.26	1.12	200
fa	698.46	1.06	100
sol	783.99	1.12	200
la	880.00	1.12	200
tee	987.77	1.12	200
do'	1,046.50	1.06	100

Table 5. Frequency ratios and pitch intervals by MD (metal tenor xylophone).

One octave of Thai musical notes	Frequency (Hz)	Frequency ratio (unitless)	Pitch interval (cent)
do	465.39		
rae	518.80	1.11	188.09
mee	572.20	1.10	169.61
fa	625.61	1.09	154.49
sol	694.27	1.11	180.28
la	762.94	1.10	163.29
tee	846.86	1.11	180.66
do'	938.42	1.11	177.73

ความถี่ของเสียงขลุ่ยเพียงออจึงอาจต่างไปจาก ความถี่ของเสียงระนาดเอกเหล็กอยู่บ้างแต่ไม่มากนัก และส่งผลให้ระยะพิตช์หนึ่งทบเสียงของขลุ่ยเพียงออ มีค่าต่างไปจาก 1,200 เซนต้ออยู่บ้าง

สรุป

การดำเนินงานวิเคราะห์เสียงดนตรีไทยในทบเสียงเพียงออ ด้วยเทคนิคประมวลผลสัญญาณดิจิทัลนั้น พบว่า วิธี MD (modal distribution) ให้ผลดีที่สุด ทบเสียงเพียงออของไทยมีความถี่ในย่าน 465-940 เฮิรตซ์ ซึ่งต่ำกว่าเสียงดนตรีสากลในทบเสียงที่ใกล้เคียงกัน (523-1,046 เฮิรตซ์) เสียงดนตรีไทยมีเอกลักษณ์ของความเป็นธรรมชาติอย่างมากรุนั้นคือ ความถี่ของโน้ตแต่ละเสียงมิได้แสดงด้วยเลขจำนวนเต็มลงตัว เพราะการปรับตั้งเสียงเครื่องดนตรีไทยใช้ทักษะการได้ยินและทักษะการปรับแต่งเสียงของนายช่างผู้ผลิต มิได้ใช้เครื่องมือวัดละเอียดใด ๆ เข้าช่วย ระยะพิตช์ในทบเสียงเพียงอ้อมีค่าในย่าน 130-230 เซนต โดยประมาณ ช่วงเสียงโดถึงฟาระยะพิตช์มีแนวโน้มลดลง จากนั้นมีอาการแกว่งในช่วงเสียงซอลถึงโด เสียงดนตรีไทยจึงมิได้มีระยะพิตช์คงที่เหมือนดังสมมติฐานดั้งเดิม

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมูลนิธิ โทเร เพื่อการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ ประเทศไทยที่ได้สนับสนุนทุนวิจัยแก่โครงการวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- บริษัท ริดเดอร์ส ไดเจสท์ (ประเทศไทย) จำกัด. (2541). พื้นฐานร่างกายมนุษย์. ครั้งที่ 1. อมรินทร์ พรินตติ้ง, กรุงเทพฯ, หน้า 206-211.
- มนตรี ตราโมท. (2540). ครุวิจัยทางศาสตร์ไทย: ภาควิชาการ. ครั้งที่ 2. มติชน, กรุงเทพฯ, หน้า 30-41.
- สรวุฒิ สุจิตจร. (2545). การวิเคราะห์เสียงดนตรีไทย. ครั้งที่ 1. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี,

นครราชสีมา, หน้า 5-47.

- สันตต์ ตัฒนันท. (2542). บันทึกเพลงไทยเป็นโน้ตสากลอย่างไร. ใน: ครูดนตรีของแผ่นดิน, สมชาย รัสมิ. ครั้งที่ 1. สถาบันราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา, กรุงเทพฯ, หน้า 6-18.
- อุทิศ นาคสวัสดิ์. (2514). ทฤษฎีและการปฏิบัติดนตรีไทย. จัดพิมพ์ในการฉลองปีการศึกษา ระหว่างชาติ 2513. โรงพิมพ์จุฬารัฐ, กรุงเทพฯ, หน้า 6-11.
- Alten, S.R. (1999). *Audio in Media*. 5th ed. Wadsworth, USA, p. 12-22.
- Cannon, R.H. (1967). *Dynamics of Physical Systems*. 1st ed. McGraw-Hill, New York, p. 475-480.
- Cohen, L. (1989). Time-frequency distribution: A review. *Proceedings of the IEEE*, 77(7): 941-981.
- Griffiths, L.J. (1975). Rapid measurement of digital instantaneous frequency. *IEEE trans. on acoustics, speech and signal processing*, ASSP-23(2):p. 207-222.
- Marple, L. (1980). A new autoregressive spectrum analysis algorithm. *IEEE trans. on acoustics, speech and signal processing*, ASSP-23(4):441-454.
- Mitra, S.K. (2001). *Digital Signal Processing: A Computer-based Approach*. 2nd ed. McGraw-Hill/Irwin, Boston, p. 764-771.
- Morton, D. (1976). *The Traditional Music of Thailand*. 1st ed. University of California Press, USA, p. 232.
- Oppenheim, A.V., and Schaffer, R.W. (1989). *Discrete-time signal processing*. International ed. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., p. 514-560.
- Totrong, P. (1983). Frequency tracking and its application in speech analysis [M.S. thesis]. Department of Electrical and Computer Engineering, The College of Engineering and Technology, Ohio University, USA, p. 9-14.
- 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):2,382-2,396.

- Pielemeier, W.J., Wakefield, G.H., and Simoni, M.H. (1996). Time-frequency analysis of musical signals. *Proceedings of the IEEE*, 84(9):1,216-1,229.
- Wood, A. (1975). *The Physics of Music*. 7th ed. John Wiley & Son, USA, p. 53.