

รายงานฉบับสมบูรณ์

การวิเคราะห์และสังเคราะห์เสียงเครื่องดนตรีไทยโดยใช้กรรม
วิธีจำลองสภาพทางกายภาพ กรณีศึกษา: พิณพื้นบ้าน

**Acoustical Analysis and Synthesis of Traditional Thai
Music Instrument using Physical Modeling
Technique: A Case Study *Pin***

รหัสโครงการ

F-31-203-12-05

กิตติพงษ์ มีสวัสดิ์ และ ภาคภูมิ โชคชัยรุ่งโรจน์

22 กุมภาพันธ์ 2551

รายงานฉบับสมบูรณ์

การวิเคราะห์และสังเคราะห์เสียงเครื่องดนตรีไทยโดยใช้กรรมวิธีจำลอง
สภาพทางกายภาพ กรณีศึกษา: พิณพื้นบ้าน

**Acoustical Analysis and Synthesis of Traditional Thai Music
Instrument using Physical Modeling Technique: A Case Study**
Pin

รหัสโครงการ

F-31-203-12-05

รายนามคณะผู้วิจัย

1. นายกิตติพงษ์ มีสวัสดิ์
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
2. นายภาคภูมิ โชคชัยรุ่งโรจน์
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

วันที่เริ่มต้นโครงการ 1 พฤษภาคม 2548

วันที่สิ้นสุดโครงการ 30 ตุลาคม 2549

ตรวจสอบการพิมพ์แล้ว :

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก ศูนย์ประสานงานนักเรียนทุนรัฐบาล
ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และ
สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

ปีงบประมาณที่ได้รับทุน ปีงบประมาณ 2548

บทคัดย่อ

การนำวิทยาศาสตร์มาใช้เป็นเครื่องมือในการศึกษาดนตรีไทยสามารถช่วยให้นักดนตรีไทยและช่างผู้ผลิตดนตรีไทยเข้าใจดนตรีไทยมากขึ้น เอื้ออำนวยให้บุคลากรในวงการดนตรีไทยสร้างสรรค์ผลงานใหม่ ๆ ได้ แนวทางหนึ่งที่ใช้วิทยาศาสตร์ศึกษาดนตรีไทยก็คือการวิเคราะห์และสังเคราะห์เสียงดนตรีไทย

รายงานฉบับนี้นำเสนอการวิเคราะห์และการสังเคราะห์เสียงเครื่องดนตรีไทยพื้นบ้านโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยเครื่องดนตรีที่เลือกมาเป็นกรณีศึกษาในที่นี้คือ *พิณพื้นบ้าน* การวิเคราะห์สัญญาณเสียงพิณพื้นบ้านทำได้โดยใช้กระบวนการวิเคราะห์สัญญาณรายคาบ - ฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัล (Power Spectral Density Function) และเลือกใช้พารามิเตอร์ที่สอดคล้องกับระบบการรับรู้เสียงของมนุษย์ การสังเคราะห์สัญญาณเสียงพิณพื้นบ้านทำได้โดยการจำลองสภาพทางกายภาพของส่วนประกอบของเครื่องดนตรีจากสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial Differential Equation) และแปลงรูปสมการนี้ให้อยู่ในรูปไม่ต่อเนื่อง (Discrete) โดยใช้กรรมวิธีผลต่างสืบเนื่องในแกนเวลา (Finite Difference Time Domain) ส่วนประกอบที่ยังมีค่าจำลองสภาพทางกายภาพในการวิจัยนี้จะใช้แบบจำลองสัญญาณ (Signal Analytical Model) แบบจำลองสัญญาณที่ใช้ในการวิจัยนี้มี 2 แบบด้วยกันแบบที่แสดงผลตอบสนองอิมพัลส์ (Impulse Response) โดยตรง และแบบจำลองที่เป็นตัวกรอง IIR ที่มีต้นแบบจากผลตอบสนองความถี่ที่ต้องการ

ผลการวิเคราะห์สัญญาณเสียงพิณพื้นบ้านพบว่าระบบขึ้นเสียงของพิณพื้นบ้านแตกต่างจากระบบขึ้นเสียงของดนตรีไทย แต่ใกล้เคียงกับระบบขึ้นเสียงของดนตรีสากล ผลการประเมินเสียงพิณพื้นบ้านที่สังเคราะห์ได้พบว่า *มีเสียง* แตกต่างจากเสียงต้นฉบับแต่ยังคงคุณลักษณะต่าง ๆ ของเสียงพิณเอาไว้ ความแตกต่างนี้อาจจะมาจากการเลือกใช้ค่าความต้านทานกล ณหอมรองสายที่ไม่แปรผันกับความถี่เสียง

ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์เสียงสามารถช่วยให้นักดนตรีตั้งเสียงของพิณพื้นบ้านให้ได้ระดับที่ดีที่สุดโดยอาศัยข้อมูลด้านการวิเคราะห์สัญญาณรายคาบของสายพิณและของเต้าพิณ กระบวนการสังเคราะห์เสียงสามารถช่วยให้ช่างผู้ผลิตเครื่องดนตรีทดลองกำหนดระยะระหว่างขึ้นเสียงบนคอพิณเพื่อทดลองฟังเสียงก่อนฝังขึ้นเสียงลงไปบนคอพิณจริงอย่างถาวรได้ ช่วยลดความสูญเสียทรัพยากรและเพิ่มคุณภาพของพิณที่ผลิตอีกด้วย

คำสำคัญ ดนตรีไทย การสังเคราะห์เสียง การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล กระบวนการเชิงตัวเลข

Abstract

Science is a powerful tool for musicians and instrument makers. Applying Science to the traditional Thai music will allow musicians and instrument makers to create new kind of music and new kind of instrument. Approaches of using Science in the field of music are analysis and synthesis of musical sound.

This report presents the traditional Thai music analysis and synthesis methods. A lute-like plucked string instrument, *Pin*, was chosen to be investigated. *Pin* sound analysis was done by using a periodic signal analysis, Power Spectral Density Function. Analysing parameters such as window function and window length were chosen based on a psychoacoustic model of human hearing mechanism. Synthesising *Pin* sound was based on physical model simulation. The physical model of *Pin* was constructed from Partial Differential Equation (PDE) that describes motion of the *Pin* strings. The simulation of this PDE was done by applying numerical methods to the PDE. This method is called Finite Different Time Domain method. Parts of the *Pin* that were not simulated, were modeled by digital filters. There were 2 filters to be compared. The first filter was an FIR filter constructed directly from *Pin* resonator impulse response. The second filter was an IIR filter constructed from *Pin* resonator frequency response prototype.

The analysis result shows that the *Pin* scale differs from traditional Thai music scale. It is rather close to the western music scale. The synthesized *Pin* sound sounds like a *Pin* sound but it definitely sounds differently from the measured. This might be because improper selected mechanical resistance in the physical model.

The obtained information would help musicians to fine tune his/her *Pin* to its best configuration, i.e. tune the strings to the bandpass region of *Pin* radiator. Physical model synthesizer would aid *Pin* maker to reduce his/her trial-and-error process in finding a new *Pin* fret position if he/she would like to develop a new *Pin* scale.

Keywords Traditional Thai Music, Sound Synthesis, Digital Signal Processing, Numerical Methods

สารบัญ

กิตติกรรมประกาศ	v
บทคัดย่อ	vii
Abstract	ix
1 บทนำ	1
1.1 วิทยาศาสตร์กับดนตรีไทย	1
1.2 แบบจำลองทางกายภาพกับดนตรีและเครื่องดนตรี	2
1.3 พินพื้นบ้าน: กรณีศึกษา	3
1.4 วัตถุประสงค์และขอบเขตของงาน	3
2 พินและแบบจำลองทางกายภาพของพิน	5
2.1 ลักษณะโดยทั่วไปของพิน	5
2.2 แบบจำลองทางกายภาพของพินพื้นบ้าน	7
3 กรรมวิธีการทดลอง	9
3.1 การวัดเสียงพินพื้นบ้าน	9
3.2 การวิเคราะห์สัญญาณเสียงพิน	10
3.2.1 การวิเคราะห์ผลตอบสนองอิมพัลส์ของเต้าพิน	11
3.2.2 การวิเคราะห์ผลตอบสนองอิมพัลส์ของสายพินเปล่า	14
3.3 การสังเคราะห์เสียงพินพื้นบ้าน	17
3.3.1 การสังเคราะห์เสียงพินสายเปล่า	17
3.3.2 การสังเคราะห์เสียงพินทั้งระบบ	21
3.4 การเปรียบเทียบผลการสังเคราะห์กับเสียงต้นฉบับ	22
3.4.1 การเปรียบเทียบเชิงปริมาณ	22
3.4.2 การเปรียบเทียบเชิงคุณภาพ	22
4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	27
4.1 ผลการวิเคราะห์เสียงพินธรรมชาติที่วัดได้	27
4.1.1 ผลการวิเคราะห์ผลตอบสนองอิมพัลส์ของเต้าพิน	27
4.1.2 ผลการวิเคราะห์ความถี่ฟอร์แมนธ์ของสายพินเปล่า	27
4.1.3 ผลการวัดค่าเวลารีเวอร์เบอเรนซ์ของสายพิน	29

4.2	ผลการสังเคราะห์เสียงพิน	29
4.2.1	ความถี่ฟอร์แมนต์ของสายพินเปล่า	30
4.2.2	ค่าเวลารีเวอร์เบอเรชั่นของสายพิน	30
4.3	ผลการสังเคราะห์เสียงพินทั้งระบบ	31
4.4	ผลการเปรียบเทียบเสียงพินธรรมชาติกับเสียงพินสังเคราะห์	32
4.4.1	ผลการเปรียบเทียบเชิงปริมาณ	32
4.4.2	ผลการเปรียบเทียบเชิงคุณภาพ	33
4.5	สรุป	36
5	สรุป	41
	ภาคผนวก	45
ก	สัญญาณเสียงพินธรรมชาติ	47
ข	ฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัลของเสียงพินธรรมชาติสายเปล่า	57
ค	ฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัลของเสียงพินสังเคราะห์สายเปล่า	67
ง	สัญญาณเสียงพินสังเคราะห์ I	77
จ	สัญญาณเสียงพินสังเคราะห์ II	87
ฉ	เนื้อหาในแผ่นสำรองข้อมูล CDROM	97
ช	ประวัติคณะผู้วิจัย	99
	บรรณานุกรม	101

สารบัญรูป

2.1	ส่วนต่าง ๆ ของพิณพื้นบ้าน	6
2.2	กระบวนการกำเนิดเสียงของพิณ	8
3.1	ระดับสัญญาณรบกวนภายในห้องที่ใช้ทำการวัดเสียงสัญญาณ	10
3.2	ไดอะแกรมกระบวนการวัดสัญญาณเสียงพิณ	11
3.3	a) – b) สัญญาณเสียง m ที่บันทึกได้จากการติดพิณเสียงโดคทั้ง 2 ครั้ง . .	12
3.4	สัญญาณที่บันทึกได้ทั้ง 14 สัญญาณ จากการใช้ค้อนขนาดเล็กเคาะเบา ๆ ที่ หมอนรองสายเพื่อวัดผลตอบสนองอิมพัลส์ของเต้าพิณ	13
3.5	แนวคิดในการประมาณหาผลตอบสนองอิมพัลส์ของสายพิณเปล่าในรูปของ แรง (Force Impulse Response) โดยการอิควไลซ์ฟังก์ชันส่งผ่านของระบบ พิณ ($P(z)$) ด้วยฟังก์ชันส่งผ่านของเต้าพิณ ($R(z)$)	14
3.6	ผลตอบสนองความถี่ของตัวกรองอิควไลซ์ของเต้าพิณ ($R^{-1}(z)$)	15
3.7	a) กำลัง ณ ขณะใดขณะหนึ่ง (Instantaneous Power) b) ฟังก์ชันกำลัง ณ ขณะใดขณะหนึ่งที่ทำการกลับเวลาแล้ว c) ผลการอินทิกรัลฟังก์ชันในรูป b) และ d) ส่วนกลับเวลาของฟังก์ชันพลังงานสะสมจากรูป c) ซึ่งก็คือฟังก์ชัน พลังงานที่เหลืออยู่ในสายพิณ ณ ขณะเวลาใด ๆ	16
3.8	แนวคิดการวัดค่าเวลารีเวอร์เบอเรชั่นโดยใช้เกณฑ์ 15 dB T คือเวลาที่ใช้ไป เพื่อให้ระดับพลังงานลดลง 15 dB ค่าเวลารีเวอร์เบอเรชั่น คือ $T_{15} = 4T$.	17
3.9	พล็อตแสดงการคำนวณ $y[x_i, t_n]$ ไต ๆ i ในพล็อตชาตร์หมายถึง x_i และ n หมายถึง t_n	20
3.10	a) ผลตอบสนองอิมพัลส์ของเต้าพิณที่ได้จากการวัด b) ผลตอบสนองความ ถี่ของ a)	22
3.11	a) ผลตอบสนองอิมพัลส์ของตัวกรอง IIR อันดับที่ 64 ที่ออกแบบโดย ใช้กรรมวิธีบูล-วอล์กเกอร์ b) ผลตอบสนองความถี่ของตัวกรองดังกล่าว . .	23
3.12	กระบวนการสังเคราะห์เสียงพิณทั้งระบบ Rasonator Filter ในรูปหมายถึง ฟังก์ชันส่งผ่านของเต้าพิณ	23
3.13	กระบวนการทดลองโดยการฟัง	24
3.14	ส่วนติดต่อกับผู้ใช้ของโปรแกรมที่รับคำตอบจากผู้ฟังว่าเสียงใดที่แตกต่างจาก เสียงอื่นใน 3 เสียงในชุดทดสอบ	25
3.15	ส่วนติดต่อกับผู้ใช้ของโปรแกรมที่รับคำแนะนำจากผู้ฟังเมื่อได้ยินเสียงทดสอบ แล้ว	26

4.1	ฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัลของผลตอบสนองอิมพัลส์ของเต้าพิน เส้นสี่เหลี่ยมแต่ละเส้นคือฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัลของผลตอบสนอง อิมพัลส์ของเต้าพินของการวัดแต่ละครั้ง เส้นสี่เหลี่ยมคือค่าเฉลี่ยในแกน เดซิเบล	28
4.2	ฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัลของเสียงพินสายเปล่าเสียง ม	29
4.3	ตัวอย่างฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัลของเสียงพินสายเปล่าเสียงเคราะห เสียง ม	33
4.4	ตัวอย่างสัญญาณเสียง ม สังเคราะห์ที่ใช้ตัวกรองผลตอบสนองอิมพัลส์เต้าพิน	35
4.5	ตัวอย่างสัญญาณเสียง ม สังเคราะห์ที่ใช้ตัวกรอง IIR อันดับที่ 64	36
4.6	ผลการเปรียบเทียบเพื่อวัดความแตกต่างระหว่างเสียงธรรมชาติกับเสียงสังเคราะห์ ทั้ง 2 แบบ Synthesized I หมายถึงผลการทดลองของเสียงสังเคราะห์ที่ใช้ ผลตอบสนองอิมพัลส์ของเต้าพิน Synthesized II หมายถึงผลการทดลอง ของเสียงสังเคราะห์ที่ใช้ตัวกรอง IIR	40
4.7	ผลการประเมินระดับความใกล้เคียงเสียงธรรมชาติของเสียงพินทั้ง 3 แบบ คือ เสียงพินธรรมชาติ เสียงพินสังเคราะห์ที่ใช้ตัวกรองผลตอบสนองอิมพัลส์ ของเต้าพิน (Synthesized I) และเสียงพินสังเคราะห์ที่ใช้ตัวกรอง IIR อันดับ ที่ 64 (Synthesized II)	40
ก.1	สัญญาณเสียงพินธรรมชาติเสียง ม และฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัล	48
ก.2	สัญญาณเสียงพินธรรมชาติเสียง ฟ และฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัล	48
ก.3	สัญญาณเสียงพินธรรมชาติเสียง ช และฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัล	49
ก.4	สัญญาณเสียงพินธรรมชาติเสียง ล และฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัล	49
ก.5	สัญญาณเสียงพินธรรมชาติเสียง ท และฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัล	50
ก.6	สัญญาณเสียงพินธรรมชาติเสียง ด และฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัล	50
ก.7	สัญญาณเสียงพินธรรมชาติเสียง ร และฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัล	51
ก.8	สัญญาณเสียงพินธรรมชาติเสียง ม และฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัล	51
ก.9	สัญญาณเสียงพินธรรมชาติเสียง ฟ และฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัล	52
ก.10	สัญญาณเสียงพินธรรมชาติเสียง ช และฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัล	52
ก.11	สัญญาณเสียงพินธรรมชาติเสียง ล และฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัล	53
ก.12	สัญญาณเสียงพินธรรมชาติเสียง ท และฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัล	53
ก.13	สัญญาณเสียงพินธรรมชาติเสียง ด และฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัล	54
ก.14	สัญญาณเสียงพินธรรมชาติเสียง ร และฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัล	54
ก.15	สัญญาณเสียงพินธรรมชาติเสียง ม และฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัล	55
ก.16	สัญญาณเสียงพินธรรมชาติเสียง ฟ และฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัล	55
ก.17	สัญญาณเสียงพินธรรมชาติเสียง ช และฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัล	56
ก.18	สัญญาณเสียงพินธรรมชาติเสียง ล และฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัล	56
ข.1	ฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัลของเสียงพินธรรมชาติสายเปล่าเสียง ม	58
ข.2	ฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัลของเสียงพินธรรมชาติสายเปล่าเสียง ฟ	58
ข.3	ฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัลของเสียงพินธรรมชาติสายเปล่าเสียง ช	59
ข.4	ฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัลของเสียงพินธรรมชาติสายเปล่าเสียง ล	59
ข.5	ฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัลของเสียงพินธรรมชาติสายเปล่าเสียง ท	60

สารบัญตาราง

3.1	ความหนาแน่นมวลต่อหน่วยความยาวของสายพินที่ใช้ในการทดลอง	20
3.2	ตารางชุดเสียงสำหรับการทดสอบด้วยการฟังทั้ง 3 ชุด	24
4.1	ความถี่ฟอร์แมนท์ที่ลำดับที่หนึ่งถึงฟอร์แมนท์ลำดับที่สามของเสียงพินที่ใช้ ทำการทดลอง ตัวเลขในตารางทุกตัวเลขมีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ (Hz)	30
4.2	ระยะพิตช์ระหว่างเสียงพิน 2 ชั้นเสียงที่อยู่ติดกันเปรียบเทียบกับระยะพิตช์ ในอุดมคติ [7] และกับระยะพิตช์ของดนตรีสากล [1]	31
4.3	ตารางแสดงค่าเวลารีเวอร์เบอเรนซ์ของสายพินเปล่าที่วัดได้ ค่าเฉลี่ย และ ความคลาดเคลื่อน	32
4.4	ค่าความต้านทานกลของแต่ละชั้นเสียงที่ประมาณได้และค่าเวลารีเวอร์เบอเรนซ์ ที่ได้จากค่าความต้านทานกลนั้น ๆ	34
4.5	ค่าแรงตึงในสายพินที่คำนวณได้และความถี่ฟอร์แมนท์ที่หนึ่งของแต่ละชั้น เสียงและความคลาดเคลื่อนเมื่อเปรียบเทียบกับเสียงที่ได้จากการวัด	37
4.6	เปรียบเทียบระยะพิตช์ระหว่างชั้นเสียงต่าง ๆ ระหว่างเสียงสังเคราะห์กับเสียง ที่วัดได้	38
4.7	ค่าความผิดพลาดเป็นร้อยละของค่าเวลารีเวอร์เบอเรนซ์ของเสียงพินสังเคราะห์ ทั้ง 2 แบบเทียบกับค่าเวลารีเวอร์เบอเรนซ์เฉลี่ยของเสียงพินธรรมชาติ	39

บทที่ 1

บทนำ

ดนตรีไทยเป็นรากฐานทางวัฒนธรรมหนึ่งของสังคมไทยและเป็นเอกลักษณ์ประการหนึ่งของชาติ วงการดนตรีไทยได้รับการทำนุบำรุงรักษามาช้านานในหลากหลายแง่มุม เช่น การประดิษฐ์เครื่องดนตรีใหม่ ๆ การผสมผสานสำเนียงเพลงจากชนชาติต่าง ๆ เข้ากับดนตรีไทย รวมไปถึงการใช้กระบวนการทางวิทยาศาสตร์ศึกษาดนตรีไทยในด้านต่าง ๆ อีกด้วย

1.1 วิทยาศาสตร์กับดนตรีไทย

การศึกษาดนตรีไทยโดยใช้กระบวนการทางวิทยาศาสตร์นั้นมีมานานแล้ว โดยเอกสารแรกสุดเท่าที่สืบค้นได้คือ Morton [7] ซึ่งได้ทำการศึกษาเครื่องดนตรีไทยและเสียงของเครื่องดนตรีเหล่านั้นไว้หลายชนิด จนได้ข้อสรุปว่าระบบความถี่เสียงของดนตรีไทยนั้นเป็นแบบ 7 เสียงเท่า กล่าวคือหนึ่งทบเสียงแบ่งเป็น 7 ช่วงความถี่เท่า ๆ กันทำให้ทราบวาระบบเสียงดนตรีไทยนั้นแตกต่างจากระบบเสียงดนตรีของยุโรป

การศึกษาดนตรีไทยโดยใช้กระบวนการทางวิทยาศาสตร์ได้อยู่ในความสนใจของนักวิจัยชาวไทยมากขึ้น จนกระทั่งในทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการใช้กระบวนการทางวิทยาศาสตร์เพื่อศึกษาดนตรีไทยอย่างต่อเนื่อง เช่นการศึกษาเพื่อจัดเก็บและสร้างระบบเสียงมาตรฐานสำหรับดนตรีไทยเพื่อการศึกษาดนตรีไทย [10, 16] การค้นหากรรมวิธีการวัดความถี่เสียงดนตรีไทยให้ได้แม่นยำ [15, 14] การสังเคราะห์เสียงชลุ่ยโดยใช้กรรมวิธี Sinusoid plus Noise [13] นอกจากนี้ยังมีการนำวิทยาการใหม่ ๆ เช่นวิทยาการคอมพิวเตอร์มาใช้ในการเรียนการสอนวิชาดนตรีไทยอีกด้วยเช่นโปรแกรมพัฒนาเครื่องดนตรีที่สร้างสรรคโดยมูลนิธิหลวงประดิษฐ์ไพเราะ เป็นต้น

อย่างไรก็ตาม การศึกษาต่าง ๆ ที่กล่าวมาข้างต้นนั้นล้วนเป็นการศึกษาเสียงที่เกิดขึ้นจากเครื่องดนตรี มิใช่การศึกษากระบวนการเกิดเสียงดนตรีของเครื่องดนตรี ทั้งนี้การศึกษาระบบการกำเนิดเสียงของเครื่องดนตรีก็เป็นอีกประเด็นหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากหากเข้าใจกระบวนการกำเนิดเสียงของเครื่องดนตรี และสามารถจำลองกระบวนการนั้น ๆ ได้แล้ว ก็จะสามารถนำความรู้ที่ได้ไปใช้เพื่อพัฒนาการผลิตเครื่องดนตรีไทยและอำนวยความสะดวกให้ช่างผู้ผลิตเครื่องดนตรีได้ หรือแม้กระทั่งอาจนำไปสู่การสร้างสรรคเสียงใหม่ ๆ ที่เครื่องดนตรีไทยปกติไม่สามารถสร้างได้ เปิดโอกาสให้ผู้เรียบเรียงเพลงไทยได้เข้าถึงเสียงเครื่องดนตรีไทยที่หลากหลายยิ่งขึ้นอีกด้วย การศึกษาระบบการเกิดเสียงของเครื่องดนตรีและการจำลอง

กระบวนการดังกล่าวนี้สามารถกระทำได้โดยผ่านแบบจำลองทางกายภาพ (Physical Model) ของเครื่องดนตรี

1.2 แบบจำลองทางกายภาพกับดนตรีและเครื่องดนตรี

แบบจำลองทางกายภาพ (Physical Model) ในที่นี้หมายถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) หรือ สมการ หรือ ชุดสมการคณิตศาสตร์ที่สามารถอธิบายปรากฏการณ์ทางกายภาพของระบบ โดยสมการหรือชุดสมการดังกล่าวสร้างขึ้นจากหลักการวิทยาศาสตร์กายภาพของระบบที่ต้องการวิเคราะห์ เช่นแบบจำลองการตกอย่างอิสระของวัตถุบนผิวโลกก็คือสมการหรือชุดสมการที่สร้างขึ้นจากกฎของนิวตัน เป็นต้น

เราสามารถคำนวณค่าตัวแปรที่ระบุสถานะภาพของระบบเช่น ตำแหน่ง ความเร็ว ความเร่งได้จากแบบจำลอง กระบวนการนี้เรียกว่าการจำลองสภาพทางกายภาพ (Physical Modelling) ซึ่งกระทำได้ 2 แนวทางด้วยกันคือ

1. แก้สมการหาคำตอบแม่นยำตรง (Exact Solution) หรือ
2. หาคำตอบโดยประมาณ (Approximate Solution)

การแก้สมการเพื่อหาคำตอบแม่นยำตรงเป็นการคำนวณหาค่าตัวแปรที่ต้องการทราบค่าโดยใช้หลักการทางคณิตศาสตร์โดยตรง (Direct Method) ซึ่งเป็นไปได้เฉพาะกับปัญหาที่มีขอบเขต (Boundary) อยู่ในรูปอย่างง่าย (Simple Form) เท่านั้น และถ้าหากขอบเขตของปัญหาเปลี่ยนแปลงไปก็ต้องดำเนินการคำนวณเพื่อแก้สมการหาค่าตัวแปรที่ต้องการทั้งหมดใหม่

ในทางตรงกันข้าม การหาคำตอบโดยประมาณเป็นการประมาณค่าคำตอบของสมการแบบจำลองด้วยกรรมวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) ซึ่งกรรมวิธีเชิงตัวเลขนั้นประกอบด้วยการคำนวณอย่างง่ายซ้ำ ๆ กันซึ่งจัดระเบียบมาอย่างเหมาะสมทำให้สามารถเขียนโปรแกรมให้คอมพิวเตอร์ดำเนินการตามระเบียบวิธีที่จัดไว้แล้วได้โดยง่าย ดังนั้นจึงมักจะใช้คอมพิวเตอร์ในการคำนวณประมาณค่าคำตอบโดยกรรมวิธีเชิงตัวเลข

ในทางปฏิบัติขอบเขตของปัญหาที่พิจารณามักจะไม่อยู่ในรูปอย่างง่ายและมีหลากหลายรูปแบบ ทำให้การคำนวณหาคำตอบแม่นยำตรงเป็นไปไม่ได้ยากและการคำนวณซ้ำทุกครั้งที่พบปัญหาใหม่ไม่ใช่ทางเลือกที่เหมาะสม ประกอบกับความก้าวหน้าทางวิทยาการคอมพิวเตอร์ในช่วง 40 ปีที่ผ่านมาทำให้กำลังในการประมวลผลและคำนวณกลายเป็นทรัพยากรที่มีราคาถูกลงและมีประสิทธิภาพมากขึ้น ทำให้การประมาณค่าตัวแปรที่ต้องการด้วยกรรมวิธีเชิงตัวเลขกลายเป็นทางเลือกที่เหมาะสมกว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ถูกจัดให้อยู่ในรูปที่เหมาะสมที่จะใช้กรรมวิธีเชิงตัวเลขและโปรแกรมคอมพิวเตอร์แก้ปัญหามักครั้งถูกเรียกว่าแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ (Computational Model)

การศึกษากระบวนการกำเนิดเสียงของเครื่องดนตรีสามารถทำได้โดยใช้แบบจำลองทางกายภาพของเครื่องดนตรี เนื่องจากกระบวนการกำเนิดเสียงของเครื่องดนตรีคือการสั่นสะเทือน (Vibration) และการแผ่กระจายเสียง (Acoustic Radiation) ซึ่งเป็นกลไกเชิงกลอยู่ภายใต้กฎเกณฑ์ของวิทยาศาสตร์กายภาพสามารถอธิบายได้โดยใช้กฎของนิวตันและสมการคลื่น

การแก้สมการที่อธิบายปรากฏการณ์ทางวิทยาศาสตร์กายภาพต่าง ๆ ข้างต้นทำให้ทราบค่าตัวแปรระบุสถานะภาพของระบบ เช่น ความเร็วอนุภาค (Particle Velocity) ของสายพิณแรงที่สายพิณกระทำต่อหมอนรองสาย หรือความดันอนุภาค (Acoustical Pressure) ที่แผ่แผ่

กระจายออกมาจากกระโหลกพิณ ณ เวลาต่าง ๆ ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ได้ ซึ่งความรู้เหล่านี้จะเป็นประโยชน์ต่อช่างผู้ประดิษฐ์เครื่องดนตรีต่อไป

1.3 พิณพื้นบ้าน: กรณีศึกษา

เครื่องดนตรีที่ถูกคัดเลือกเพื่อเป็นกรณีศึกษาสำหรับการวิเคราะห์และสังเคราะห์เสียงโดยใช้แบบจำลองทางกายภาพนี้คือพิณพื้นบ้าน พิณพื้นบ้านเป็นเครื่องดีดพื้นเมืองของภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ บ้างมี 3 สาย บ้างก็มี 4 สาย บางพื้นที่เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า ซึง หรือ ซุง นิยมบรรเลงพิณในงานรื่นเริงต่าง ๆ ในท้องถิ่น ทั้งที่บรรเลงเดี่ยว บรรเลงร่วมกับวงโปงลาง วงพิณ-แคน-ซอ หรือแม้กระทั่งกับวงสตริง

สาเหตุที่พิณพื้นบ้านเหมาะสมที่จะเป็นกรณีตัวอย่างสำหรับการศึกษานี้มีสาเหตุหลักสองประการคือสาเหตุทางวัฒนธรรมและสาเหตุทางกระบวนการวิเคราะห์และสังเคราะห์

สาเหตุทางวัฒนธรรมคือความยืดหยุ่นและความสามารถในการปรับตัวเข้ากับสิ่งใหม่ ๆ ของกลุ่มผู้บรรเลงพิณพื้นบ้าน ทำให้ผู้วิจัยไม่มีความกังวลต่อเสียงต่อต้านจากผู้บรรเลงพิณพื้นบ้านถ้าหากงานวิจัยนี้จะเป็นจุดเริ่มต้นที่นำไปสู่ความเปลี่ยนแปลงบางประการเช่น เสียงพิณแบบใหม่ ๆ ที่อาจจะสังเคราะห์ได้จากคอมพิวเตอร์ หรือกระบวนการผลิตที่อาจจะแตกต่างไปจากเดิมเนื่องจากข้อมูลใหม่ที่ได้จากแบบจำลองทางกายภาพ เป็นต้น ความยืดหยุ่นและความสามารถในการปรับตัวเข้ากับสิ่งใหม่ ๆ ของผู้บรรเลงพิณพื้นบ้านนั้นสามารถสังเกตได้จากการประดิษฐ์พิณพื้นบ้านอิเล็กทรอนิกส์ขึ้นเพื่อใช้ร่วมกับเครื่องขยายเสียงสำหรับการแสดงบนเวทีโดยเฉพาะ และแม้การปรับตัวเพื่อให้สามารถขึ้นสายพิณพื้นบ้านได้โดยใช้สายกีตาร์มาตรฐานที่มีจำหน่ายทั่วไป เป็นต้น [11]

อย่างไรก็ตามความยืดหยุ่นและความสามารถในการปรับตัวซึ่งมีอยู่สูงนั้นก็มิได้หมายความว่าวัฒนธรรมเก่าของพิณพื้นบ้านเลือนหายไปได้อย่างง่าย เช่นในปัจจุบันนี้มีผู้บรรเลงพิณทั่วไปน้อยรายนักที่จะทราบว่าสายพิณในสมัยก่อนที่จะหันมาใช้สายกีตาร์นั้นคือวัสดุประเภทใด ซึ่งในกรณีเช่นนั้น การเร่งศึกษาโครงสร้างและกลไกการกำเนิดเสียงของพิณพื้นบ้านในปัจจุบันก็สามารถมีส่วนช่วยอนุรักษ์รูปแบบดั้งเดิมของวัฒนธรรมพิณพื้นบ้านไว้ได้เช่นกัน

สาเหตุทางกระบวนการวิเคราะห์และสังเคราะห์คือการที่พิณพื้นบ้านแบ่งระดับบันไดเสียงเป็นขั้น ๆ ที่แน่นอน (Discrete) เนื่องจากการจำกัดตำแหน่งการกดสายพิณบนคอกพิณโดยใช้ชั้นเสียง (Fret) ทำให้ลดขั้นตอนการวิเคราะห์เสียงได้ ซึ่งหากเปรียบเทียบกับ ซอ ซึ่งระดับบันไดเสียงต่อเนื่อง (Continuous) เนื่องจากตำแหน่งการกดสายซอบนคันทันซอนั้นมีไม่จำกัด ทำให้การวิเคราะห์เสียงมีขั้นตอนเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ความก้องกังวานของเสียงพิณก็อยู่ในระดับที่ไม่มากเกินไป เสียงก้องกังวานที่มากเกินไปหรือก้องนานเกินไปเช่น เสียงฆ้อง จะทำให้การวัดเสียงในสภาพห้องทำงานปกติ ซึ่งเป็นเงื่อนไขจำกัดในการศึกษาครั้งนี้เกิดปัญหากับเสียงสะท้อนภายในห้องที่ใช้ทำการวัดได้

1.4 วัตถุประสงค์และขอบเขตของงาน

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์มีดังต่อไปนี้

1. เพื่อช่วยให้เข้าใจกระบวนการกำเนิดเสียงของพิณพื้นบ้านตามหลักวิทยาศาสตร์กายภาพ
2. เพื่อวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะทางอคูสติกของพิณพื้นบ้าน

3. เพื่อสังเคราะห์เสียงพินพื้นบ้านจากคอมพิวเตอร์โดยใช้แบบจำลองทางกายภาพ
ทั้งนี้ขอบเขตของงานในขั้นนี้ประกอบด้วย
 1. ศึกษากระบวนการกำเนิดเสียงของพินพื้นบ้าน
 2. วิเคราะห์ลักษณะเสียงของพินพื้นบ้าน
 3. สร้างแบบจำลองทางกายภาพของพินพื้นบ้าน โดยมีข้อจำกัดคือแบบจำลองจะตั้งอยู่บนสมมติฐานว่าระบบของพินเป็นแบบเชิงเส้นและไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Linear Time Invariant System)
 4. กำหนดให้ค่าอิมพีแดนซ์กล ฅ หมอนรองสายเป็นค่าความต้านทานกลบริสุทธิ์ และให้ค่าอิมพีแดนซ์กล ฅ จุดที่เกิดสายพินกับชั้นเสียงมีความต้านทานกลเป็นอนันต์
 5. สังเคราะห์เสียงพินพื้นบ้านโดยใช้แบบจำลองดังกล่าวโดยใช้โปรแกรมกรอบงาน (Framework Program) ที่พัฒนาขึ้นเพื่อช่วยในการศึกษาแบบจำลองทางกายภาพของพินพื้นบ้านในขั้นสูงต่อไป

โครงสร้างของรายงานฉบับนี้ประกอบด้วย บทนำในบทที่ 1 รายละเอียดเกี่ยวกับพินพื้นบ้าน และแบบจำลองทางกายภาพของพินอยู่ในบทที่ 2 บทที่ 3 เสนอขั้นตอนการทดลองวิเคราะห์ และสังเคราะห์เสียงพินโดยใช้กรรมวิธีเชิงตัวเลข บทที่ 4 แสดงผลการวิเคราะห์เสียง การสังเคราะห์เสียงและวิจารณ์ผลการทดลอง ผลงานทั้งหมดจะสรุปไว้ในบทที่ 5

บทที่ 2

พิณและแบบจำลองทางกายภาพของพิณ

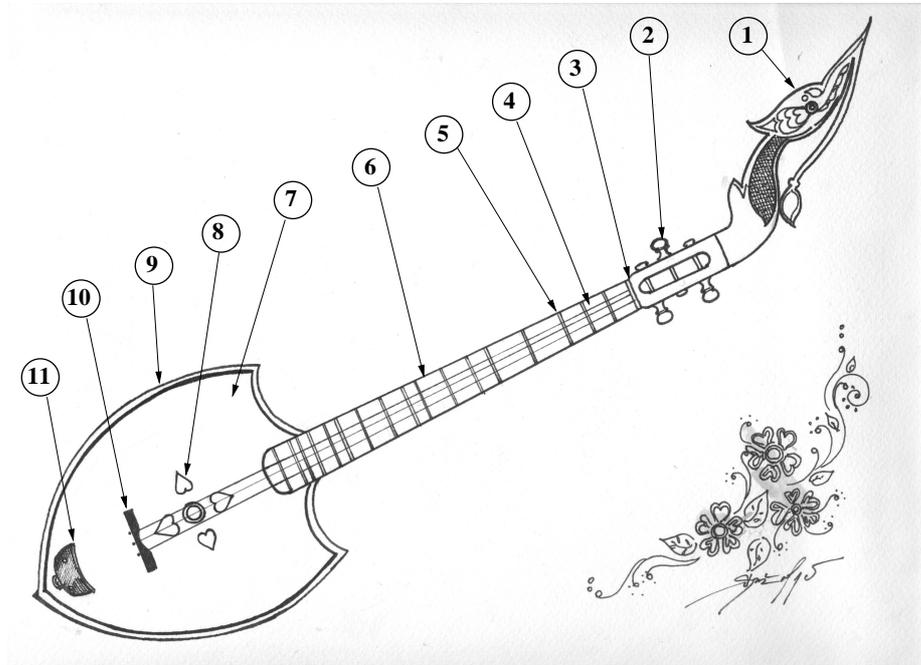
2.1 ลักษณะโดยทั่วไปของพิณ

พิณเป็นเครื่องดนตรีในสกุลเครื่องสาย ใช้ดีดโดยนิ้วมือหรือวัสดุที่มีลักษณะเป็นแผ่นแข็งบางอื่น ๆ เช่นเขาสัตว์หรือกระดองเต่า มีลักษณะสำคัญคือประกอบด้วย กระจกลูกพิณหรือเต้าพิณเป็นตัวก้ำทอนเสียง (Resonator) ต่อติดกับคอพิณ มีสายพิณซึ่งตึงระหว่างปลายด้านหนึ่งของคอพิณกับปลายอีกด้านหนึ่งของกระจกลูกพิณ บรรเลงโดยดีดที่สายพิณบริเวณเต้าพิณ ปรับระดับความถี่เสียงโดยใช้นิ้วกดสายพิณให้ติดคอพิณบนตำแหน่งต่าง ๆ บนคอพิณ พิณในประเทศไทยมี 5 ชนิดคือ [11]

1. พิณน้ำเต้า รูปร่างคล้ายคันธนู ปลายข้างหนึ่งต่อติดกับผลน้ำเต้าแห้งตัดขวางเพื่อทำหน้าที่เป็นเต้าพิณก้ำทอนเสียง มีหนึ่งสาย จัดอยู่ในตระกูลซิทเตอร์ (Zither)
2. พิณเพ็ชระ ลักษณะคล้ายพิณน้ำเต้า แต่มีสายพิณ 2-4 สาย จัดอยู่ในตระกูลซิทเตอร์ เช่นเดียวกับ
3. พิณพื้นบ้าน กระจกลูกพิณมีลักษณะเป็นกล่องแบนทึบรูปทรงสี่เหลี่ยม วงกลมแบนหรือรูปทรงใบไม้ เจาะรูสะท้อนเสียงไว้ด้านหน้า มี 3-4 สาย จัดอยู่ในตระกูลลูท (Lute) พิณพื้นบ้านนี้เป็นที่นิยมในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ทั้งยังมีการประดิษฐ์ดัดแปลงเป็นพิณไฟฟ้าอีกด้วย
4. กระจับปี่ เป็นพิณประเภทเดียวกับพิณพื้นบ้าน เพียงแต่เป็นชื่อที่ใช้เรียกพิณชนิดนี้ในท้องถิ่น
5. พิณไห เป็นพิณแบบพิเศษคือไม่มีคอพิณ และใช้ไหทำเป็นเต้าพิณโดยขึงสายพิณที่ปากไหนั่นเอง

เนื่องจากพิณพื้นบ้านเป็นที่นิยมมากในภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย จึงใช้พิณพื้นบ้านเป็นหัวข้อในการศึกษาแบบจำลองของพิณในการศึกษาค้นคว้านี้ โดยการ

ศึกษาจะมุ่งไปที่พิณพื้นบ้านแบบธรรมดาหรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าพิณโปรง และต่อไปนี่รายงานฉบับนี้จะใช้คำว่าพิณพื้นบ้านเพื่ออ้างถึงพิณพื้นบ้านแบบธรรมดาหรือพิณโปรงนี้เท่านั้น



รูปที่ 2.1: ส่วนต่าง ๆ ของพิณพื้นบ้าน

โดยทั่วไปพิณพื้นบ้านจะมีลักษณะดังรูปที่ 2.1 และมีส่วนประกอบดังต่อไปนี้ [11]

1. หัวพิณ
2. หูบิดหรือลูกบิดสำหรับขึ้นสาย
3. หย่องรองสาย
4. สายพิณ
5. ชั้นเสียง (Fret)
6. คอพิณหรือคานพิณ
7. ฝาปิดหน้า (Soundboard)
8. รูสะท้อนเสียง
9. เตัวพิณ (Body or Resonator)
10. ทมอรองสาย (Bridge)
11. หูติดสาย

วัสดุที่นิยมใช้ทำตัวพิณและคอพิณในปัจจุบันคือไม้ขนุนเนื่องจากขึ้นรูปได้ง่าย เมื่อแห้งแล้วมีสีเหลืองสวยงามตามธรรมชาติ สำหรับสายพิณนั้นในอดีตใช้สายไหมพื้นเอ็นแต่ปัจจุบันนิยมใช้สายกีตาร์โปร่งแทนเนื่องจากการผลิตในระดับอุตสาหกรรมทำให้ควบคุมความแน่นอนของเสียงได้ดีกว่า

2.2 แบบจำลองทางกายภาพของพิณพื้นบ้าน

กระบวนการกำเนิดเสียงของพิณไม่แตกต่างจากการกำเนิดเสียงของเครื่องดนตรีตระกูลลูทอื่น ๆ เช่น กีตาร์ หรือ บับเบิล กล่าวคือ เช่นกระบวนการกำเนิดเสียงพิณพื้นบ้านโดยสังเขปประกอบด้วยกระบวนการย่อยต่อไปนี้

1. ผู้บรรเลงใช้นิ้วกดสายพิณ ณ ชั้นเสียงต่าง ๆ เพื่อเปลี่ยนแปลงความยาวสัมฤทธิ์สำหรับการสั่นสะเทือนของสายพิณ (Effective Vibrating Length)
2. ผู้บรรเลงเทียวยสายพิณให้ได้ระยะ จากนั้นปล่อยสายพิณอย่างกะทันหันคล้ายการปล่อยสายธนู ทำให้สายพิณเกิดการสั่นสะเทือนทางกล อธิบายได้โดยสมการคลื่น 1 มิติ ที่มีขอบเขตคือหมอนรองสายและชั้นเสียงที่นิ้วกดสายพิณเพื่อกำหนดความถี่เสียง
3. การสั่นสะเทือนของสายพิณถูกแปลงเป็นแรงส่งผ่านหมอนรองสาย (Bridge) อธิบายได้โดยการส่งผ่านพลังงานคลื่น
4. แรงที่หมอนรองสายรับมาก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนบนฝาปิดหน้าหน้าพิณและการสั่นสะเทือนนี้ก่อให้เกิดคลื่นเสียงในตัวพิณ อธิบายได้โดยสมการคลื่น 3 มิติ ที่มีขอบเขตคือปริมาตรของตัวพิณ
5. เสียงที่สั่นสะเทือนภายในตัวพิณแผ่กระจายออกมาทางรูสะท้อนเสียงบนฝาปิดหน้าพิณ อธิบายโดยการแผ่กระจายคลื่นเสียง

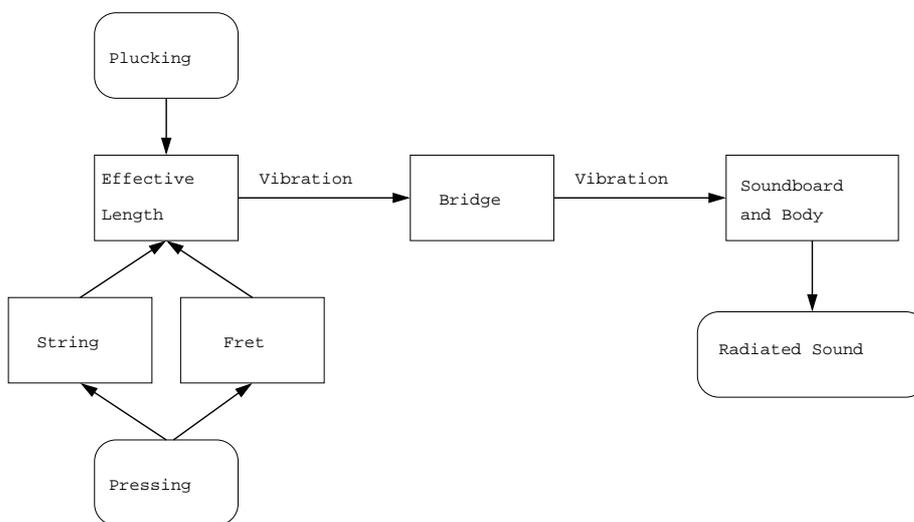
รูปที่ 2.2 แสดงกระบวนการกำเนิดเสียงของพิณ

จะเห็นได้ว่าส่วนประกอบที่เป็นกลไกการทำงานนั้นมีอยู่เพียง 3 ส่วนก็คือ สายพิณ หมอนรองสาย และฝาปิดหน้าและตัวพิณ อย่างไรก็ตามส่วนที่มีผลต่อลักษณะสัญญาณเสียงอย่างมากคือ สายพิณ การศึกษานี้จึงจะเน้นที่แบบจำลองทางกายภาพของสายพิณเท่านั้น ส่วนแบบจำลองของหมอนรองสายและแบบจำลองของฝาปิดหน้าและตัวพิณจะใช้การวัดค่าโดยตรงร่วมกัน

ลักษณะของสายพิณเป็นเส้น (String) ซึ่งตึงระหว่างจุดติดสายกับหูชั้นสายพาดหมอนรองสายและผ่านชั้นเสียงต่าง ๆ บนคอพิณ แบบจำลองทางกายภาพของสายพิณที่จะใช้อธิบายการสั่นสะเทือนของสายพิณนั้นสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการคลื่นหนึ่งมิติซึ่งเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial Differential Equation) ได้ดังแสดงในสมการที่ 2.1 [4]

$$\frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial x^2} - \frac{\rho_L}{T} \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2} = 0 \quad (2.1)$$

เมื่อ $y(x, t)$ คือระยะที่สายพิณเคลื่อนที่ออกจากจุดสมดุล x คือระยะจากจุดอ้างอิงซึ่งในที่นี้กำหนดให้จุดอ้างอิง ($x = 0$) คือจุดที่สายพิณพาดหมอนรองสาย t คือเวลา ρ_L คือความหนาแน่นมวลต่อหน่วยความยาวของสายพิณ และ T คือแรงตึงในสายพิณตามลำดับ ทั้งนี้



รูปที่ 2.2: กระบวนการกำเนิดเสียงของพิณ

คำตอบของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยหรือฟังก์ชัน $y(x, t)$ นั้นขึ้นอยู่กับค่าคงที่ระบุคุณลักษณะของระบบ เงื่อนไขตั้งต้น (Initial Condition) เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) และเงื่อนไขตั้งต้นและเงื่อนไขขอบเขตของระบบในการสั่นสะเทือนของสายพิณนั้นเป็นไปตามสมการที่ 2.2 สมการที่ 2.3 และสมการที่ 2.4 [4]

$$y(x, 0) \equiv \text{Initial position of } y(x, t) \text{ at } t = 0 \quad (2.2)$$

$$u(0, t) = \frac{1}{Z_{m0}} T \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)_{x=0} \quad (2.3)$$

$$u(L, t) = -\frac{1}{Z_{mL}} T \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)_{x=L} \quad (2.4)$$

เมื่อ x_{pluck} คือระยะจากจุดอ้างอิงจนถึงจุดที่ตีสายพิณ y_{init} คือระยะที่เหนี่ยวสายพิณออกไปจากจุดสมดุลเมื่อตอนแรกเริ่ม $u(0, t)$ และ $u(L, t)$ คือความเร็วของสายพิณ ณ จุดอ้างอิง และ ณ จุดที่ผู้บรรเลงกดสายพิณที่ขึ้นเสียงต่าง ๆ ตามลำดับ z_{m0} และ z_{mL} คืออิมพีแดนซ์เชิงกล (Mechanical Impedance) ของขอบเขตของสายพิณ ณ จุดที่ผู้บรรเลงกดสายพิณที่ขึ้นเสียงต่าง ๆ และ ณ จุดหมอนรองสายตามลำดับ การแก้สมการที่ 2.1 สามารถกระทำได้โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยซึ่งจะนำเสนอต่อไปในบทที่ 3

บทที่ 3

กรรมวิธีการทดลอง

กระบวนการทดลองของงานวิจัยนี้ประกอบด้วย 4 ส่วนหลักคือ 1) การวัดเสียงพินพื้นบ้าน 2) การวิเคราะห์เสียงพินพื้นบ้าน 3) การสังเคราะห์เสียงพินพื้นบ้าน และ 4) การเปรียบเทียบผลจากการสังเคราะห์กับผลที่ได้จากการวัด

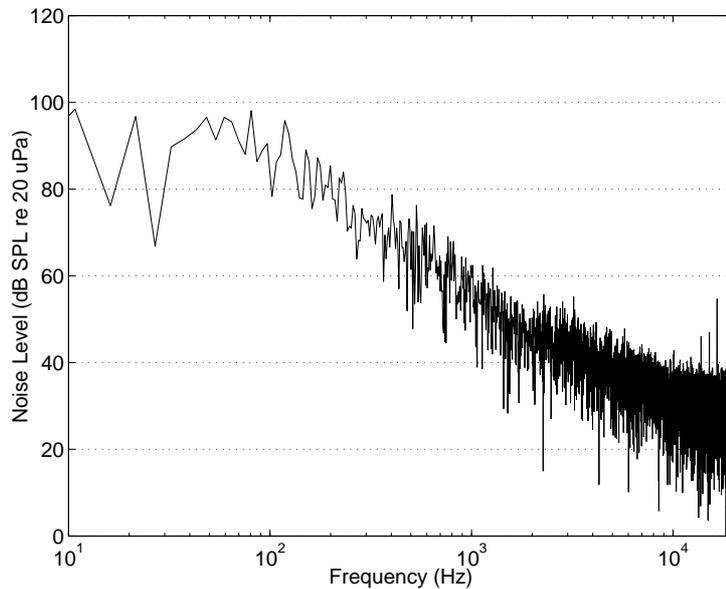
การวัดเสียงพินมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้เสียงต้นแบบของพินพื้นบ้านมาทำการวิเคราะห์ การวิเคราะห์เสียงพินมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ทราบถึงความถี่ฟอร์แมนท์และเวลารีเวอร์เบอเรชั่น (Reverberation Time) ของเสียงพิน ซึ่งจะมีส่วนช่วยในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ (Parameters) ต่าง ๆ ของการสังเคราะห์เสียงพินพื้นบ้านต่อไป การสังเคราะห์เสียงพินพื้นบ้านมี วัตถุประสงค์เพื่อทดลองสังเคราะห์เสียงพินจากแบบจำลองทางกายภาพ และการเปรียบเทียบผลการทดลองมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ทราบถึงความเป็นไปได้ในการนำการสังเคราะห์เสียงจากแบบจำลองทางกายภาพนี้ไปใช้งานจริงต่อไป

3.1 การวัดเสียงพินพื้นบ้าน

การวัดเสียงพินพื้นบ้านในการทดลองนี้เป็นการวัดเสียงพินที่เกิดจากการตีพินเสียงโดด ซึ่งถือได้ว่าเป็นการวัดผลตอบสนองอิมพัลส์ของพินนั่นเอง การวัดประกอบด้วย 2 ส่วนคือการวัดผลตอบสนองอิมพัลส์ของพินทั้งระบบและการวัดผลตอบสนองอิมพัลส์เฉพาะของเต้าพิน

การวัดสัญญาณเสียงกระทำในห้องทำงานซึ่งอยู่ในสภาพปรกติขนาด $3.9\text{m} \times 3.9\text{m} \times 2.9\text{m}$ มีสัญญาณรบกวนความถี่ต่ำกว่า 100 Hz อยู่ระหว่าง 80 – 100 dB SPL ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ตั้งสายพินโดยเทียบเสียง มีตา (ม) กับเสียงแคน ซึ่งถือว่าเป็นเครื่องเทียบเสียงมาตรฐานในวงดนตรีอีสาน จากนั้นเทียบเสียงอื่น ๆ เทียบกับเสียง ม ที่ตั้งเสียงไว้แล้ว

การวัดเสียงทั้งหมดดำเนินการโดยใช้ไมโครโฟนรับเสียงรอบทิศทาง (Omni-Directional Microphone) PCB PiezotronicsTM 130D20 ซึ่งมีความกว้างแถบความถี่ที่รับสัญญาณได้ 15 kHz และมีความไว (Sensitivity) เท่ากับ 45mV/Pa สัญญาณจากไมโครโฟนจะถูกส่งต่อไปยังวงจรแปลงสัญญาณและเก็บข้อมูลแบบ 24-Bit (24-Bit Data Acquisition Card) NI PCI-4474 ของ National InstrumentsTM กำหนดอัตราซีกตัวอย่างที่ 44.1 kHz ควบคุมการทำงานของวงจรแปลงสัญญาณและเก็บข้อมูลโดยใช้โปรแกรม LabviewTM จัดเก็บสัญญาณที่บันทึกได้ในรูปแบบไฟล์ WAV รูปที่ 3.2 แสดงไดอะแกรมของกระบวนการวัดสัญญาณเสียงพิน



รูปที่ 3.1: ระดับสัญญาณรบกวนภายในห้องที่ใช้ทำการวัดเสียงสัญญาณ

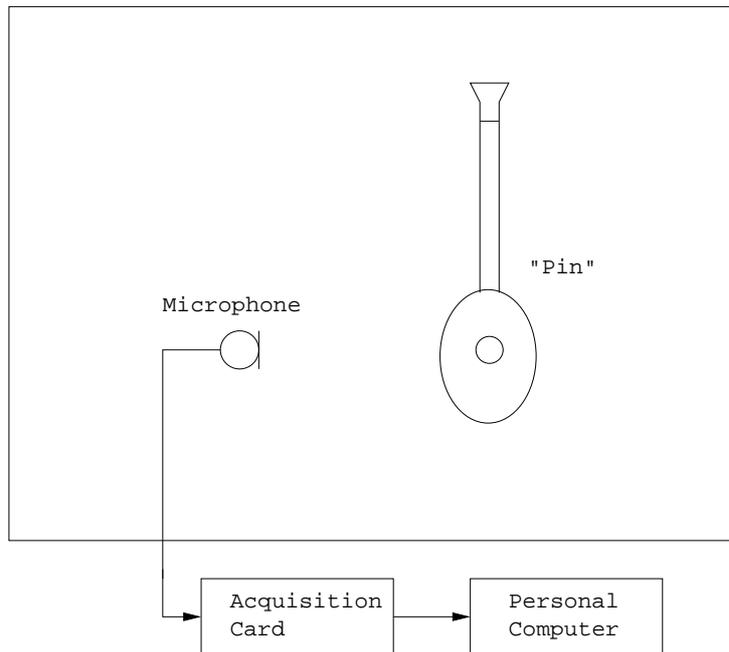
วัดผลตอบสนองอิมพัลส์ของพินโดยตีพินเสียงโดดเพียงครั้งเดียว โดยถือว่าการตีพินคือการจ่ายอิมพัลส์ให้ระบบพิน เสียงที่เกิดขึ้นก็คือผลตอบสนองอิมพัลส์ของพิน ให้ผู้บรรเลงพินนั่งอยู่ห่างจากไมโครโฟน 1.5 เมตร บรรเลงพินทีละหนึ่งเสียงโดยไล่ระดับจากเสียง “มีต่ำ” (ม) ไปสู่เสียง “ลาสูง” (ล) รวมทั้งสิ้น 18 เสียง (ม ฟ ช ล ท ด ร ม ฟ ช ล ท ด ร ม ฟ ช ล) บันทึกเสียง ๆ ละ 2 ครั้ง รูปที่ 3.3 แสดงตัวอย่างผลการวัดผลตอบสนองอิมพัลส์ของพินที่เสียง ม ที่ได้จากการตีพินเสียง ม ทั้ง 2 ครั้ง ผลการวัดผลตอบสนองอิมพัลส์ของพินทั้งหมดจะแสดงในภาคผนวก ก

การวัดผลตอบสนองอิมพัลส์ของเต้าพินกระทำโดยร้อยสายพินออกทั้ง 3 สาย และใช้ค้อนขนาดเล็กตีเบา ๆ ที่หมอนรองสายจากนั้นวัดเสียงที่แผ่กระจายออกมา กำหนดให้พินอยู่ห่างจากไมโครโฟน 1.5m เคาหมอนรองสาย 14 ครั้ง แต่ละครั้งเว้นระยะห่างกันประมาณ 3 วินาที รูปที่ 3.4 แสดงสัญญาณที่บันทึกได้ทั้ง 14 ครั้ง

3.2 การวิเคราะห์สัญญาณเสียงพิน

เนื่องจากกระบวนการกำเนิดเสียงพินดังที่อธิบายแล้วในส่วนที่ 2.2 ประกอบด้วยการสั่นสะเทือนของสายเปล่าส่งแรงผ่านหมอนรองสายผ่านเข้าไปในเต้าพินซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวกำทอน (Resonator) ดังนั้นการวิเคราะห์สัญญาณเสียงพินจึงประกอบด้วย การวิเคราะห์ผลตอบสนองอิมพัลส์ของเต้าพิน และการวิเคราะห์ผลตอบสนองอิมพัลส์ของสายพินเปล่า ซึ่งคือผลตอบสนองอิมพัลส์ของพินทั้งระบบที่หักล้างผลตอบสนองอิมพัลส์ของเต้าพินออกไปแล้ว

กระบวนการวิเคราะห์สัญญาณเสียงหลังจากการบันทึกเสียงทั้งหมดกระทำโดยใช้โปรแกรม MATLAB และเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล ทำการลดทอนสัญญาณรบกวนความถี่ต่ำที่แฝงอยู่ในสัญญาณเสียงพินที่บันทึกไว้โดยใช้ตัวกรองสัญญาณความถี่สูงผ่าน (Highpass



รูปที่ 3.2: ไดอะแกรมกระบวนการวัดสัญญาณเสียงพูด

Filter) ที่มีความถี่ตัดที่ 100 Hz ก่อนกระบวนการวิเคราะห์อื่น ๆ ทั้งหมด เนื่องจากต้องการความราบเรียบของผลตอบสนองความถี่ในย่านความถี่ผ่านจึงเลือกใช้ตัวกรองต้นแบบเป็นตัวกรองบัตเตอร์เวิร์ธอันดับ 4

3.2.1 การวิเคราะห์ผลตอบสนองอิมพัลส์ของเต้าพิน

การวิเคราะห์สัญญาณเสียงพูดเพื่อหาความถี่ฟอร์แมนท์ของเสียงพูดโดยใช้กรรมวิธีวิเคราะห์ความหนาแน่นกำลังสเปกตรัล (Power Spectral Density - PSD) แบบเวลช์ (Welch) ซึ่งมีขั้นตอนดังแสดงในสมการที่ 3.1 – 3.4 [8]

ในขั้นแรกแบ่งชุดข้อมูลเป็น L ส่วน (Segment) แต่ละส่วนมีความยาว M ตัวอย่างและเหลื่อมกับส่วนก่อนหน้านี้ได้โดยกำหนดช่วงเหลื่อมด้วยตัวแปร D โดยจำนวนจุดที่เหลื่อมกันจะเท่ากับ $M - D$ ซึ่งหากให้กำหนด $D = M$ แล้วจะหมายถึงไม่มีการเหลื่อมกันระหว่างส่วน

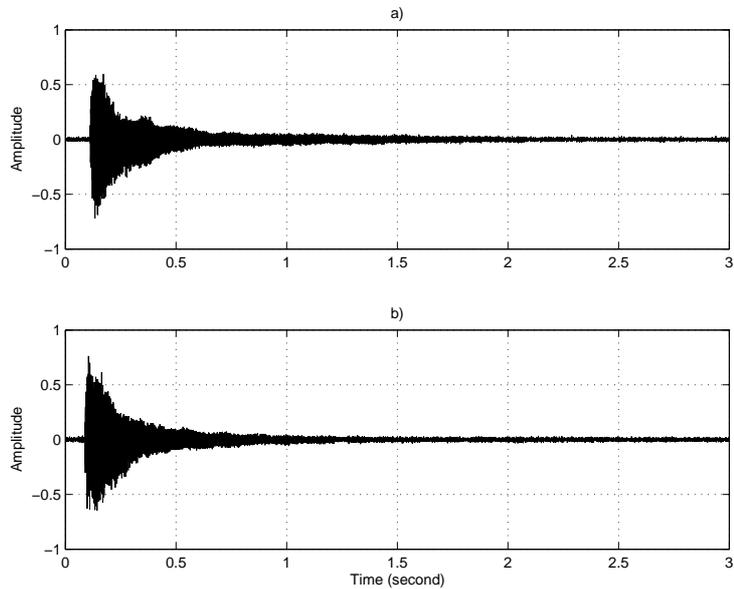
$$\begin{aligned} x_i[n] &= x[iD + n]; & n &= 0, 1, \dots, M - 1 \\ & & i &= 0, 1, \dots, L - 1 \end{aligned} \quad (3.1)$$

จากนั้นคำนวณความหนาแน่นกำลังสเปกตรัลของแต่ละส่วนโดยใช้กรรมวิธี Periodogram

$$\tilde{P}_{xx}^{(i)}[f] = \frac{1}{MU} \left| \sum_{n=0}^{M-1} x_i[n] w[n] e^{-j2\pi f n} \right|^2; \quad i = 0, 1, \dots, L - 1 \quad (3.2)$$

เมื่อ $w[n]$ คือฟังก์ชันหน้าต่าง และ U คือ ส่วนประกอบนอร์มอลไลซ์ (Normalization Factor)

$$U = \frac{1}{M} \sum_{n=0}^{M-1} w^2[n] \quad (3.3)$$



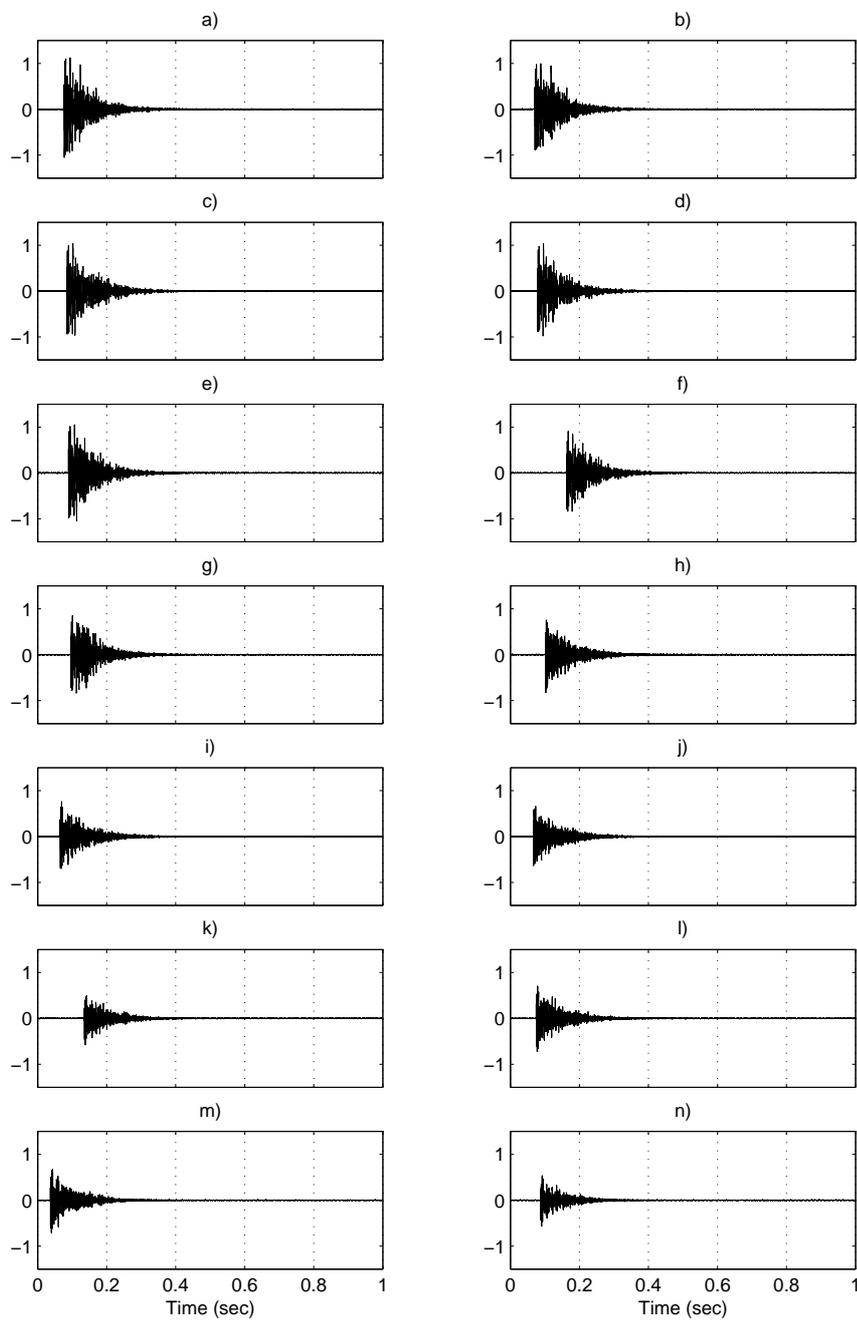
รูปที่ 3.3: a) – b) สัญญาณเสียง มุ ที่บันทึกได้จากการตีพิมพ์เสียงโดดทั้ง 2 ครั้ง

ขั้นตอนสุดท้ายคือการนำความหนาแน่นกำลังสเปกตรัลของทุกส่วนที่คำนวณได้จากสมการที่ 3.2 มาหาค่าเฉลี่ย

$$P_{xx}^W[f] = \frac{1}{L} \sum_{i=0}^{L-1} \tilde{P}_{xx}^{(i)}[f] \quad (3.4)$$

ในการนี้ได้เลือกพารามิเตอร์ต่าง ๆ สำหรับการคำนวณความหนาแน่นกำลังสเปกตรัลให้สอดคล้องกับระบบการรับรู้เสียงของมนุษย์ กล่าวคือ เลือกฟังก์ชันหน้าต่าง $w_n[n]$ เป็นฟังก์ชันหน้าต่างแบบแบล็คแมน-แฮร์ริส (Blackman-Harris) เพื่อลดการรั่วซึมทางความถี่ มีขนาดความยาวของหน้าต่างเป็น 4096 ตัวอย่างหรือเท่ากับ 92.88 ms ที่ความถี่ซิกตัวอย่าง 44.1 kHz ซึ่งใกล้เคียงกับค่าช่วงเวลาตรวจจับเสียง (Duration of Unity Detectability: 15 – 150 ms) ของหูมนุษย์ [5] เลือกใช้ช่วงการเลื่อนเท่ากับ 2048 ตัวอย่างหรือเท่ากับ 46.44 ms เนื่องจากเสียงพินที่วิเคราะห์เป็นเสียงเดี่ยวไม่มีการเปลี่ยนแปลงเสียงอย่างฉับพลัน และเลือกใช้ขนาดของการแปลงฟูริเยร์ไม่ต่อเนื่อง (DFT) เป็น 65536 ตัวอย่างหรือเท่ากับ 1.486 sec ที่ความถี่ซิกตัวอย่างที่ 44.1 kHz โดยการเติมศูนย์ (Zero Padding) ต่อเข้าไปที่ท้ายฟังก์ชันหน้าต่างดังที่ได้อธิบายไว้แล้ว ทั้งนี้เพื่อให้ได้ความละเอียดในแกนความถี่เป็น 0.6729 Hz ซึ่งใกล้เคียงกับความสามารถในการแยกแยะความถี่ของหูมนุษย์ [5] แนวทางการคัดเลือกพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อทำการวิเคราะห์เสียงดนตรีนี้ได้นำเสนอในที่ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 29 [9]

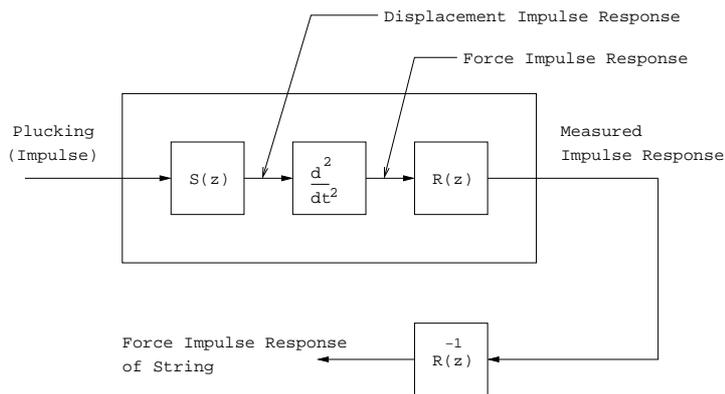
ขนาดความหนาแน่นกำลังสเปกตรัลของผลตอบสนองอิมพัลส์ของตัวพินได้จากค่าเฉลี่ยในแกนเดซิเบลของขนาดของความหนาแน่นกำลังสเปกตรัลของสัญญาณอิมพัลส์ของตัวพินที่วัดมาได้ทั้ง 14 อิมพัลส์ ผลการวิเคราะห์ผลตอบสนองอิมพัลส์ของตัวพินแสดงใน ส่วนที่ 4.1.1



รูปที่ 3.4: สัญญาณที่บันทึกได้ทั้ง 14 สัญญาณ จากการใช้ค้อนขนาดเล็กเคาะเบา ๆ ที่หมอนรองสายเพื่อวัดผลตอบสนองอิมพัลส์ของเต้าพิน

3.2.2 การวิเคราะห์ผลตอบสนองอิมพัลส์ของสายพิณเปล่า

วิเคราะห์ผลตอบสนองอิมพัลส์ของสายพิณเปล่าเพื่อคำนวณหาความถี่ฟอร์แมนท์ลำดับต่าง ๆ ของสายพิณและค่าเวลารีเวอร์เบอเรนซ์ของสายพิณ โดยผลตอบสนองอิมพัลส์ของสายพิณเปล่าจะประมาณได้มาจากการอิควอไลซ์ฟังก์ชันส่งผ่าน (Transfer Function) ของระบบพิณทั้งระบบ ($P(z)$) ด้วยส่วนกลับของฟังก์ชันส่งผ่านของเต้าพิณ ($R^{-1}(z)$) ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5: แนวคิดในการประมาณหาผลตอบสนองอิมพัลส์ของสายพิณเปล่าในรูปของแรง (Force Impulse Response) โดยการอิควอไลซ์ฟังก์ชันส่งผ่านของระบบพิณ ($P(z)$) ด้วยฟังก์ชันส่งผ่านของเต้าพิณ ($R(z)$)

ตัวกรองอิควอไลซ์ฟังก์ชันส่งผ่านของเต้าพิณ ($R^{-1}(z)$) นั้นเป็นตัวกรอง FIR อันดับที่ 8192 ได้มาจากการออกแบบตัวกรอง FIR โดยใช้กรรมวิธีสุ่มความถี่ (Frequency Sampling Method) ที่ใช้หน้าต่างแฮมมิง (Hamming Window) ในการออกแบบ ผลตอบสนองความถี่ของตัวกรองนี้จะเป็นส่วนกลับของผลตอบสนองความถี่ของเต้าพิณ รูปที่ 3.6 แสดงผลตอบสนองความถี่ของตัวกรองอิควอไลซ์ดังกล่าว เมื่อนำผลตอบสนองอิมพัลส์ของระบบพิณจากส่วน 3.1 มาผ่านตัวกรองอิควอไลซ์นี้แล้วก็จะได้ผลตอบสนองอิมพัลส์ของสายพิณเปล่า

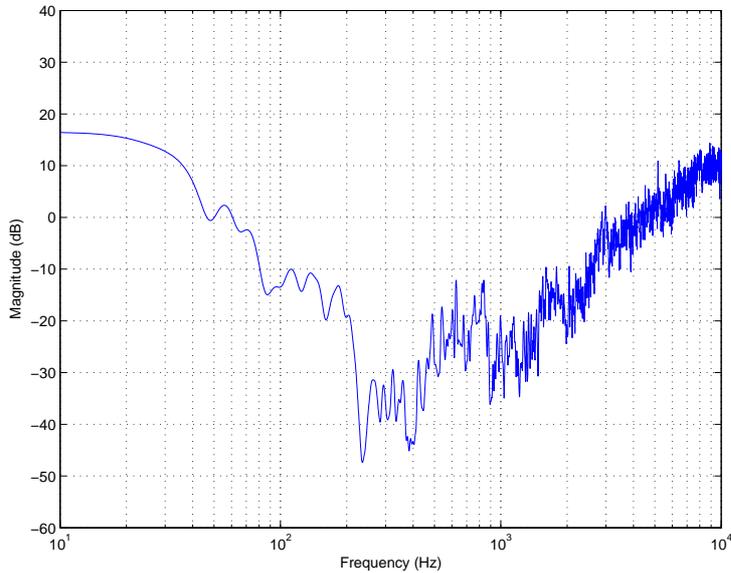
เมื่อได้ผลตอบสนองอิมพัลส์ของสายพิณเปล่า ณ ชั้นเสียงต่าง ๆ แล้ว ดำเนินการหาความถี่ฟอร์แมนท์ลำดับต่าง ๆ และเวลารีเวอร์เบอเรนซ์ของสายพิณเปล่าดังกล่าวต่อไป

ความถี่ฟอร์แมนท์ของสายพิณเปล่า

การคำนวณหาความถี่ฟอร์แมนท์ของสายพิณ ณ ชั้นเสียงต่าง ๆ ใช้กระบวนการดังที่อธิบายไว้แล้วในส่วนที่ 3.2.1 โดยความถี่ฟอร์แมนท์ของสายพิณเปล่าลำดับต่าง ๆ ณ แต่ละชั้นเสียงนั้นจะได้จากค่าเฉลี่ยของความถี่ฟอร์แมนท์ของสายพิณเปล่าที่ได้จากการวัดเสียงในแต่ละชั้นเสียงทั้ง 2 ครั้ง ความถี่ฟอร์แมนท์ของสายพิณเปล่าจะแสดงต่อไปในส่วนที่ 4.1.2

เวลารีเวอร์เบอเรนซ์ของสายพิณเปล่า

หลังจากที่ตัดพิณเสียงโดคเมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่งเสียงพิณจะเบาลงจนกระทั่งไม่ได้ยินอีกต่อไป ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากพลังงานสั่นสะเทือนในสายพิณสูญเสียให้แก่ตัวต้านทานกล ณ



รูปที่ 3.6: ผลตอบสนองความถี่ของตัวกรองอีควอไลซ์ของเต้าพิน ($R^{-1}(z)$)

จุดหมอนรองสายที่ละน้อย ๆ จนกระทั่งไม่เหลือพลังงานการสั่นสะท้อนอยู่ในสายพินอีก สายพินก็หยุดสั่นสะท้อนและหยุดให้กำเนิดเสียงในที่สุด อัตราการลดลงของพลังงานในสายพินในอุดมคติเป็นไปดังสมการที่ 3.5

$$E(t) = E_0 e^{-\alpha t} \quad (3.5)$$

เมื่อ $E(t)$ คือพลังงานคงเหลือในสายพิน ณ เวลา t ใด ๆ E_0 คือพลังงานตั้งต้นหรือพลังงาน ณ เวลา $t = 0$ และ α เป็นอัตราการลดลงของพลังงาน และค่าเวลารีเวอร์เบอเรนซ์ (Reverberation Time) มีความสัมพันธ์โดยตรงกับอัตราการลดลงของพลังงานในสายพิน

นิยามของค่าเวลารีเวอร์เบอเรนซ์คือ *ช่วงเวลาที่ใช้ไปเพื่อให้ความดันเสียง (Sound Pressure) มีพลังงานลดลง 60 dB หลังจากต้นเสียงหยุดกำเนิดเสียงอย่างกะทันหัน* [4] ซึ่งอัตราการลดลงของพลังงานกับค่าเวลารีเวอร์เบอเรนซ์มีความสัมพันธ์กันดังแสดงในสมการที่ 3.6

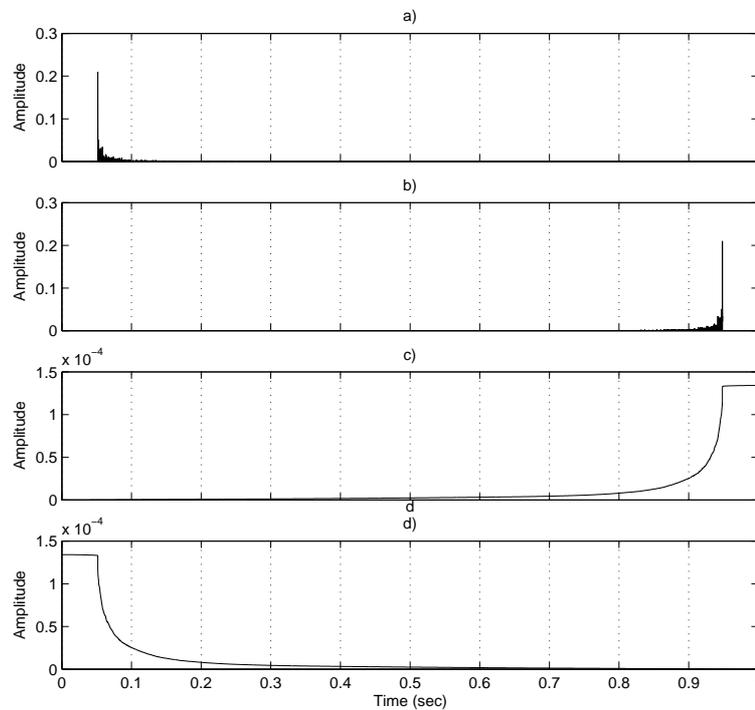
$$\begin{aligned} -60 &= 10 \log_{10}(e^{-\alpha T_{60}}) \\ -6 &= -\alpha T_{60} \log_{10}(e) \\ \alpha &= \frac{T_{60}}{13.816} \end{aligned} \quad (3.6)$$

เนื่องจากไม่ทราบอัตราการลดทอนพลังงาน α จึงต้องวัดค่าเวลารีเวอร์เบอเรนซ์โดยตรงจากสัญญาณเสียงที่วัดได้ คำนวณค่าเวลารีเวอร์เบอเรนซ์ของสายพินเปล่าที่วัดได้โดยใช้กรรม

วิธีการอินทิกรัลย้อนกลับ (Backward Integral) [3] ซึ่งเป็นไปตามสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} E(t) &= \int_t^{\infty} p^2(\tau) d\tau \\ &= \int_{\infty}^t p^2(\tau) d(-\tau) \end{aligned} \quad (3.7)$$

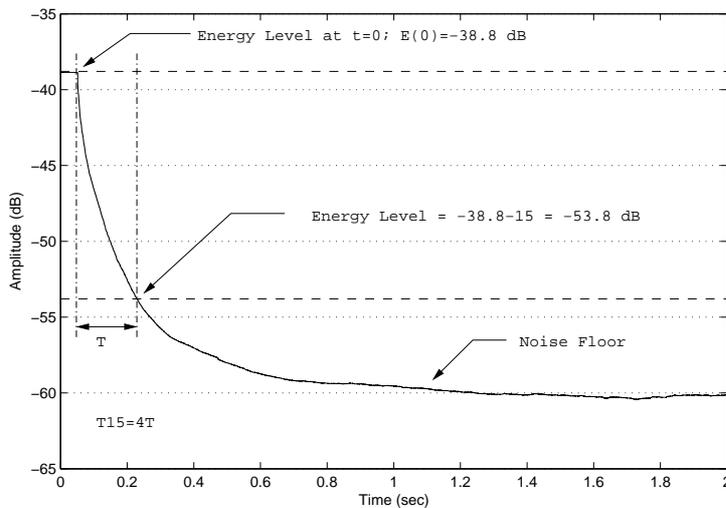
เมื่อ $E(t)$ เป็นฟังก์ชันพลังงานของเสียง และ $p(t)$ เป็นขนาดของความดันคลื่นเสียง (Sound Pressure) ดำเนินการอินทิกรัลย้อนกลับโดยใช้โปรแกรม MATLAB โดยกระทำการกลับเวลา (Time Reversal) กับผลตอบสนองอิมพัลส์ของสายพินเปล่าและใช้กรรมวิธีอินทิกรัลเชิงตัวเลขแบบสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapiziod Rule) [12] รูปที่ 3.7 แสดงแนวคิดการใช้กระบวนการอินทิกรัลย้อนกลับเพื่อหาฟังก์ชันพลังงานของคลื่นเสียง ($E(t)$)



รูปที่ 3.7: a) กำลัง ณ ขณะใดขณะหนึ่ง (Instantaneous Power) b) ฟังก์ชันกำลัง ณ ขณะใดขณะหนึ่งที่ทำการกลับเวลาแล้ว c) ผลการอินทิกรัลฟังก์ชันในรูป b) และ d) ส่วนกลับเวลาของฟังก์ชันพลังงานสะสมจากรูป c) ซึ่งก็คือฟังก์ชันพลังงานที่เหลืออยู่ในสายพิน ณ ขณะเวลาใด ๆ

ในทางทฤษฎีการวัดค่าเวลารีเวอร์เบอเรนซ์จะต้องวัดจากเวลา $t = 0$ จนถึงเวลาที่ $E(t)$ มีขนาดน้อยกว่า $E(0)$ อยู่ 60 dB แต่ในทางปฏิบัติการวัดสัญญาณมักจะมีสัญญาณรบกวนปะปนมาอยู่เสมอ ทำให้ $E(t)$ ไม่ลดลงถึง 60 dB ดังนั้นการวัดค่าเวลารีเวอร์เบอเรนซ์ในทางปฏิบัติจึงเลือกวัดช่วงเวลาจาก $t = 0$ จนถึงช่วงเวลาที่ $E(t)$ มีขนาดน้อยกว่า $E(0)$ อยู่ 20 dB หรือ 30 dB จากนั้นนำช่วงเวลาดังกล่าวไปคูณ 3 หรือ คูณ 2 และเรียกค่าเวลาเหล่านี้ว่า T_{20} และ T_{30} ตามลำดับ

ในกรณีของการทดลองนี้ซึ่งมีสัญญาณรบกวนมากดังนั้นจึงเลือกใช้เกณฑ์ 20 dB และคูณค่าเวลาที่วัดได้ด้วย 3 เพื่อให้ได้ค่าเวลารีเวอร์เบอเรนซ์ที่แท้จริง อย่างไรก็ตามในการบันทึกเสียงบางส่วนจะมีสัญญาณรบกวนมากเป็นพิเศษ จึงมีความจำเป็นต้องปรับเกณฑ์ให้สอดคล้องกับสภาพแวดล้อมโดยเลือกใช้เกณฑ์ 15 dB สำหรับการวัดค่าเวลารีเวอร์เบอเรนซ์ของเสียงพินที่บันทึกไว้บางส่วน แนวคิดการวัดค่าเวลารีเวอร์เบอเรนซ์โดยเกณฑ์ 15 dB แสดงอยู่ในรูปที่ 3.8 ค่าเวลารีเวอร์เบอเรนซ์ของสายพินเปล่าในแต่ละชั้นเสียงจะใช้ค่าเฉลี่ย จากการวัดสัญญาณ 2 ครั้ง ผลการวิเคราะห์ค่าเวลารีเวอร์เบอเรนซ์ของสายพินเปล่าจะแสดงต่อไปในส่วนที่ 4.1.3



รูปที่ 3.8: แนวคิดการวัดค่าเวลารีเวอร์เบอเรนซ์โดยใช้เกณฑ์ 15 dB T คือเวลาที่ใช้ไป เพื่อให้ระดับพลังงานลดลง 15 dB ค่าเวลารีเวอร์เบอเรนซ์ คือ $T_{15} = 4T$

3.3 การสังเคราะห์เสียงพินพื้นบ้าน

กระบวนการกำเนิดเสียงพินดังแสดงในส่วนที่ 2.2 บ่งชี้ว่าการสังเคราะห์เสียงพินพื้นบ้านสามารถทำได้ผ่านแบบจำลอง 2 ส่วนคือ 1) แบบจำลองของการสั่นสะเทือนของสายพินเปล่า และ 2) แบบจำลองของเต้าพิน ในการศึกษานี้กำหนดขอบเขตไว้เพียงการสร้างแบบจำลองของสายพินเปล่าเท่านั้น ส่วนแบบจำลองของเต้าพินจะใช้ค่าที่ได้จากการวัดผลตอบสนองอิมพัลส์ซึ่งได้จากส่วนที่ 3.2.1 โดยตรง ซึ่งในงานวิจัยนี้จะสร้างแบบจำลองเต้าพินขึ้นมาเพื่อเปรียบเทียบกัน 2 แบบด้วยกันคือ แบบจำลองที่สร้างจากผลตอบสนองอิมพัลส์ของเต้าพินโดยตรง และแบบจำลองที่เป็นตัวกรอง FIR อันดับที่ 8192 ที่สร้างขึ้นโดยมีผลตอบสนองความถี่ของเต้าพินเป็นต้นแบบ

3.3.1 การสังเคราะห์เสียงพินสายเปล่า

การสังเคราะห์เสียงพินสายเปล่าก็คือการจำลองสภาพการสั่นสะเทือนของสายพินซึ่งสามารถอธิบายได้โดยสมการที่ 2.1 ซึ่งการหาคำตอบโดยประมาณของสมการดังกล่าวทำได้โดยใช้กรรม

วิธีผลต่างสืบเนื่องกระทำโดยการประมาณค่าพจน์อนุพันธ์ต่าง ๆ ในสมการที่ 2.1 นั้นเอง ในที่นี้เลือกใช้การประมาณค่าของผลต่างแบบตรงกลาง (Central Divided Difference) [12] ซึ่งแสดงในสมการที่ 3.8 – 3.9 ดังต่อไปนี้

$$\frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2} \approx \frac{y[x_i, t_{n+1}] - 2y[x_i, t_n] + y[x_i, t_{n-1}]}{(\Delta t)^2} \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial x^2} \approx \frac{y[x_{i+1}, t_n] - 2y[x_i, t_n] + y[x_{i-1}, t_n]}{(\Delta x)^2} \quad (3.9)$$

โดยให้ x_i แทนจุดอ้างอิงลำดับที่ i และ t_n แทนเวลาลำดับที่ n เมื่อ i และ n เป็นจำนวนเต็ม ทั้งนี้ x_i จะห่างจาก x_{i+1} เป็นระยะทางเท่ากับ Δx และ t_n จะห่างจาก t_{n+1} เป็นเวลาเท่ากับ Δt ตามลำดับ เมื่อแทนที่สมการที่ 3.8 และ 3.9 ลงในสมการที่ 2.1 และจัดรูปใหม่แล้วจะได้

$$y[x_i, t_{n+1}] = 2y[x_i, t_n] - y[x_i, t_{n-1}] + \left[\left(\frac{(\Delta t)^2}{(\Delta x)^2} \cdot \frac{T}{\rho L} \right) y[x_{i+1}, t_n] - 2y[x_i, t_n] + y[x_{i-1}, t_n] \right] \quad (3.10)$$

สมการที่ 3.10 แสดงให้เห็นว่าตำแหน่งของสายพิณ ณ ระยะ x_i ณ เวลา t_{n+1} สามารถประมาณได้จากตำแหน่งของสายพิณ ณ ระยะ x_{i-1} , x_i และ x_{i+1} เมื่อเวลา t_{n-1} และตำแหน่งของสายพิณ ณ ระยะ x_i ที่เวลา t_n ค่า $\left(\frac{(\Delta t)^2}{(\Delta x)^2} \cdot \frac{T}{\rho L} \right)$ จากสมการที่ 3.10 คือค่าเลขคูร์นต์ (Courant Number) ซึ่งค่าที่เหมาะสมคือกำหนดให้ค่าเลขคูร์นต์เท่ากับหนึ่ง [12]

การแก้สมการจะเป็นไปได้ก็ต่อเมื่อเราทราบเงื่อนไขตั้งต้น (Initial Condition) ของสายพิณเมื่อเวลา t_0 และเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) ของสายพิณ ณ ระยะ x_0 และ ณ ระยะ x_L ซึ่งเป็นจุดปลายทั้งสองข้างของสายพิณ

เงื่อนไขตั้งต้นของสายพิณ

เงื่อนไขตั้งต้นของสายพิณคือสภาพของสายพิณเมื่อ t_0 ซึ่งก็คือสภาพตอนที่สายพิณถูกเหนี่ยวไว้ถึงระยะที่กำหนดก่อนจะถูกปล่อยออกมาอย่างกระชันทันทีเมื่อ $t_n > 0$ หากกำหนดให้ตำแหน่งที่เหนี่ยวสายพิณเมื่อเวลา $t_n < 0$ อยู่ที่ตำแหน่ง x_A และกำหนดให้ระยะเหนี่ยวสายพิณเป็น d เมตร ตำแหน่งของสายพิณ ณ จุด x_i ต่าง ๆ จะเป็นไปตามสมการเชิงเส้นดังสมการที่ 3.11

$$y[x_i, t_0] = \begin{cases} d \cdot \left(\frac{x_i}{x_A} \right) & \text{for } 0 \leq i \leq A \\ d \cdot \left(\frac{x_L - x_i}{x_L - x_A} \right); & \text{for } A < i \leq L \end{cases} \quad (3.11)$$

เงื่อนไขขอบเขตของสายพิณ

กำหนดให้จุด x_0 เป็นจุดที่นิ้วกดทับสายพิณ ณ ตำแหน่งขึ้นเสียงใด ๆ จุด x_L เป็นจุด ณ ตำแหน่งหมอนรองเสียง จากขอบเขตของการศึกษาและสมมติฐานเบื้องต้นที่ระบุให้อิมพีแดนซ์ของขอบเขตสายพิณที่ตำแหน่งนิ้วกดเป็นอนันต์และอิมพีแดนซ์ของขอบเขตสายพิณ

ที่ตำแหน่งหมอนรองเสียงเป็นตัวต้านทานกลบริสุทธิ์ (Pure Mechanical Resistance) แก้สมการเงื่อนไขขอบเขตของสายพินแสดงในสมการที่ 2.3 และ 2.4 โดยการใช้กระบวนการเชิงตัวเลขดังแสดงในสมการต่อไปนี้

สำหรับเงื่อนไขขอบเขตที่จุด x_0

$$\begin{aligned} u(0, t) &= \frac{1}{Z_{m0}} T \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)_{x=0} \\ \frac{\partial y(0, t)}{\partial t} &= 0 \\ y(0, t) &= 0 \end{aligned} \quad (3.12)$$

เมื่อความเร็วของสายพินเป็นศูนย์และเงื่อนไขตั้งต้นของตำแหน่งสายพิน ณ จุด x_0 ก็เป็นศูนย์ย่อมหมายความว่าตำแหน่งของสายพิน ณ จุด x_0 ก็จะเป็นศูนย์ตลอดไปดังแสดงในสมการที่ 3.12

ในขณะที่เงื่อนไขขอบเขต ณ จุด x_L ค่าอิมพีแดนซ์เป็นจำนวนจริง ($Z_{mL} = R_{mL}$) เมื่อใช้การหาค่าอนุพันธ์จากการแบ่งย่อยไปข้างหน้าประกอบกับการหาค่าอนุพันธ์จากการแบ่งย่อยแบบย้อนหลังกับสมการที่ 2.4 จะได้

$$\begin{aligned} u(L, t) = \frac{\partial y(L, t)}{\partial t} &= -\frac{1}{Z_{mL}} T \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)_{x=L} \\ \frac{y[L, t+1] - y[L, t]}{\Delta t} &= \frac{-T}{R_{mL}} \left(\frac{y[L, t] - y[L-1, t]}{\Delta x} \right) \\ y[L, t+1] &= y[L, t] - \frac{T}{R_{mL}} \frac{\Delta t}{\Delta x} (y[L, t] - y[L-1, t]) \end{aligned} \quad (3.13)$$

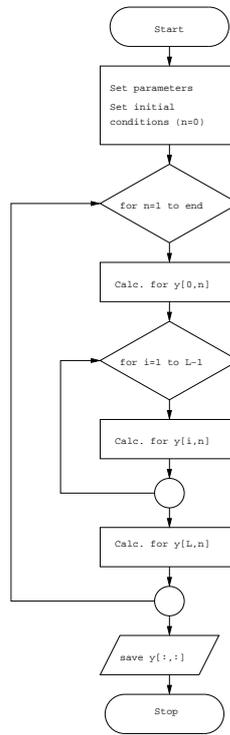
เมื่อ R_{mL} คือค่าความต้านทานกล ณ จุดหมอนรองสาย

เมื่อทราบแนวทางการแก้สมการอนุพันธ์ย่อย เงื่อนไขตั้งต้น และเงื่อนไขขอบเขตแล้วก็สามารถคำนวณระยะในแกน y ของสายพิน ณ จุด x_i ใด ๆ ที่เวลา t_n ใด ๆ ($y[x_i, t_n]$) ได้ตั้งขั้นตอนซึ่งแสดงในรูปที่ 3.9 การคำนวณในขั้นตอนนี้ใช้โปรแกรม MATLAB คำนวณทั้งหมด

ค่าพารามิเตอร์สำหรับการสังเคราะห์เสียงจากสมการที่ 3.10 3.12 และ 3.13 ประกอบด้วย ด้วยแรงตึงในสายพิน T ความหนาแน่นมวลต่อหน่วยความยาว ρ_L อัตราเวลาชักตัวอย่าง Δt ระยะขั้นคำนวณ (Step size) Δx และความต้านทานกล ณ จุดหมอนรองสาย R_{mL} การกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เป็นไปดังนี้

พารามิเตอร์คงที่

พารามิเตอร์ที่ถูกกำหนดให้เป็นค่าคงที่เนื่องจากเงื่อนไขในการทดลองนี้ประกอบด้วย ความหนาแน่นมวลต่อหน่วยความยาวของสายพิน ρ_L ซึ่งสายพินทั้ง 3 สายที่ใช้ในการทดลองนี้ใช้สายกีตาร์ยี่ห้อ Gibson หมายเลข 0.022w 0.012p และ 0.010p โดยมีค่าความหนาแน่นต่อหน่วยความยาวแสดงในตารางที่ 3.1 และค่าอัตราเวลาชักตัวอย่าง Δt ซึ่งเป็นส่วนกลับของความถี่ชักตัวอย่าง f_s และในการทดลองนี้เลือกใช้ความถี่ชักตัวอย่างที่ 44.1 kHz ซึ่งเป็นความถี่มาตรฐานของสัญญาณเสียงคุณภาพเทียบเท่าสัญญาณเสียงจาก CD ทำให้อัตราเวลาชักตัวอย่างเป็น 0.02268 ms



รูปที่ 3.9: โพล์ชาตร์แสดงการคำนวณ $y[x_i, t_n]$ ใด ๆ i ในโพล์ชาตร์หมายถึง x_i และ n หมายถึง t_n

พารามิเตอร์ที่มีผลต่อเสียง

พารามิเตอร์ที่มีผลต่อเสียงประกอบด้วย ค่าแรงตึงในสายพิน T และค่าความต้านทานกล R_{mL} โดยที่รากที่สองของค่าแรงตึงในเส้นเชือกแปรผันตรงกับความเร็วที่สายพินสร้างขึ้นดังสมการที่ 3.14 [6]

$$T = (2LF_0)^2 \rho_L \tag{3.14}$$

เมื่อ L คือความยาวสัมฤทธิ์ของสายพิน และ F_0 คือความถี่ฟอร์แมนท์ที่หนึ่งของการสั่นสะเทือนของสายพิน แทนค่าความถี่ฟอร์แมนท์ที่หนึ่งของสายพินเปล่าที่ได้จากการวัดจากส่วนที่ 3.2.2 เพื่อคำนวณหาค่า T เพื่อใช้ในการสังเคราะห์เสียง

ตารางที่ 3.1: ความหนาแน่นมวลต่อหน่วยความยาวของสายพินที่ใช้ในการทดลอง

สายที่	เสียง	หมายเลข	ρ_L (kg/m)
1	ต่ำ	0.022w	2.1142×10^{-3}
2	กลาง	0.012p	7.4368×10^{-4}
3	สูง	0.010p	5.5023×10^{-4}

จากการทดลองเบื้องต้นพบว่าค่าความต้านทานกลแปรผันตรงกับค่าเวลารีเวอร์เบอเรชั่น ใช้กระบวนการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square Regression) [12] เพื่อหาค่าความต้านทานที่ทำให้ค่าเวลารีเวอร์เบอเรชั่นตรงกับค่าที่ได้จากการวัดจากส่วนที่ 3.2.2 ผลการสังเคราะห์เสียงพินจะแสดงในส่วนที่ 4.2

พารามิเตอร์ที่ถูกบังคับ

ดังที่อธิบายไว้ตอนต้นแล้วว่าค่าคูร์นต์ของการจำลองสภาพนี้จะต้องเท่ากับหนึ่ง เงื่อนไขนี้บังคับให้ค่าขั้นการคำนวณ (Step size) Δx ต้องสอดคล้องกับสมการต่อไปนี้

$$\left(\frac{(\Delta t)^2}{(\Delta x)^2} \cdot \frac{T}{\rho L} \right) = 1$$

$$\Delta x = \Delta t \cdot \sqrt{\frac{T}{\rho L}} \quad (3.15)$$

ซึ่งหมายความว่าเมื่อทำการสังเคราะห์เสียงต่างสายกัน มีแรงตึงในสายพินต่างกันและสายพินมีความหนาแน่นมวลต่อหน่วยความยาวต่างกันก็จะบังคับให้ดำเนินการสังเคราะห์เสียงด้วยค่า Δx ต่างกันด้วย

3.3.2 การสังเคราะห์เสียงพินทั้งระบบ

การสังเคราะห์เสียงพินในส่วน 3.3.1 เป็นการสังเคราะห์เสียงพินแบบสายเปล่าไม่รวมผลอันเนื่องมาจากเต้าพิน การสังเคราะห์เสียงพินทั้งระบบจะต้องแปลงระยะขจัด (Displacement) ของสายพิน ณ จุด x_L ซึ่งเป็นตำแหน่งของหมอนรองสายให้เป็นแรงและส่งแรงผ่านหมอนรองสายไปยังฟังก์ชันส่งผ่านของเต้าพิน

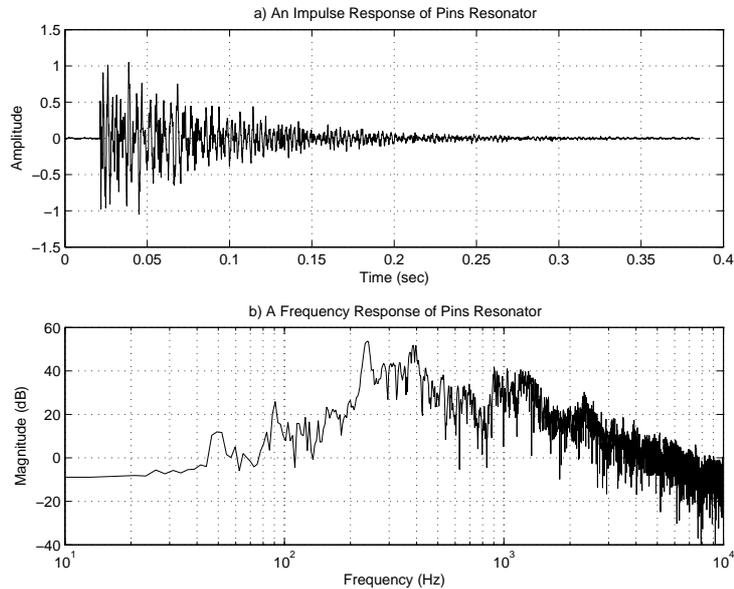
การแปลงระยะขจัดเป็นแรงทำได้โดยการหาอนุพันธ์อันดับสองของฟังก์ชันระยะขจัดของสายพิน $y[x_L, t_n]$ ที่ได้จากส่วน 3.3.1 โดยใช้กระบวนการเชิงตัวเลข การหาอนุพันธ์อันดับสองของฟังก์ชันระยะขจัดของสายพิน $y[x_L, t_n]$ ทำได้โดยใช้กระบวนการแบ่งย่อยตรงกลาง ดังแสดงในสมการที่ 3.16

$$\frac{\partial y[x_L, t_n]}{\partial t} \approx \frac{y[x_L, t_{n+1}] - 2y[x_L, t_n] + y[x_L, t_{n-1}]}{\Delta t^2} \quad (3.16)$$

จากนั้นกรองสัญญาณที่ได้ด้วยตัวกรองเต้าพินซึ่งในการทดลองนี้จะใช้ตัวกรอง 2 ชนิด เพื่อนำผลมาเปรียบเทียบกันคือ

1. ตัวกรอง FIR ที่สร้างขึ้นโดยตรงจากผลตอบสนองอิมพัลส์หนึ่งของเต้าพิน มีขนาดความยาวของผลตอบสนองอิมพัลส์เป็น 17,000 ตัวอย่าง (Samples) ภาพผลตอบสนองอิมพัลส์และผลตอบสนองความถี่ของมันแสดงในรูปที่ 3.10 a) และ b) ตามลำดับ
2. ตัวกรอง IIR อันดับที่ 64 ที่สร้างขึ้นโดยใช้กรรมวิธียูล-วอล์กเกอร์ (Yule-Walker Method) และมีผลตอบสนองความถี่เฉลี่ยของผลตอบสนองอิมพัลส์ที่วัดได้ทั้ง 14 ครั้งของเต้าพิน ดังแสดงในรูปที่ 3.4 เป็นต้นแบบ 3.11

แนวคิดของกระบวนการทั้งหมดนี้แสดงอยู่ในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.10: a) ผลตอบสนองอิมพัลส์ของเต้าพินที่ได้จากการวัด b) ผลตอบสนองความถี่ของ a)

3.4 การเปรียบเทียบผลการสังเคราะห์กับเสียงต้นฉบับ

การเปรียบเทียบผลการสังเคราะห์กับเสียงต้นฉบับสามารถทำได้โดยการเปรียบเทียบเชิงปริมาณ (เช่นการเปรียบเทียบพารามิเตอร์ต่าง ๆ ระหว่างเสียงธรรมชาติและเสียงสังเคราะห์) และ การเปรียบเทียบเชิงคุณภาพ (เช่นโดยการฟัง)

3.4.1 การเปรียบเทียบเชิงปริมาณ

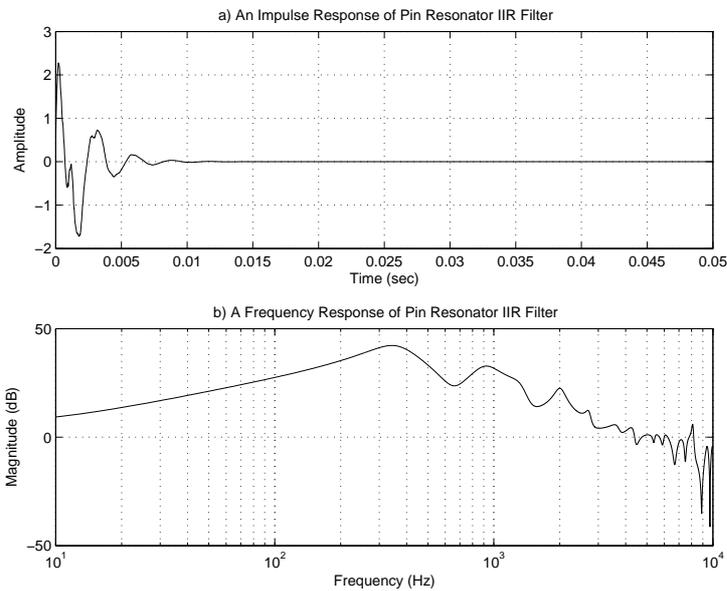
เปรียบเทียบเชิงปริมาณโดยเปรียบเทียบความถี่ฟอร์แมนท์และค่าเวลารีเวอเบอเรชั่นของเสียงธรรมชาติที่บันทึกไว้กับเสียงสังเคราะห์ที่ได้ ผลการเปรียบเทียบจะนำเสนอในบทที่ 4

3.4.2 การเปรียบเทียบเชิงคุณภาพ

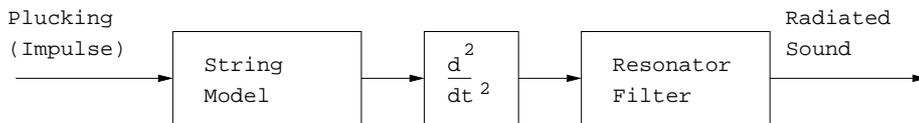
ดำเนินการเปรียบเทียบเชิงคุณภาพโดยการทดลองโดยการฟัง (Listening Test) เพื่อวัดคุณภาพของเสียงสังเคราะห์ที่แท้จริงจึงแยกการทดลองโดยการฟังออกเป็นสองส่วนคือ

1. การเปรียบเทียบเพื่อวัดความแตกต่างระหว่างกัน (Discrimination Test) ระหว่างเสียงธรรมชาติที่วัดได้ กับเสียงสังเคราะห์
2. การเปรียบเทียบเพื่อประเมินระดับความใกล้เคียงเสียงธรรมชาติของเสียงสังเคราะห์ (Quality Assessment Test)

รูปที่ 3.13 แสดงกระบวนการทดลองโดยการฟัง การทดลองนี้ควบคุมโดยคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก IBM ThinkPad R51 ผ่านโปรแกรมการทดลองโดยการฟังซึ่งเขียนขึ้นโดยใช้ Lab-



รูปที่ 3.11: a) ผลตอบสนองอิมพัลส์ของตัวกรอง IIR อันดับที่ 64 ที่ออกแบบโดยใช้กรรมวิธียูล-วอล์กเกอร์ b) ผลตอบสนองความถี่ของตัวกรองดังกล่าว



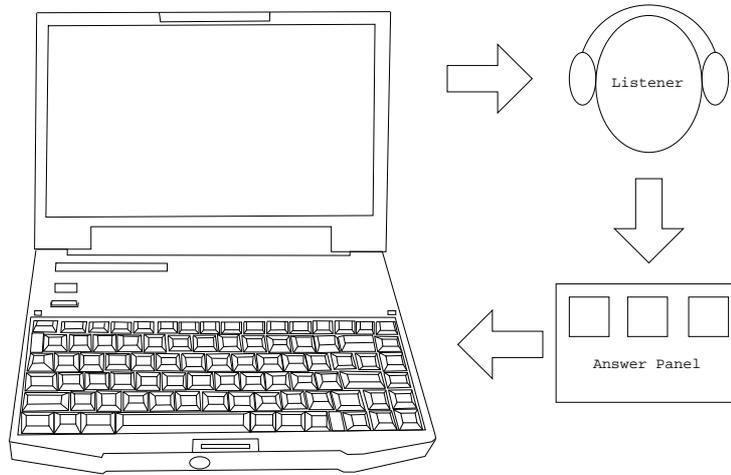
รูปที่ 3.12: กระบวนการสังเคราะห์เสียงพินทั้งระบบ Rasonator Filter ในรูปหมายถึง ฟังก์ชันส่งผ่านของเต้าพิน

VIEW จะเลือกชุดสัญญาณจากรายการที่อยู่ในไฟล์รายการ (*.txt) จากนั้นจะส่งสัญญาณเสียงผ่านหูฟัง AKG K66 ซึ่งมีแถบสัญญาณ (Bandwidth) กว้าง 18 – 22000 Hz และมีประสิทธิภาพ 122 dB SPL/V เมื่อผู้ฟังได้ฟังเสียงจากชุดทดสอบแล้วก็ตอบสนองผ่านโปรแกรมที่เขียนโดยใช้ LabVIEW โปรแกรมก็จะเก็บผลตอบสนองจากผู้ฟังลงในไฟล์บันทึกผล (*.log) จากนั้นโปรแกรมก็จะเริ่มอ่านรายการถัดไปและดำเนินการซ้ำ ๆ เช่นนี้จนกระทั่งสิ้นสุดไฟล์รายการ

การเปรียบเทียบเพื่อวัดความแตกต่างระหว่างกัน

เปรียบเทียบเพื่อวัดความแตกต่างระหว่างกันโดยให้อาสาสมัครฟังชุดของเสียงซึ่งประกอบด้วยเสียงธรรมชาติและเสียงสังเคราะห์ เรียงกันเป็น 3 เสียง ได้รูปแบบของชุดเสียงทดสอบทั้งหมด 3 รูปแบบดังแสดงในตารางที่ 3.2

โดยให้อาสาสมัครฟังเสียงทั้ง 3 ชุดของแต่ละชั้นเสียงโดยเรียงชุดเสียงอย่างสุ่ม และให้อาสาสมัครระบุว่าเสียงใด (ในชุดเสียงเดียวกัน) แตกต่างจากเสียงอื่น หากอาสาสมัครไม่สามารถระบุเสียงที่แตกต่างได้ให้อาสาสมัครเดาคำตอบ หากผลการทดลองแสดงว่าอาสาสมัครตอบ



รูปที่ 3.13: กระบวนการทดลองโดยการฟัง

ตารางที่ 3.2: ตารางชุดเสียงสำหรับการทดสอบด้วยการฟังทั้ง 3 ชุด

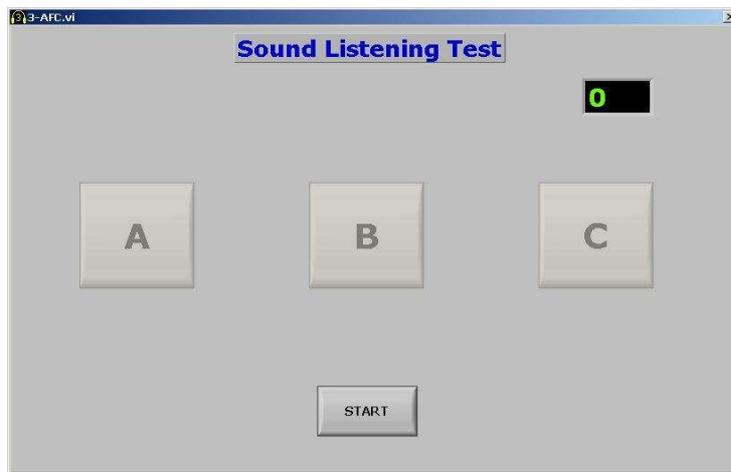
ชุดเสียง	เสียงที่ 1	เสียงที่ 2	เสียงที่ 3
1	เสียงธรรมชาติ	เสียงสังเคราะห์	เสียงสังเคราะห์
2	เสียงสังเคราะห์	เสียงธรรมชาติ	เสียงสังเคราะห์
3	เสียงสังเคราะห์	เสียงสังเคราะห์	เสียงธรรมชาติ

ผิดเกินกว่าค่าที่กำหนด แสดงว่าเสียงสังเคราะห์และเสียงธรรมชาติไม่มีความแตกต่างกัน ในทางกลับกัน หากอาสาสมัครตอบถูกเกินกว่าค่าที่กำหนดแสดงว่าเสียงสังเคราะห์มีความแตกต่างจากเสียงธรรมชาติอย่างชัดเจน รูปที่ 3.14 แสดงส่วนติดต่อกับผู้ใช้ของโปรแกรมที่ควบคุมการทดลองนี้

เนื่องจากการทดลองประกอบด้วยการฟังเสียงขึ้นเสียงละ 3 ครั้ง หากอาสาสมัครไม่สามารถระบุความแตกต่างได้และจำเป็นจะต้องเดา ความน่าจะเป็นที่อาสาสมัครจะเดาถูกจะเป็น $1/3$ เปรียบเทียบค่าความน่าจะเป็นที่วัดได้จากการทดลองกับเกณฑ์ $1/3$ นี้โดยใช้ค่าที่วัดได้ประกอบกับความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่าง (Standard Error of the Sample Mean) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.17 [2]

$$e_{\mu} = \sqrt{\frac{SD^2}{N}} \quad (3.17)$$

เมื่อ e_{μ} คือความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่าง SD คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกลุ่มตัวอย่าง และ N คือจำนวนกลุ่มตัวอย่าง เกณฑ์การพิจารณาในช่วง $\bar{p} \pm e_{\mu}$ เมื่อ \bar{p} คือค่าความน่าจะเป็นที่อาสาสมัครจะตอบถูกที่วัดได้ หากย่านดังกล่าวครอบคลุมค่า $1/3$ แสดงว่าค่าเฉลี่ยของความน่าจะเป็นที่วัดได้ มีค่าไม่แตกต่างจากค่าความน่าจะเป็นที่จะเกิดขึ้นจากการเดา ซึ่งหมายความว่าเสียงที่นำมาทดสอบนั้นไม่แตกต่างไปจากเสียงธรรมชาติที่นำมาใช้อ้างอิงเลย



รูปที่ 3.14: ส่วนติดต่อกับผู้ใช้ของโปรแกรมที่รับคำตอบจากผู้ฟังว่าเสียงใดที่แตกต่างจากเสียงอื่นใน 3 เสียงในชุดทดสอบ

เนื่องจากการทดลองกระทำการสังเคราะห์เสียงทั้งหมด 18 ชั้นเสียง ทำให้มีชุดเสียงที่อาสาสมัครต้องทดลองฟังรวมทั้งสิ้น $18 \times 3 = 54$ ชุดเสียง แบ่งชุดเสียงเหล่านี้เป็น 3 กลุ่ม โดยมีเงื่อนไขว่าในแต่ละกลุ่มจะไม่มีชุดเสียงที่มาจากชั้นเสียงเดียวกัน เรียบเรียงชุดเสียงเหล่านี้แบบสุ่มเพื่อให้อาสาสมัครฟัง

ดำเนินการทดลองเปรียบเทียบเพื่อวัดความแตกต่าง 2 ครั้ง ครั้งหนึ่งเพื่อวัดความแตกต่างระหว่างเสียงธรรมชาติกับเสียงสังเคราะห์ที่ใช้ตัวกรองที่สร้างจากผลตอบสนองอิมพัลส์ของเต้าพิน และอีกครั้งหนึ่งเพื่อวัดความแตกต่างระหว่างเสียงธรรมชาติกับเสียงสังเคราะห์ที่ใช้แบบจำลองตัวกรองเต้าพิน ซึ่งเป็นตัวกรอง IIR อันดับที่ 64 ที่สร้างขึ้นโดยใช้กรรมวิธียูลวอล์กเกอร์

การทดลองแต่ละครั้งใช้อาสาสมัคร ชาย-หญิง การทดลองละ 5 คน อายุระหว่าง 20 – 27 ปี นำผลการทดลองมาวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อวัดผล แสดงผลการทดลองในบทที่ 4

การเปรียบเทียบเพื่อประเมินระดับความใกล้เคียงเสียงธรรมชาติ

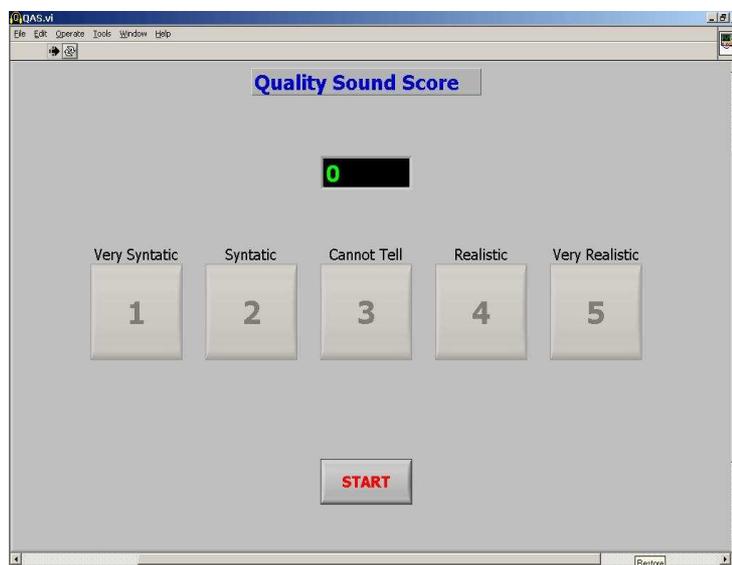
ผลการเปรียบเทียบเพื่อวัดความแตกต่างนั้นจะบอกได้เพียงว่าเสียงธรรมชาติที่วัดได้กับเสียงที่สังเคราะห์ได้นั้นมีความแตกต่างกันหรือไม่เท่านั้น ไม่สามารถบอกได้ว่าเสียงสังเคราะห์นั้นมีความเหมือนกับเสียงธรรมชาติมากหรือน้อยเท่าใด เนื่องจากในความเป็นจริงแล้วหากมีเสียงธรรมชาติที่บันทึกเสียงไว้ต่างกรรมต่างวาระ ก็อาจจะมีเสียงที่แตกต่างกันทั้ง ๆ ที่เป็นเสียงธรรมชาติทั้งคู่ก็ได้

ดังนั้นการเปรียบเทียบเพื่อประเมินระดับความใกล้เคียงเสียงธรรมชาติจึงถูกนำมาใช้ โดยออกแบบให้อาสาสมัครฟังเสียงธรรมชาติ และเสียงสังเคราะห์ และให้อาสาสมัครให้คะแนน โดยไม่ให้อาสาสมัครทราบว่าเสียงใดเป็นเสียงธรรมชาติ เสียงใดเป็นเสียงสังเคราะห์ ระดับคะแนนเป็นดังนี้

- ให้คะแนน 5 เมื่ออาสาสมัคร **มั่นใจ** ว่าเสียงที่ได้ยินเป็นเสียงธรรมชาติ

- ให้คะแนน 4 เมื่ออาสาสมัคร **คาดคะเน** ว่าเสียงที่ได้ยินเป็นเสียงธรรมชาติ
- ให้คะแนน 3 เมื่ออาสาสมัคร **ไม่แน่ใจ** ว่าเสียงที่ได้ยินเป็นเสียงธรรมชาติหรือเสียงสังเคราะห์
- ให้คะแนน 2 เมื่ออาสาสมัคร **คาดคะเน** ว่าเสียงที่ได้ยินเป็นเสียงสังเคราะห์
- ให้คะแนน 1 เมื่ออาสาสมัคร **มั่นใจ** ว่าเสียงที่ได้ยินเป็นเสียงสังเคราะห์

หลังจากนั้นนำคะแนนที่อาสาสมัครให้แก่เสียงธรรมชาติ มาเปรียบเทียบกับคะแนนที่อาสาสมัครให้แก่เสียงสังเคราะห์ รูปที่ 3.15 แสดงส่วนติดต่อกับผู้ใช้ของโปรแกรมที่ควบคุมการทดลองนี้



รูปที่ 3.15: ส่วนติดต่อกับผู้ใช้ของโปรแกรมที่รับค่าคะแนนจากผู้ฟังเมื่อได้ยินเสียงทดสอบแล้ว

เสียงสังเคราะห์ที่จะนำมาเปรียบเทียบก็เช่นเดียวกับที่ใช้ในการเปรียบเทียบเพื่อวัดความแตกต่าง คือประกอบด้วยเสียงสังเคราะห์ที่ใช้ตัวกรองที่สร้างจากผลตอบสนองอิมพัลส์ของเต้าพิน และเสียงสังเคราะห์ที่ใช้ตัวกรอง IIR อันดับที่ 64 เป็นแบบจำลองเต้าพิน

การทดลองใช้อาสาสมัคร ชาย-หญิง จำนวน 5 คน ซึ่งมีอายุระหว่าง 21 – 24 ปี ผลการทดลองแสดงในบทที่ 4

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในบทที่ 4 นี้จะนำเสนอผลการทดลองที่ได้เสนอกรรมวิธีการทดลองแล้วในบทที่ 3 โดยผลการทดลองที่จะนำเสนอประกอบด้วย 1) ผลการวิเคราะห์เสียงพินธรรมชาติที่วัดได้ 2) ผลการสังเคราะห์เสียงพิน และ 3) ผลการเปรียบเทียบเสียงพินธรรมชาติที่วัดได้กับเสียงพินสังเคราะห์

4.1 ผลการวิเคราะห์เสียงพินธรรมชาติที่วัดได้

ผลการวิเคราะห์เสียงพินธรรมชาติประกอบด้วย 1) ผลการวิเคราะห์ผลตอบสนองอิมพัลส์ของเต้าพิน 2) ความถี่ฟอร์แมนท์ของสายพินเปล่า และ 3) ค่าเวลารีเวอเบอเรชั่นของเสียงพิน

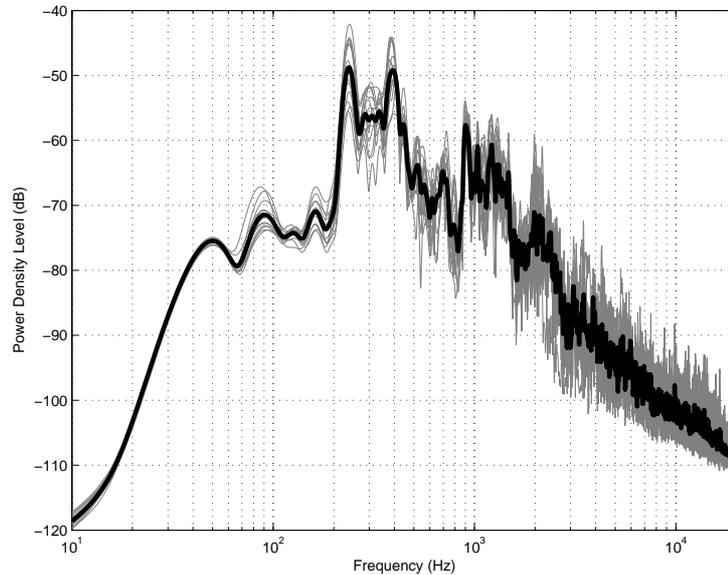
4.1.1 ผลการวิเคราะห์ผลตอบสนองอิมพัลส์ของเต้าพิน

ฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัล (Power Spectral Density) ของผลตอบสนองอิมพัลส์ของเต้าพินที่ได้จากกระบวนการทดลองที่แสดงในส่วนที่ 3.2.1 แสดงอยู่ในรูปที่ 4.1

สังเกตผลการทดลองพบว่าเต้าพินจะมีอัตราขยายสัญญาณที่สูงอยู่ในย่านความถี่ระหว่าง 200 – 400 Hz โดยจุดสูงสุดของอัตราขยายสัญญาณอยู่ที่ 237.5363 Hz และที่ 393.6497 Hz จากนั้นลดทอนสัญญาณในย่านความถี่ 400 – 800 Hz และขยายสัญญาณอีกเล็กน้อยในย่านความถี่ 800 – 1200 Hz จากนั้นอัตราขยายจะแปรผกผันกับความถี่กล่าวคือที่ความถี่สูงจะมีอัตราขยายสัญญาณน้อยกว่าที่ความถี่ต่ำ

4.1.2 ผลการวิเคราะห์ความถี่ฟอร์แมนท์ของสายพินเปล่า

รูปที่ 4.2 แสดงตัวอย่างฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัลของเสียงพินที่ขึ้นเสียง มุ โดยความหนาแน่นกำลังสเปกตรัลของการวัดแต่ละครั้งจะแสดงเป็นเส้นประ ในขณะที่ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นกำลังสเปกตรัลของแต่ละเสียงในแกนเดซิเบลแสดงเป็นเส้นเต็ม จากรูปจะเห็น



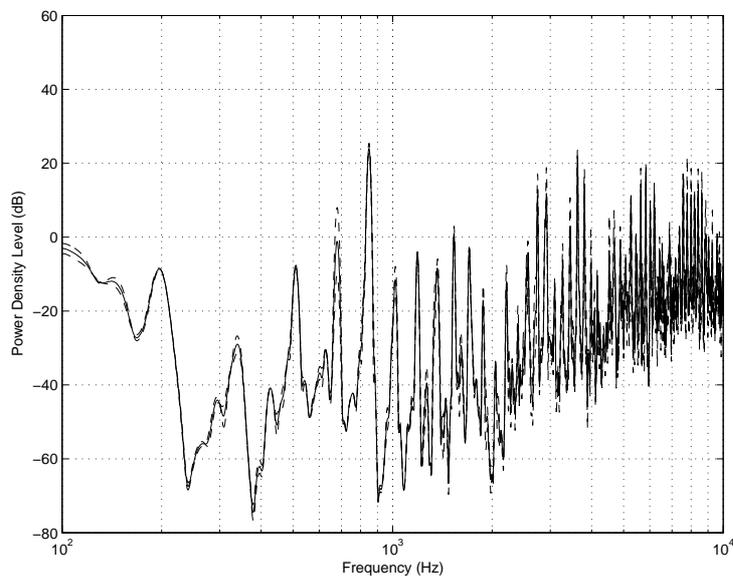
รูปที่ 4.1: พลังกึ่งชั้นความหนาแน่นกำลังสเปกตรัลของผลตอบสนองอิมพัลส์ของเต้าพิน เส้นสีเทาแต่ละเส้นคือพลังกึ่งชั้นความหนาแน่นกำลังสเปกตรัลของผลตอบสนองอิมพัลส์ของเต้าพินของการวัดแต่ละครั้ง เส้นสีดำหนาคือค่าเฉลี่ยในแกนเดซิเบล

ว่าความหนาแน่นกำลังสเปกตรัลที่ได้จากการวัดแต่ละครั้งของแต่ละชั้นเสียงมีค่าใกล้เคียงกัน พลังกึ่งชั้นความหนาแน่นกำลังสเปกตรัลของเสียงพินที่ได้ทำการวัดทั้งหมดแสดงอยู่ในภาคผนวก ข

จากการสังเกตพลังกึ่งชั้นความหนาแน่นกำลังสเปกตรัลของเสียงพินพบว่าสัญญาณเสียงแต่ละเสียงประกอบด้วยความถี่ฟอร์แมนท์ ณ ลำดับต่าง ๆ โดยความถี่ฟอร์แมนท์ลำดับแรกของเสียงพินแต่ละเสียงจะแตกต่างกันและความถี่ฟอร์แมนท์ลำดับต่อ ๆ มาก็เป็นความถี่โดยประมาณเป็นจำนวนเต็มเท่าของความถี่ฟอร์แมนท์แรก อย่างไรก็ตามเนื่องจากผลของตัวกรองอิควอไลซ์พลังกึ่งชั้นส่งผ่านของเต้าพิน ($R^{-1}(z)$) ทำให้พลังกึ่งชั้นความหนาแน่นสเปกตรัลของเสียงพินในช่วงความถี่ระหว่าง 200 – 400 Hz มีค่าต่ำจนไม่สามารถจะตรวจจับฟอร์แมนท์ที่ตกในช่วงความถี่นี้ได้โดยอัตโนมัติ จึงต้องประเมินค่าฟอร์แมนท์ลำดับที่หนึ่งโดยใช้ผลต่างระหว่างฟอร์แมนท์ลำดับที่สองกับฟอร์แมนท์ลำดับที่สามแทน ตารางที่ 4.1 แสดงความถี่ฟอร์แมนท์ลำดับที่หนึ่งถึงฟอร์แมนท์ลำดับที่สามของเสียงพินที่วัดได้ทั้ง 18 เสียง

เนื่องจากความถี่ฟอร์แมนท์สัมบูรณ์ของพินขึ้นอยู่กับความตึงในสายพิน แม้ว่าจจะตั้งสายพินโดยเทียบเสียงกับเสียงแคนแล้วก็ตามแต่หากให้นักดนตรี 2 คน ตั้งสายพินหลังเดียวกันต่างกรรมต่างวาระกันความถี่ฟอร์แมนท์สัมบูรณ์อาจจะไม่เท่ากันก็ได้ แต่ระยะพิตช์ (Pitch) ระหว่างชั้นเสียง ซึ่งเป็นระยะที่บอกความแตกต่างของเสียงสองความถี่ในสเกลลอกการิทึมมีหน่วยเป็นเซนต์ (Cent) และมีขั้นตอนการคำนวณดังสมการที่ 4.1 [15] ควรจะมีค่าใกล้เคียงกัน

$$d = 1200 \log_2 \frac{f_2}{f_1} \quad (4.1)$$



รูปที่ 4.2: ฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัลของเสียงพินสายเปล่าเสียง ม

ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 4.2 โดยแสดงผลเปรียบเทียบกับระยะพิตช์ในอุดมคติของดนตรีไทย (171.4286 เซนต์) [7] และกับระยะพิตช์ของดนตรีสากล [1] พบว่าระบบระยะพิตช์ของพินแตกต่างจากระบบระยะพิตช์ในอุดมคติของดนตรีไทยแต่มีความคล้ายคลึงกับระบบระยะพิตช์ของดนตรีสากลทำให้น่าสงสัยว่าระบบขึ้นเสียงของพินพื้นบ้านนั้นใกล้เคียงกับระบบขึ้นเสียงของดนตรีสากลแต่เดิมหรือว่าเป็นเช่นนี้เพราะว่าดนตรีอีสานในปัจจุบันได้รับอิทธิพลมาจากดนตรีสากลในช่วงหลังกันแน่ เรื่องนี้เป็นประเด็นที่น่าจะทำการศึกษาต่อไป

4.1.3 ผลการวัดค่าเวลารีเวอร์เบอเรนซ์ของสายพิน

ค่าเวลารีเวอร์เบอเรนซ์ของสายพินเปล่าที่วัดได้เป็นผลจากการดำเนินการตามวิธีการทดลองที่แสดงในส่วนที่ 3.2.2 ค่าเวลารีเวอร์เบอเรนซ์ของเสียงพิน ณ ขึ้นเสียงต่าง ๆ แสดงไว้ในตารางที่ 4.3

จากผลการทดลองพบว่าเวลารีเวอร์เบอเรนซ์ของสายพินเปล่ามีค่าอยู่ระหว่าง 0.9383 – 5.6150 วินาที ค่าความคลาดเคลื่อนจากค่าเฉลี่ยจากการวัดซ้ำมีค่าตั้งแต่ 0.47 – 18.56 % จากการวัด 18 ขึ้นเสียง มีเพียง 5 ขึ้นเสียงเท่านั้นที่มีค่าความคลาดเคลื่อนจากค่าเฉลี่ยเกิน 10 % นอกจากนั้น 13 ขึ้นเสียงมีค่าคลาดเคลื่อนจากค่าเฉลี่ยน้อยกว่า 10 % สาเหตุของความคลาดเคลื่อนที่มีค่าสูงในบางขึ้นเสียงนั้นเกิดจากสภาพการวัดที่มีเสียงรบกวนสูง

4.2 ผลการสังเคราะห์เสียงพิน

การนำเสนอผลการสังเคราะห์เสียงพิน ในส่วนนี้ประกอบด้วยการนำเสนอความถี่ฟอร์แมนท์ของเสียงพินสายเปล่าสังเคราะห์ และค่าเวลารีเวอร์เบอเรนซ์ของเสียงพินที่ขึ้นเสียงต่าง ๆ

ตารางที่ 4.1: ความถี่ฟอร์แมนท์ที่ลำดับที่หนึ่งถึงฟอร์แมนท์ลำดับที่สามของเสียงพินที่ใช้ทำการทดลอง ตัวเลขในตารางทุกตัวเลขมีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ (Hz)

เสียง	ฟอร์แมนท์ที่ 1	ฟอร์แมนท์ที่ 2	ฟอร์แมนท์ที่ 3
ม	170.24	339.15	509.39
ฟ	179.67	357.99	537.66
ช	202.55	399.71	602.26
ล	224.75	450.85	675.60
ท	253.69	510.74	764.43
ด	268.49	536.31	804.80
ร	303.48	606.97	910.45
ม	338.50	677.60	1016.10
ฟ	358.66	716.65	1075.31
ช	401.06	802.11	1203.17
ล	450.18	900.36	1350.54
ท	505.36	1002.64	1508.00
ด	532.90	1069.30	1602.20
ร	598.22	1197.78	1796.00
ม	673.59	1345.15	2018.74
ฟ	709.93	1442.72	2152.65
ช	804.80	1600.86	2405.66
ล	898.34	1794.66	2693.00

4.2.1 ความถี่ฟอร์แมนท์ของสายพินเปล่า

รูปที่ 4.3 แสดงตัวอย่างฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัลของเสียงพินสายเปล่าสังเคราะห์เสียง ม ฟังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัลของเสียงพินสายเปล่าสังเคราะห์ทั้งหมดจะแสดงในภาคผนวก ค จากรูปจะเห็นว่าค่ายอดของฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัลของเสียงพินสายเปล่าสังเคราะห์มีลักษณะเป็นฮาร์โมนิกที่ชัดเจน สิ่งที่สามารถสังเกตเห็นได้ชัดประการหนึ่งก็คือฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัลของเสียงสังเคราะห์ไม่มีส่วนของสัญญาณรบกวนปรากฏอยู่เลย และลักษณะของคอมบ์ฟิลเตอร์ (Comb Filter) ก็ปรากฏออกมาอย่างชัดเจน สอดคล้องกับทฤษฎีการสั่นสะเทือนของเส้นเชือกในอุดมคติ (Ideal String Vibration) [4]

4.2.2 ค่าเวลารีเวอร์เบอเรนซ์ของสายพิน

ค่าความต้านทานกล ๓ หมอนรองสายที่จะทำให้ค่าเวลารีเวอร์เบอเรนซ์ของการสั่นสะเทือนของสายพินมีค่าตรงกับค่าที่วัดได้ซึ่งประมาณโดยใช้กรรมวิธีถดถอยกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square Regression) และค่าเวลารีเวอร์เบอเรนซ์ของเสียงพินสังเคราะห์ทั้ง 2 แบบแสดงในตารางที่ 4.4 T_{60} สังเคราะห์ I ในตารางที่ 4.4 หมายถึงค่าเวลารีเวอร์เบอเรนซ์ของเสียงสังเคราะห์ที่สร้างจากตัวกรองผลตอบสนองอิมพัลส์ของเต้าพิน และ T_{60} สังเคราะห์ II หมายถึงค่าเวลารีเวอร์เบอเรนซ์ของเสียงสังเคราะห์ที่สร้างจากตัวกรองแบบจำลองเต้าพินซึ่งเป็นตัวกรอง IIR

ตารางที่ 4.2: ระยะเวลาพักระหว่างเสียงพิน 2 ชั้นเสียงที่อยู่ติดกันเปรียบเทียบกับระยะเวลาพักระยะพินในอุดมคติ [7] และกับระยะเวลาพักระยะพินของดนตรีสากล [1]

ชั้นเสียง	ระยะเวลาพักระยะพิน (เซนต์)		
	ดนตรีไทย	ดนตรีสากล	พิน
ม-ฟ	171.4286	99.9989	93.3354
ฟ-ช	171.4286	200.0610	207.5143
ช-ล	171.4286	199.9798	180.0516
ล-ท	171.4286	199.9884	209.6946
ท-ด	171.4286	100.0409	98.1620
ด-ร	171.4286	199.9425	212.0797
ร-ม	171.4286	200.0409	189.0653
ม-ฟ	171.4286	99.9959	100.1532
ฟ-ช	171.4286	200.0114	193.4415
ช-ล	171.4286	199.9798	200.0207
ล-ท	171.4286	199.9884	200.1714
ท-ด	171.4286	100.0078	91.8640
ด-ร	171.4286	200.0051	200.1736
ร-ม	171.4286	200.0115	205.4335
ม-ฟ	171.4286	99.9959	90.9673
ฟ-ช	171.4286	199.9893	217.1442
ช-ล	171.4286	200.0019	190.3575

อันดับที่ 64

4.3 ผลการสังเคราะห์เสียงพินทั้งระบบ

การสังเคราะห์เสียงพินทั้งระบบทำได้โดยนำสัญญาณที่ได้จากการสังเคราะห์เสียงพินสายเปล่าผ่านตัวกรองเข้าพินที่ได้จากส่วนที่ 3.3.2 รูปที่ 4.4 และ 4.5 แสดงรูปตัวอย่างสัญญาณเสียงพินเสียง ม ที่สังเคราะห์ได้ สัญญาณเสียงพินสังเคราะห์ทั้งหมดพร้อมกับฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัลจะแสดงในภาคผนวก ง และภาคผนวก จ

จากรูปที่ 4.4 และ 4.5 จะเห็นว่าเสียงสังเคราะห์ที่ใช้ตัวกรองผลตอบสนองอิมพัลส์ของเข้าพินจะให้สภาพเสียงที่คล้ายกับเสียงพินธรรมชาติมากกว่าเสียงที่สังเคราะห์โดยใช้ตัวกรอง IIR อันดับที่ 64

ตารางที่ 4.3: ตารางแสดงค่าเวลารีเวอร์เบอรัชั่นของสายพินเปล่าที่วัดได้ ค่าเฉลี่ย และความคลาดเคลื่อน

ชั้นเสียง	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	% ความคลาดเคลื่อน
ม	2.4240	1.8654	2.1447	±13.02%
ฟ	2.9697	2.8922	2.9310	±1.32%
ช	2.3836	2.4843	2.4340	±2.07%
ล	3.1753	3.1454	3.1604	±0.47%
ท	1.4552	1.4785	1.4669	±0.79%
ด	2.2247	2.1456	2.1852	±1.81%
ร	3.4505	4.4712	3.9609	±12.88%
ม	5.6150	3.8571	4.7361	±18.56%
ฟ	2.0510	2.1328	2.0919	±1.96%
ช	1.4838	1.7532	1.6185	±8.32%
ล	2.3535	2.1797	2.2666	±3.83%
ท	2.3918	2.0915	2.2417	±6.70%
ด	1.3418	1.2277	1.2848	±4.44%
ร	2.7531	3.0852	2.9192	±5.69%
ม	1.0856	1.3480	1.2168	±10.78%
ฟ	2.1712	2.7610	2.4661	±11.96%
ช	1.0531	1.1392	1.0962	±3.93%
ล	0.9383	1.0228	0.9806	±4.31%

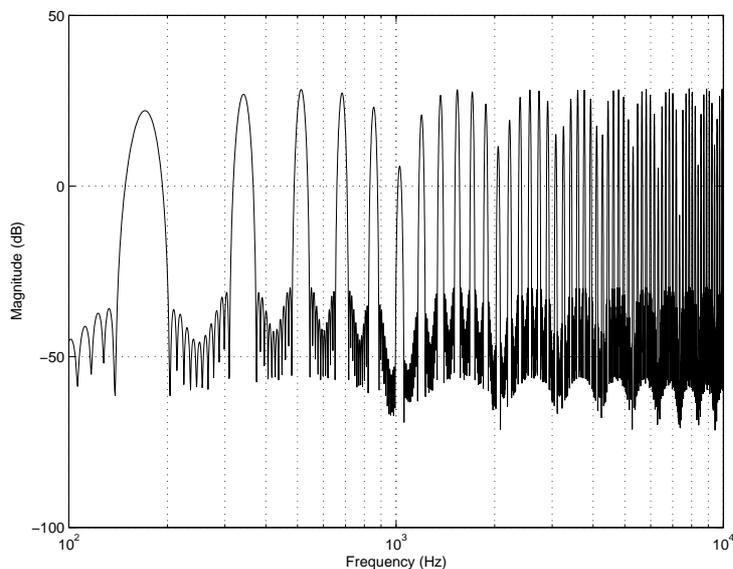
4.4 ผลการเปรียบเทียบเสียงพินธรรมชาติกับเสียงพินสังเคราะห์

4.4.1 ผลการเปรียบเทียบเชิงปริมาณ

ผลการเปรียบเทียบความถี่ฟอร์แมนท์และระยะพิตช์

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าแรงตึงในสายพิน ความถี่ฟอร์แมนท์ที่วัดได้เทียบกับความถี่ฟอร์แมนท์ของเสียงสังเคราะห์ ณ ชั้นเสียงต่าง ๆ พร้อมทั้งค่าความคลาดเคลื่อนคิดเป็นร้อยละ (%) สังเกตว่าความคลาดเคลื่อนจากค่าที่วัดได้สูงสุดคือ 5.62% ที่ชั้นเสียงสูงที่สุดคือเสียง ล ในขณะที่ค่าความผิดพลาดส่วนใหญ่มีค่าน้อยกว่า 1.00% สาเหตุที่เป็นไปได้ของความคลาดเคลื่อนเหล่านี้ประกอบด้วย

- ความไม่สม่ำเสมอของค่าความหนาแน่นต่อหน่วยความยาว (ρ_L) ของสายพินที่ใช้ เทียบกับความสม่ำเสมอของความหนาแน่นต่อหน่วยความยาวของสายพินในแบบจำลองคอมพิวเตอร์
- ความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบพิน ในขณะที่แบบจำลองที่ใช้ ณ ที่นี้เป็นแบบเชิงเส้น
- แรงตึงในสายพินที่ใช้ในการคำนวณไม่เท่ากับแรงตึงที่เกิดขึ้นจริง
- ค่าผิดพลาดอันเนื่องจากการการแบ่งส่วน (Quantization Error)



รูปที่ 4.3: ตัวอย่างฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัลของเสียงพินสายเปล่าสังเคราะห์เสียง ม

การเปรียบเทียบระยะพิทช์ ณ ชั้นเสียงต่าง ๆ ระหว่างเสียงสังเคราะห์กับเสียงที่วัดได้แสดงในตารางที่ 4.6 สังเกตว่าความคลาดเคลื่อนส่วนหนึ่งมีค่าไม่เกิน 10 % ในขณะที่ความคลาดเคลื่อนที่มีค่าสูงที่สุดนั้นมีค่าสูงถึง 66.18 % ในภาพรวมถือว่าระยะพิทช์ของเสียงสังเคราะห์มีความคลาดเคลื่อนจากค่าที่วัดได้จริงสูง สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการสังเคราะห์เสียงมีเป้าหมายเพื่อให้ได้ความถี่ฟอร์แมนท์ที่ใกล้เคียงค่าที่วัดได้มากที่สุด ไม่ได้มีเป้าหมายเพื่อให้ได้ระยะพิทช์ที่ใกล้เคียงค่าที่วัดได้มากที่สุด เฉพาะในส่วนของชั้นเสียง ช – ล ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนสูงที่สุดนั้น หากพิจารณาค่าความถี่ฟอร์แมนท์ของเสียง ล จากตารางที่ 4.5 ประกอบก็จะพบว่าเสียงสังเคราะห์ที่ชั้นเสียงนี้มีความคลาดเคลื่อนสูงที่สุดเช่นกัน

ผลการเปรียบเทียบค่าเวลารีเวอเบอเรชั่น

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าความผิดพลาดเป็นร้อยละของของค่าเวลารีเวอเบอเรชั่นของเสียงพินสังเคราะห์จากตารางที่ 4.4 เมื่อเทียบกับค่าเวลารีเวอเบอเรชั่นเฉลี่ยของเสียงพินธรรมชาติจากตารางที่ 4.3

เป็นที่น่าแปลกใจว่าผลการเปรียบเทียบค่าเวลารีเวอเบอเรชั่นให้ค่าผิดพลาดที่สูง ค่าผิดพลาดที่สูงที่สุดมีค่าสูงถึง -108.26% ที่เดียว

4.4.2 ผลการเปรียบเทียบเชิงคุณภาพ

ผลการเปรียบเทียบเชิงคุณภาพประกอบด้วย 1) ผลการเปรียบเทียบเพื่อวัดความแตกต่างระหว่างเสียงพินธรรมชาติที่บันทึกไว้กับเสียงพินที่สังเคราะห์ได้ และ 2) ผลการเปรียบเทียบเพื่อประเมินระดับความใกล้เคียงเสียงธรรมชาติ โดยกระบวนการทดลองนั้นได้อธิบายไว้ในบทที่ 3.4

ตารางที่ 4.4: ค่าความต้านทานกลของแต่ละชั้นเสียงที่ประมาณได้และค่าเวลารีเวอร์เบอเรนซ์ที่ได้จากค่าความต้านทานกลนั้น ๆ

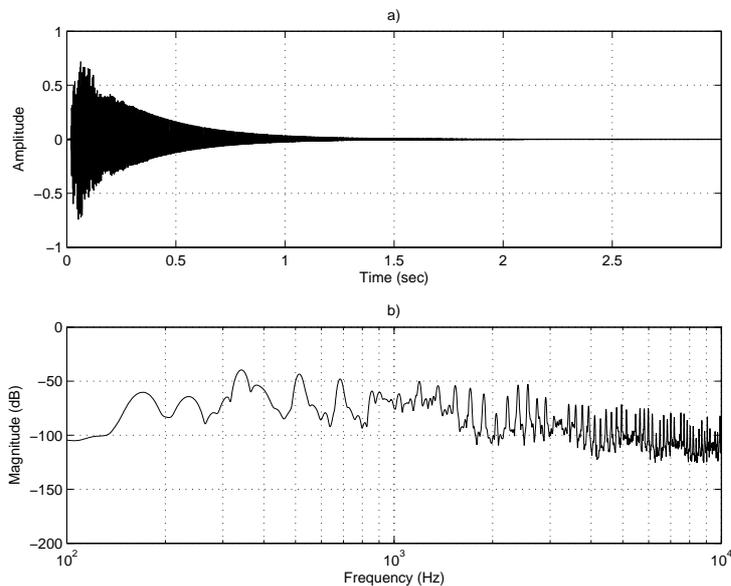
ชั้นเสียง	R_{mL}	T_{60} สังเคราะห์ I	T_{60} สังเคราะห์ II
ม	86.5829	2.0817	2.1532
ฟ	124.8225	3.3395	2.9950
ช	116.6065	2.2430	2.4365
ล	78.2821	3.2937	3.2736
ท	54.1559	2.2752	2.1283
ด	89.6861	3.2913	3.1183
ร	131.4713	4.1005	4.1100
ม	188.5988	5.3759	5.2241
ฟ	107.6123	2.8845	2.5362
ช	79.0966	1.6479	1.6862
ล	133.6338	2.4212	2.5239
ท	157.8135	3.1582	2.7167
ด	101.4846	1.8956	1.5852
ร	274.2362	4.1416	4.2913
ม	206.5264	2.8073	2.6528
ฟ	205.8794	2.5292	2.4968
ช	192.2143	2.1229	1.9542
ล	162.4369	1.6879	1.7263

ผลการเปรียบเทียบเพื่อวัดความแตกต่างระหว่างกัน

รูปที่ 4.6 แสดงผลการวัดความแตกต่างระหว่างเสียงธรรมชาติกับเสียงสังเคราะห์ทั้ง 2 แบบ โดยเส้นสีดำแสดงผลการเปรียบเทียบเสียงธรรมชาติกับเสียงสังเคราะห์ที่สร้างโดยใช้ผลตอบสนองอิมพัลส์ของเต้าพิน และเส้นสีเทาแสดงผลการเปรียบเทียบเสียงธรรมชาติกับเสียงสังเคราะห์ที่สร้างขึ้นโดยอาศัยตัวกรอง IIR อันดับที่ 64 แสดงผลการทดลองในรูปความน่าจะเป็นที่อาสาสมัครจะระบุเสียงที่แตกต่างได้ถูกต้อง ชั้นเสียงหมายเลข 1 ในรูปหมายถึงเสียง ม และชั้นเสียงหมายเลข 2 ในรูปหมายถึง ฟ เป็นอย่างนี้เรื่อยไปตามลำดับ เนื่องจากเกิดความผิดพลาดจากจัดเก็บข้อมูลจึงมีข้อมูลผลการทดลองที่ถูกต้องเพียงผลการทดลองของเสียง ม – ฟ รวม 16 เสียงเท่านั้น

ผลการทดลองแสดงว่าอาสาสมัครสามารถระบุเสียงที่แตกต่างได้ถูกต้องอย่างไม่มีข้อสงสัยหมายความว่าเสียงสังเคราะห์ที่ได้มีความแตกต่างจากเสียงพิณธรรมชาติที่บันทึกไว้อย่างชัดเจน

นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าความน่าจะเป็นที่อาสาสมัครจะระบุเสียงที่แตกต่างได้ถูกต้องนั้นลดลงในกรณีที่เสียงสังเคราะห์นั้นสร้างโดยใช้ผลตอบสนองอิมพัลส์ของเต้าพินเมื่อเปรียบเทียบ กับที่สังเคราะห์โดยใช้ตัวกรอง IIR อันดับที่ 64 อย่างไรก็ตามความแตกต่างนี้ได้รับการ



รูปที่ 4.4: ตัวอย่างสัญญาณเสียง ม สังเคราะห์ที่ใช้ตัวกรองผลตอบสนองอิมพัลส์เต่าพิน

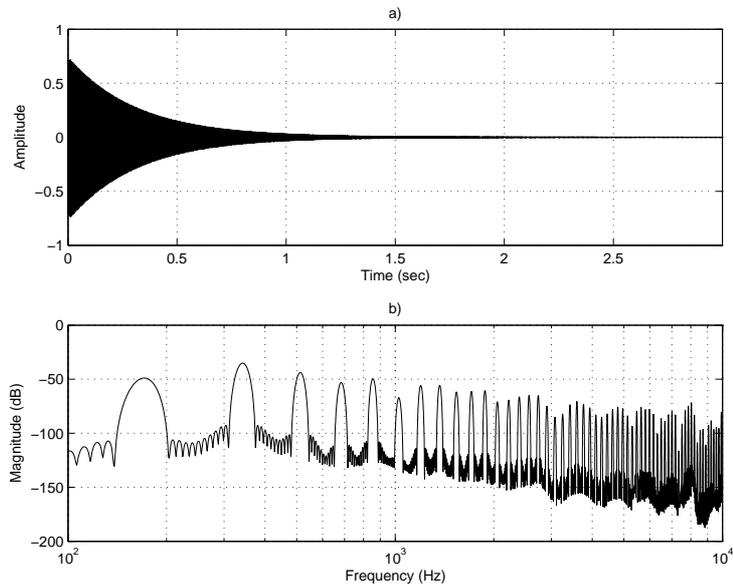
ยืนยันก็ต่อเมื่อมีการทดลองที่ใช้จำนวนอาสาสมัครมากกว่านี้

ผลการเปรียบเทียบเพื่อประเมินระดับความใกล้เคียงเสียงธรรมชาติ

รูปที่ 4.7 แสดงผลการประเมินระดับความใกล้เคียงเสียงธรรมชาติระหว่างเสียงพินธรรมาชาติเสียงพินสังเคราะห์ที่ใช้ตัวกรองผลตอบสนองอิมพัลส์ของเต่าพิน และเสียงพินสังเคราะห์ที่ใช้ตัวกรอง IIR อันดับที่ 64 โดยคะแนนระดับ 5 หมายถึงอาสาสมัครมั่นใจว่าเสียงที่ได้ยินนั้นเป็นเสียงธรรมชาติ และคะแนนระดับ 1 หมายถึงอาสาสมัครมั่นใจว่าเสียงที่ได้ยินนั้นเป็นเสียงสังเคราะห์ เนื่องจากเกิดข้อผิดพลาดขึ้นในระหว่างการจัดเก็บข้อมูลทำให้มีข้อมูลผลการทดลองที่ถูกต้องเฉพาะสำหรับชั้นเสียง ม-พ รวมทั้งสิ้น 16 เสียงเท่านั้น แสดงผลการเปรียบเทียบแยกตามชั้นเสียงทั้ง 16 ชั้นเสียงตามลำดับ

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า โดยส่วนใหญ่แล้วอาสาสมัครสามารถทราบได้ว่าเสียงใดน่าจะเป็นเสียงธรรมชาติ ในขณะที่คะแนนความเป็นธรรมชาติของเสียงสังเคราะห์นั้นอยู่ระหว่าง 2 (น่าจะเป็นเสียงสังเคราะห์) และ 3 (ไม่แน่ใจ) แม้กระนั้นก็มีบางชั้นเสียงที่ระดับคะแนนของเสียงธรรมชาติและเสียงสังเคราะห์ที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกัน คือ ชั้นเสียง ซ (ลำดับที่ 3) ชั้นเสียง ร (ลำดับที่ 7) ชั้นเสียง ม (ลำดับที่ 8) ชั้นเสียง ช (ลำดับที่ 10) ชั้นเสียง ท (ลำดับที่ 12) ชั้นเสียง ร์ (ลำดับที่ 14) และ ชั้นเสียง ม (ลำดับที่ 15)

ในภาพรวมสังเกตได้ว่าระดับคะแนนของเสียงสังเคราะห์ที่สร้างขึ้นโดยใช้ตัวกรองผลตอบสนองอิมพัลส์ของเต่าพินจะมีค่าสูงกว่าระดับคะแนนของเสียงสังเคราะห์ที่สร้างขึ้นโดยใช้ตัวกรอง IIR อันดับที่ 64 แสดงให้เห็นว่าหากต้องการเสียงสังเคราะห์ที่เหมือนจริงมากขึ้นจะต้องปรับปรุงแบบจำลองตัวกรองเต่าพิน



รูปที่ 4.5: ตัวอย่างสัญญาณเสียง มุสังเคราะห์ที่ใช้ตัวกรอง IIR อันดับที่ 64

4.5 สรุป

ผลการทดลองแบ่งออกเป็นสองส่วนหลักคือผลการทดลองในส่วนของการวัดและวิเคราะห์เสียงพินิจจริง และผลการทดลองในส่วนของการสังเคราะห์และวิเคราะห์เสียงพินิจสังเคราะห์ การวัดและวิเคราะห์เสียงพินิจจริงทำให้ทราบคุณลักษณะบางประการของพินิจบ้านเช่นคุณลักษณะความเป็นตัวกรองแถบความถี่ (Bandpass Filter) ของเต้าพิน ความใกล้เคียงความเป็นตัวต้านทานกลบรีสุทธีของหมอนรองสายของพินิจบ้าน เป็นต้น

การเปรียบเทียบสัญญาณเสียงธรรมชาติกับสัญญาณเสียงสังเคราะห์โดยการเปรียบเทียบเชิงปริมาณผลการเปรียบเทียบพบว่าค่าคุณลักษณะต่าง ๆ ของเสียงสังเคราะห์แตกต่างจากค่าเฉลี่ยของคุณลักษณะต่าง ๆ ของเสียงที่วัดได้อยู่บ้างแต่ไม่มากนัก ความแตกต่างที่เกิดขึ้นน่าจะมาจากความไม่เป็นอุดมคติและส่วนประกอบของความไม่เป็นเชิงเส้นของเครื่องดนตรีจริง ในขณะที่แบบจำลองของเครื่องดนตรีตั้งอยู่บนสมมติฐานในอุดมคติหลายประการอีกทั้งแบบจำลองยังจำกัดตัวอยู่ที่แบบจำลองแบบเป็นเชิงเส้นอีกด้วย

การเปรียบเทียบสัญญาณเสียงธรรมชาติกับสัญญาณเสียงสังเคราะห์โดยการเปรียบเทียบเชิงคุณภาพซึ่งใช้การทดลองโดยการฟัง (Listening Tests) แสดงว่าอาสาสมัครสามารถระบุได้ทันทีว่าเสียงธรรมชาติ กับเสียงสังเคราะห์ทั้ง 2 แบบนั้นมีความแตกต่างกัน

นอกจากนี้เมื่อให้อาสาสมัครให้คะแนนความเหมือนจริงของสัญญาณเสียงโดยไม่ให้อาสาสมัครทราบว่ากำลังฟังเสียงใดอยู่ พบว่าระดับคะแนนความเหมือนจริงของเสียงธรรมชาติส่วนใหญ่จะมีค่าสูงกว่าระดับคะแนนความเหมือนจริงของเสียงสังเคราะห์ทั้ง 2 อย่างเห็นได้ชัด อย่างไรก็ตามมีบางชิ้นเสียงที่ระดับคะแนนความเหมือนจริงของเสียงสังเคราะห์มีค่าทัดเทียมกับระดับคะแนนความเหมือนจริงของเสียงธรรมชาติ นอกจากนี้จะพบข้อสังเกตอีกประการหนึ่งด้วยว่าระดับคะแนนโดยเฉลี่ยของเสียงสังเคราะห์ที่สร้างจากตัวกรองผลตอบสนองอิมพัลส์ของเต้าพิน จะ

ตารางที่ 4.5: ค่าแรงตึงในสายพินที่คำนวณได้และความถี่พอร์แมนท์ที่หนึ่งของแต่ละชั้นเสียงและความคลาดเคลื่อนเมื่อเปรียบเทียบกับเสียงที่ได้จากการวัด

ชั้นเสียง	แรงตึงในสายพิน (N)	พอร์แมนท์ที่วัดได้ (Hz)	พอร์แมนท์สังเคราะห์ (Hz)	ผิดพลาด (%)
ม	77.60	170.24	170.92	-0.40 %
ฟ	78.05	179.67	181.01	-0.75 %
ช	78.49	202.55	202.54	0.00 %
ล	47.21	224.75	224.75	0.00 %
ท	48.20	253.69	253.69	0.00 %
ด	47.93	268.49	269.16	-0.25 %
ร	48.55	303.48	302.14	0.44 %
ม	77.20	338.50	333.76	1.40 %
ฟ	79.49	358.66	361.35	-0.75 %
ช	77.28	401.06	401.06	0.00 %
ล	76.75	450.18	450.18	0.00 %
ท	77.77	505.36	501.32	0.80 %
ด	77.34	532.90	537.66	-0.89 %
ร	76.73	598.22	596.20	0.34 %
ม	77.33	673.59	668.20	0.80 %
ฟ	75.85	709.93	711.27	-0.19 %
ช	77.17	804.80	816.92	-1.51 %
ล	68.83	898.34	847.87	5.62 %

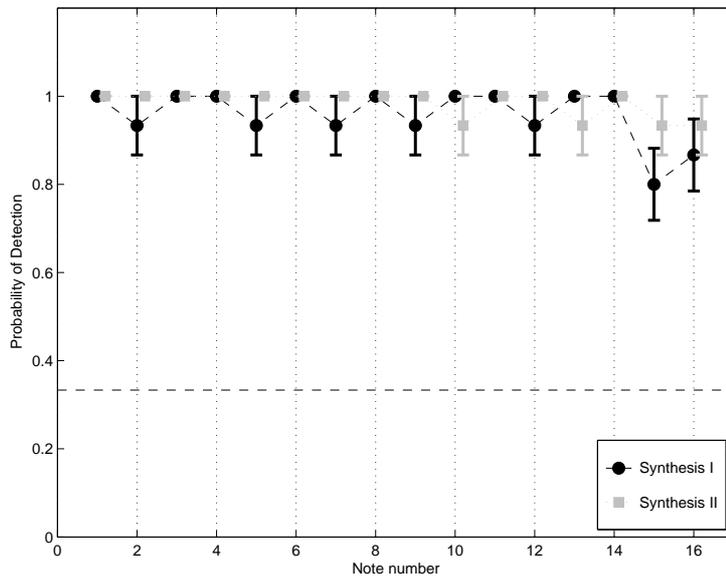
มีค่าสูงกว่าระดับคะแนนโดยเฉลี่ยของเสียงสังเคราะห์ที่สร้างจากตัวกรอง IIR อันดับที่ 64 ที่จำลองจากผลตอบสนองความถี่ของเต้าพินโดยใช้กรรมวิธียูล-วอล์กเกอร์ (Yule-Walker Method) แสดงว่านอกเหนือจากการจำลองการสั่นสะเทือนของสายพินแล้ว แบบจำลองเต้าพินก็มีความสำคัญไม่ยิ่งหย่อนไปกว่ากัน

ตารางที่ 4.6: เปรียบเทียบระยะพิตช์ระหว่างชั้นเสียงต่าง ๆ ระหว่างเสียงสังเคราะห์กับเสียงที่วัดได้

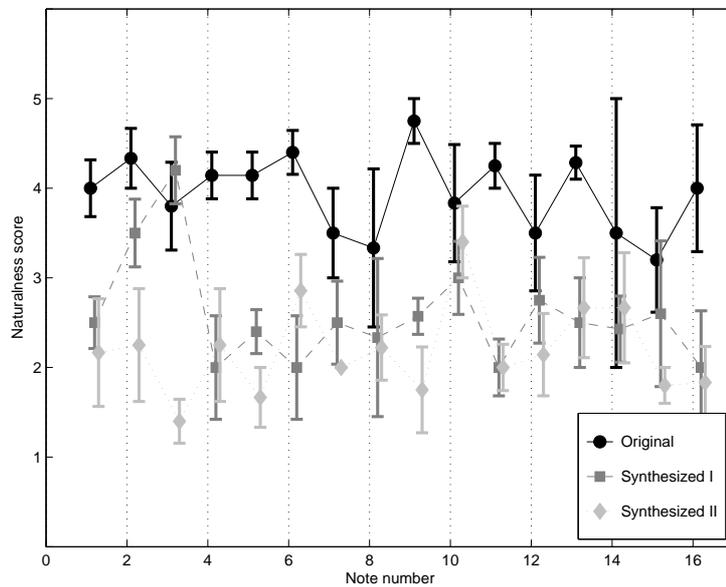
ชั้นเสียง	ระยะพิตช์ (เฮนซ์)		ค่าผิดพลาด (%)
	เสียงที่วัดได้	เสียงสังเคราะห์	
ม-ฟ	93.3354	99.2978	-6.39 %
ฟ-ช	207.5140	194.5649	6.24 %
ช-ล	180.0516	180.1371	-0.05 %
ล-ท	209.6946	209.6946	0.00 %
ท-ด	98.1620	102.4768	-4.40 %
ด-ร	212.0797	200.1038	5.65 %
ร-ม	189.0653	172.3126	8.86 %
ม-ฟ	100.1532	137.5030	-37.29 %
ฟ-ช	193.4415	180.5054	6.69 %
ช-ล	200.0207	200.0207	0.00 %
ล-ท	200.1714	186.2758	6.94 %
ท-ด	91.8640	121.1548	-31.88 %
ด-ร	200.1736	178.9227	10.62 %
ร-ม	205.4335	197.3803	3.92 %
ม-ฟ	90.9673	108.1408	-18.88 %
ฟ-ช	217.1442	239.7570	-10.41 %
ช-ล	190.3575	64.3779	66.18 %

ตารางที่ 4.7: ค่าความผิดพลาดเป็นร้อยละของค่าเวลารีเวอเบอเรชั่นของเสียงพินลั้งเคราะห์ ทั้ง 2 แบบเทียบกับค่าเวลารีเวอเบอเรชั่นเฉลี่ยของเสียงพินธรรมชาติ

ชั้นเสียง	ค่าผิดพลาด ลั้งเคราะห์ I	ค่าผิดพลาด ลั้งเคราะห์ II
ม	-11.60 %	-15.43 %
ฟ	-15.47 %	-3.55 %
ช	9.71 %	1.92 %
ล	-4.71 %	-4.08 %
ท	-53.89 %	-43.95 %
ด	-53.40 %	-45.33 %
ร	8.29 %	8.08 %
ม	-39.38 %	-35.44 %
ฟ	-35.24 %	-18.91 %
ช	6.01 %	3.82 %
ล	-11.08 %	-15.79 %
ท	-51.00 %	-29.89 %
ด	-54.40 %	-29.12 %
ร	-34.24 %	-39.09 %
ม	-108.26 %	-96.80 %
ฟ	8.40 %	9.57 %
ช	-65.03 %	-68.78 %
ล	-86.35 %	-71.54 %



รูปที่ 4.6: ผลการเปรียบเทียบเพื่อวัดความแตกต่างระหว่างเสียงธรรมชาติกับเสียงสังเคราะห์ ทั้ง 2 แบบ Synthesized I หมายถึงผลการทดลองของเสียงสังเคราะห์ที่ใช้ผลตอบสนองอิมพัลส์ของเต้าพิน Synthesized II หมายถึงผลการทดลองของเสียงสังเคราะห์ที่ใช้ตัวกรอง IIR



รูปที่ 4.7: ผลการประเมินระดับความใกล้เคียงเสียงธรรมชาติของเสียงพินทั้ง 3 แบบ คือ เสียงพินธรรมชาติ เสียงพินสังเคราะห์ที่ใช้ตัวกรองผลตอบสนองอิมพัลส์ของเต้าพิน (Synthesized I) และเสียงพินสังเคราะห์ที่ใช้ตัวกรอง IIR อันดับ 64 (Synthesized II)

บทที่ 5

สรุป

การนำวิทยาศาสตร์เข้ามาศึกษาดนตรีและเครื่องดนตรีพื้นบ้านเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่จะช่วยรักษาและพัฒนาดนตรีพื้นบ้านได้ ในสาขาดนตรีสากลได้มีการนำวิทยาศาสตร์เข้ามาศึกษาและพัฒนาเครื่องดนตรีและเครื่องดนตรีมาไม่น้อยกว่า 50 ปี สำหรับดนตรีไทยก็ได้มีการนำวิทยาศาสตร์เข้ามาเป็นเครื่องมือในการศึกษาดนตรีไทยในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยอีกหนึ่งชิ้นที่ใช้วิทยาศาสตร์เป็นเครื่องมือในการศึกษาดนตรีไทย โดยเลือกเครื่องดนตรีคือ พิณพื้นบ้านเป็นกรณีศึกษา

งานวิจัยประกอบด้วยงานสองส่วนหลักคือ 1) การวิเคราะห์เสียงพิณพื้นบ้าน และ 2) การสังเคราะห์เสียงพิณพื้นบ้านโดยใช้กรรมวิธีจำลองสภาพทางกายภาพ (Physical Model)

การวิเคราะห์เสียงพิณพื้นบ้านประกอบด้วยวิธีการวิเคราะห์ผลตอบสนองความถี่ของเต้าพิณ ผลตอบสนองความถี่ของสายพิณ และค่าเวลารีเวอร์เบอเรชั่นของสายพิณ ทั้งนี้ก็เพื่อให้ทราบถึงลักษณะเฉพาะตัวของเสียงพิณพื้นบ้าน และสามารถนำไปสู่การศึกษาคุณลักษณะเฉพาะตัวของดนตรีอีสานได้อีกด้วย ผลการทดลองชี้นำไปสู่สิ่งที่น่าสนใจ 2 ประเด็นด้วยกันคือ

1. คุณลักษณะความเป็นตัวกรองแถบความถี่ผ่าน (Bandpass Filter) ของเต้าพิณ ซึ่งมีช่วงแถบความถี่ผ่านอยู่ระหว่าง 200 – 400 Hz ทำให้ทราบว่าหากผู้บรรเลงต้องการจะตั้งสายพิณให้มีเสียงดังกังวานแล้ว ควรจะตั้งสายพิณให้ความถี่ฟอร์แมนทของเสียงแต่ละชั้นเสียงตกอยู่ในช่วงความถี่ดังกล่าว หรือหากชั้นเสียงที่จำเป็นต้องใช้อยู่นอกขอบเขตความถี่ดังกล่าวแล้ว ช่างทำพิณก็ต้องออกแบบเต้าพิณใหม่ให้มีช่วงแถบความถี่ผ่านที่เหมาะสมเช่นต่ำลงหรือสูงขึ้นต่อไป
2. ระยะเวลาพิทช์ (Pitch Interval) ระหว่างชั้นเสียงไม่สอดคล้องกับระยะเวลาพิทช์ในอุดมคติของดนตรีไทย แต่สอดคล้องกับดนตรีสากลมากกว่า ในประเด็นนี้ยังเป็นที่น่าสงสัยว่าลักษณะระยะเวลาพิทช์ของพิณเช่นนี้ เป็นลักษณะดั้งเดิม หรือว่าเป็นลักษณะที่เกิดขึ้นในภายหลังคือหลังจากที่ภูมิภาคนี้ได้รับอิทธิพลทางวัฒนธรรมจากดนตรีตะวันตกในช่วง 50 ปีที่ผ่านมา แนวทางการศึกษาในประเด็นนี้ต่อไปก็คือการศึกษาระยะเวลาพิทช์ของพิณจากพื้นที่ต่าง ๆ กัน เช่น พิณ 4 สายจากพื้นที่ภาคเหนือเพื่อทำการเปรียบเทียบเป็นต้น

การสังเคราะห์เสียงพิณประกอบด้วยวิธีการจำลองสภาพของการสั่นสะเทือนของสายพิณด้วยแบบจำลองทางกายภาพ (Physical Model) และการสร้างตัวกรองสัญญาณซึ่งในการศึกษานี้ใช้ตัวกรองเต้าพิณ 2 แบบคือ ตัวกรองที่สร้างจากผลตอบสนองอิมพัลส์ของเต้าพิณที่วัดได้

จริง และตัวกรองแบบ IIR ที่เป็นแบบจำลองทางสัญญาณ (Signal Model) เพื่อจำลองสภาพของเต้าพินโดยใช้กรรมวิธียูล-วอล์กเกอร์ (Yule-Walker) การสังเคราะห์เสียงพินกระทำโดยใช้พารามิเตอร์ควบคุมเพื่อให้ได้ผลที่สอดคล้องกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์เสียงพิน

ประเมินผลการสังเคราะห์เสียงโดยเปรียบเทียบเชิงปริมาณกับผลการวิเคราะห์เสียงธรรมชาติที่บันทึกไว้พบว่าได้ผลพอใช้ กล่าวคือเสียงสังเคราะห์มีความถี่ฟอร์แมนท์ที่หนึ่งใกล้เคียงกับเสียงธรรมชาติ ในขณะที่ระยะพิตช์และค่าเวลารีเวอร์เบอเรนซ์ของเสียงสังเคราะห์มีความคลาดเคลื่อนจากเสียงธรรมชาติอยู่มาก

ประเมินผลการสังเคราะห์เสียงโดยเปรียบเทียบเชิงคุณภาพซึ่งใช้การทดลองโดยการฟัง 2 แบบคือ การเปรียบเทียบเพื่อวัดความแตกต่างระหว่างกัน และการเปรียบเทียบเพื่อประเมินระดับความใกล้เคียงเสียงธรรมชาติ ผลการเปรียบเทียบเพื่อวัดความแตกต่างระหว่างกันระบุว่าผู้ฟังสามารถระบุได้ทันทีว่าเสียงธรรมชาติและเสียงสังเคราะห์นั้นแตกต่างกัน อย่างไรก็ตามการทดลองนี้ยังไม่สามารถทำให้ทราบได้ว่าที่แตกต่างกันนั้นเป็นความแตกต่างระหว่างเสียงใด ๆ 2 เสียง หรือเป็นความแตกต่างที่ทราบแน่ชัดว่าเสียงหนึ่งคือเสียงธรรมชาติ และอีกเสียงหนึ่งคือเสียงสังเคราะห์

ผลการเปรียบเทียบเพื่อประเมินระดับความใกล้เคียงเสียงธรรมชาติระบุว่า ผู้ฟังให้คะแนนเสียงธรรมชาติโดยเฉลี่ยสูงกว่าเสียงสังเคราะห์ อย่างไรก็ตามเสียงสังเคราะห์บางชิ้นเสียงได้รับคะแนนสูงใกล้เคียงกับเสียงธรรมชาติ สังเกตได้ชัดเจนว่าเสียงสังเคราะห์ที่ใช้ตัวกรองผลตอบสนองอิมพัลส์ของเต้าพินจะได้คะแนนสูงกว่าเสียงสังเคราะห์ที่ใช้ตัวกรอง IIR อันดับที่ 64 ผลการทดลองนี้ชี้แนะว่าการพัฒนาตัวกรองเต้าพินเพื่อให้มีความเหมือนจริงและมีประสิทธิภาพสูงมีความสำคัญต่อคุณภาพเสียงอย่างยิ่ง

ผลการทดลองที่ไม่เป็นไปตามสมมติฐานบางส่วนนั้นอาจจะเนื่องมาจากสมมติฐานตั้งต้นของตัวแบบจำลองเองซึ่งถูกกำหนดให้เป็นระบบเชิงเส้นที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Linear Time Invariant System) ในขณะที่ระบบพินจริงอาจจะไม่เป็นเช่นนั้น นอกจากนี้เงื่อนไขการกำเนิดเสียงของเสียงทั้งสองก็ต่างกันคือเสียงจริงวัดและบันทึกในสภาพห้องทำงานทั่วไปที่มีสัญญาณเสียงรบกวน ในขณะที่เสียงสังเคราะห์กำเนิดจากการคำนวณและไม่มีสัญญาณรบกวนเป็นส่วนประกอบเลย

ข้อบกพร่องประการหนึ่งของการวิเคราะห์และสังเคราะห์เสียงพินพื้นฐานในรายงานฉบับนี้ซึ่งพบในภายหลังคือ ค่าเวลารีเวอร์เบอเรนซ์ของเสียงพิน ๓ ความถี่ฟอร์แมนท์ต่าง ๆ กันมีค่าไม่เท่ากัน กล่าวคืออัตราการลดทอนพลังงานของความถี่เสียงต่างกันมีค่าต่างกันนั่นเอง การสังเคราะห์เสียงโดยตั้งเงื่อนไขว่าเสียงทุกความถี่ในชั้นเสียงเดียวกันจะมีค่าเวลารีเวอร์เบอเรนซ์เท่ากันโดยใช้ค่าความต้านทานกลที่ไม่แปรผันตามความถี่ทำให้เสียงที่สังเคราะห์ได้แตกต่างจากเสียงต้นฉบับ

เราสามารถประยุกต์ใช้งานแบบจำลองที่สังเคราะห์ได้นี้ในการค้นคว้าและทดลองเรื่องเสียงเพลงพื้นฐานได้ เช่นแบบจำลองอนุญาตให้ผู้วิจัยเปลี่ยนระยะระหว่างชั้นเสียงโดยเปลี่ยนความยาวสัมฤทธิ์ของสายพิน L ในแบบจำลอง และทดลองฟังได้ทันทีก่อนที่จะลงมือสร้างพินที่มีชั้นเสียงตามที่ต้องการ ทั้งนี้เพื่อลดการสูญเสียวัสดุในการทดลองสร้างพินจริงขึ้นมา หรือสามารถทดลองฟังเสียงพินที่ใช้สายพินแบบอื่น ๆ ที่ทราบค่าความหนาแน่นมวลต่อหน่วยความยาวได้

แนวทางการศึกษาต่อจากนี้ไปสามารถทำได้ 2 แนวทางคือ 1) แนวทางการวิเคราะห์เสียงดนตรีพื้นฐาน และ 2) แนวทางการสังเคราะห์เสียงพิน

ในส่วนของการวิเคราะห์เสียงดนตรีพื้นฐานจะเริ่มศึกษาจากระยะพิตช์ระหว่างชั้นเสียง

ของเครื่องดนตรีพื้นบ้านชนิดต่าง ๆ ผลการศึกษาที่ได้ อาจช่วยให้สามารถสร้างระบบเสียงมาตรฐานของดนตรีพื้นบ้านขึ้นมาได้เช่นเดียวกับดนตรีไทยและดนตรีสากล ซึ่งระบบเสียงมาตรฐานนี้น่าจะมีส่วนช่วยพัฒนาแนวทางดนตรีพื้นบ้านได้อีกทางหนึ่ง

สำหรับการสังเคราะห์เสียงพิณสามารถศึกษาและพัฒนาแบบจำลองทางกายภาพของเต้าพิณเพื่อช่วยให้ช่างทำพิณกำหนดรูปแบบของเต้าพิณที่มีประสิทธิภาพได้ รวมไปถึงการพัฒนาการวิเคราะห์และสังเคราะห์เสียงพิณพื้นบ้านที่มีค่าความต้านทานกลแปรผันตามความถี่เป็นต้น

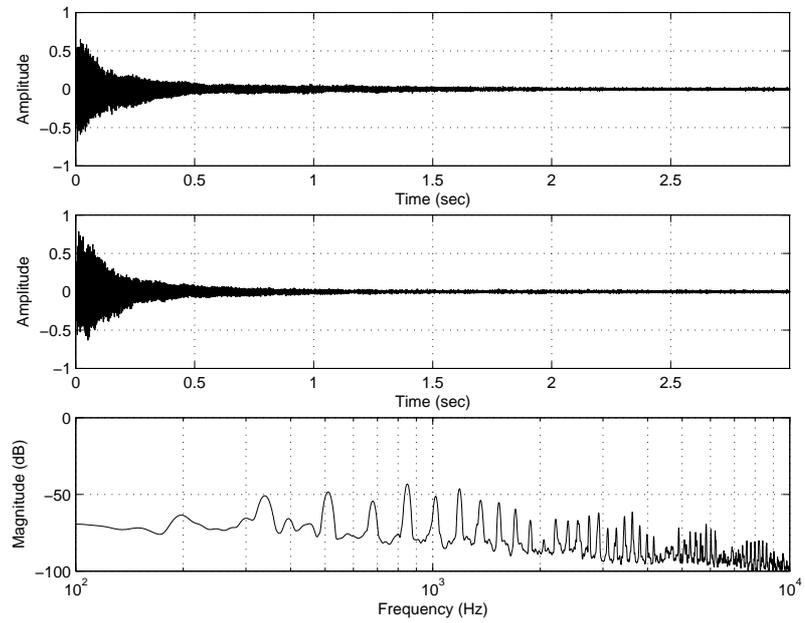
บางส่วนของงานวิจัยนี้ถูกนำเสนอแล้วในที่ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 29 [9] และคณะผู้วิจัยมีแผนจะนำเสนอผลการวิจัยฉบับสมบูรณ์ ณ ที่ประชุมวิชาการ Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology Association Annual Conference 2008 (ECTI-CON 2008)

ภาคผนวก

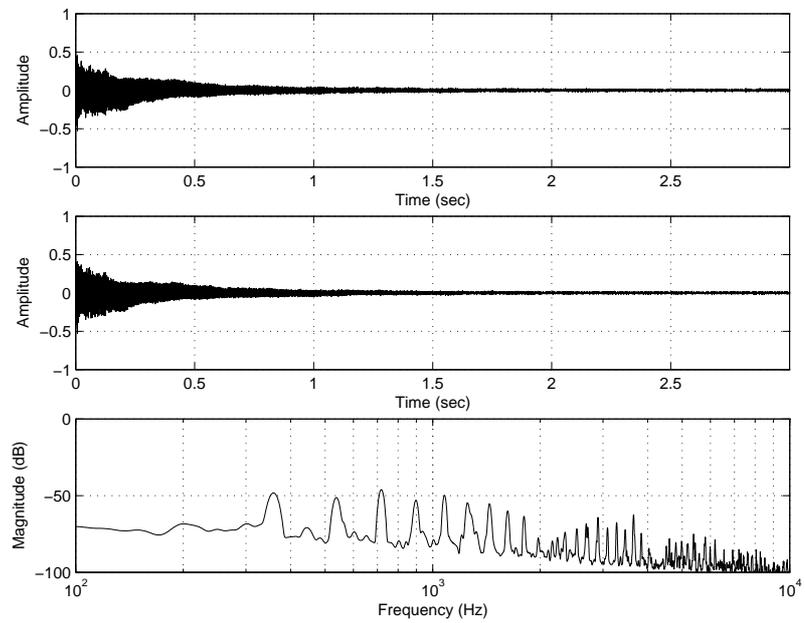
ภาคผนวก ก

สัญญาณเสียงพิณธรรมชาติ

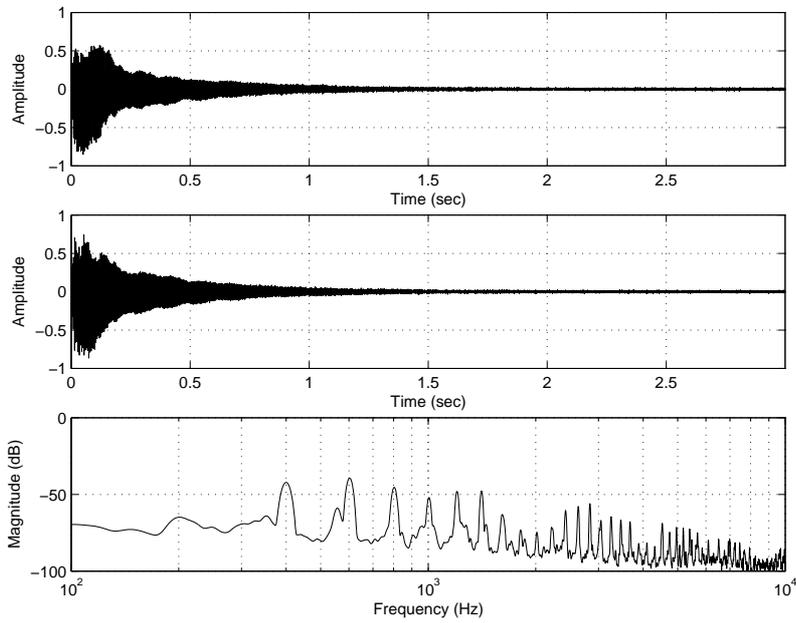
รูปที่ ก.1 – ก.18 แสดงสัญญาณเสียงพิณธรรมชาติทั้ง 18 เสียง ๆ ละ 2 ครั้ง พร้อมทั้งแสดงฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัลเฉลี่ยของสัญญาณดังกล่าวด้วย



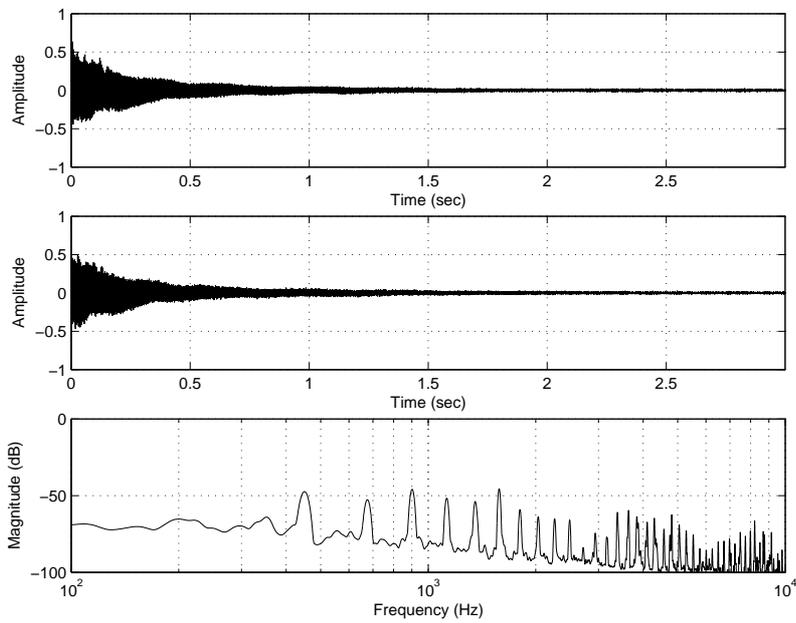
รูปที่ ก.1: สัญญาณเสียงพิณธรรมชาติเสียง มุ และฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปคตรัล



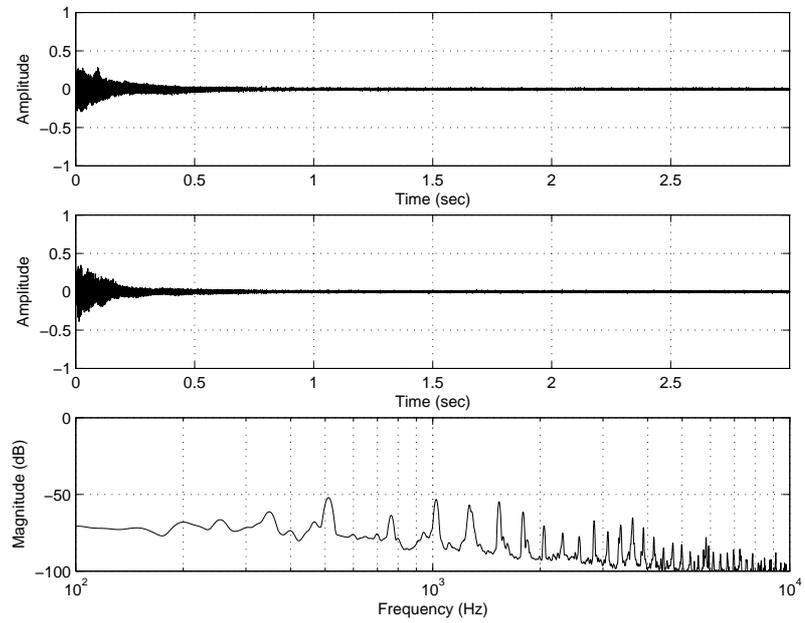
รูปที่ ก.2: สัญญาณเสียงพิณธรรมชาติเสียง ฟุ และฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปคตรัล



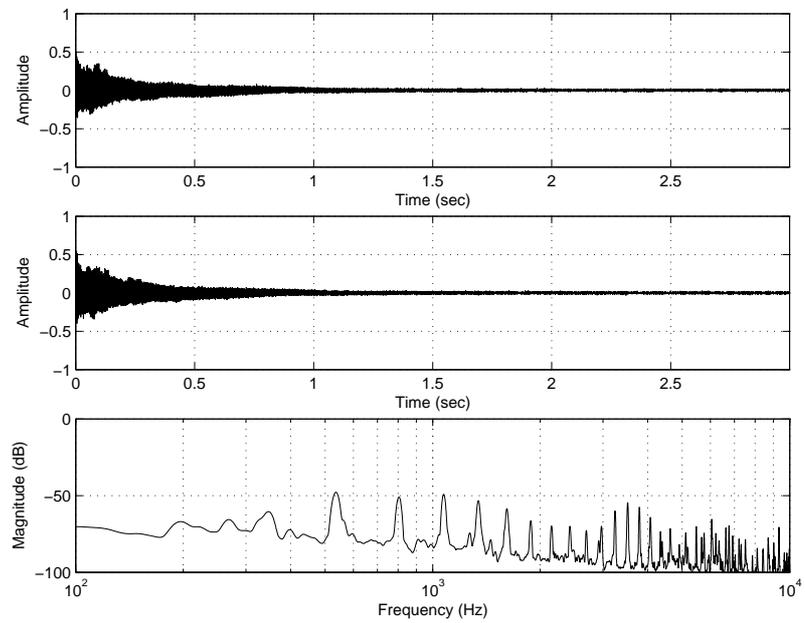
รูปที่ ก.3: สัญญาณเสียงพินกรรมชาติเสียง ชู และฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัล



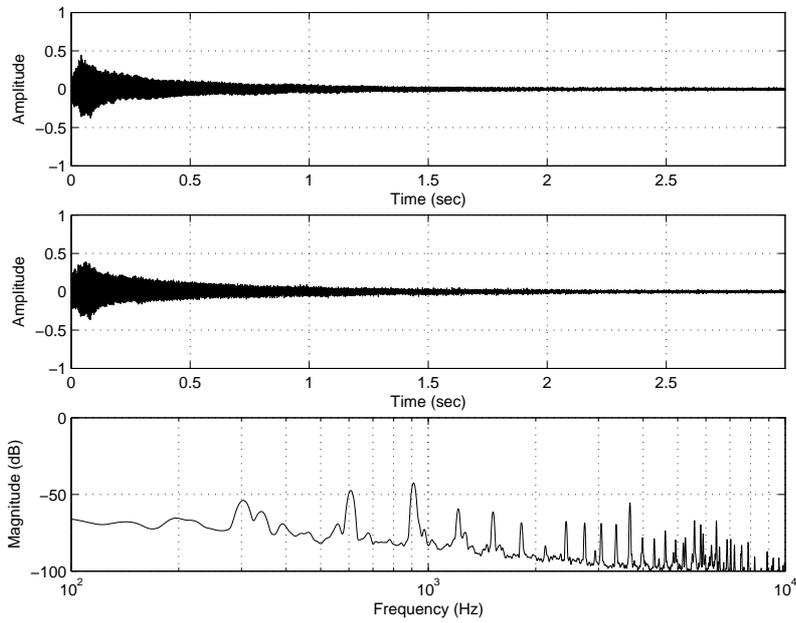
รูปที่ ก.4: สัญญาณเสียงพินกรรมชาติเสียง ลู และฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัล



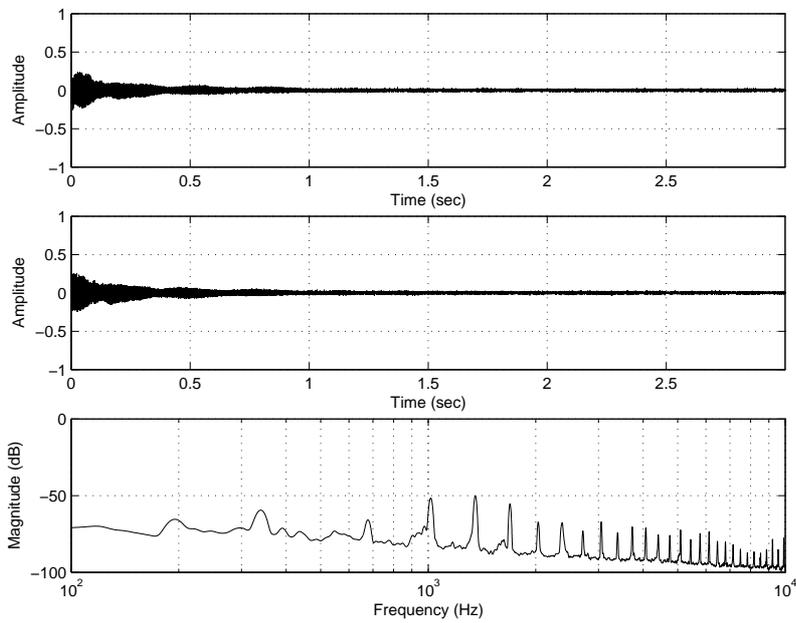
รูปที่ ก.5: สัญญาณเสียงพินธุรรมชาติเสียง ทุ และฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปคตรัล



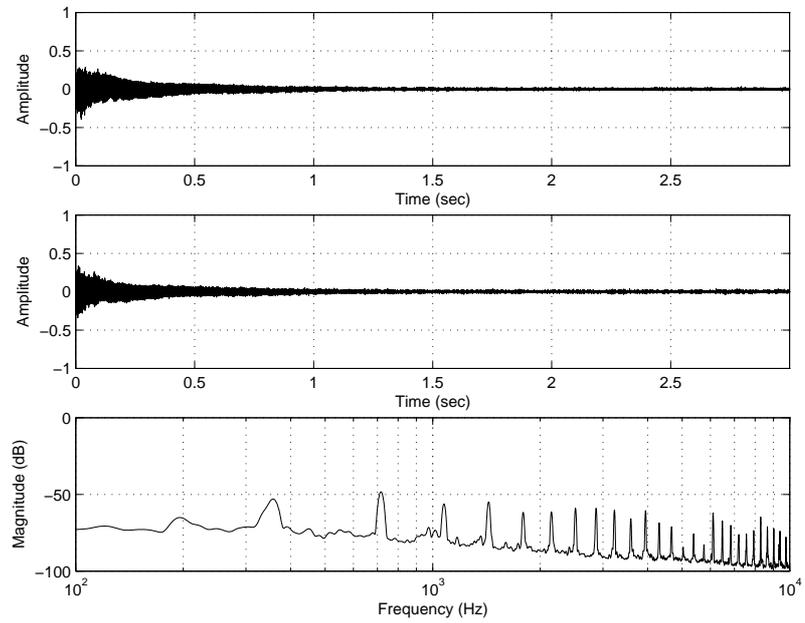
รูปที่ ก.6: สัญญาณเสียงพินธุรรมชาติเสียง ด และฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปคตรัล



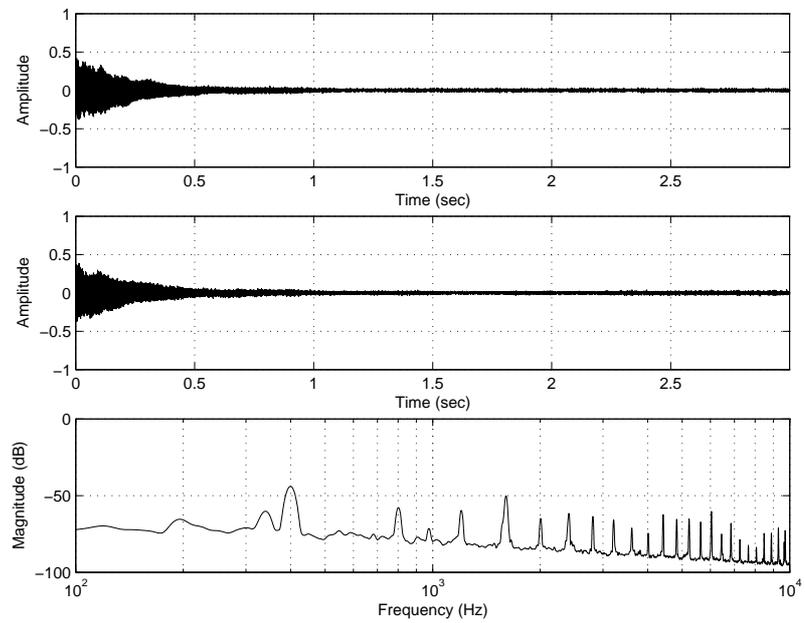
รูปที่ ก.7: สัญญาณเสียงพินธรมชาติเสียง ร และฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปคตรัล



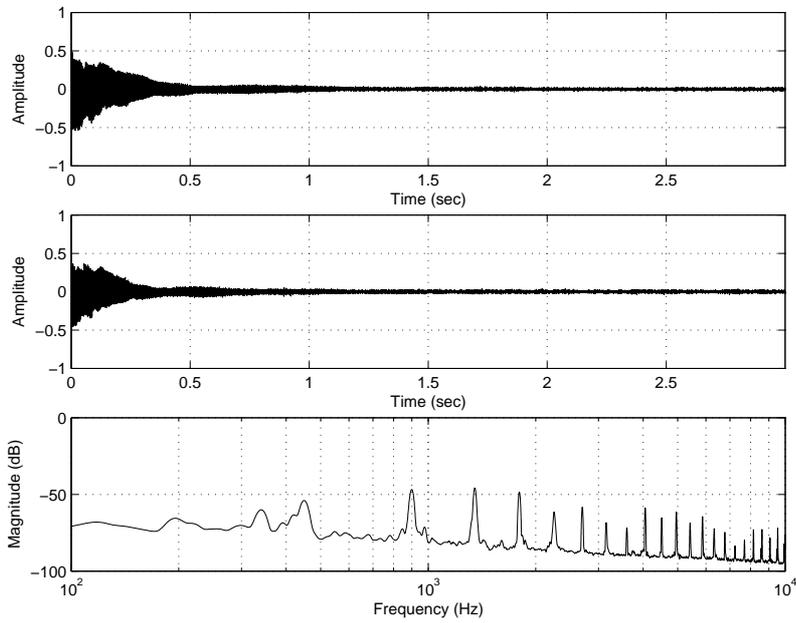
รูปที่ ก.8: สัญญาณเสียงพินธรมชาติเสียง ม และฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปคตรัล



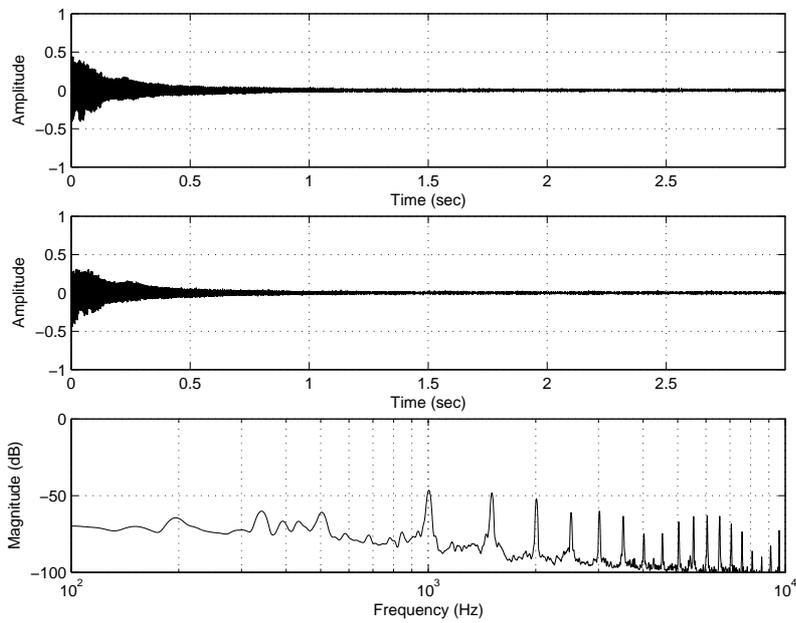
รูปที่ ก.9: สัญญาณเสียงพิณธรรมชาติเสียง ฟ และฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปคตรัล



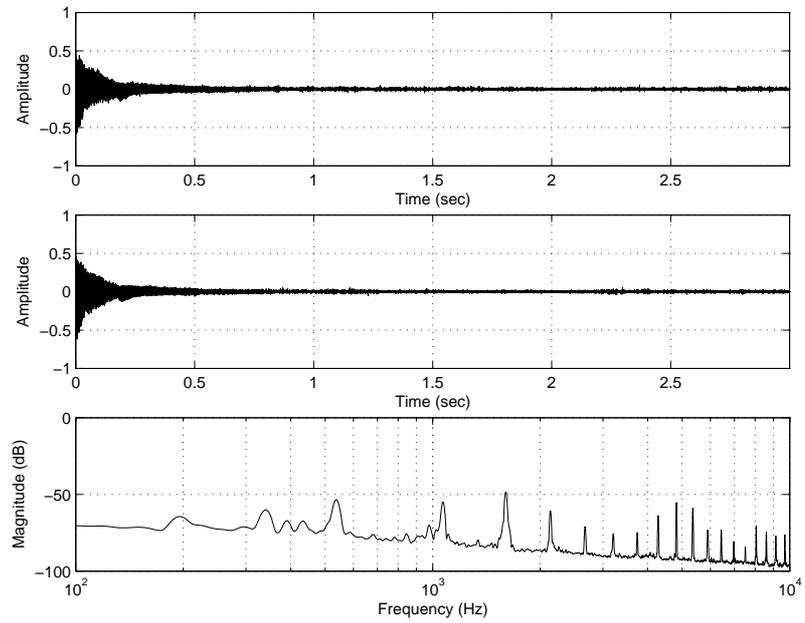
รูปที่ ก.10: สัญญาณเสียงพิณธรรมชาติเสียง ช และฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปคตรัล



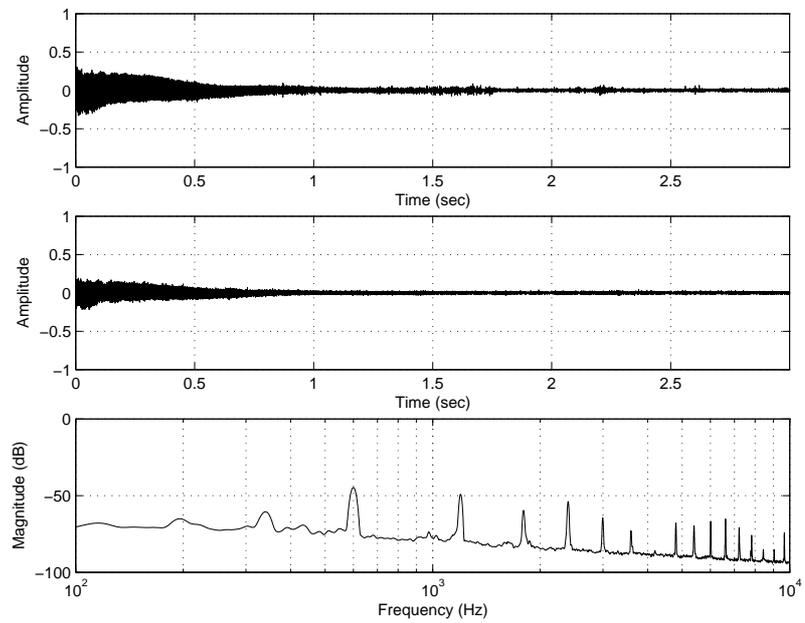
รูปที่ ก.11: สัญญาณเสียงพินทรธรรมาดิเสียง ล และฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปคตรัล



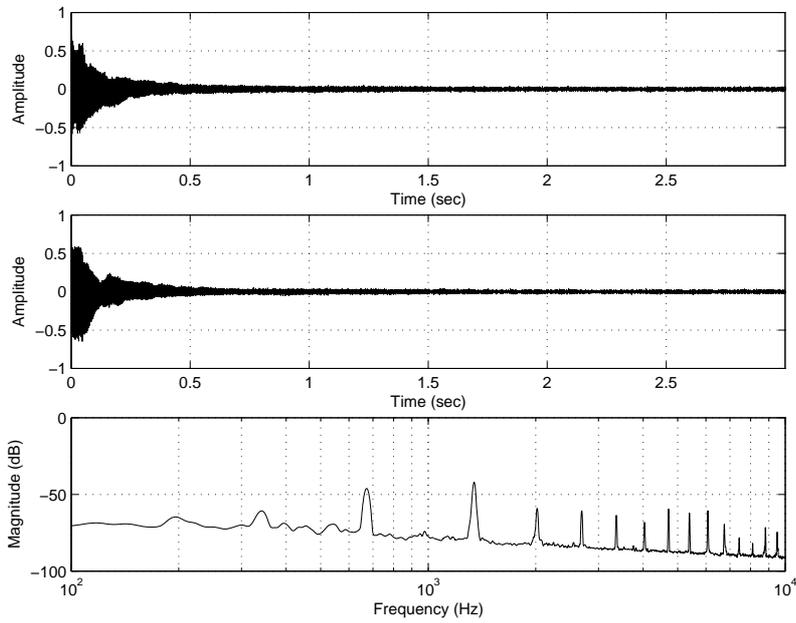
รูปที่ ก.12: สัญญาณเสียงพินทรธรรมาดิเสียง ท และฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปคตรัล



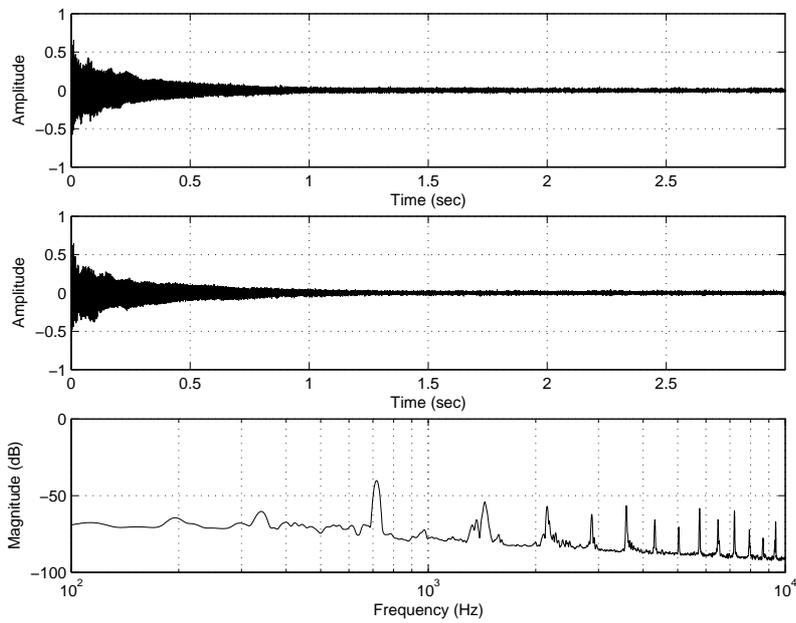
รูปที่ ก.13: สัญญาณเสียงพินธรรมาชาติเสียง ต่ และฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปคตรัล



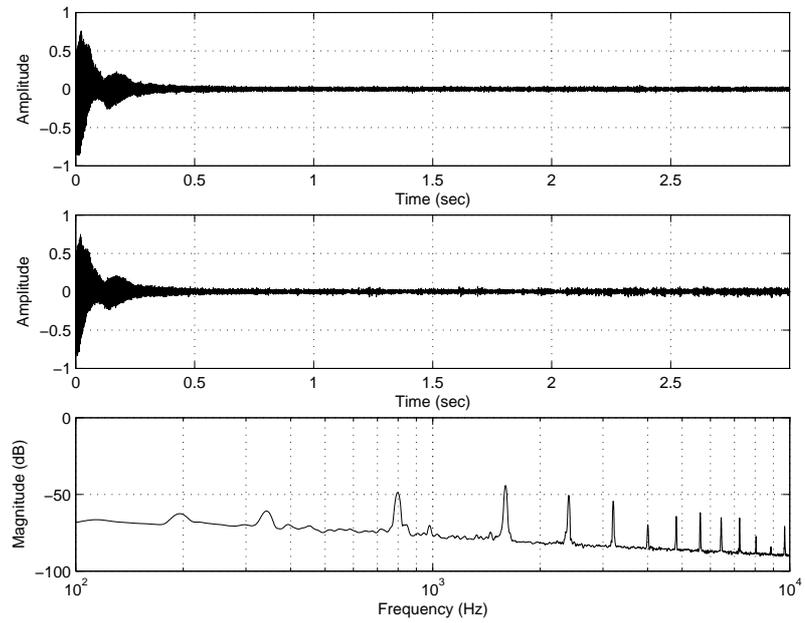
รูปที่ ก.14: สัญญาณเสียงพินธรรมาชาติเสียง รั และฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปคตรัล



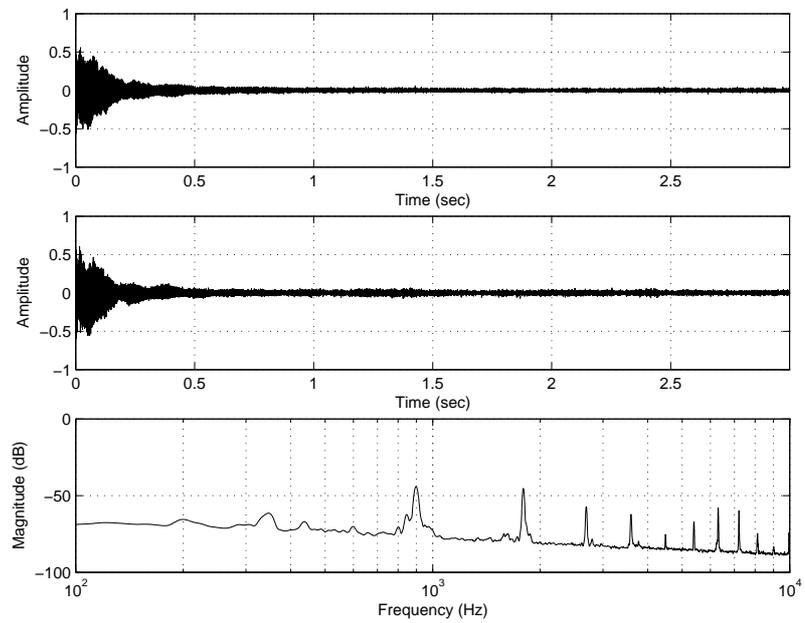
รูปที่ ก.15: สัญญาณเสียงพินธรรมาชาติเสียง ม และฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปคตรัล



รูปที่ ก.16: สัญญาณเสียงพินธรรมาชาติเสียง พ และฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปคตรัล



รูปที่ ก.17: สัญญาณเสียงพินธรรมาชาติเสียง ข และฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปคตรัล

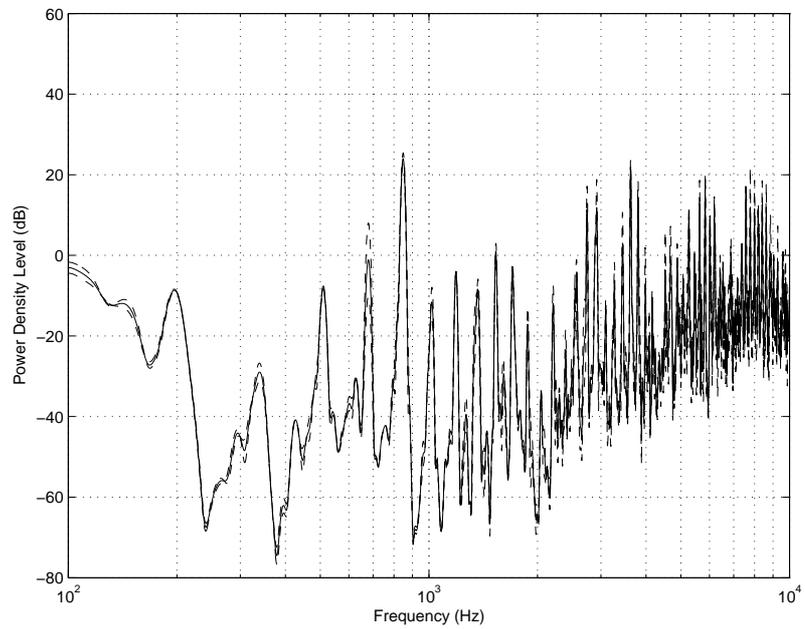


รูปที่ ก.18: สัญญาณเสียงพินธรรมาชาติเสียง ค และฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปคตรัล

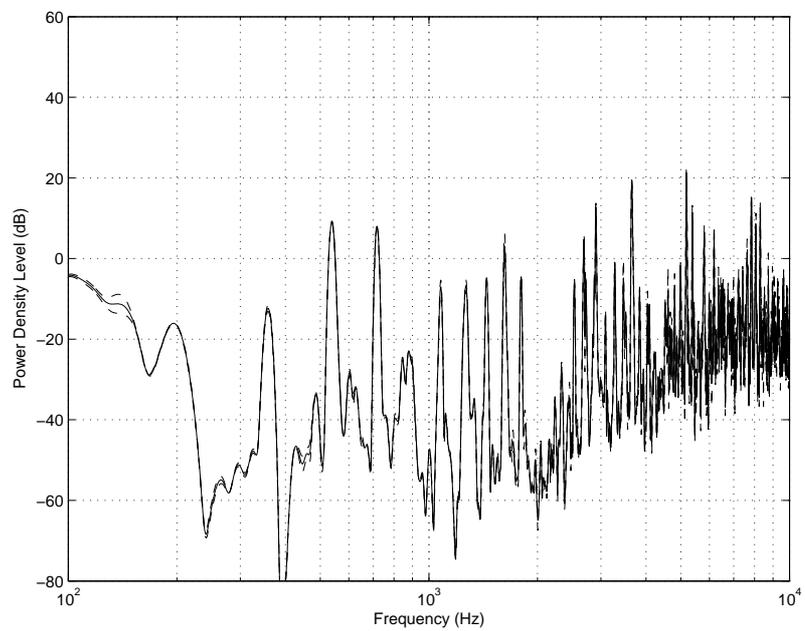
ภาคผนวก ข

ฟังก์ชันความหนาแน่นกำลัง สเปกตรัลของเสียงพิณธรรมชาติสาย เปล่า

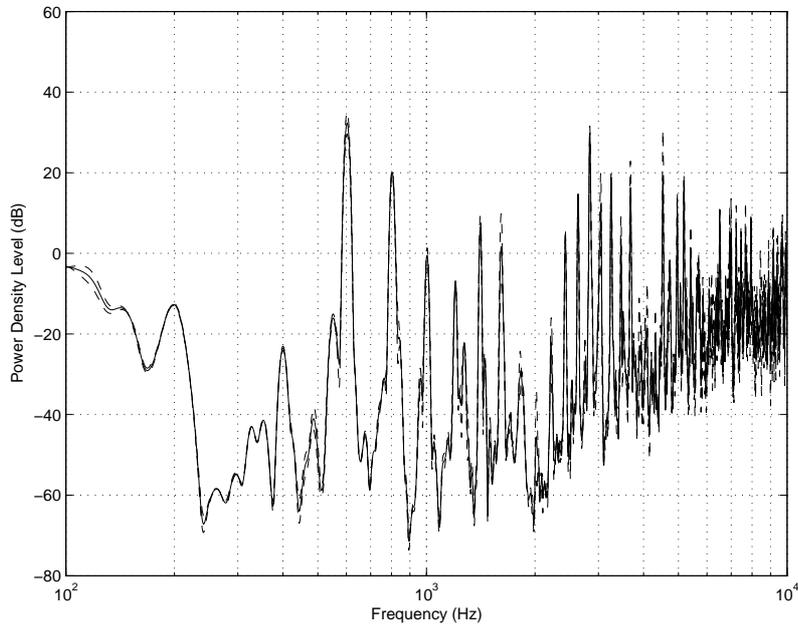
รูปที่ ข.1 – ข.18 แสดงฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัลของเสียงพิณธรรมชาติสายเปล่าที่วัดได้ทั้ง 18 เสียง เส้นประในรูปแสดงฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัลของการวัด 2 ครั้งและเส้นทึบแสดงค่าเฉลี่ยในแกนเดซิเบลของการวัดดังกล่าว



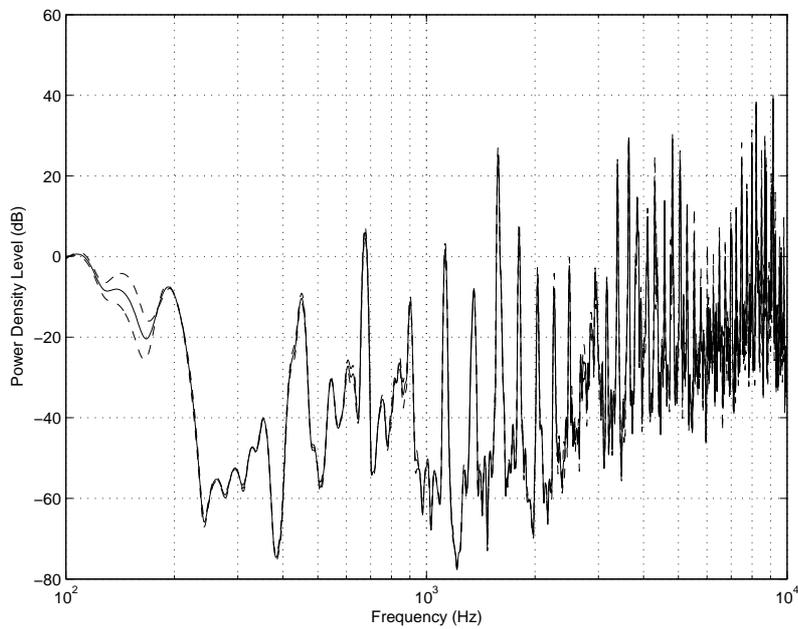
รูปที่ ข.1: ฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัมของเสียงพิณธรรมชาติสายเปล่าเสียง ม



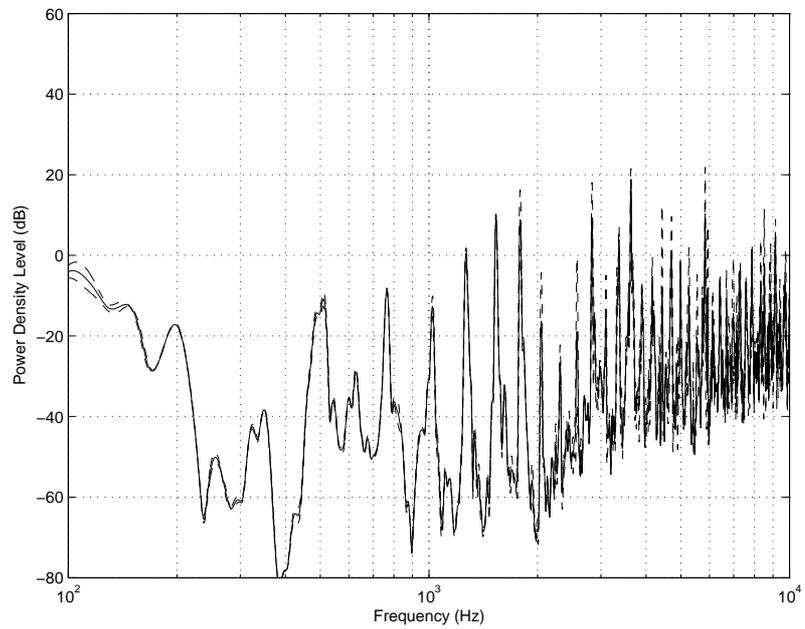
รูปที่ ข.2: ฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัมของเสียงพิณธรรมชาติสายเปล่าเสียง ฟ



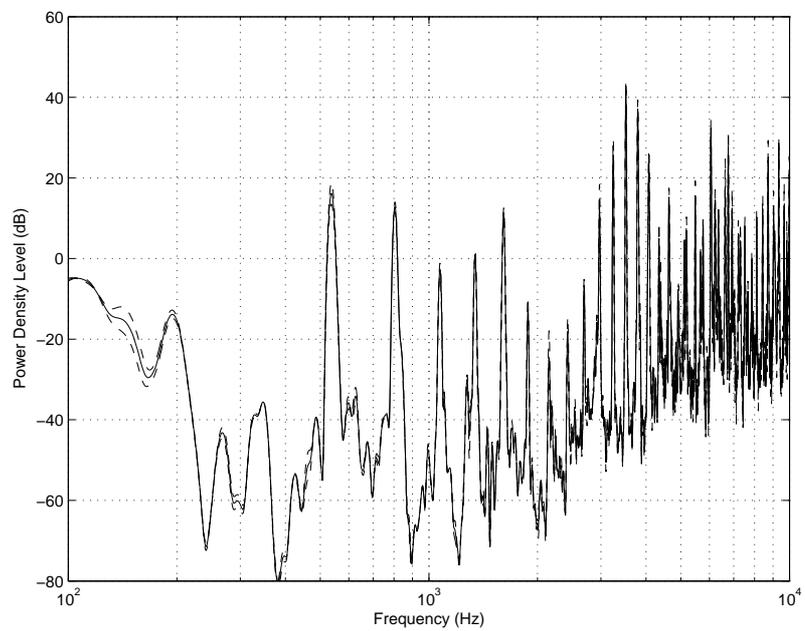
รูปที่ ๓.3: ฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัลของเสียงพจนานุกรมชาติสายเปล่าเสียง ซ



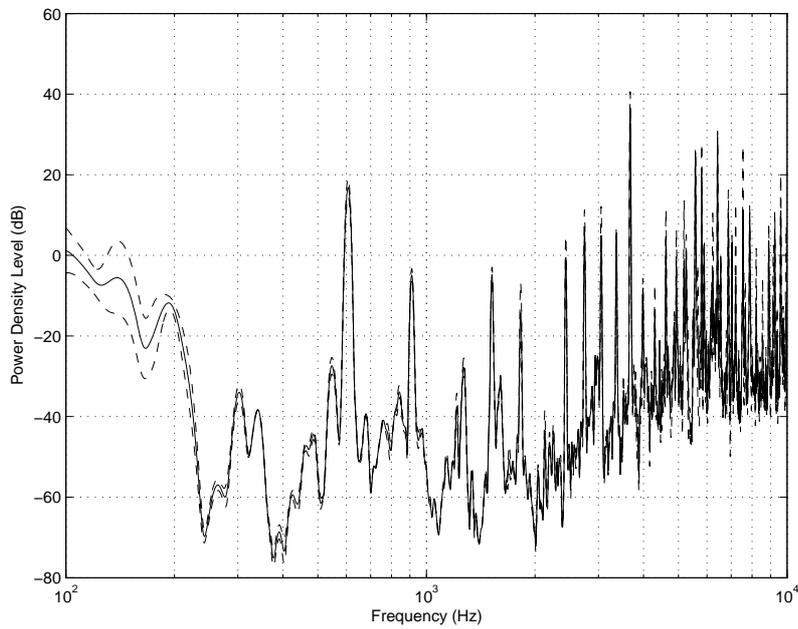
รูปที่ ๓.4: ฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัลของเสียงพจนานุกรมชาติสายเปล่าเสียง ล



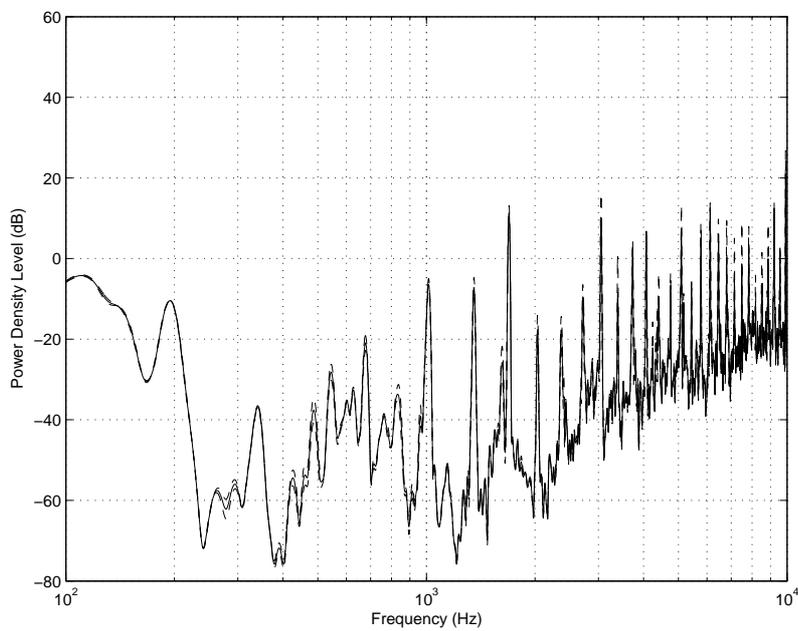
รูปที่ ข.5: ฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัมของเสียงพิณธรรมชาติสายเปล่าเสียง ทุ



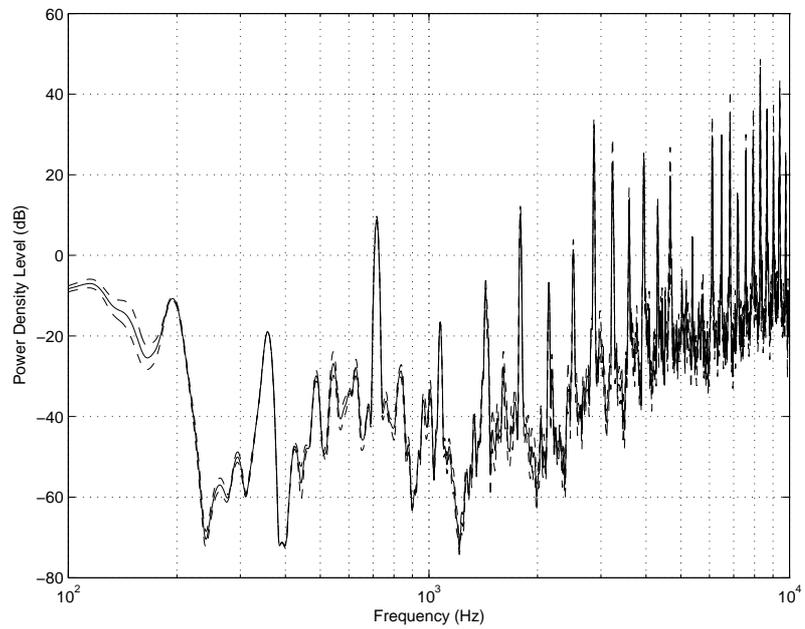
รูปที่ ข.6: ฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัมของเสียงพิณธรรมชาติสายเปล่าเสียง ด



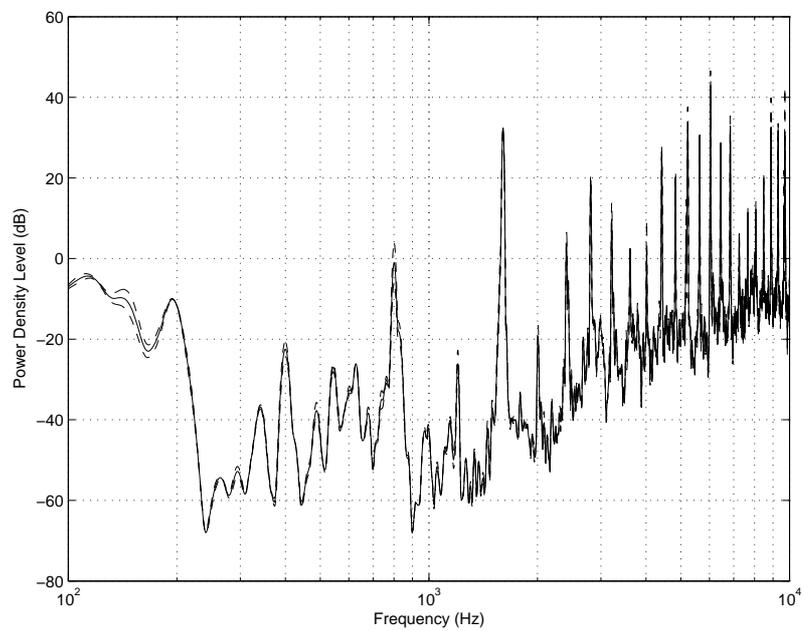
รูปที่ ๗.7: ฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัมของเสียงพจนานุกรมชาติสายเปล่าเสียง ร



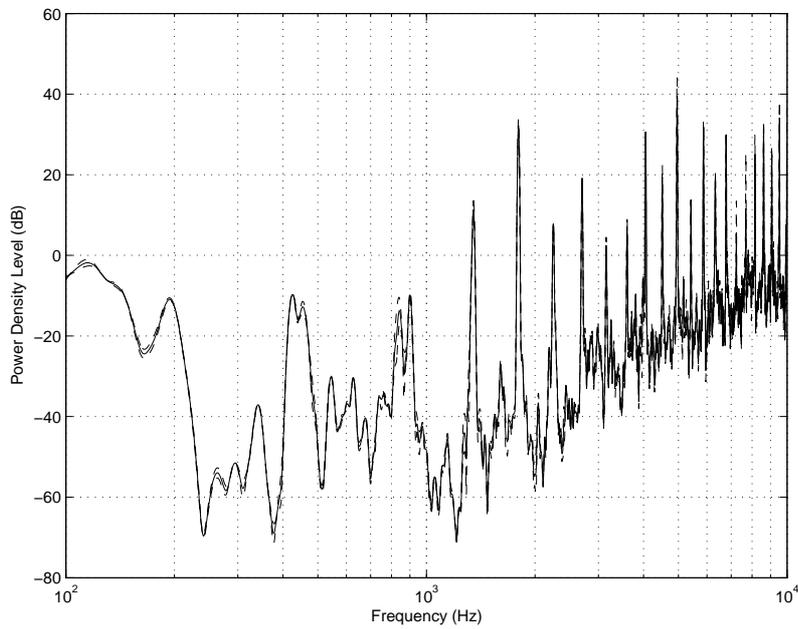
รูปที่ ๗.8: ฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัมของเสียงพจนานุกรมชาติสายเปล่าเสียง ม



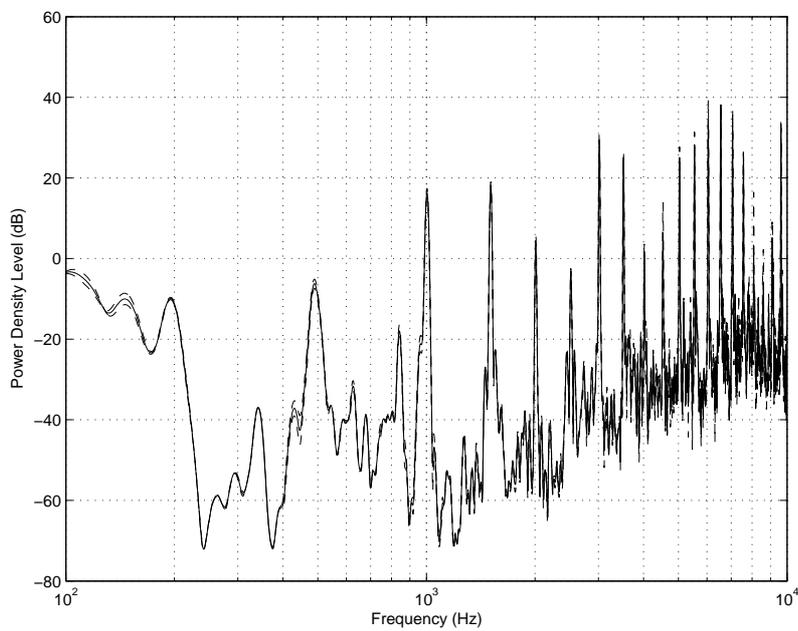
รูปที่ ข.9: ฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัมของเสียงพิณธรรมชาติสายเปล่าเสียง ฟ



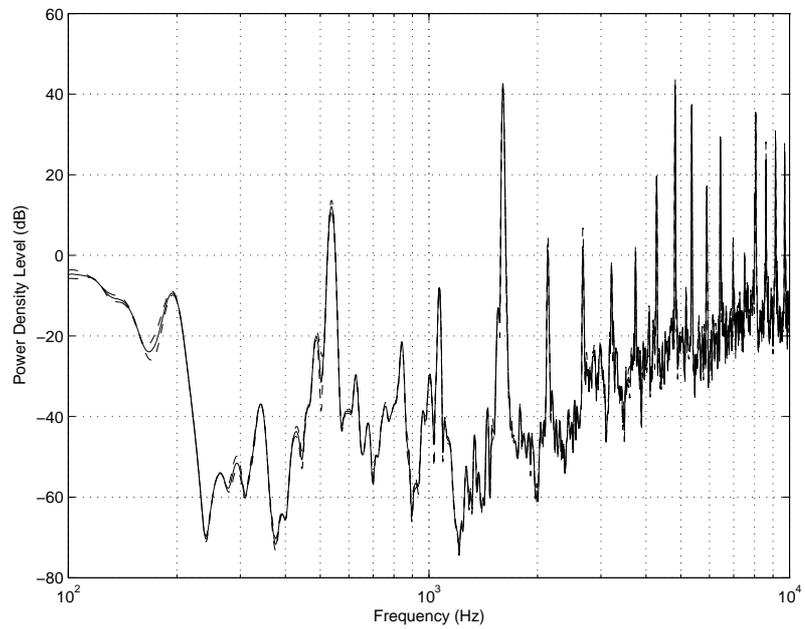
รูปที่ ข.10: ฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัมของเสียงพิณธรรมชาติสายเปล่าเสียง ช



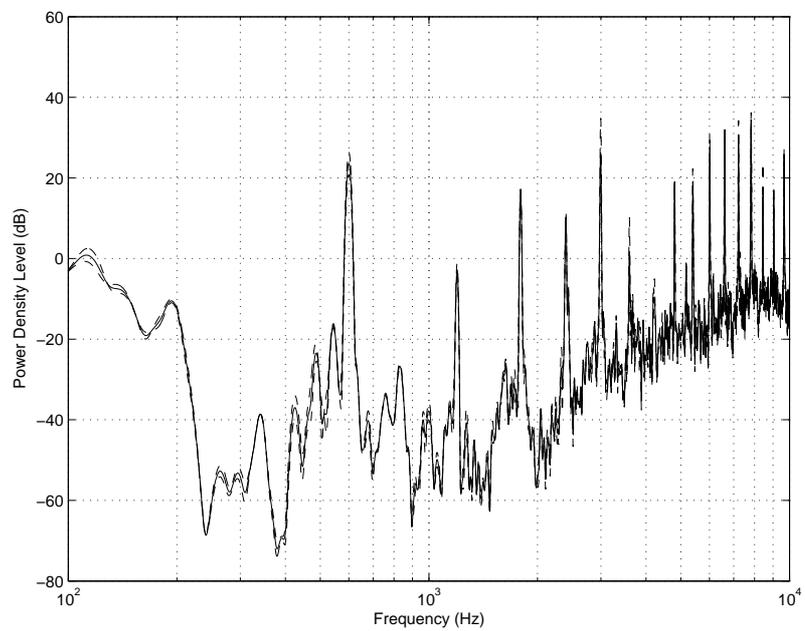
รูปที่ ข.11: ฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัลของเสียงพจนานุกรมชาติสายเปล่าเสียง ล



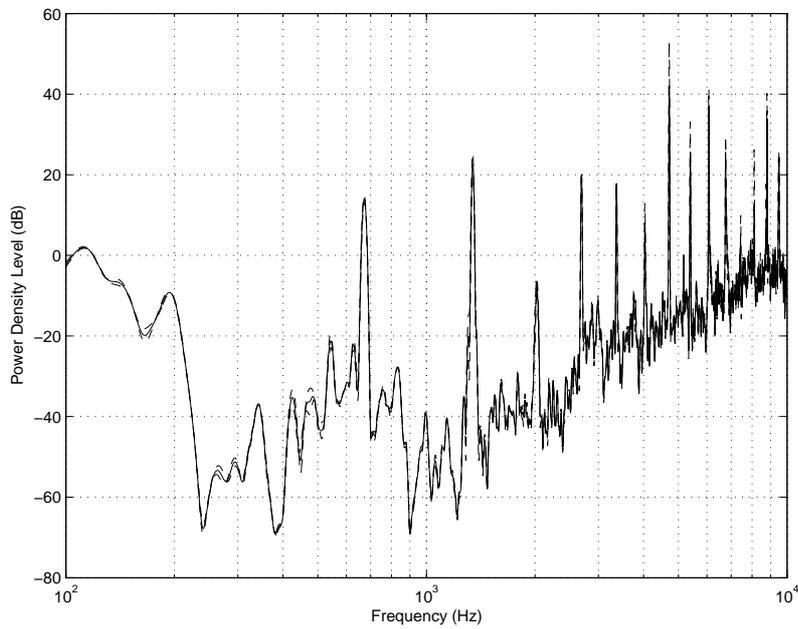
รูปที่ ข.12: ฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัลของเสียงพจนานุกรมชาติสายเปล่าเสียง ท



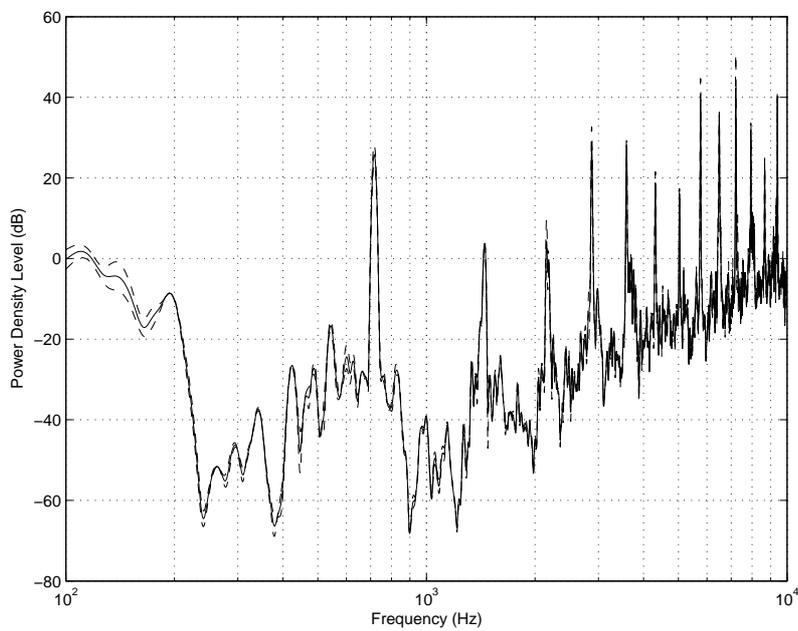
รูปที่ ข.13: ฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัมของเสียงพิณธรรมชาติสายเปล่าเสียง ต่



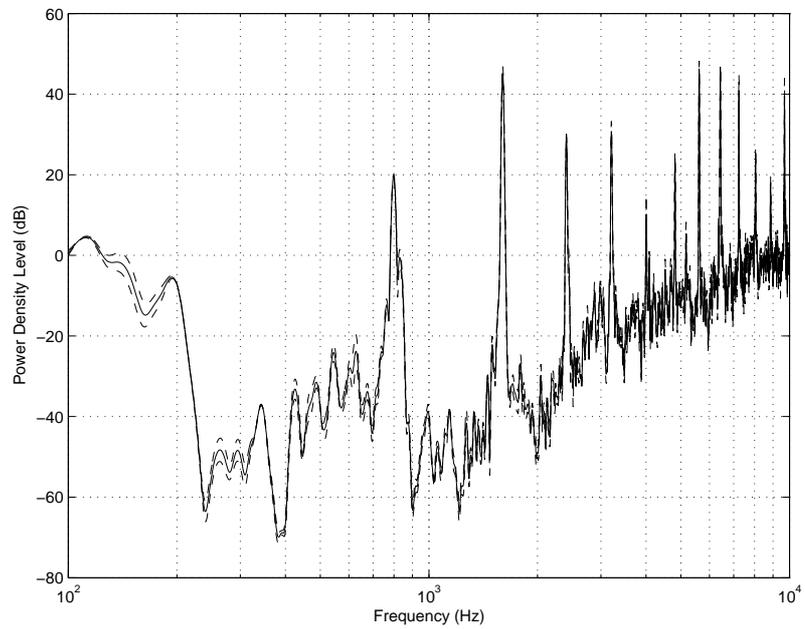
รูปที่ ข.14: ฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัมของเสียงพิณธรรมชาติสายเปล่าเสียง รั



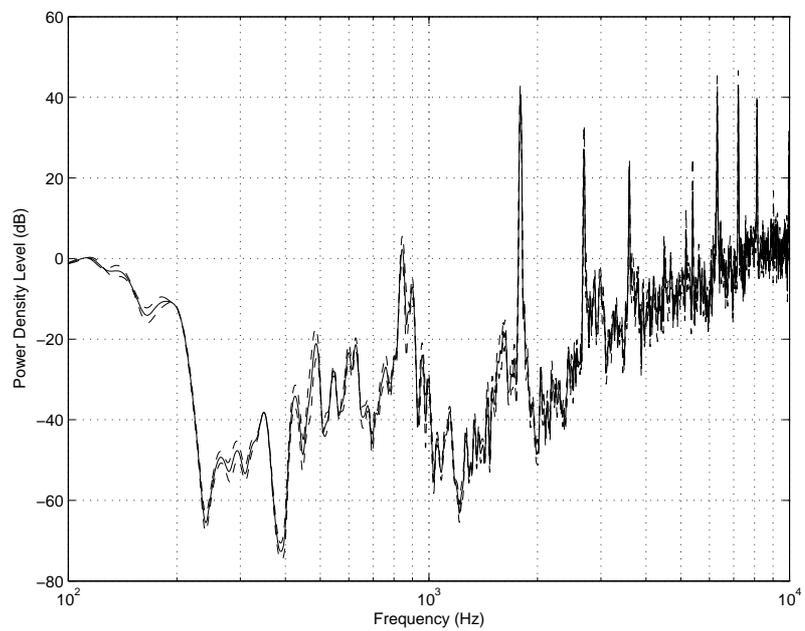
รูปที่ ข.15: พังค์ชั้นความหนาแน่นกำลังสเปกตรัลของเสียงพจนธรรมาชาติสายเปล่าเสียง ม่



รูปที่ ข.16: พังค์ชั้นความหนาแน่นกำลังสเปกตรัลของเสียงพจนธรรมาชาติสายเปล่าเสียง ฟ



รูปที่ ข.17: ฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัมของเสียงพิณธรรมชาติสายเปล่าเสียง ชั

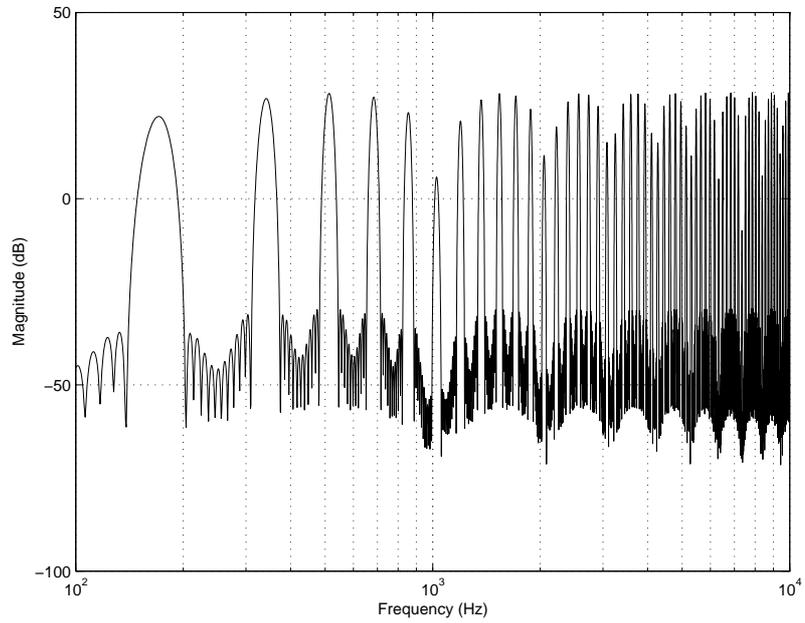


รูปที่ ข.18: ฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัมของเสียงพิณธรรมชาติสายเปล่าเสียง ล่

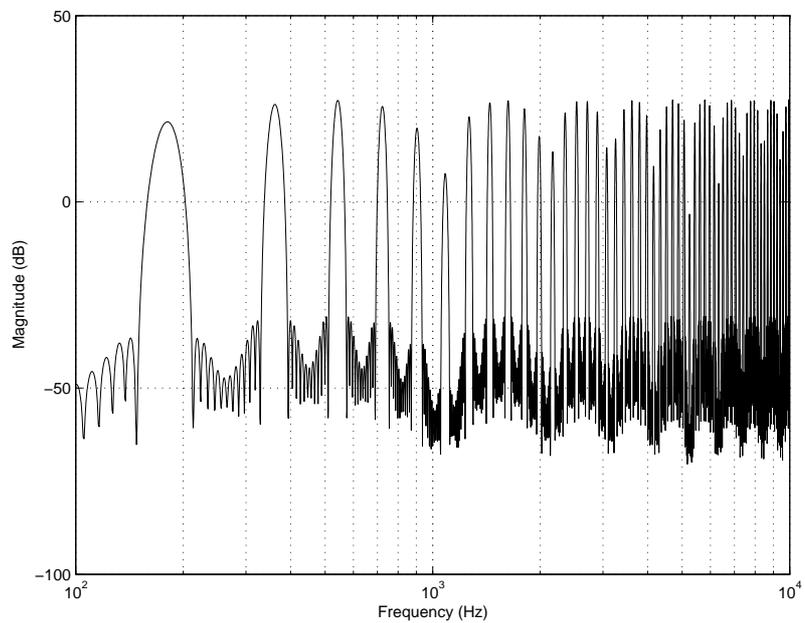
ภาคผนวก ค

ฟังก์ชันความหนาแน่นกำลัง สเปกตรัลของเสียงพึณสังเคราะห์ สายเปล่า

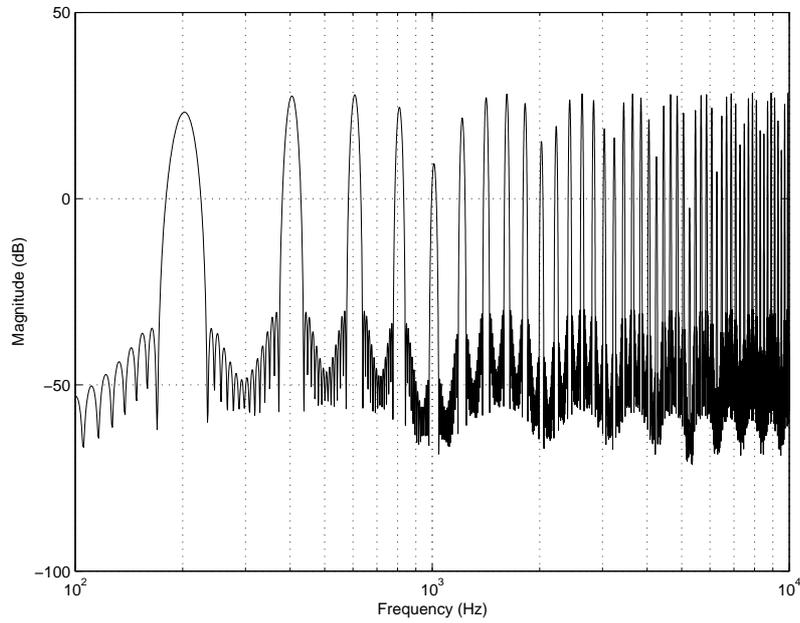
รูปที่ ค.1 – ค.18 แสดงฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัลของเสียงพึณสังเคราะห์ 18 เสียง การวิเคราะห์นี้ไม่รวมผลอันเนื่องมาจาก ผลตอบสนองความถี่ของเต้าพึณ



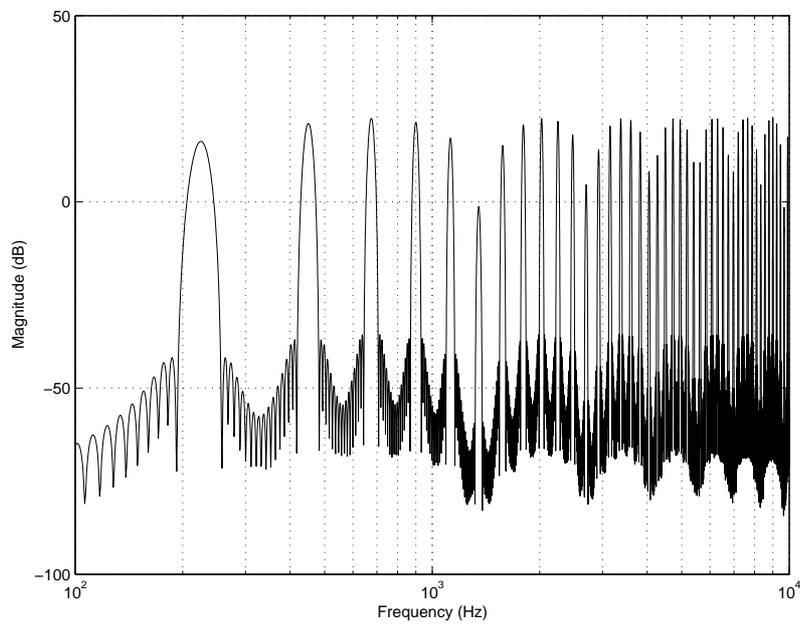
รูปที่ ค.1: ฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัมของเสียงพินสักระดะห์สายเปล่าเสียง ม



รูปที่ ค.2: ฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัมของเสียงพินสักระดะห์สายเปล่าเสียง ฟ

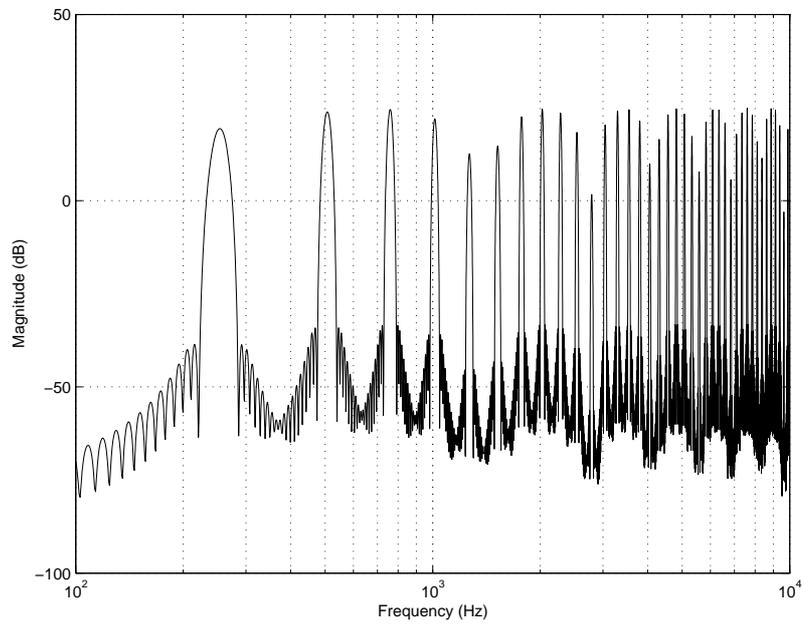


รูปที่ ค.3: พิกัดชั้นความหนาแน่นกำลังสเปกตรัมของเสียงพินส์เคราะห์สายเปล่าเสียง ซ

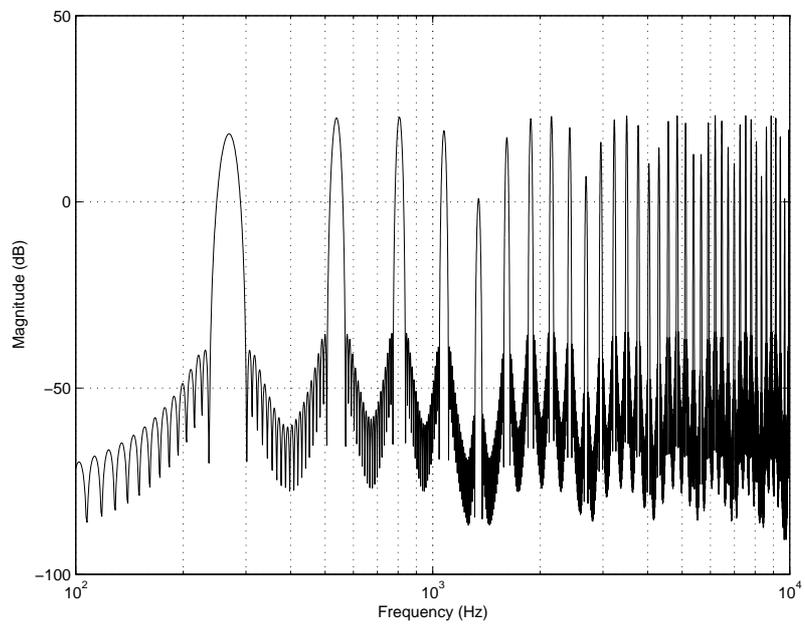


รูปที่ ค.4: พิกัดชั้นความหนาแน่นกำลังสเปกตรัมของเสียงพินส์เคราะห์สายเปล่าเสียง ล

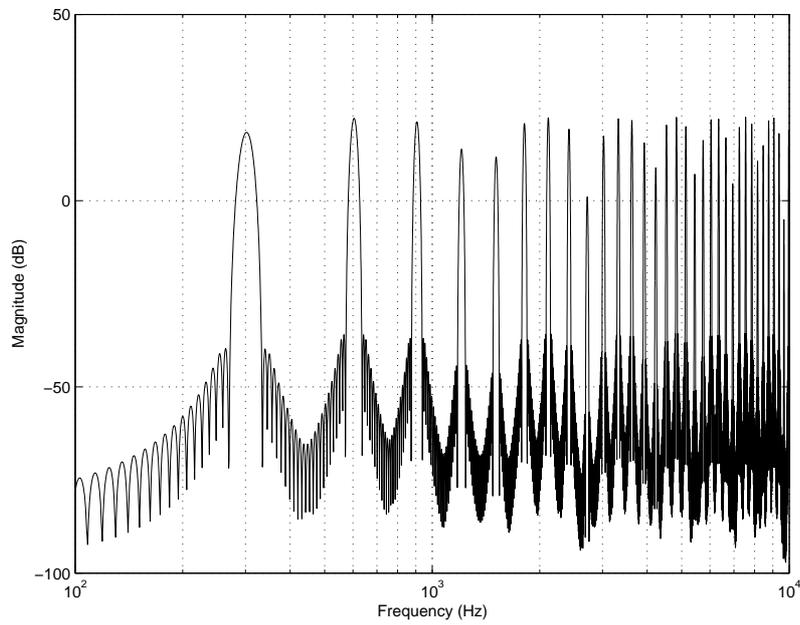
70 ภาคผนวก ค. ฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัมของเสียงพินสั้เคราะห์สายเปล่า



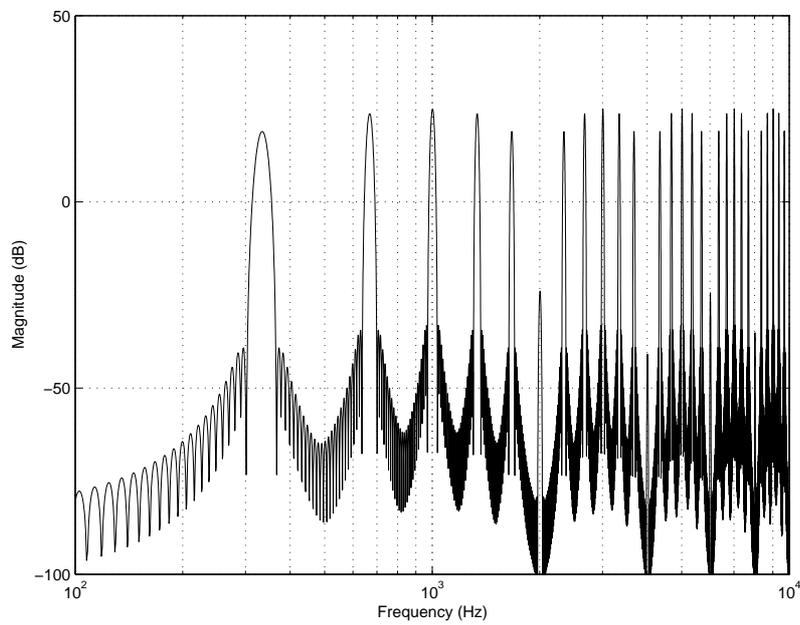
รูปที่ ค.5: ฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัมของเสียงพินสั้เคราะห์สายเปล่าเสียง ท



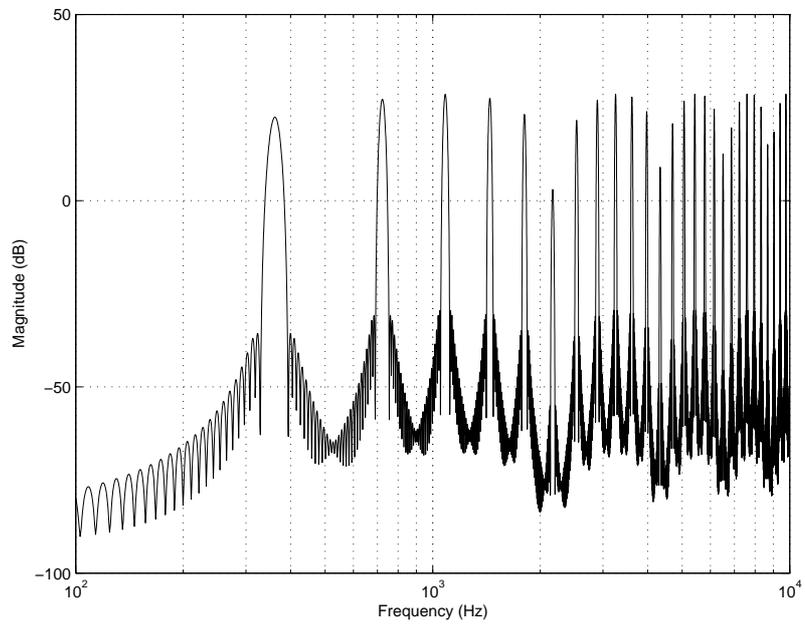
รูปที่ ค.6: ฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัมของเสียงพินสั้เคราะห์สายเปล่าเสียง ด



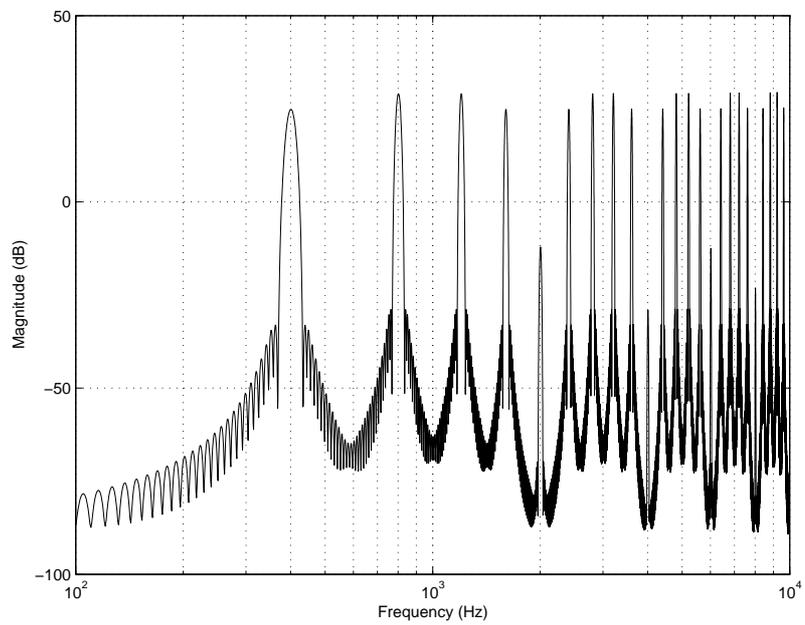
รูปที่ ค.7: พิกัดชี้ความหนาแน่นกำลังสเปกตรัมของเสียงพินส์เคราะห์สายเปล่าเสียง ร



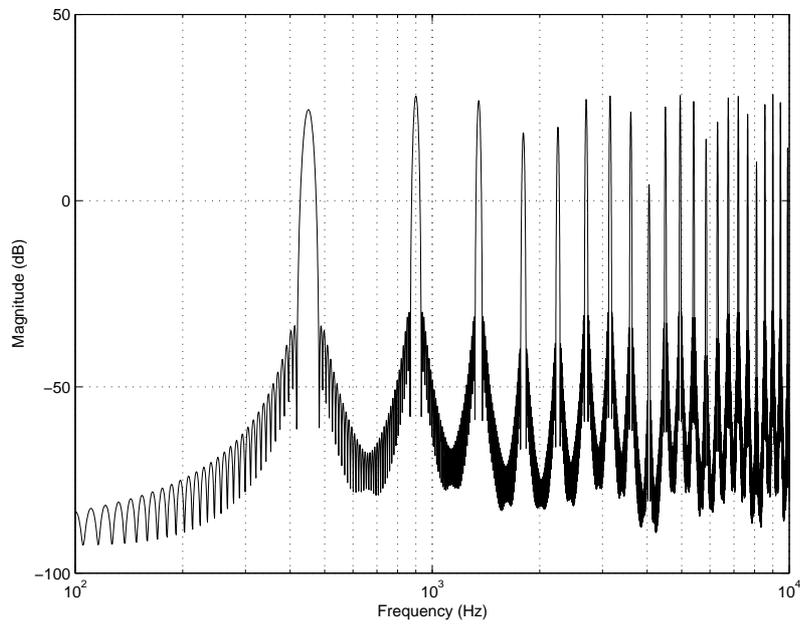
รูปที่ ค.8: พิกัดชี้ความหนาแน่นกำลังสเปกตรัมของเสียงพินส์เคราะห์สายเปล่าเสียง ม



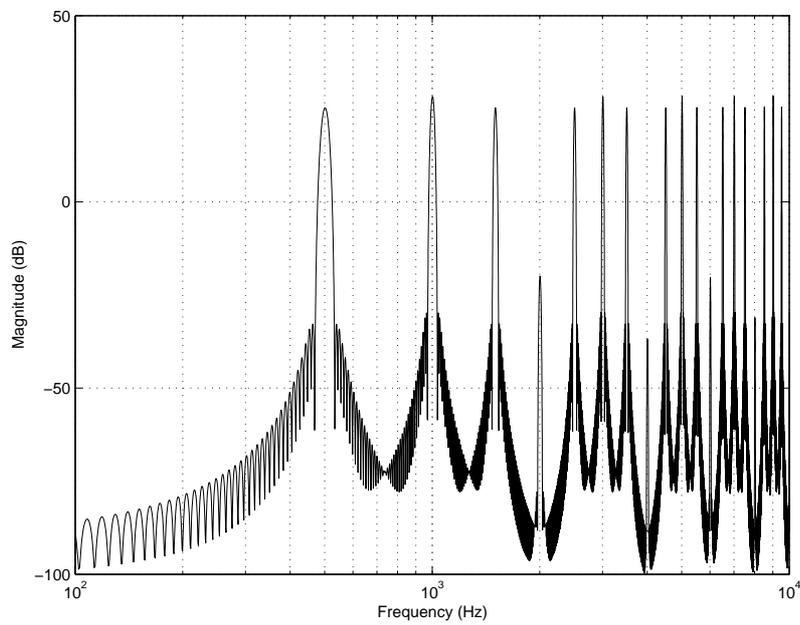
รูปที่ ค.9: ฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัมของเสียงพินสักระดะห์สายเปล่าเสียง ฟ



รูปที่ ค.10: ฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัมของเสียงพินสักระดะห์สายเปล่าเสียง ช

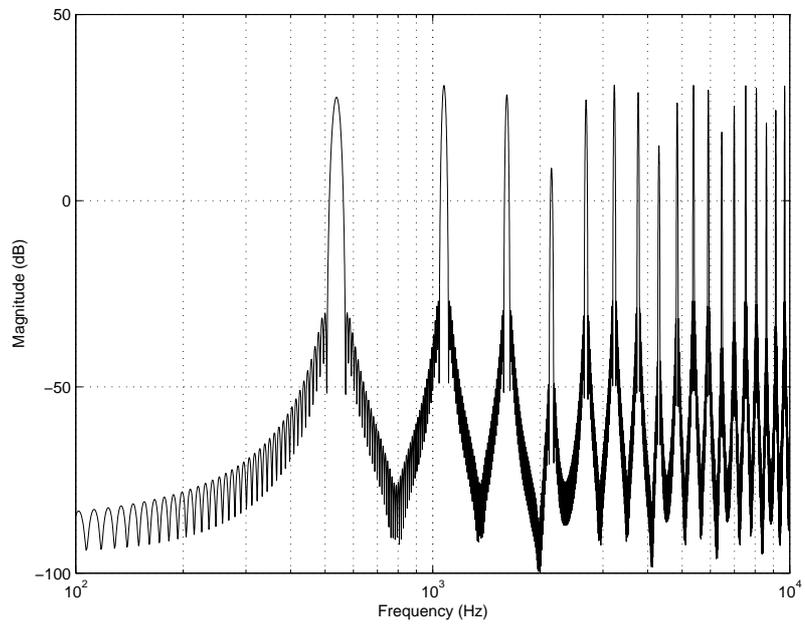


รูปที่ ค.11: พังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัมของเสียงพินส์เคราะห์สายเปล่าเสียง ล

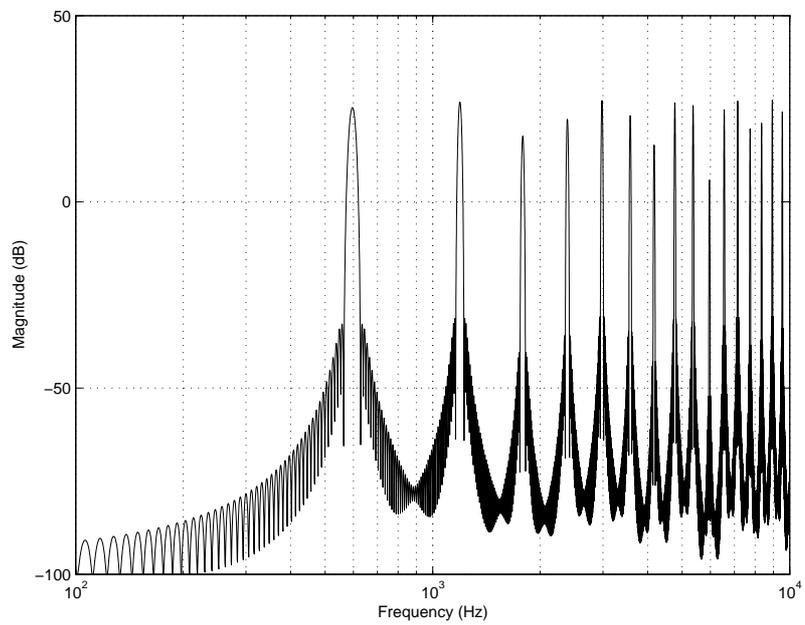


รูปที่ ค.12: พังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัมของเสียงพินส์เคราะห์สายเปล่าเสียง ท

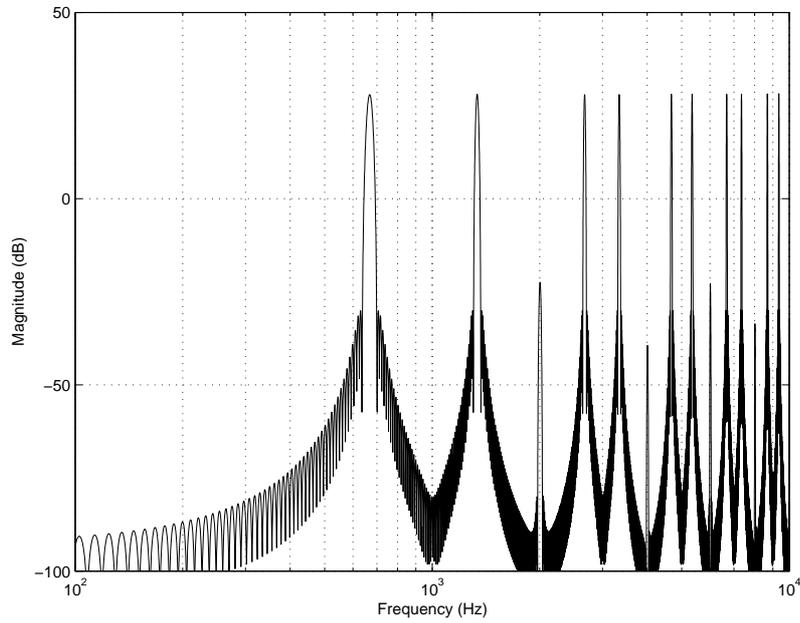
74 ภาคผนวก ค. ฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัมของเสียงพินส์เคราะห์สายเปล่า



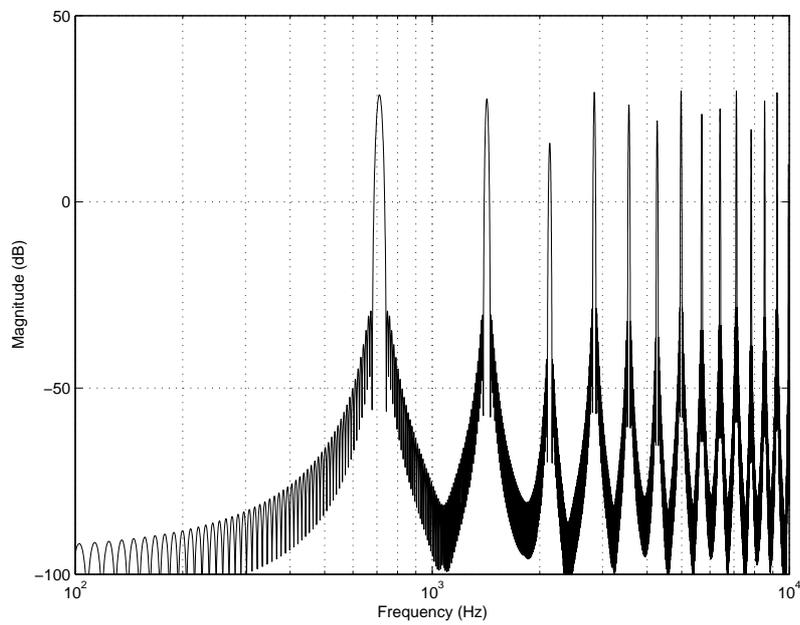
รูปที่ ค.13: ฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัมของเสียงพินส์เคราะห์สายเปล่าเสียง ต่



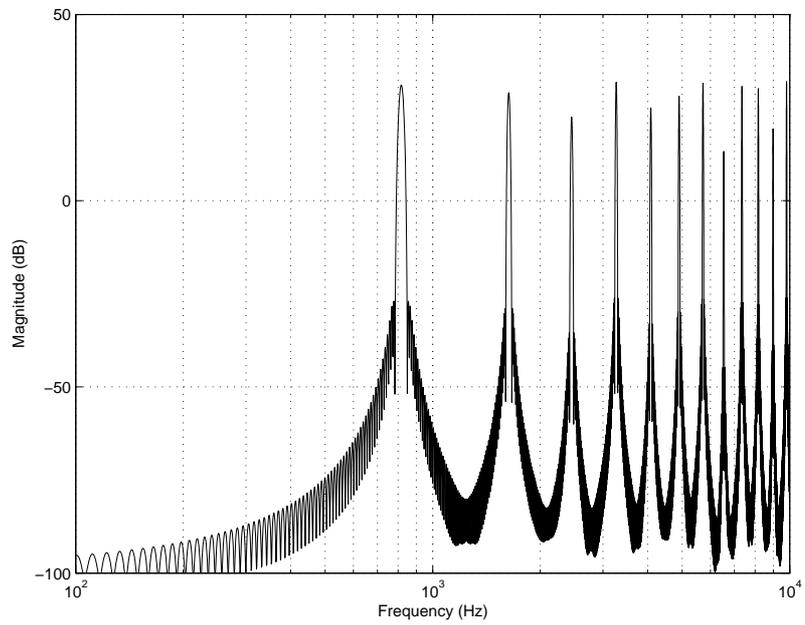
รูปที่ ค.14: ฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัมของเสียงพินส์เคราะห์สายเปล่าเสียง รั



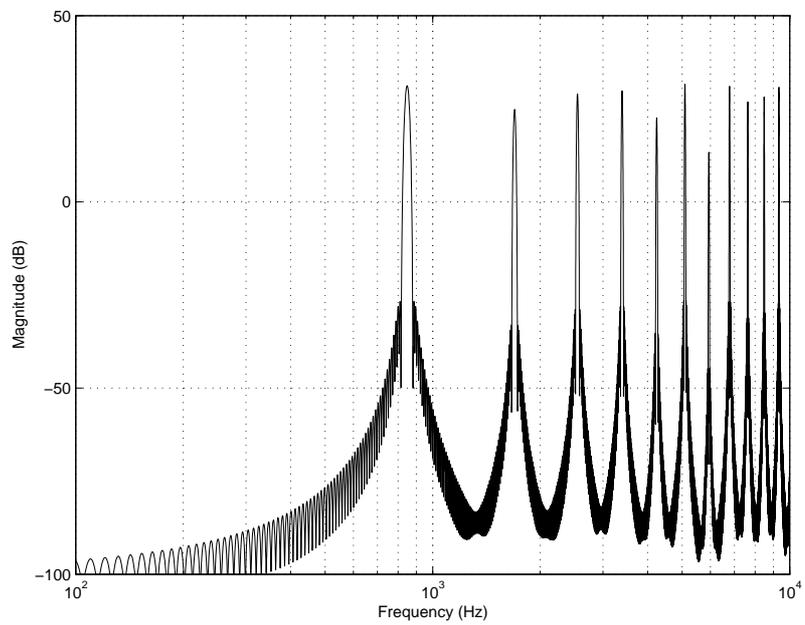
รูปที่ ค.15: พังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัมของเสียงพินส์เคราะห์สายเปล่าเสียง ม



รูปที่ ค.16: พังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัมของเสียงพินส์เคราะห์สายเปล่าเสียง ฟ



รูปที่ ค.17: ฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัมของเสียงพินส์เคราะห้สายเปล่าเสียง ช้

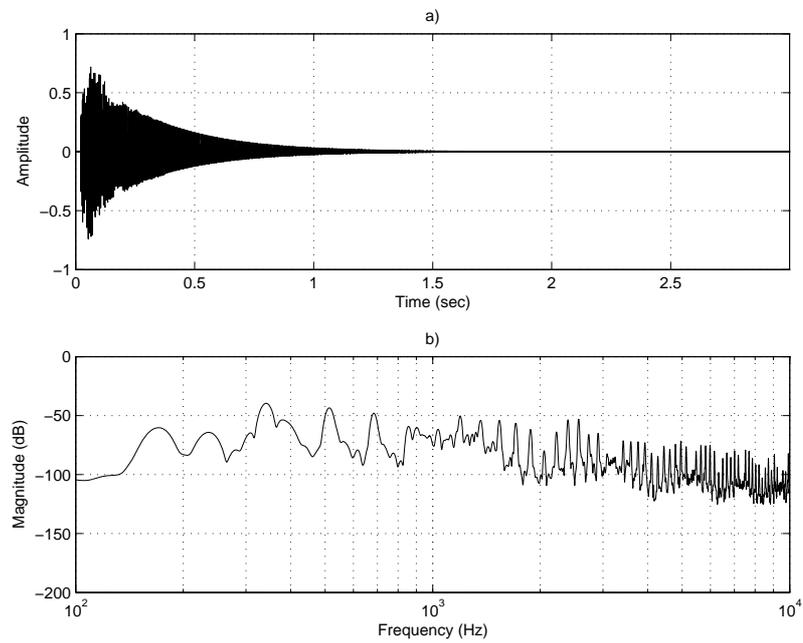


รูปที่ ค.18: ฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัมของเสียงพินส์เคราะห้สายเปล่าเสียง ล้

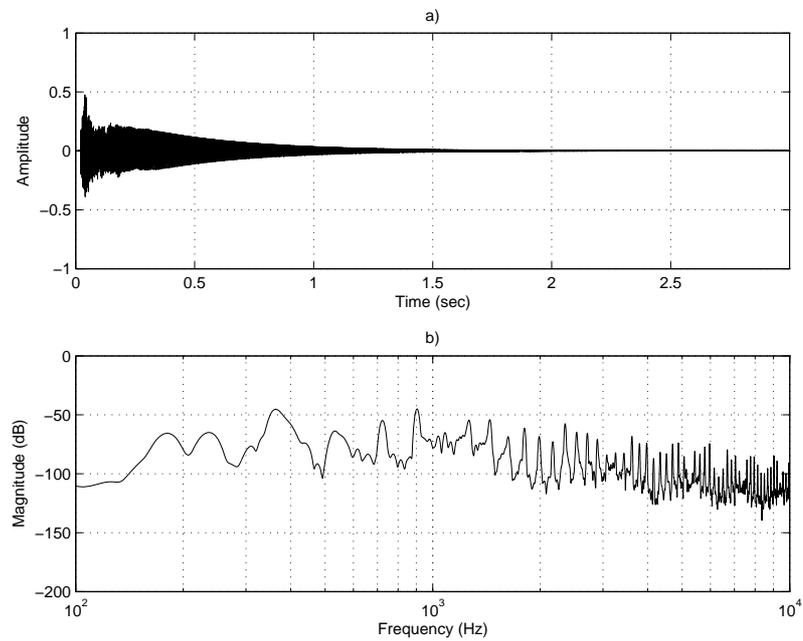
ภาคผนวก ง

สัญญาณเสียงพินสักระยะที่ I

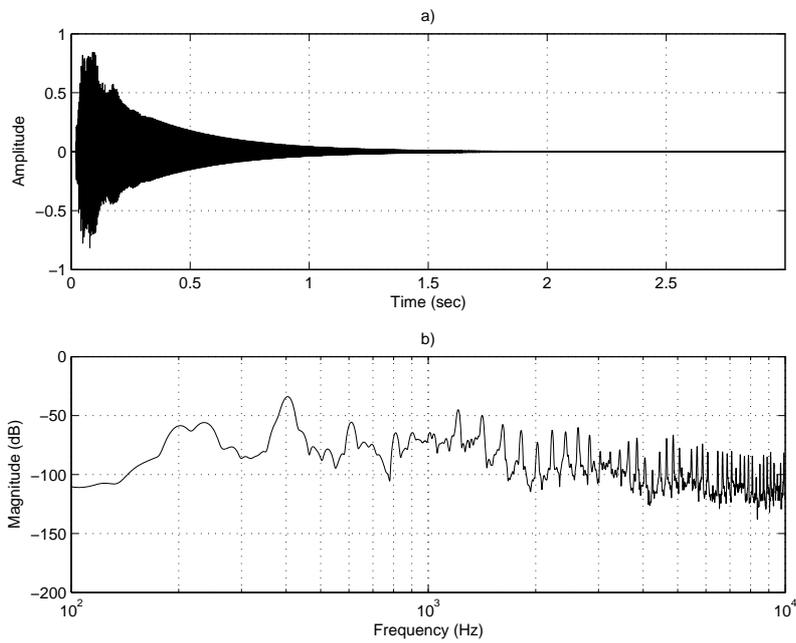
รูปที่ ง.1 – ง.18 แสดงสัญญาณเสียงพินสักระยะที่ใช้ตัวกรองผลตอบสนองอิมพัลส์ของ
เต้าพินในการสร้างพร้อมกับแสดงฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปคตรัล



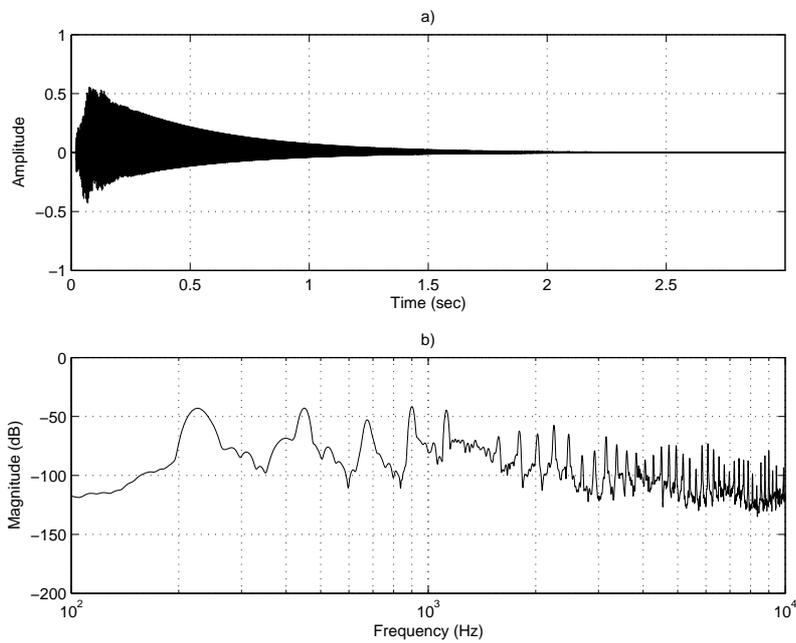
รูปที่ ง.1: สัญญาณเสียงพินสังเคราะห์ที่ใช้ตัวกรองผลตอบสนองอิมพัลส์เต้าพิน และ ฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัมของเสียงพินสังเคราะห์เสียง ม



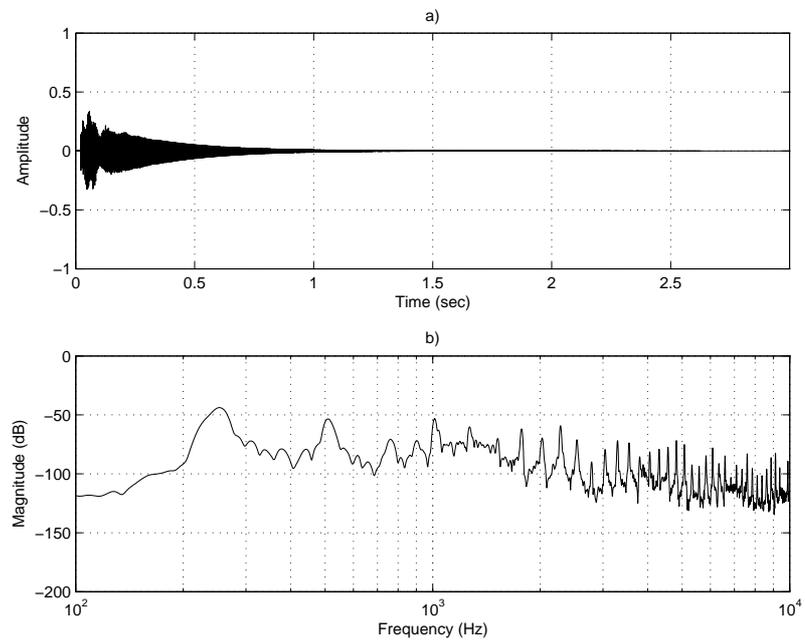
รูปที่ ง.2: สัญญาณเสียงพินสังเคราะห์ที่ใช้ตัวกรองผลตอบสนองอิมพัลส์เต้าพิน และ ฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัมของเสียงพินสังเคราะห์เสียง พ



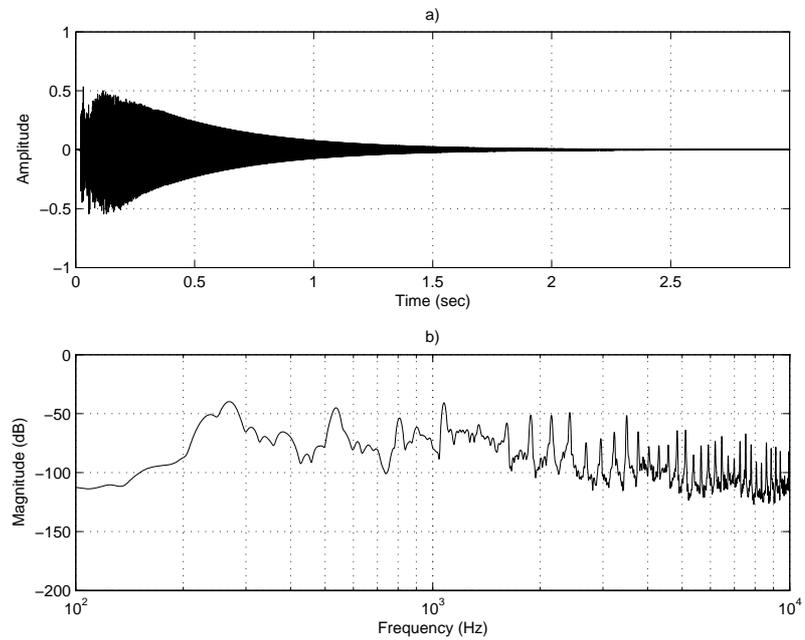
รูปที่ 3: สัญญาณเสียงพิณสังเคราะห์ที่ใช้ตัวกรองผลตอบสนองอิมพัลส์เต้าพิณ และ ฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัลของเสียงพิณสังเคราะห์เสียง ชู



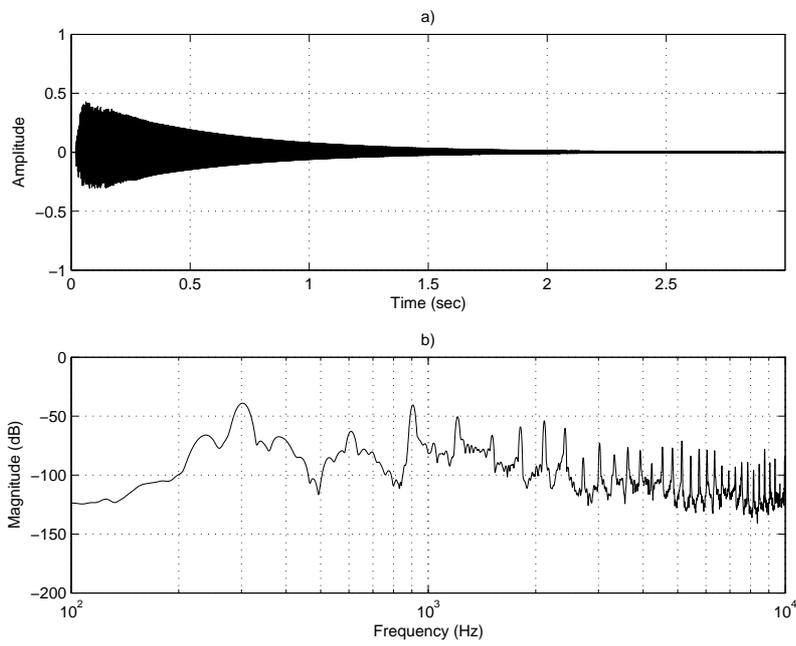
รูปที่ 4: สัญญาณเสียงพิณสังเคราะห์ที่ใช้ตัวกรองผลตอบสนองอิมพัลส์เต้าพิณ และ ฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัลของเสียงพิณสังเคราะห์เสียง ลู



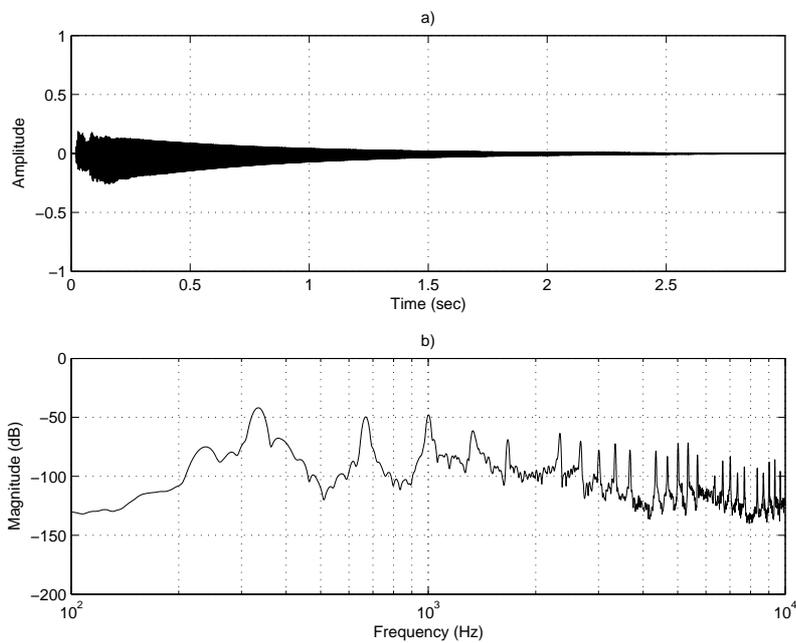
รูปที่ ง.5: สัญญาณเสียงพินสังเคราะห์ที่ใช้ตัวกรองผลตอบสนองอิมพัลส์เต้าพิน และ ฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัลของเสียงพินสังเคราะห์เสียง ทุ



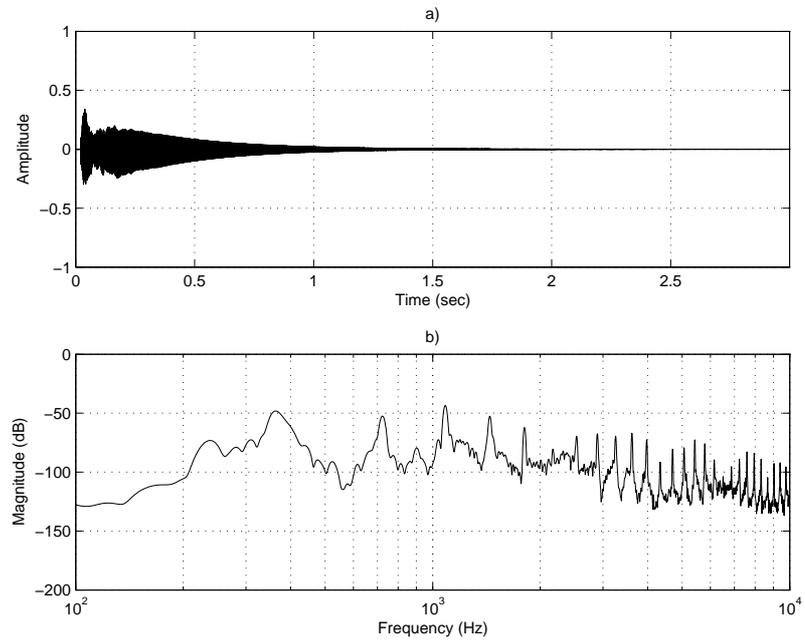
รูปที่ ง.6: สัญญาณเสียงพินสังเคราะห์ที่ใช้ตัวกรองผลตอบสนองอิมพัลส์เต้าพิน และ ฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัลของเสียงพินสังเคราะห์เสียง ด



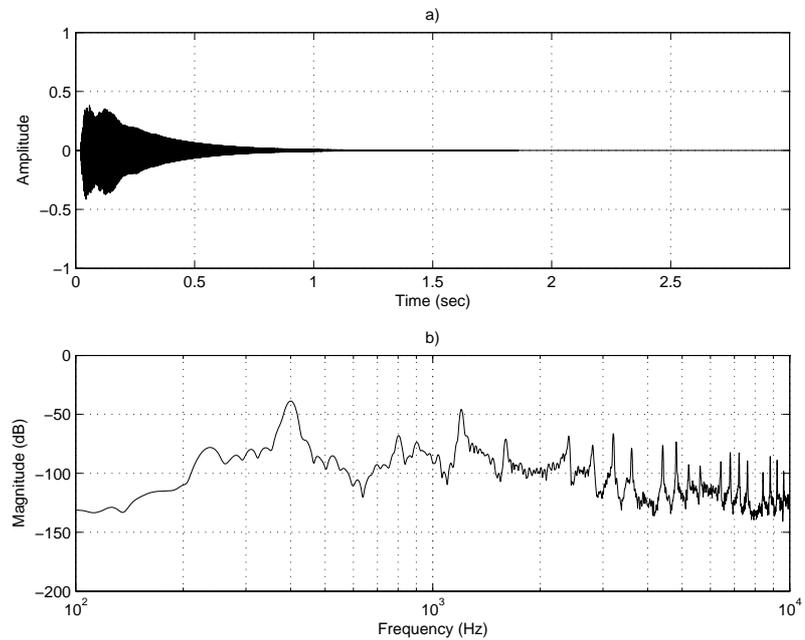
รูปที่ ๗.7: สัญญาณเสียงพินสังเคราะห์ที่ใช้ตัวกรองผลตอบสนองอิมพัลส์เต้าพิน และ ฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัลของเสียงพินสังเคราะห์เสียง ร



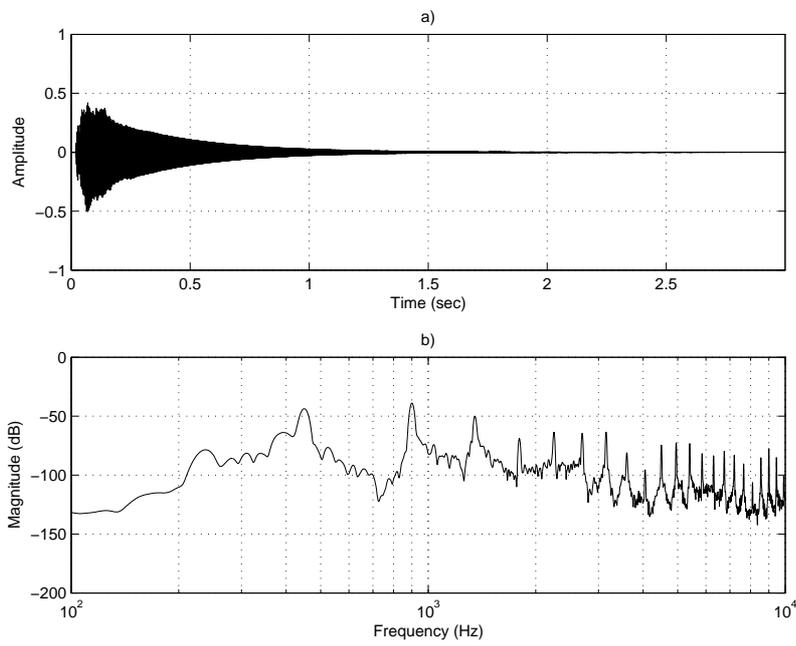
รูปที่ ๗.8: สัญญาณเสียงพินสังเคราะห์ที่ใช้ตัวกรองผลตอบสนองอิมพัลส์เต้าพิน และ ฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัลของเสียงพินสังเคราะห์เสียง ม



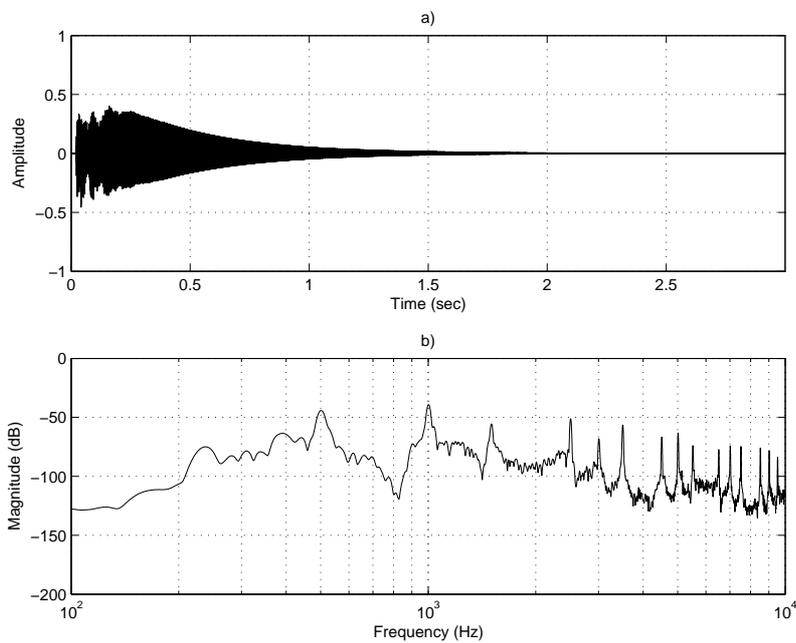
รูปที่ ง.9: สัญญาณเสียงพินสังเคราะห์ที่ใช้ตัวกรองผลตอบสนองอิมพัลส์เต่าพิน และ ฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัมของเสียงพินสังเคราะห์เสียง ฟ



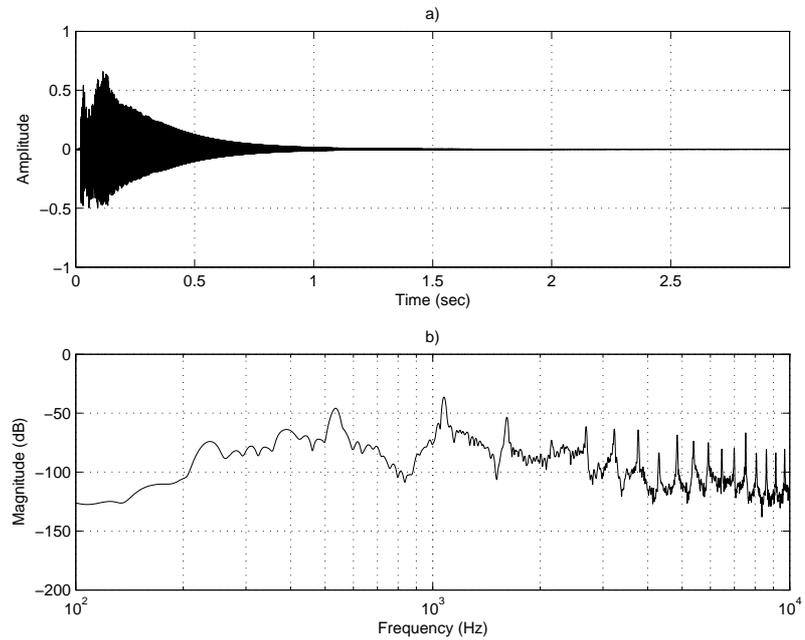
รูปที่ ง.10: สัญญาณเสียงพินสังเคราะห์ที่ใช้ตัวกรองผลตอบสนองอิมพัลส์เต่าพิน และ ฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัมของเสียงพินสังเคราะห์เสียง ช



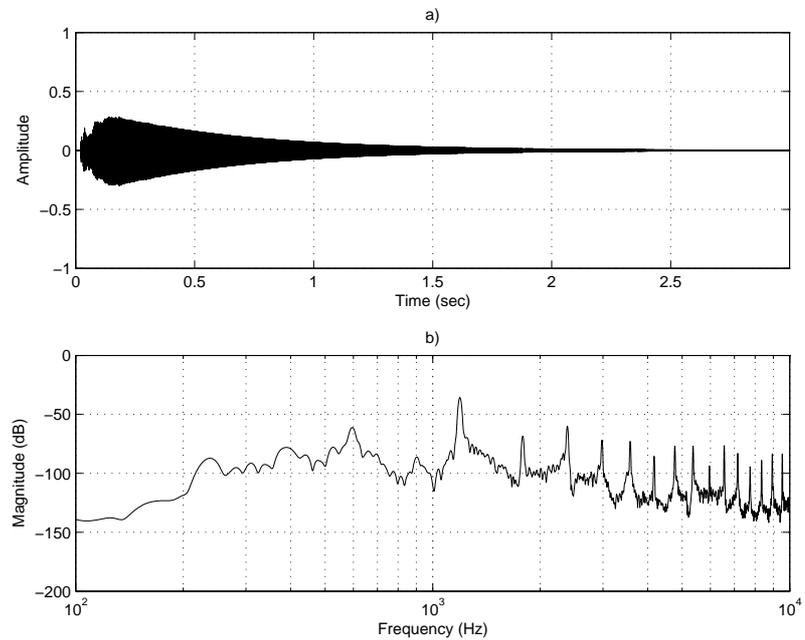
รูปที่ ง.11: สัญญาณเสียงพินส์เครื่องที่ใช้ตัวกรองผลตอบสนองอิมพัลส์เต้าพิน และ ฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปคตรัลของเสียงพินส์เครื่องเสียง ล



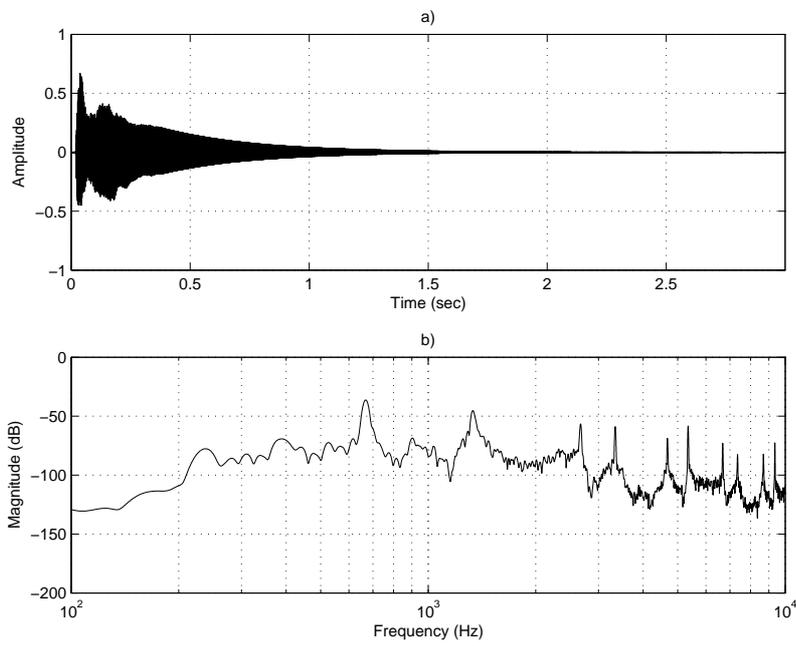
รูปที่ ง.12: สัญญาณเสียงพินส์เครื่องที่ใช้ตัวกรองผลตอบสนองอิมพัลส์เต้าพิน และ ฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปคตรัลของเสียงพินส์เครื่องเสียง ท



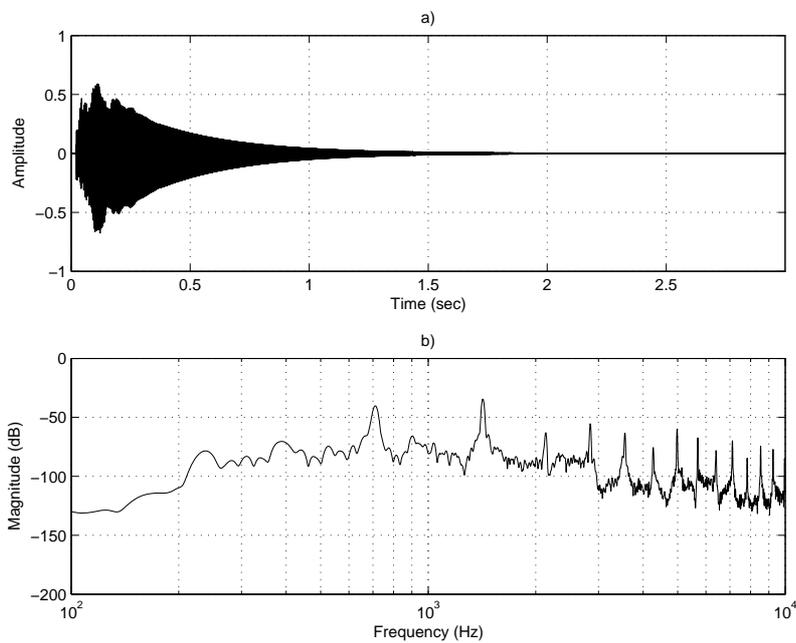
รูปที่ ง.13: สัญญาณเสียงพินสังเคราะห์ที่ใช้ตัวกรองผลตอบสนองอิมพัลส์เต้าพิน และ ฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัมของเสียงพินสังเคราะห์เสียง จ



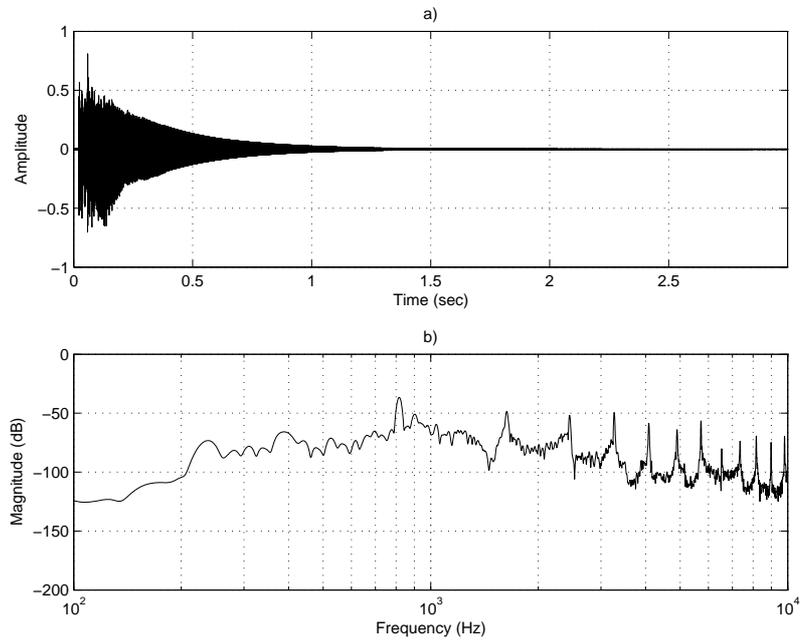
รูปที่ ง.14: สัญญาณเสียงพินสังเคราะห์ที่ใช้ตัวกรองผลตอบสนองอิมพัลส์เต้าพิน และ ฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัมของเสียงพินสังเคราะห์เสียง ร



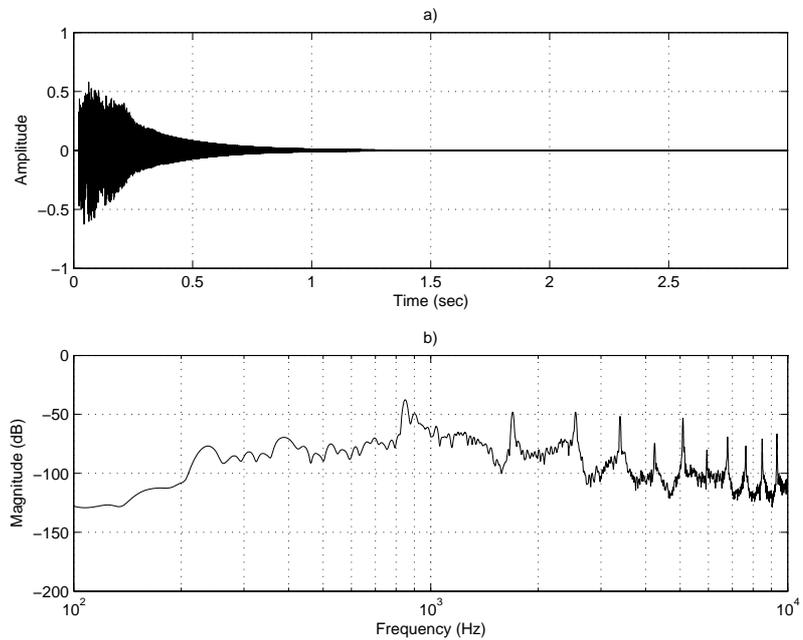
รูปที่ ง.15: สัญญาณเสียงพิณสังเคราะห์ที่ใช้ตัวกรองผลตอบสนองอิมพัลส์เต้าพิณ และ ฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัมของเสียงพิณสังเคราะห์เสียง ม



รูปที่ ง.16: สัญญาณเสียงพิณสังเคราะห์ที่ใช้ตัวกรองผลตอบสนองอิมพัลส์เต้าพิณ และ ฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัมของเสียงพิณสังเคราะห์เสียง พ



รูปที่ ง.17: สัญญาณเสียงพินสังเคราะห์ที่ใช้ตัวกรองผลตอบสนองอิมพัลส์เต้าพิน และ ฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปคตรัลของเสียงพินสังเคราะห์เสียง ช้

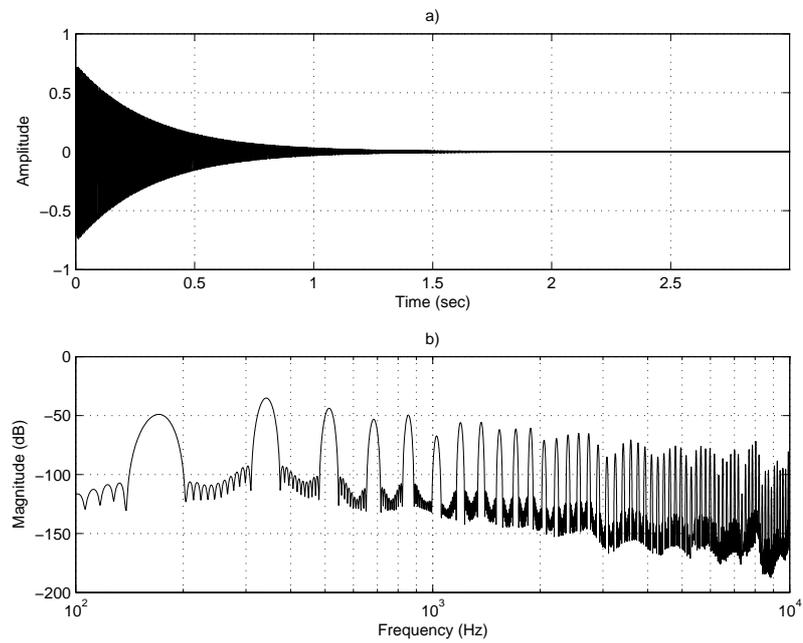


รูปที่ ง.18: สัญญาณเสียงพินสังเคราะห์ที่ใช้ตัวกรองผลตอบสนองอิมพัลส์เต้าพิน และ ฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปคตรัลของเสียงพินสังเคราะห์เสียง ล้

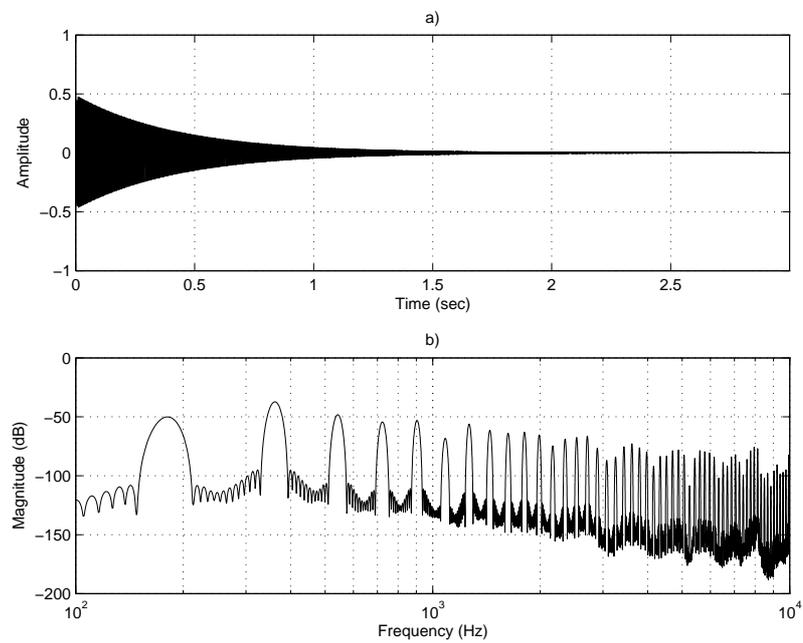
ภาคผนวก จ

สัญญาณเสียงพินสักระยะ II

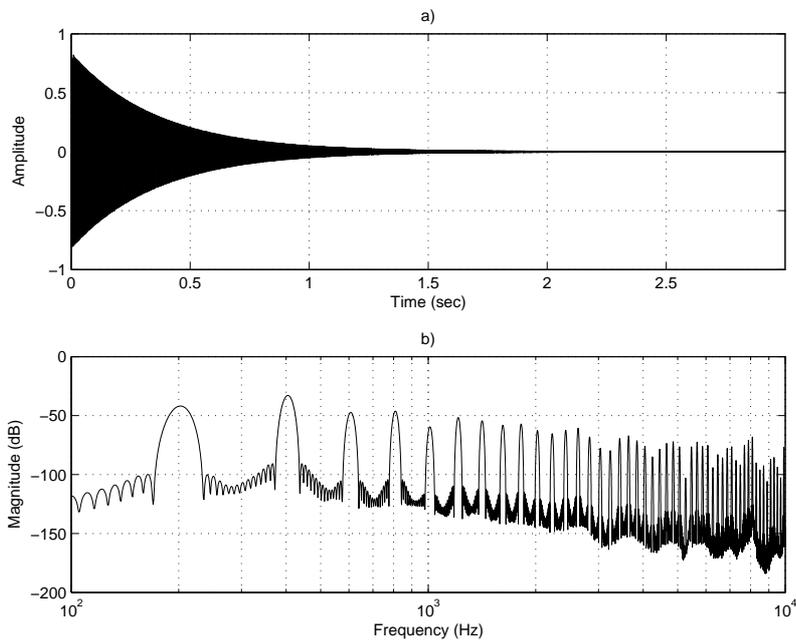
รูปที่ จ.1 – จ.18 แสดงสัญญาณเสียงพินสักระยะที่ใช้ตัวกรอง IIR อันดับที่ 64 ที่สร้างจากผลตอบสนองความถี่ของตัวพินโดยใช้กรรมวิธียูล-วอล์กเกอร์ (Yule-Walker) พร้อมฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปคตรัล



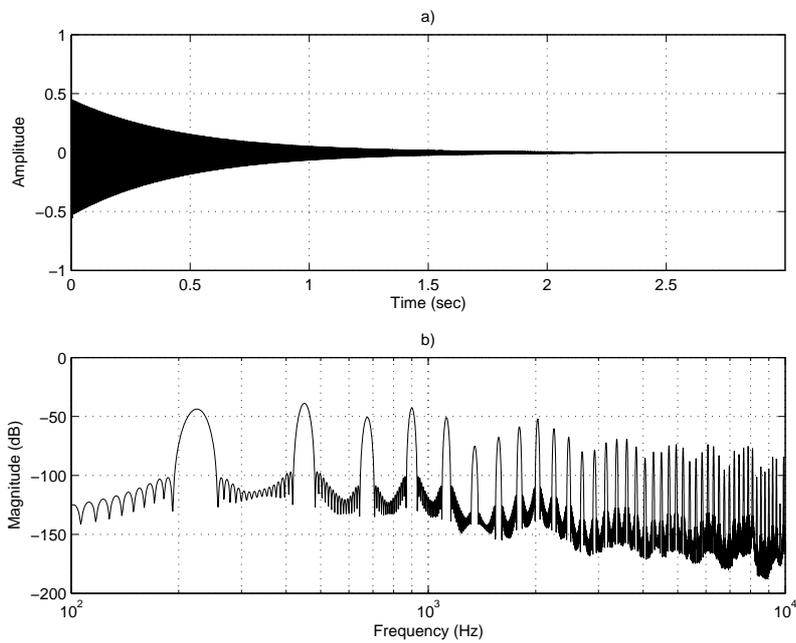
รูปที่ จ.1: สัญญาณเสียงพินส์เคราะหที่ที่ใช้ตัวกรองตัวกรอง IIR อันดับที 64 และฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปคตรัลของเสียงพินส์เคราะหที่เสียง ม



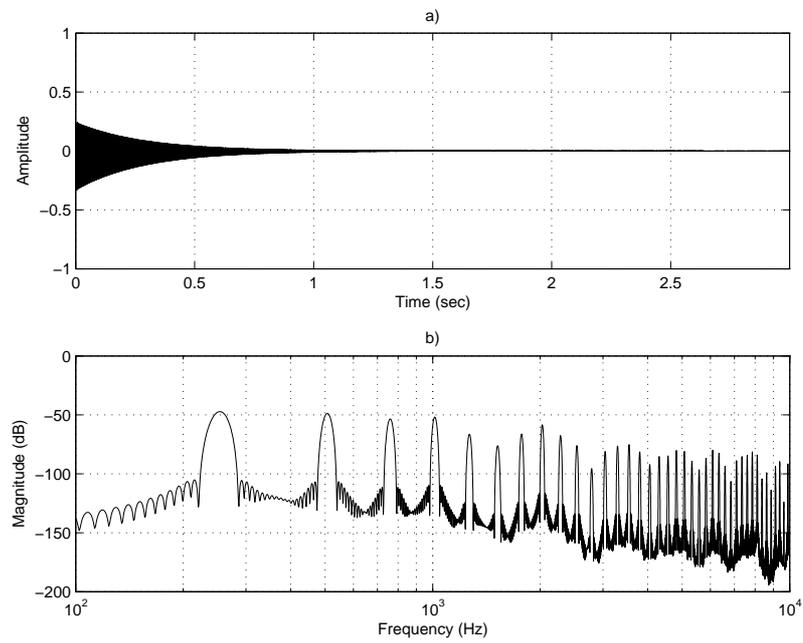
รูปที่ จ.2: สัญญาณเสียงพินส์เคราะหที่ที่ใช้ตัวกรองตัวกรอง IIR อันดับที 64 และฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปคตรัลของเสียงพินส์เคราะหที่เสียง พ



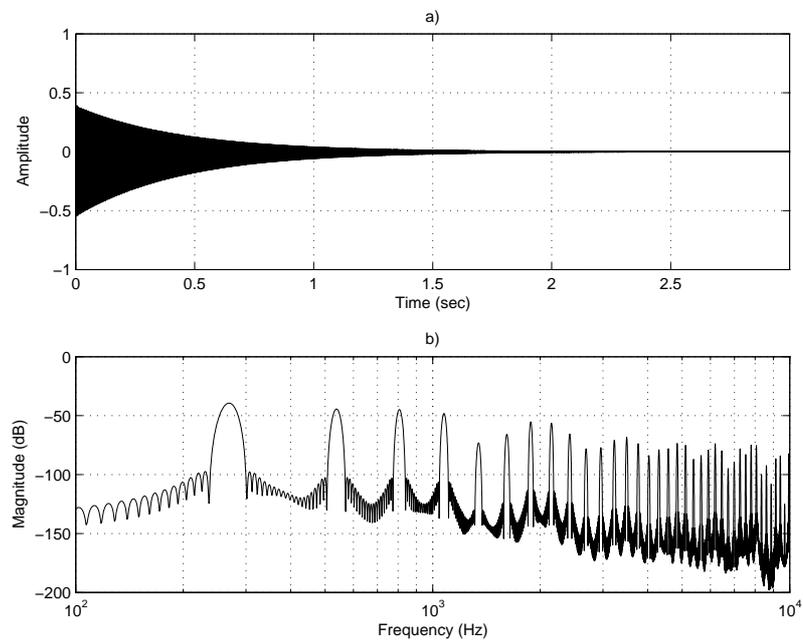
รูปที่ ๓.3: สัญญาณเสียงพินสียงเคราะห์ที่ใช้ตัวกรองตัวกรอง IIR อันดับที่ 64 และฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัลของเสียงพินสียงเคราะห์เสียง ชู



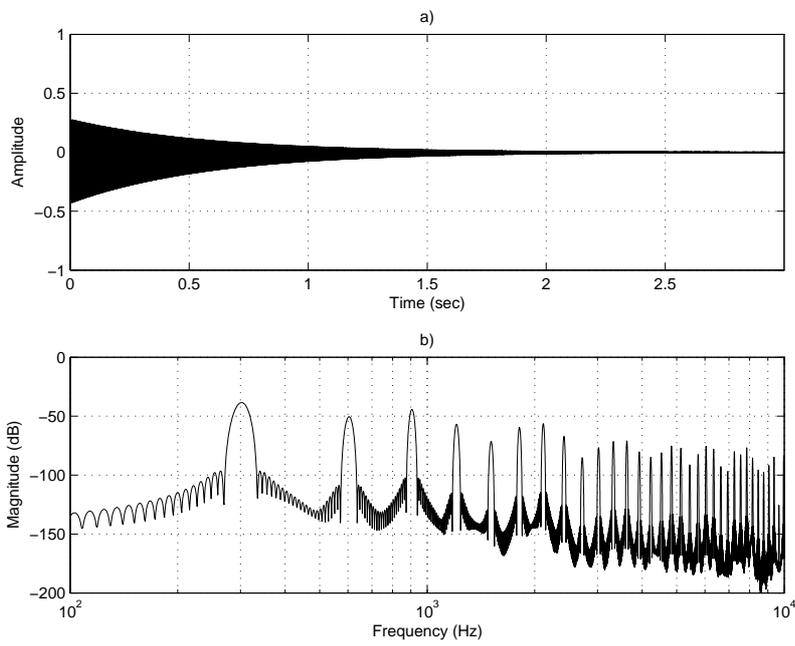
รูปที่ ๓.4: สัญญาณเสียงพินสียงเคราะห์ที่ใช้ตัวกรองตัวกรอง IIR อันดับที่ 64 และฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัลของเสียงพินสียงเคราะห์เสียง ลู



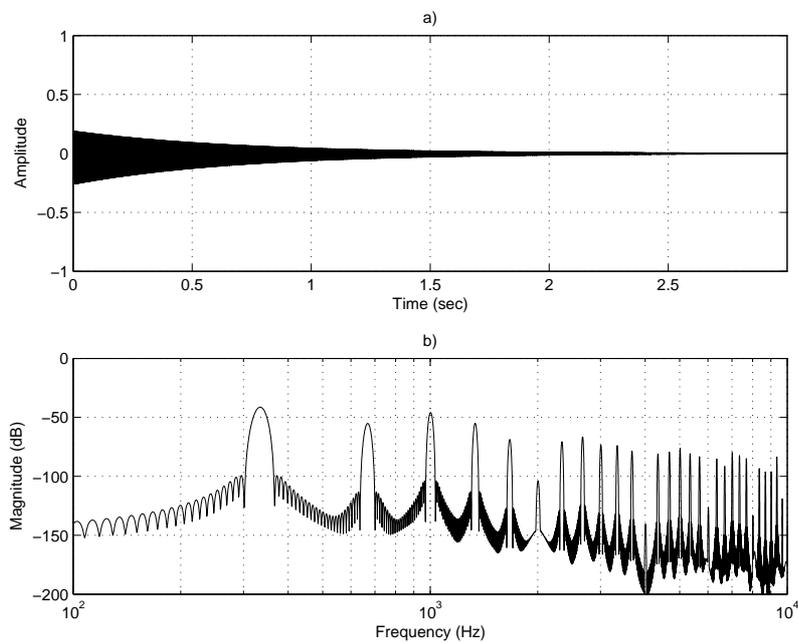
รูปที่ จ.5: สัญญาณเสียงพินส์สังเคราะห์ที่ใช้ตัวกรองตัวกรอง IIR อันดับที่ 64 และฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปคตรัลของเสียงพินส์สังเคราะห์เสียง ท



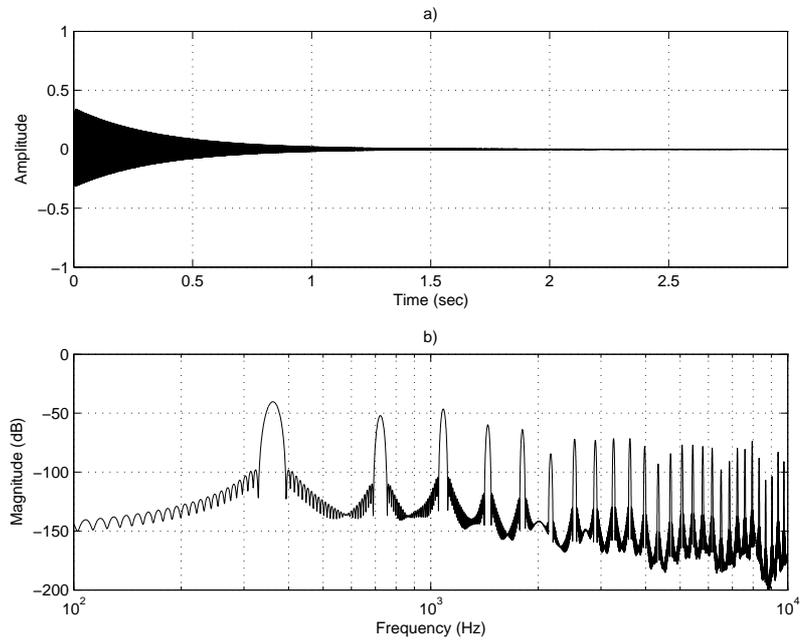
รูปที่ จ.6: สัญญาณเสียงพินส์สังเคราะห์ที่ใช้ตัวกรองตัวกรอง IIR อันดับที่ 64 และฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปคตรัลของเสียงพินส์สังเคราะห์เสียง ด



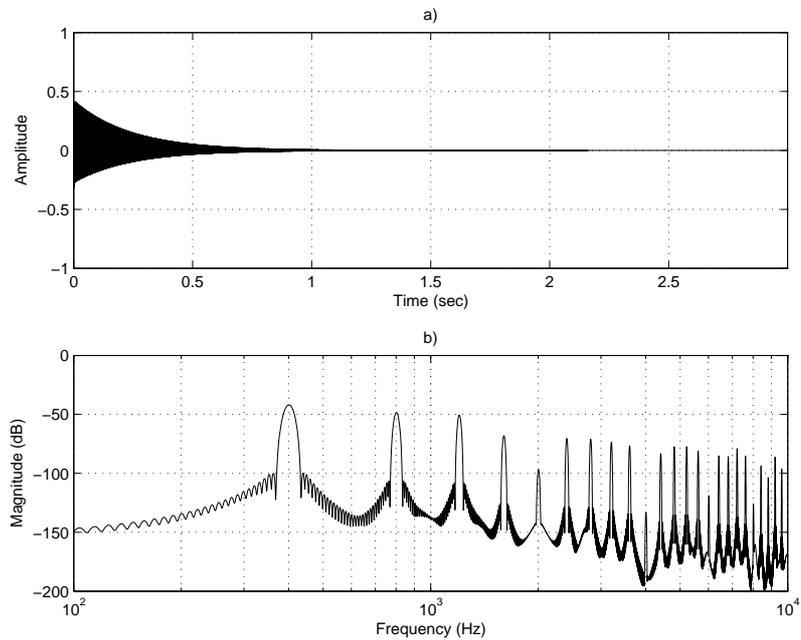
รูปที่ ๗.7: สัญญาณเสียงพินส์เคราะห์ที่ใช้ตัวกรองตัวกรอง IIR อันดับที่ 64 และฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัมของเสียงพินส์เคราะห์เสียง ร



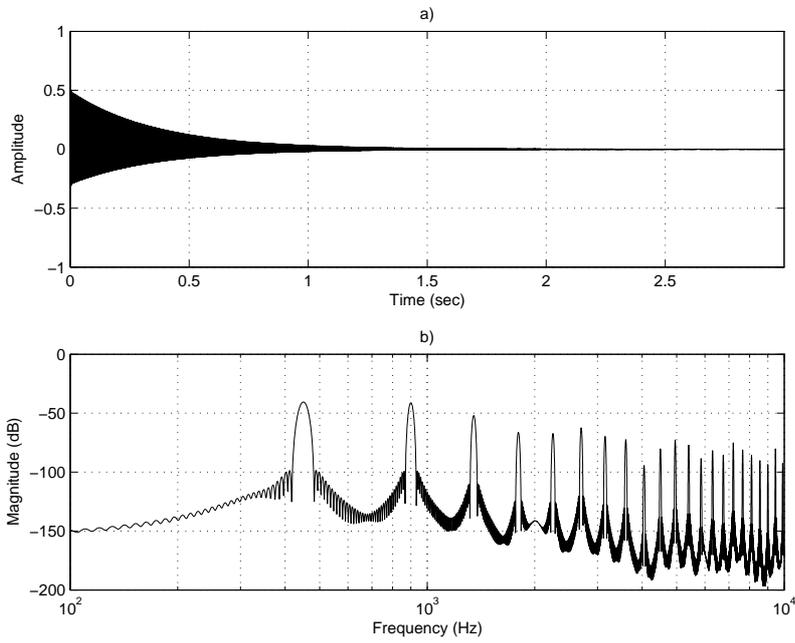
รูปที่ ๗.8: สัญญาณเสียงพินส์เคราะห์ที่ใช้ตัวกรองตัวกรอง IIR อันดับที่ 64 และฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัมของเสียงพินส์เคราะห์เสียง ม



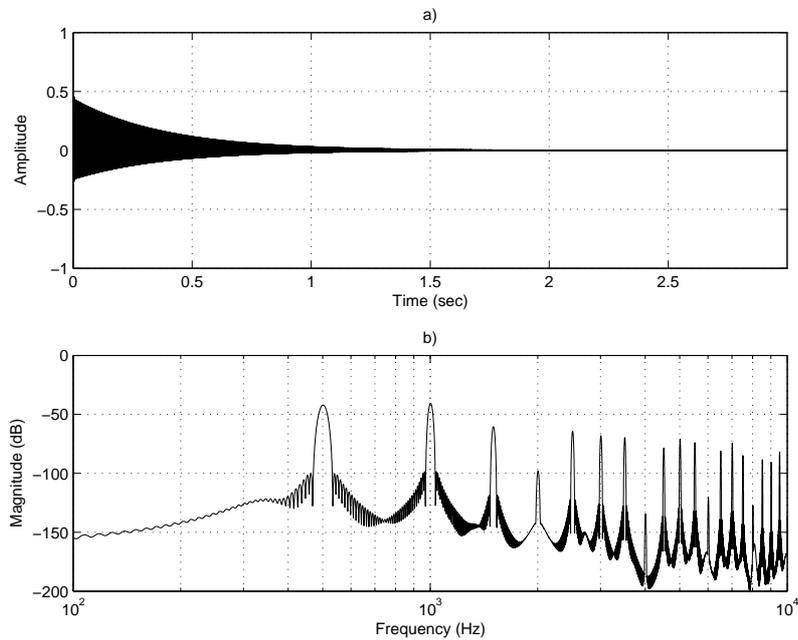
รูปที่ จ.9: สัญญาณเสียงพินส์เกราะที่ใช้ตัวกรองตัวกรอง IIR อันดับที่ 64 และฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปคตรัลของเสียงพินส์เกราะที่เสียง ฟ



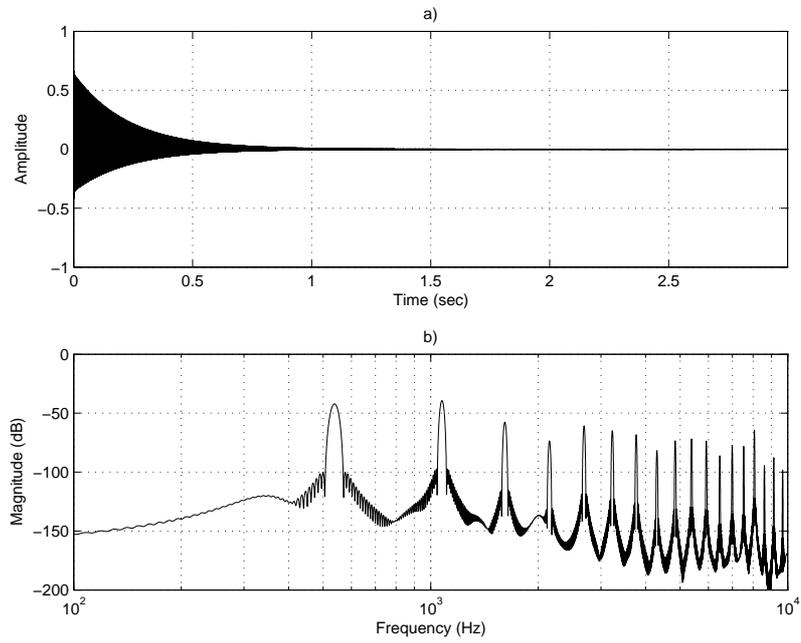
รูปที่ จ.10: สัญญาณเสียงพินส์เกราะที่ใช้ตัวกรองตัวกรอง IIR อันดับที่ 64 และฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปคตรัลของเสียงพินส์เกราะที่เสียง ช



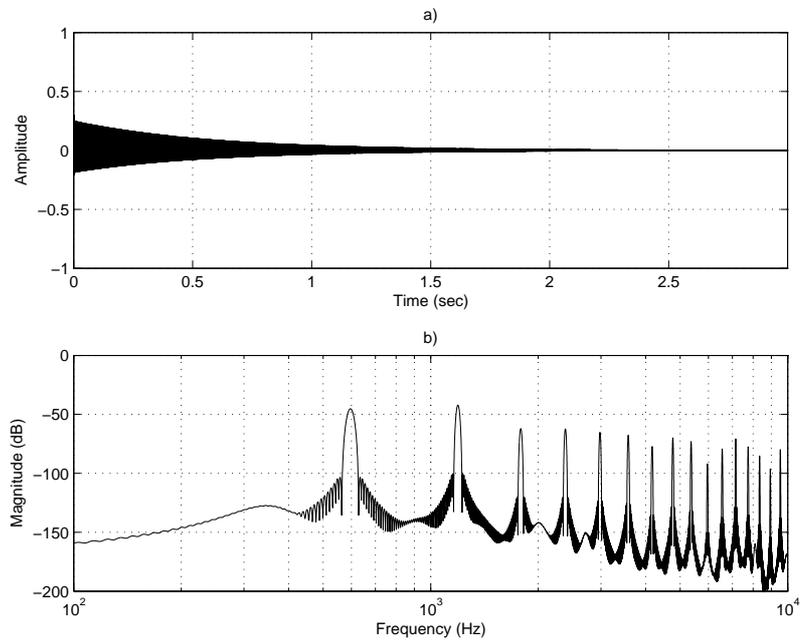
รูปที่ ๑.11: สัญญาณเสียงพิณสังเคราะห์ที่ใช้ตัวกรองตัวกรอง IIR อันดับที่ 64 และฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัมของเสียงพิณสังเคราะห์เสียง ล



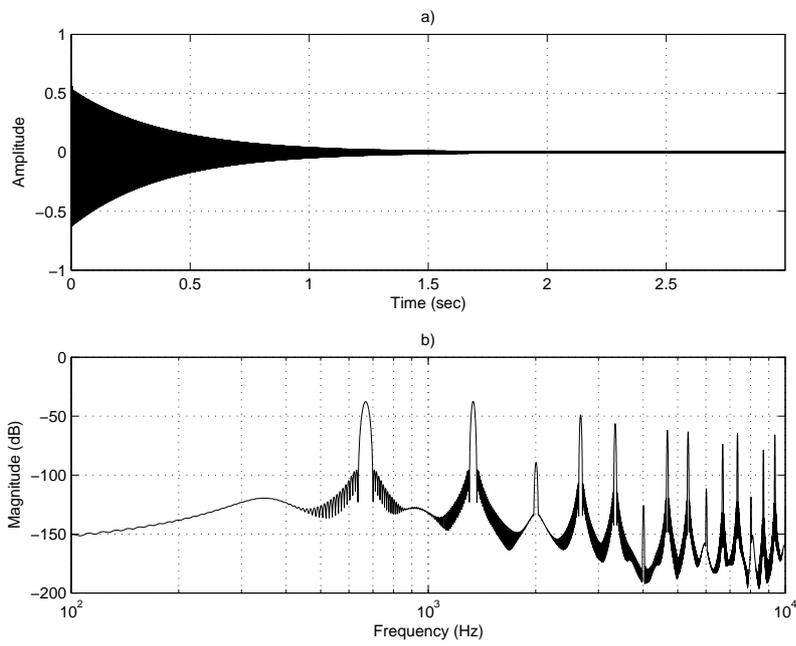
รูปที่ ๑.12: สัญญาณเสียงพิณสังเคราะห์ที่ใช้ตัวกรองตัวกรอง IIR อันดับที่ 64 และฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัมของเสียงพิณสังเคราะห์เสียง ท



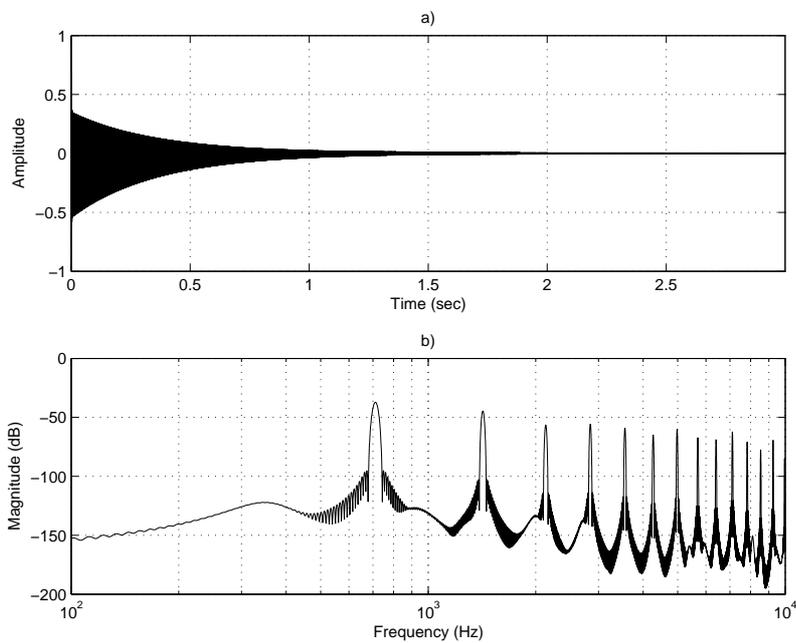
รูปที่ จ.13: สัญญาณเสียงพินสั้เคราะห์ที่ใช้ตัวกรองตัวกรอง IIR อันดับที่ 64 และฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปคตรั้ลของเสียงพินสั้เคราะห์เสียง ด



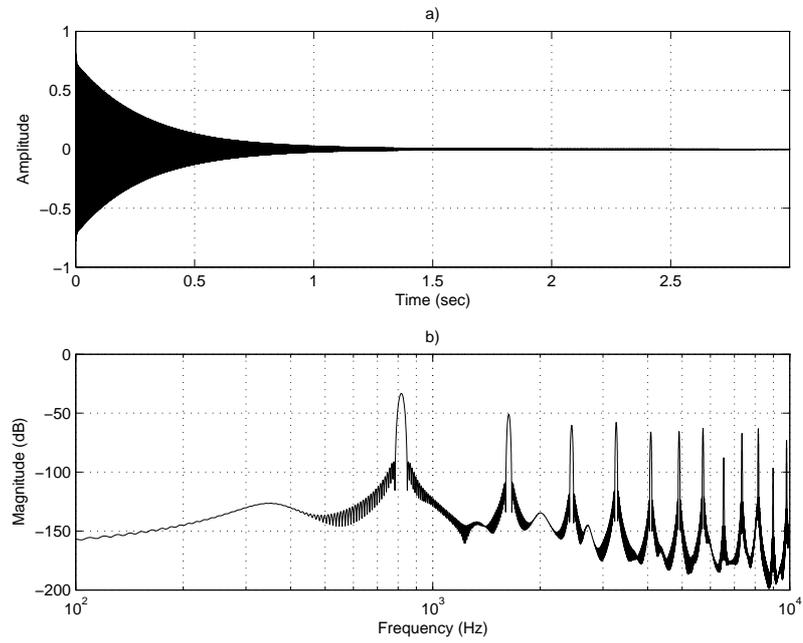
รูปที่ จ.14: สัญญาณเสียงพินสั้เคราะห์ที่ใช้ตัวกรองตัวกรอง IIR อันดับที่ 64 และฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปคตรั้ลของเสียงพินสั้เคราะห์เสียง ร



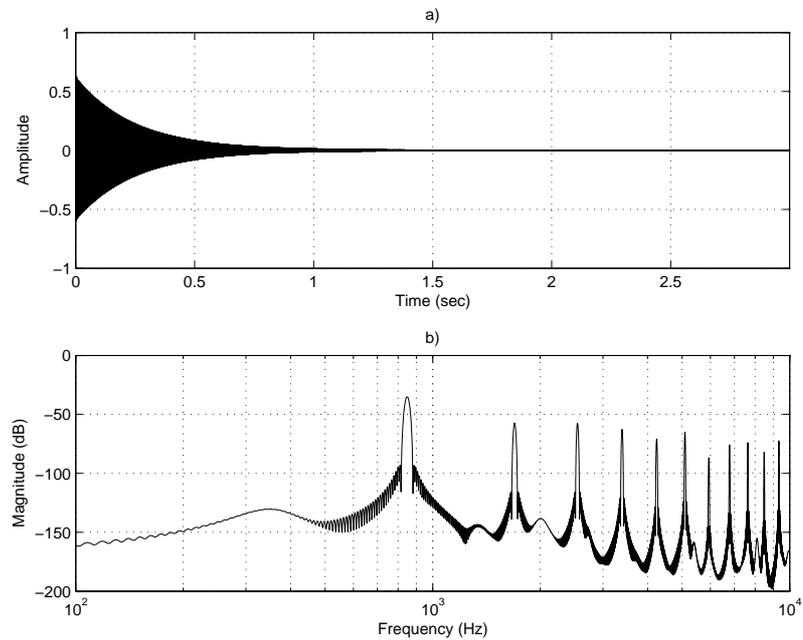
รูปที่ ๑.15: สัญญาณเสียงพินส์เคราะห์ที่ใช้ตัวกรองตัวกรอง IIR อันดับที่ 64 และฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัมของเสียงพินส์เคราะห์เสียง ม



รูปที่ ๑.16: สัญญาณเสียงพินส์เคราะห์ที่ใช้ตัวกรองตัวกรอง IIR อันดับที่ 64 และฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัมของเสียงพินส์เคราะห์เสียง ฟ



รูปที่ จ.17: สัญญาณเสียงพินสั้เคราะห์ที่ใช้ตัวกรองตัวกรอง IIR อันดับที่ 64 และฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปคตรัลของเสียงพินสั้เคราะห์เสียง ช้



รูปที่ จ.18: สัญญาณเสียงพินสั้เคราะห์ที่ใช้ตัวกรองตัวกรอง IIR อันดับที่ 64 และฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปคตรัลของเสียงพินสั้เคราะห์เสียง ล้

ภาคผนวก ฉ

เนื้อหาในแผ่นสำรองข้อมูล CDROM

แผ่นสำรองข้อมูล CDROM ที่แนบมาพร้อมกับรายงานนี้บรรจุข้อมูลเกี่ยวกับงานวิจัยนี้ทั้งหมด โดยเนื้อหาจะแยกออกเป็นส่วน ๆ ตามรายการในไดเรกทอรีต่อไปนี้

readme.txt ไฟล์ตัวหนังสือบรรจุข้อความในภาคผนวก ฉ นี้

F312031205.pdf ไฟล์เอกสารของรายงานฉบับนี้ในรูปแบบ PDF-FILE

Measured/ ข้อมูลที่ได้จากการวัด

Analysis/ สคริปต์และฟังก์ชัน MATLAB ที่ใช้วิเคราะห์สัญญาณและผลการวิเคราะห์

Synthesis/ สคริปต์และฟังก์ชัน MATLAB ที่ใช้สังเคราะห์สัญญาณ

Data/ ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ และข้อมูลที่ใช้ประกอบการสังเคราะห์ในรูปแบบ MAT-FILE

Samples/ สัญญาณเสียงธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการเตรียมสัญญาณแล้ว สัญญาณเสียงสังเคราะห์ ทั้ง 2 แบบ

ListeningTest/ ข้อมูล โปรแกรม LabVIEW สคริปต์และฟังก์ชัน MATLAB ที่เกี่ยวกับการทดลองโดยการฟังและผลการทดลอง

Miscellaneous/ ไฟล์อื่น ๆ

ภาคผนวก ช

ประวัติคณะผู้วิจัย

นายกิตติพงษ์ มีสวาสดี



นายกิตติพงษ์ มีสวาสดี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิริธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ เมื่อปี 2539 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโทและปริญญาเอก สาขาอคูสติกจากมหาวิทยาลัยอัลบอร์ก (Aalborg University) ประเทศเดนมาร์ก ในปี 2543 และ 2547 ตามลำดับ ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น สาขางานวิจัยที่สนใจคือ การประยุกต์ใช้งานการประมวลผลเชิงเลขกับดนตรีไทย

นายภาคภูมิ ไชคชัยรุ่งโรจน์



นายภาคภูมิ ไชคชัยรุ่งโรจน์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ในปี 2547 ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาโทสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น สาขางานวิจัยที่สนใจคือ การประยุกต์ใช้งานการประมวลผลเชิงเลขกับดนตรีไทย

บรรณานุกรม

- [1] S. R. Allen. *Audio in Media*. Wadsworth, 1999.
- [2] M. Blend. *An Introduction to Medical Statistics*. Oxford Medical Publications, 1995.
- [3] ISO3382. Acoustics – measurements of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters. Technical report, International Organization for Standardization, 1997.
- [4] L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens, and J. V. Sanders. *Fundamentals of Acoustics*. John Wiley & Sons, 3rd edition, 1982.
- [5] B. J. C. Moore. *An Introduction to the Psychology of Hearing*. Academic Press, Great Britain, 4th edition, 1997.
- [6] P. M. Morse and K. U. Ingard. *Theoretical Acoustics*. Princeton University Press, 1986.
- [7] D. Morton. *The traditional music of Thailand*. University of California Press, CA, USA, 1976.
- [8] J. G. Proakis and D. G. Manolakis. *Digital Signal Processing; Principles, Algorithm, and Applications*. Prentice Hall, 1996.
- [9] กิตติพงษ์ มีสวัสดิ์ จรัญ กาญจนประดิษฐ์ และ ภาคภูมิ โชคชัยรุ่งโรจน์. การประเมินระบบเสียงธรรมชาติของขลุ่ยเพียงออ. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 29, 2549.
- [10] จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. *การศึกษาค้นคว้าวิจัยเรื่องความถี่ของเสียงดนตรีไทย*. เรื่อง แก้วการพิมพ์, กรุงเทพมหานคร, 2542.
- [11] บุญโฮม พรศรี. พิณอีสานกับการเปลี่ยนแปลงทางวัฒนธรรม : กรณีศึกษาจังหวัดอุตรธานี. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, 2543.
- [12] ปราโมทย์ เดชะอำไพ. *ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม*. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.

- [13] รุ่งกานต์ ศิริเจริญไชย และ นพพร โชติกกำธร. การวิเคราะห์และสังเคราะห์เสียงขลุ่ยไทยโดยใช้โมเดลแบบ sinusoidal plus noise. *สารเนคเทค*, 36, กันยายน – ตุลาคม 2543.
- [14] ฤดีรัตน์ ชินเวชกิจวานิชย์ สรวุฒิ สุจิตจร กิตติ อรรถกิมงคล และ เพ็ชร โตท่าโรง. การวิเคราะห์ระดับเสียงดนตรีไทย. *วารสารเทคโนโลยีสุรนารี*, 11(3):179 – 192, กรกฎาคม – กันยายน 2547.
- [15] สรวุฒิ สุจิตจร. *การวิเคราะห์เสียงดนตรีไทย*. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา, 2545.
- [16] สุก รี้ เจริญสุข. *เสียง และ ระบบเสียง ดนตรี ไทย*. วิทยาลัยดุริยางคศิลป์ มหาวิทยาลัยมหิดล, กรุงเทพมหานคร, 2546.