

บทที่ 3

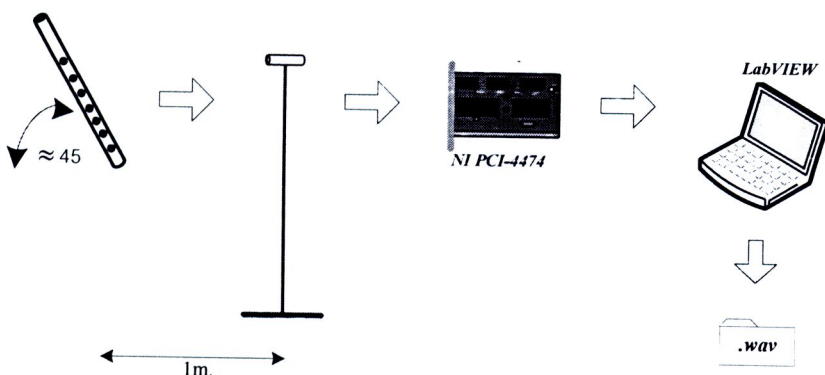
กรรมวิธีการทดลอง

กรรมวิธีทดลองประกอบไปด้วย การบันทึกเสียงขลุ่ยเพียงออ การกำจัดสัญญาณรบกวน การวิเคราะห์สัญญาณไซน์บริสุทธิ์ การสร้างแบบจำลองขอบของสัญญาณเสียงขลุ่ยเพียงออ การสร้างแบบจำลองสัญญาณไซน์บริสุทธิ์โดยใช้การประมาณค่าเชิงเส้น และการสร้างแบบจำลองการสัญญาณไซน์บริสุทธิ์โดยใช้การประมาณค่าเชิงเส้นแบบด้อย การสังเคราะห์เสียงด้วยกรรมวิธี Subtractive Synthesis โดยใช้การประมาณค่าเชิงเส้น และการประมาณค่าเชิงเส้นแบบด้อยตามลำดับ

3.1 การบันทึกเสียงขลุ่ยเพียงออ

การบันทึกเสียงจะดำเนินการบันทึกจากขลุ่ยเพียงออ ชนิดไม้รวก 1 เล้า ที่ผ่านเลือกโดยผู้เชี่ยวชาญเพื่อให้มั่นใจว่าขลุ่ยเล้าที่เลือกมีความเพี้ยนของเสียงขลุ่ยเพียงออน้อยที่สุด จากนั้นบรรเลงขลุ่ยเพียงออโดยผู้เชี่ยวชาญด้านการบรรเลงขลุ่ย ซึ่งสถานที่ในการบันทึกเสียงกระทำในห้องทำงานสภาพปรกติ ณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ซึ่งมีขนาด $3.9 \times 3.9 \times 2.9$ ตารางเมตร

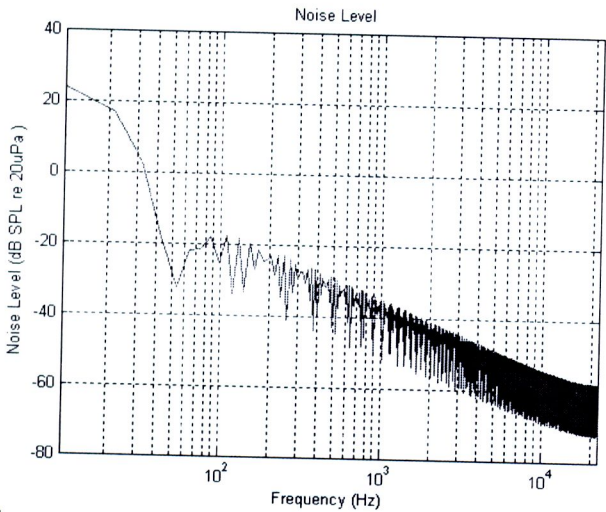
ในการเริ่มต้นบันทึกผู้บรรเลงจะอยู่ห่างจากไมโครโฟน 1 เมตร ซึ่งเป็นระยะที่ไม่เกิดการขลิบสัญญาณเสียงขลุ่ยเพียงออที่ทำการบันทึก กำหนดให้บรรเลงไล่ระดับจากเสียงโดต่ำไป จนถึงเสียงโดสูง โดยบรรเลงเสียงละ 3 รอบ ซึ่งเสียงขลุ่ยที่บรรเลงจะถูกส่งผ่านไปยังไมโครโฟนรับเสียงรอบทิศทาง (Omni-Directional Microphone) PCB Piezotronics™ 130D20 ซึ่งมีความกว้างแบนด์ความถี่ที่รับได้ 15 กิโลเฮิร์ตซ์ จากนั้นสัญญาณเสียงจะถูกส่งต่อไปยังวงจรแปลงสัญญาณ (24-Bit Data Acquisition Card) Nation Instruments™ NI PCI-4474 กำหนดอัตราซีกตัวอย่างที่ 44.1 กิโลเฮิร์ตซ์ ควบคุมการบันทึก และจัดเก็บสัญญาณที่บันทึกได้ในรูปแบบไฟล์ WAV ด้วยโปรแกรม Labview™ โดยขั้นตอนการบันทึกเสียงแสดงดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนการบันทึกเสียงขลุ่ยเพียงออ

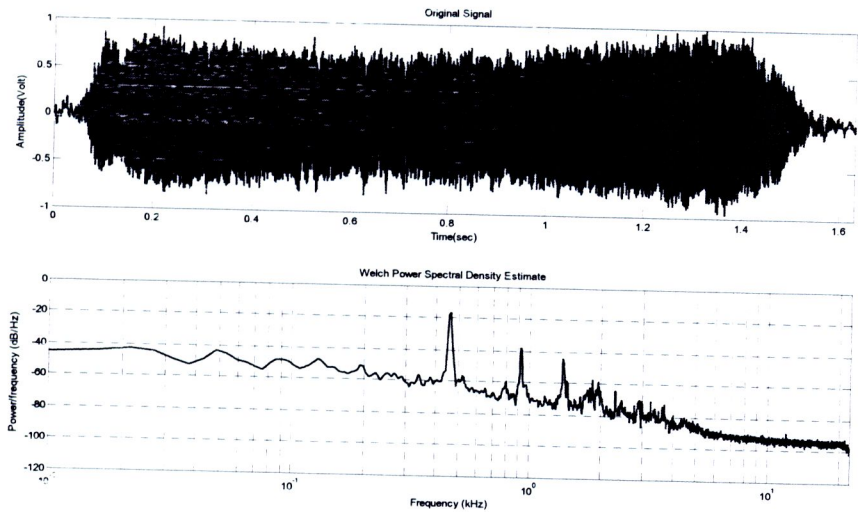
3.2 การกำจัดสัญญาณรบกวน

เนื่องจากสัญญาณเสียงขลุ่ยเพียงออที่ทำการบันทึกนั้น กระทำในสภาพห้องทำงานปกติที่ไม่ใช่ห้องสำหรับบันทึกเสียงโดยตรงจึงมีส่วนของสัญญาณรบกวนอยู่ในย่านความถี่ต่ำกว่า 100 เฮิร์ตซ์ ซึ่งได้ทำการตรวจวัดก่อนทำการบันทึกเสียงขลุ่ยเพียงออ แสดงได้ดังภาพที่ 3.2

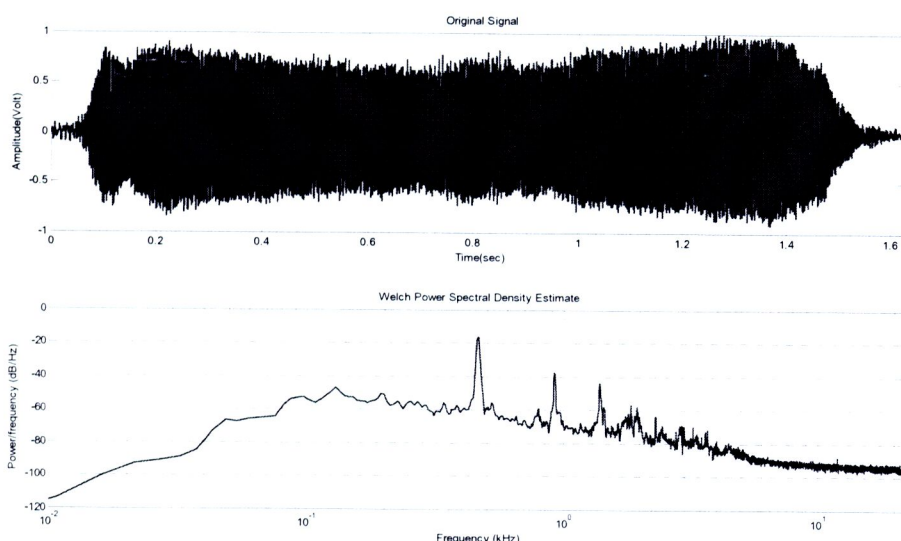


ภาพที่ 3.2 ระดับสัญญาณรบกวนภายในห้องที่ใช้ในการบันทึกเสียง

โดยสัญญาณเสียงขลุ่ยเพียงออที่มีสัญญาณรบกวนผสม แสดงในภาพที่ 3.3 เพื่อไม่ให้สัญญาณรบกวนเหล่านี้มีอิทธิพลต่อการทดลองจึงต้องทำการกรองสัญญาณรบกวนออกเสียก่อนโดยใช้ตัวกรองความถี่สูงผ่านแบบบัตเตอร์เวิร์ธอันดับ 4 (4th Order Butterworth Highpass Filter) ที่มีค่าความถี่ตัดที่ 100 เฮิร์ตซ์ เพื่อลดทอนสัญญาณรบกวนที่แฝงอยู่ในการบันทึกเสียงซึ่งผลการกรองสัญญาณรบกวนแสดงดังภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.3 ตัวอย่างสัญญาณเสียงโดต่ำที่มีสัญญาณรบกวน



ภาพที่ 3.4 ตัวอย่างชุดสัญญาณเสียงโดต้าที่ผ่านการกรองสัญญาณรบกวนออกเรียบร้อยแล้ว

3.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงความถี่ของสัญญาณเสียงขลุ่ยเพียงออ

การวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงความถี่ของสัญญาณเสียงขลุ่ยเพียงออโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังตามกรรมวิธีของเวลช์ จะใช้ในการเปรียบเทียบกับผลตอบสนองเชิงความถี่ของสัญญาณเสียงสังเคราะห์ในลำดับต่อไป โดยกำหนดพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ได้แก่

1. อัตราการสุ่มตัวอย่าง 44.1 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งเป็นมาตรฐานของอัตราการสุ่มสัญญาณเสียงออไดโอ (Audio) โดยทั่วไป

2. จำนวนจุดที่ใช้ในการแปลงฟูเรียร์แบบรวดเร็วเท่ากับ 8,192 จุด หรือเท่ากับ 185.8 มิลลิวินาที ซึ่งใกล้เคียงกับช่วงเวลาที่มนุษย์สามารถตรวจจับได้ (Duration of Unity Detectability : 15–150 มิลลิวินาที) (Moore, 1997) และมีการเหลื่อมล้ำ (Overlap) ที่ 50 เปอร์เซ็นต์ หรือ 4,096 จุด

3. การเลือกฟังก์ชันหน้าต่างได้เลือกใช้หน้าต่างชนิดหน้าต่างชนิดแบล็คแมน (Blackman Window) ซึ่งเมื่อนำมาใช้วิเคราะห์เสียงขลุ่ยไทยแล้วให้ค่าความถี่และค่าแอมพลิจูดที่ถูกต้องมากกว่าฟังก์ชันหน้าต่างชนิดอื่น ๆ (รุ่งกานต์ ศิริเจริญชัย, 2544)

ในเบื้องต้น ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์สัญญาณไซน์บริสุทธิ์ในย่านความถี่ 100 – 1000 เฮิร์ตซ์ เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่จะใช้ในการวิเคราะห์เสียงขลุ่ยเพียงออต้นฉบับ โดยผลการทดลองที่ได้แสดงดังตารางที่ 3.1 พบว่ามีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 1.36 เฮิร์ตซ์ และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.77 เฮิร์ตซ์

ตารางที่ 3.1 ผลการวิเคราะห์ความถี่สัญญาณไซน์บริสุทธิ์

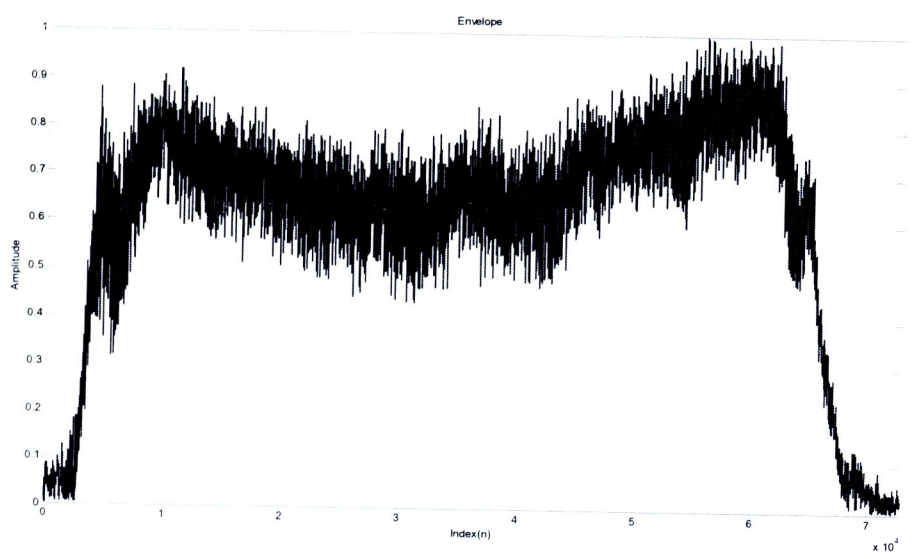
สัญญาณไซน์(เฮิรตซ์)	ความถี่ที่วิเคราะห์ได้(เฮิรตซ์)	ความคลาดเคลื่อน(เฮิรตซ์)
100	102.3	2.3
200	199.2	0.8
300	301.5	1.5
400	398.4	1.6
500	500.6	0.6
600	597.5	2.5
700	699.8	0.2
800	802.1	2.1
900	899	1
1000	1,001	1
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย	1.36	
SD	0.77	

สำหรับผลการวิเคราะห์เพื่อหาค่าประกอบเชิงความถี่ของสัญญาณเสียงขลุ่ยเพียงออโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังจะอยู่ในหัวข้อ 4.1

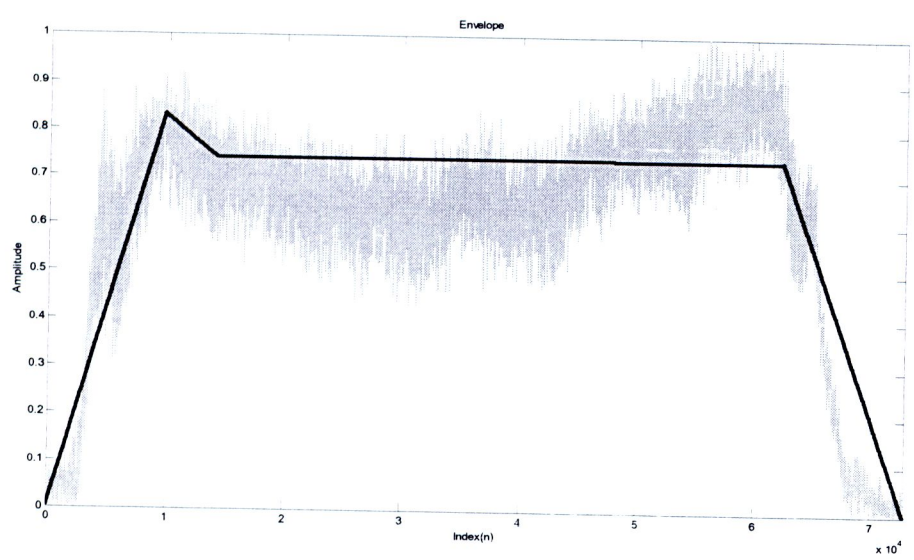
3.4 การสร้างแบบจำลองขอบของสัญญาณเสียงขลุ่ยเพียงออ

การทดลองนี้เป็นกรรมวิธีในการสร้างแบบจำลองขอบของสัญญาณเสียง (ADSR Model) ของขลุ่ยเพียงออ ซึ่งใช้สำหรับสร้างเสียงสังเคราะห์ในลำดับต่อไป โดยในขั้นตอนแรกนำสัญญาณเสียงต้นฉบับมาทำการแปลงฮิลเบิร์ต (Hilbert Transform) (Proakis, Manolakis, 1996) เพื่อทำการสร้างขอบของสัญญาณจากสัญญาณเสียงต้นฉบับที่ผ่านการกรองสัญญาณรบกวนแล้ว ดังแสดงในภาพที่ 3.5 จากนั้นทำการกำหนดจุด A D S R ตามแบบจำลองขอบของสัญญาณเสียงโดยใช้ค่าเฉลี่ยที่ได้จากการวัดสัญญาณเสียงต้นฉบับจำนวนทั้งสิ้น 5 เสียงในหนึ่งชั้นเสียง

ลำดับถัดมาจึงทำการจำลองขอบของสัญญาณเสียงขลุ่ยเพียงออโดยใช้กรรมวิธีการปรับเส้นโค้ง อันดับหนึ่ง (1st Order Curve Fitting) (ลัญฉกร วุฒิสัทติกุลกิจ และคณะ, 2549) ซึ่งแสดงได้ดังภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.5 ขอบของสัญญาณเสียงขลุ่ยเพียงออต้นฉบับ

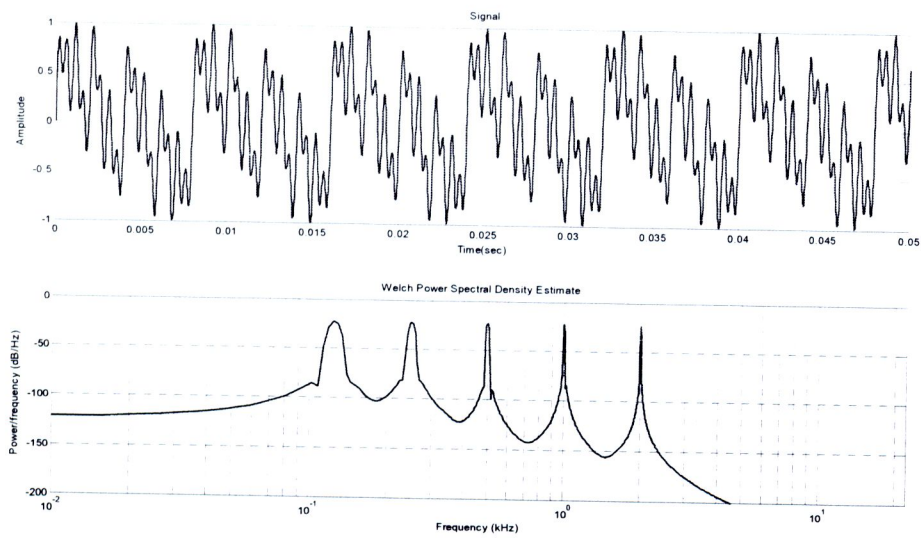


ภาพที่ 3.6 การสร้างแบบจำลองขอบของสัญญาณเสียงขลุ่ยเพียงออ

ซึ่งผลของการสร้างแบบจำลองสัญญาณเสียงขลุ่ยเพียงออในแต่ละชั้นเสียงจะนำเสนอในหัวข้อที่ 4.2

3.5 การสังเคราะห์เสียงขลุ่ยเพียงออด้วยกรรมวิธี Subtractive Synthesis โดยใช้การประมาณเชิงเส้น

ในขั้นตอนแรกจะทำการทดสอบแนวคิดและกำหนดค่าอันดับที่เหมาะสมสำหรับการจำลองตัวกำทอนโดยสร้างสัญญาณที่มีองค์ประกอบของสัญญาณไซน์บริสุทธิ์ขนาดแอมพลิจูดเท่ากับ 1 หน่วยที่ความถี่ 125 250 500 1000 และ 2000 เฮิร์ตซ์รวมกัน ด้วยอัตราการสุ่มตัวอย่างเท่ากับ 44.1 กิโลเฮิร์ตซ์ ดังแสดงได้ดังภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 สัญญาณที่ประกอบด้วยสัญญาณไซน์บริสุทธิ์ 5 ความถี่รวมกัน

จากนั้นจึงนำสัญญาณที่สร้างขึ้นขนาด 8,192 จุดหรือเท่ากับ 185.8 มิลลิวินาที มาทำการวิเคราะห์หาสัมประสิทธิ์การประมาณค่าเชิงเส้นที่อันดับ 100 150 200 250 300 350 และ 400 ตามลำดับเพื่อหาอันดับที่เหมาะสม โดยแบบจำลองจะต้องมีความถี่โดดเด่นของผลตอบสนองเชิงความถี่ที่ประกอบไปด้วยความถี่มูลฐานและความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่ 2 ถึง 5 อย่างเด่นชัด เนื่องจากองค์ประกอบเชิงความถี่ที่สูงกว่าฮาร์โมนิกส์ที่ 5 ไม่มีผลต่อคุณภาพเสียงขลุ่ยเพียงออที่มนุษย์ได้ยิน (กรกช แสงรัตนกุล และคณะ, 2552) ผลการสังเคราะห์เสียงเพื่อทดสอบแนวคิดและกำหนดค่าอันดับที่เหมาะสมแสดงในตารางที่ 3.2

จากตารางที่ 3.2 พบว่าอันดับที่ 100 ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในการจำลองเนื่องจากแบบจำลองให้ความถี่โดดเด่นของผลตอบสนองเชิงความถี่ไม่ครบทุกความถี่ และอันดับที่ 150 ยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง ดังนั้นจึงได้เลือกใช้การประมาณค่าเชิงเส้นที่อันดับ 200 – 400 ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าเพื่อใช้ในการจำลองตัวกำทอนสำหรับขลุ่ยเพียงออและนำค่าความถี่โดดเด่นของสัญญาณที่สังเคราะห์ได้เปรียบเทียบกับความถี่โดดเด่นของสัญญาณเสียงต้นฉบับ เพื่อหาค่าอันดับที่ให้ค่าผิดพลาดน้อยที่สุดในการสังเคราะห์เสียง ซึ่งผลการทดลองจะนำเสนอในหัวข้อที่ 4.3

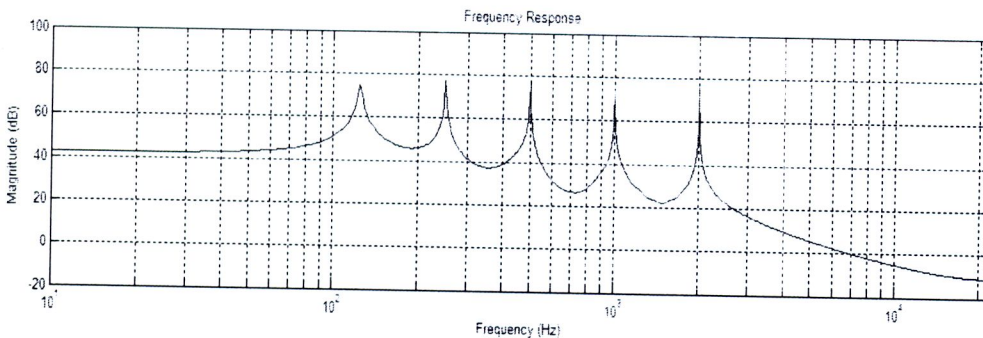


จากผลการทดลองในหัวข้อ 4.3 พบว่าอันดับที่เหมาะสมในการนำไปใช้สังเคราะห์เสียง
ขลุ่ยเพียงออโดยใช้การประมาณค่าเชิงเส้นเท่ากับอันดับที่ 350 ซึ่งจะใช้ในการสังเคราะห์เสียงใน
ลำดับถัดไป

ตารางที่ 3.2 ความถี่โดดเด่นของผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองสัญญาณไซน์บริสุทธิ์
โดยใช้กรรมวิธีการประมาณค่าเชิงเส้น

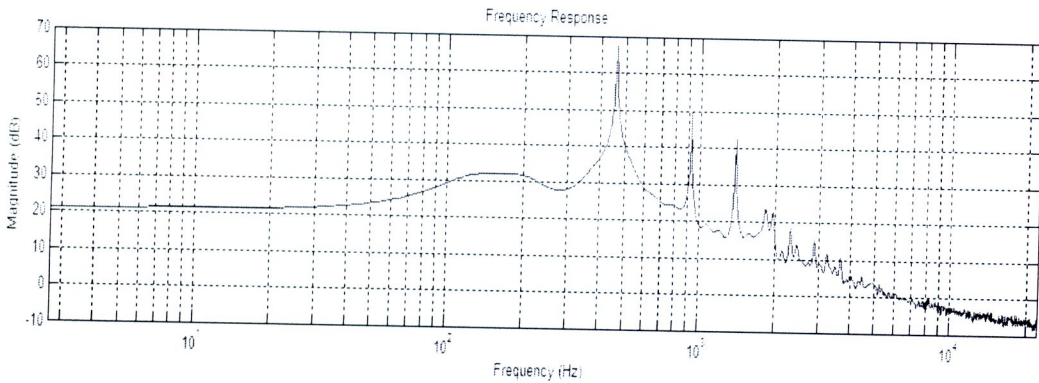
ความถี่(เฮิรตซ์) อันดับที่	125	250	500	1,000	2,000
100	-	212.6	498	1,001	2,000
150	123.8	250.3	500.6	998.6	2,000
200	123.8	250.3	500.6	1,001	2,000
250	123.8	250.3	500.6	1,001	2,000
300	123.8	250.3	500.6	1,001	2,000
350	123.8	250.3	500.6	1,001	2,000
400	123.8	250.3	500.6	1,001	2,000

สำหรับตัวอย่างผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองสัญญาณไซน์บริสุทธิ์โดยใช้
กรรมวิธีการประมาณค่าเชิงเส้นที่อันดับ 300 แสดงได้ดังภาพที่ 3.8



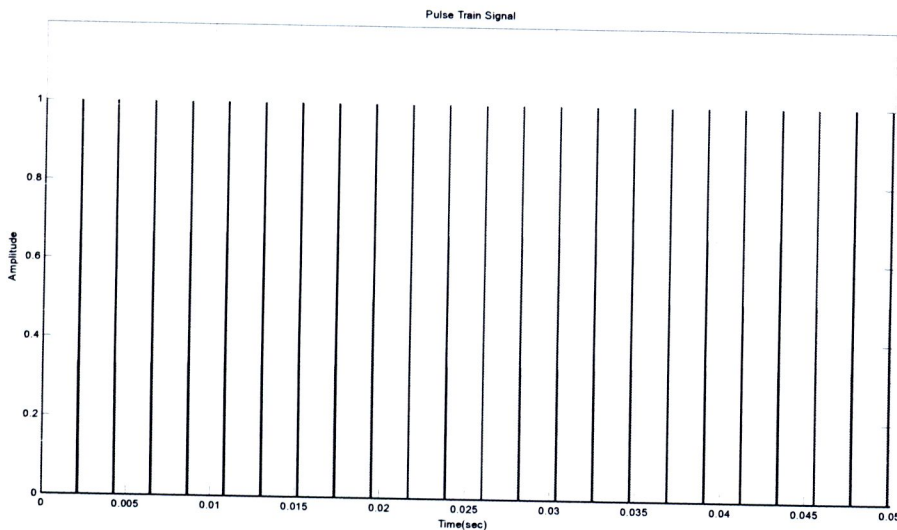
ภาพที่ 3.8 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองสัญญาณไซน์บริสุทธิ์โดยใช้กรรมวิธีการ
ประมาณค่าเชิงเส้นที่อันดับ 300

ลำดับต่อมาทำการสังเคราะห์เสียงโดยนำสัญญาณเสียงขลุ่ยเพียงออที่ผ่านการลดทอนสัญญาณรบกวนแล้ว มาทำการวิเคราะห์เพื่อหาสัมประสิทธิ์การประมาณค่าเชิงเส้นโดยใช้การประมาณค่าเชิงเส้นที่อันดับ 350 เพื่อสร้างเป็นแบบจำลองตัวกำหนดสำหรับขลุ่ยเพียงออตามสมการที่ (9) โดยตัวอย่างการวิเคราะห์เสียงโดต่ำแสดงดังภาพที่ 3.9



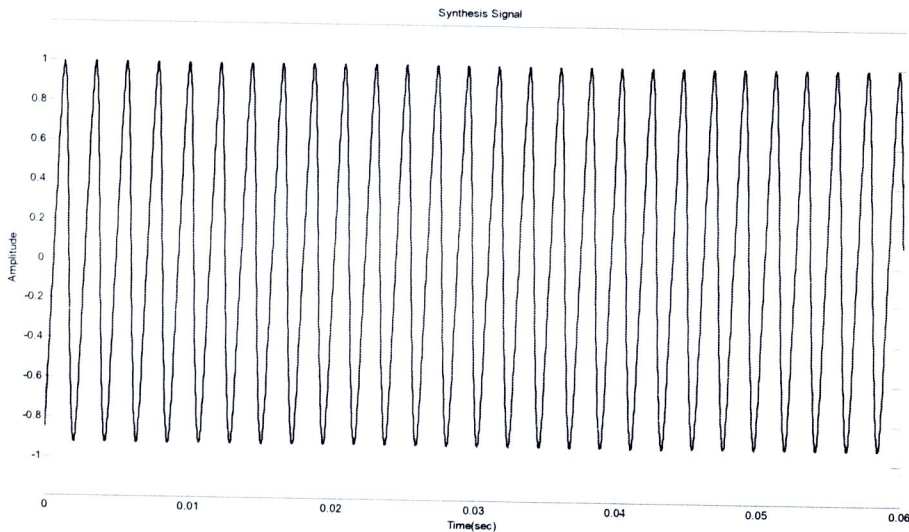
ภาพที่ 3.9 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองตัวกำหนดสำหรับขลุ่ยเพียงออเสียงโดต่ำที่อันดับ 350

สัญญาณขาเข้าของแบบจำลองตัวกำหนดคือสัญญาณ Pulse Train ที่มีความถี่เท่ากับความถี่มูลฐานของสัญญาณเสียงที่จะทำการสังเคราะห์ ในตัวอย่างสัญญาณเสียงโดต่ำนี้ สัญญาณ Pulse Train ที่สร้างขึ้นโดยมีคาบเท่ากับ 2.2 มิลลิวินาที หรือมีความถี่เท่ากับ 463 เฮิร์ตซ์ แสดงได้ดังภาพที่ 3.10



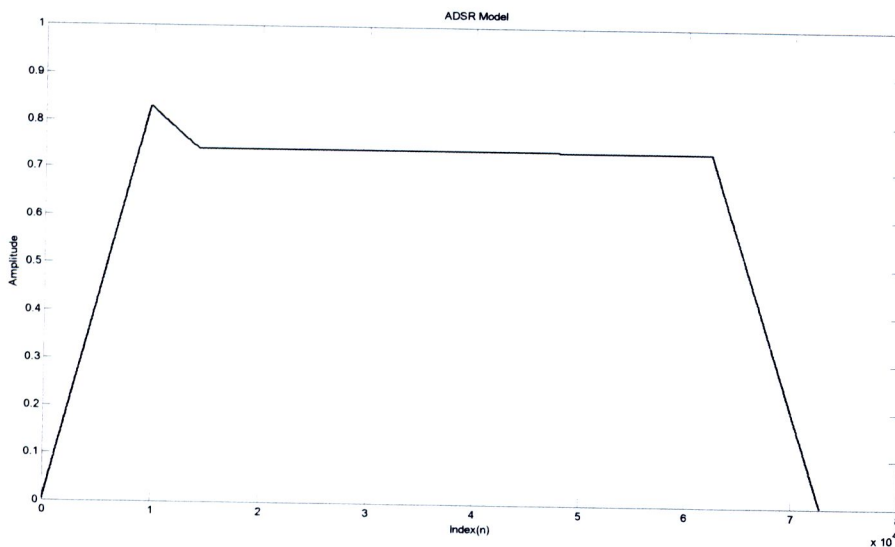
ภาพที่ 3.10 สัญญาณ Pulse Train ที่มีความถี่เท่ากับเสียงโดต่ำ

ป้อนสัญญาณ Pulse Train ให้กับแบบจำลองตัวกำทอนซึ่งเป็นตัวกรองสัญญาณที่มีผลตอบสนองอิมพัลส์ไม่จำกัด (Infinite Impulse Response-IIR) เพื่อตัดองค์ประกอบเชิงความถี่ที่ไม่ต้องการออกไป ซึ่งสัญญาณที่ได้เมื่อผ่านตัวกรองดังกล่าวแสดงได้ดังภาพที่ 3.11



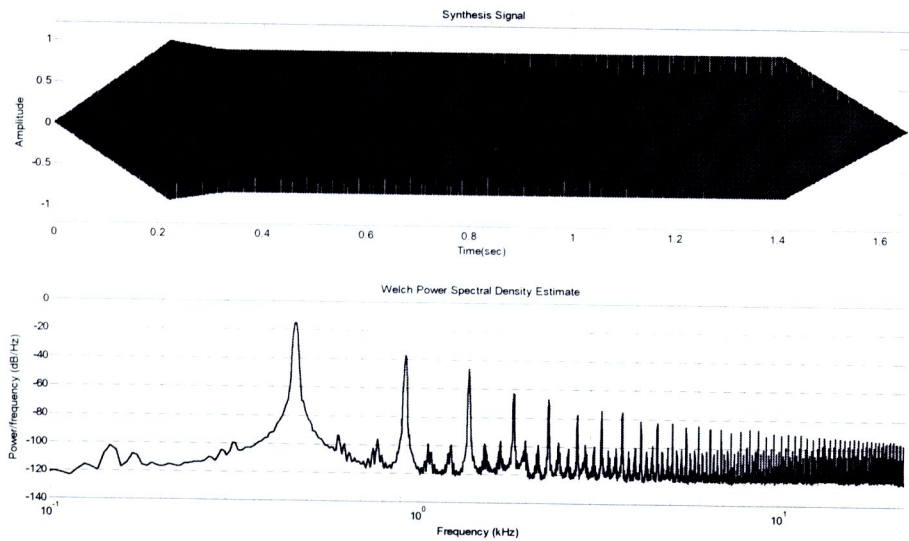
ภาพที่ 3.11 สัญญาณ Pulse Train ที่ผ่านตัวกรองสัญญาณที่ทำหน้าที่เป็นตัวกำทอน

สัญญาณที่ได้จะต้องผ่านกระบวนการคูณด้วยแบบจำลองขอบของสัญญาณเสียงขลุ่ยเพียงออที่ได้จากการทดลองที่ผ่านมาเสียก่อนจึงจะเป็นสัญญาณเสียงสังเคราะห์ที่สมบูรณ์ โดยแบบจำลองขอบของสัญญาณเสียงโดต้าแสดงได้ดังภาพที่ 3.12



ภาพที่ 3.12 ขอบของสัญญาณเสียงโดต้า

เมื่อนำสัญญาณที่สังเคราะห์ได้มาคูณกับแบบจำลองขอบของสัญญาณเสียงโตต้าแล้วก็จะ
ได้สัญญาณเสียงโตต้าสังเคราะห์ที่สมบูรณ์ดังแสดงดังภาพที่ 3.13

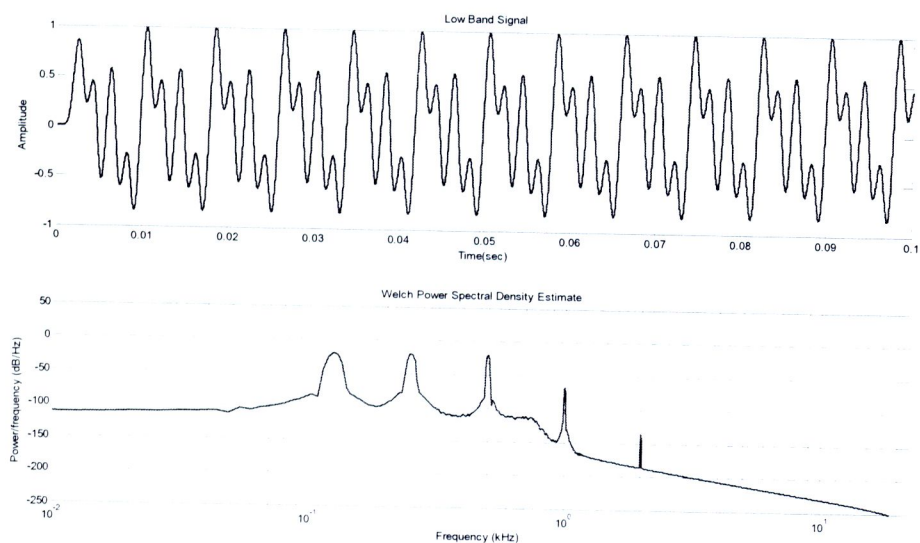


ภาพที่ 3.13 เสียงโตต้าสังเคราะห์ที่สมบูรณ์แล้ว

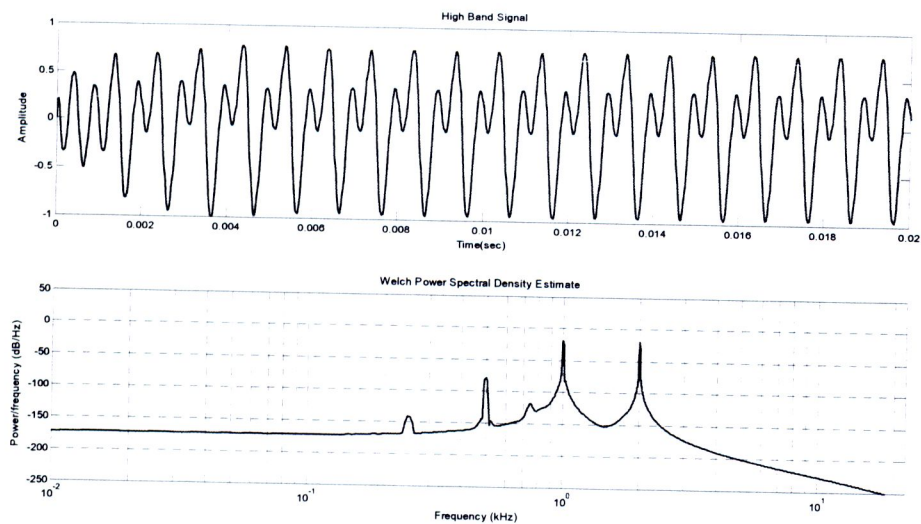
3.6 การสังเคราะห์เสียงขลุ่ยเพียงออกด้วยกรรมวิธี Subtractive Synthesis โดยการใช้การประมาณเชิงเส้นแบนด์ย่อย

การทดลองนี้ในขั้นตอนแรกนำสัญญาณสัญญาณไซน์บริสุทธิ์ที่สร้างจากการทดลองที่ผ่าน
มา นำมาใช้ในการจำลองตัวกำทอนด้วยกรรมวิธีการประมาณค่าเชิงเส้นแบนด์ย่อย ซึ่งกรรมวิธีนี้
จะช่วยลดจำนวนสัมประสิทธิ์การประมาณค่าเชิงเส้นลงได้อย่างมาก โดยในลำดับแรกนำสัญญาณ
ที่สร้างขึ้น มาแยกเป็นสัญญาณแบนด์ความถี่ต่ำ (Low Frequency Band) และแบนด์ความถี่สูง
(High Frequency Band) ด้วยตัวกรองความถี่ต่ำผ่านแบบเชบปีเชฟอันดับที่ 9 (9th Order
Chebyshev Lowpass Filter) และตัวกรองความถี่สูงผ่านแบบเชบปีเชฟอันดับที่ 9 (9th Order
Chebyshev Highpass Filter) ตามลำดับ โดยกรณีนี้เลือกความถี่ตัด (Cutoff Frequency) ที่ 750
เฮิรตซ์ ซึ่งจากการทดลองเบื้องต้นสามารถลดทอนองค์ประกอบเชิงความถี่ในแบนด์ความถี่ต่ำและ
แบนด์ความถี่สูงได้มากกว่า 100 เท่าหรือ 40 dB ตามลำดับ โดยกำหนดความถี่ตัดให้ 3
องค์ประกอบแรกอยู่ในแบนด์ความถี่ต่ำ และ 2 องค์ประกอบหลังอยู่ในแบนด์ความถี่สูง

สำหรับสัญญาณไซน์บริสุทธิ์ในแบนด์ความถี่ต่ำและแบนด์ความถี่สูงที่ผ่านการแยกแล้ว
แสดงได้ดังภาพที่ 3.14 และ 3.15 ตามลำดับ



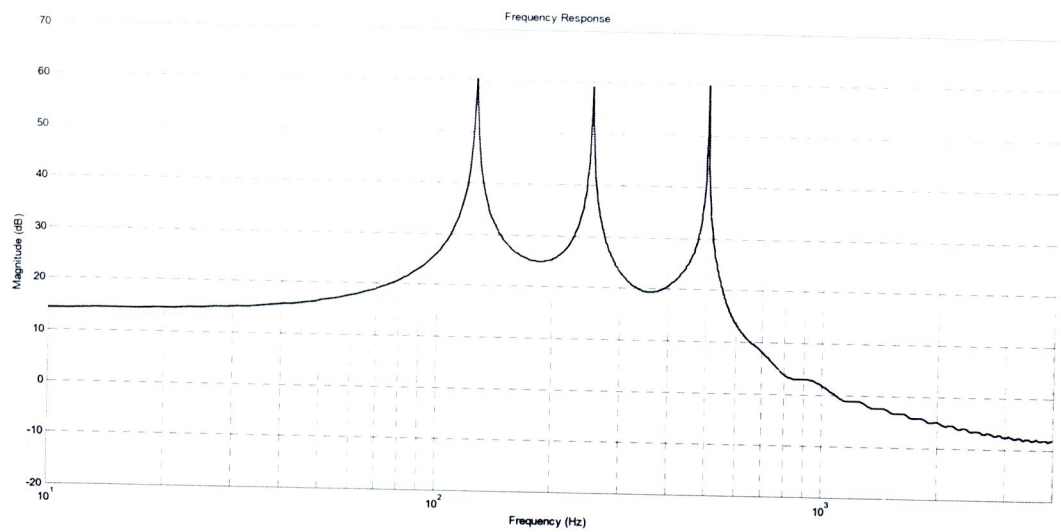
ภาพที่ 3.14 สัญญาณไซน์บริสุทธิ์ในแบนด์ความถี่ต่ำ



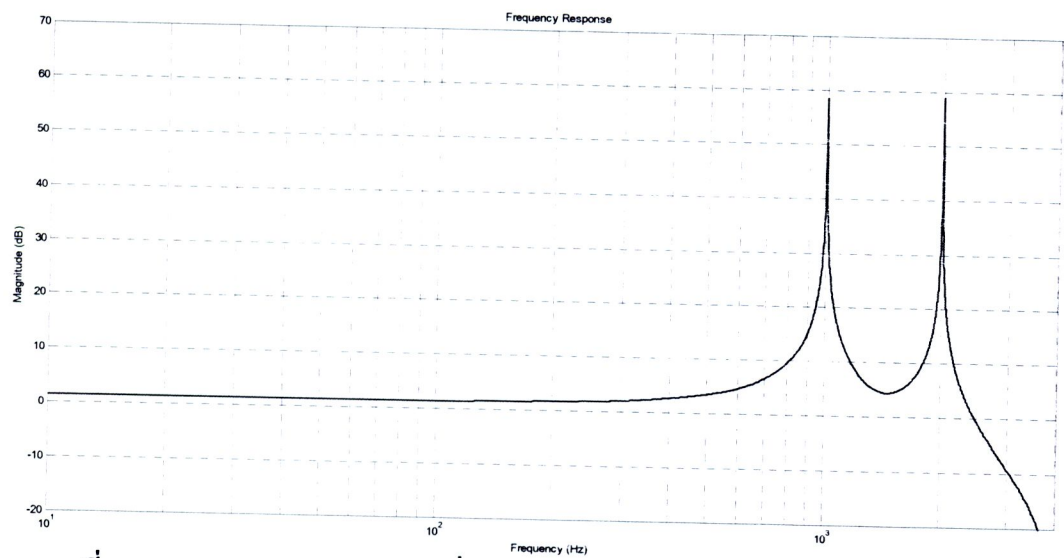
ภาพที่ 3.15 สัญญาณไซน์บริสุทธิ์ในแบนด์ความถี่สูง

ลำดับถัดมานำสัญญาณไซน์บริสุทธิ์ในแบนด์ความถี่ต่ำและความถี่สูงมาทำการลดอัตรา
สุ่มลงจาก 44.1 กิโลเฮิร์ตซ์ เป็น 8 กิโลเฮิร์ตซ์ หรือ 11.025 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยกำหนดให้อัตราสุ่ม
ที่ลดลงจะต้องมากกว่า 2 เท่าของความถี่ที่ฮาร์โมนิกส์ที่ 5 ของสัญญาณที่จะใช้ในการวิเคราะห์
ยกตัวอย่างเช่นเสียงโดสูงที่ฮาร์โมนิกส์ที่ 5 มีความถี่เท่ากับ 4,613 เฮิร์ตซ์ ดังนั้นอัตราสุ่มที่จะใช้
จึงเท่ากับ 11.025 กิโลเฮิร์ตซ์ (สามารถดูผลการวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบเชิงความถี่ของ
สัญญาณเสียงขลุ่ยเพียงออได้ในหัวข้อที่ 4.1) โดยในการทดลองเบื้องต้นนี้ได้ลดอัตราสุ่มจาก
44.1 กิโลเฮิร์ตซ์ เป็น 11.025 กิโลเฮิร์ตซ์

จากนั้นทำการประมาณค่าเชิงเส้นองค์ประกอบสัญญาณไซน์บริสุทธิ์ทั้งแบนด์ความถี่ต่ำและแบนด์ความถี่สูงเพื่อหาสัมประสิทธิ์การประมาณค่าเชิงเส้นจากสัญญาณที่ผ่านการลดอัตราสุ่มแล้วโดยใช้สัญญาณขนาด 2,048 จุดหรือเท่ากับ 185.8 มิลลิวินาที และดูผลตอบสนองเชิงความถี่จากแบบจำลองที่สร้างขึ้น โดยตัวอย่างผลตอบสนองเชิงความถี่ที่อันดับ 45 ของแบบจำลองสัญญาณไซน์บริสุทธิ์แบนด์ความถี่ต่ำและสูงแสดงดังภาพที่ 3.16 และ 3.17 ตามลำดับ



ภาพที่ 3.16 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองสัญญาณไซน์บริสุทธิ์แบนด์ความถี่ต่ำ



ภาพที่ 3.17 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองสัญญาณไซน์บริสุทธิ์แบนด์ความถี่สูง

สำหรับผลความถี่โดดเด่นของผลตอบสนองเชิงความถี่ที่อันดับต่าง ๆ ที่ได้จากแบบจำลองสัญญาณไซน์บริสุทธิ์โดยใช้กรรมวิธีการประมาณค่าเชิงเส้นแบบด้อยแสดงได้ดังตารางที่ 3.3

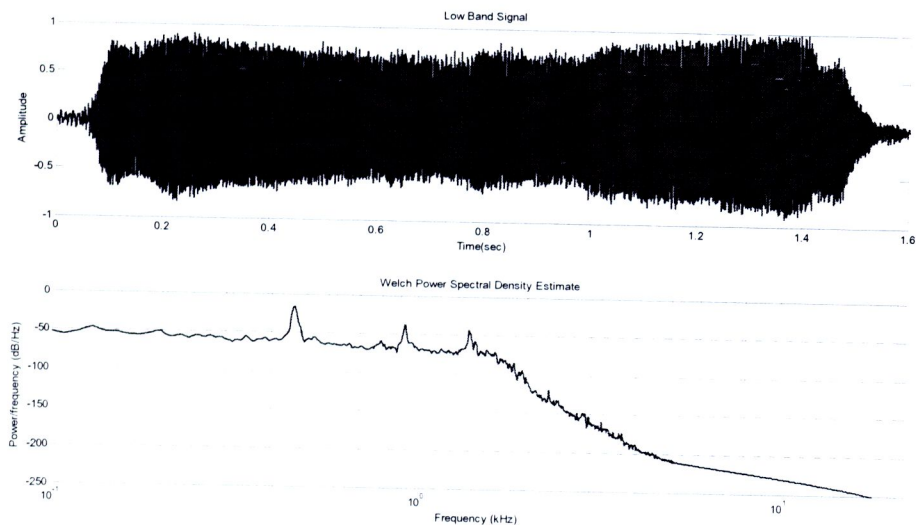
ตารางที่ 3.3 ความถี่โดดเด่นของผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองสัญญาณไซน์บริสุทธิ์โดยใช้กรรมวิธีการประมาณค่าเชิงเส้นแบบด้อย

ความถี่(เฮิร์ตซ์) อันดับที่	125	250	500	1,000	2,000
25	-	239.6	500.6	999.9	2,000
30	127.9	253	500.6	999.9	2,000
35	126.5	253	500.6	999.9	2,000
40	123.8	250.3	499.3	999.9	2,000
45	123.8	250.3	499.3	999.9	2,000
50	123.8	250.3	499.3	999.9	2,000

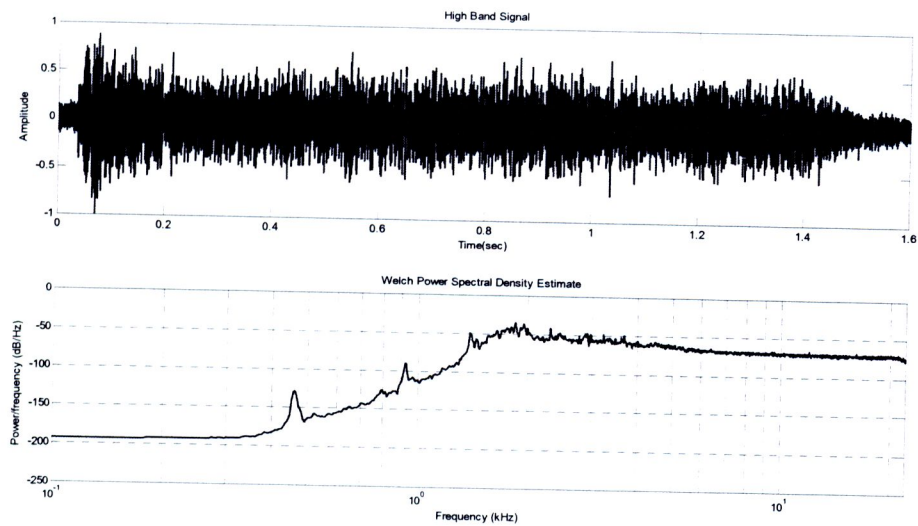
จากตารางที่ 3.3 พบว่าอันดับที่ 25 ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในการจำลองเนื่องจากแบบจำลองให้ความถี่โดดเด่นของผลตอบสนองเชิงความถี่ไม่ครบทุกความถี่ และอันดับที่ 30 และ 35 ยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง ดังนั้นจึงได้เลือกใช้การประมาณค่าเชิงเส้นที่อันดับ 40-50 ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าเพื่อใช้ทดลองหาอันดับที่เหมาะสมในการจำลองตัวกำหนดสำหรับขลุ่ยเพียงออต่อไป โดยใช้การเปรียบเทียบค่าความถี่โดดเด่นของสัญญาณที่สังเคราะห์ได้กับความถี่โดดเด่นของสัญญาณเสียงต้นฉบับ ซึ่งจะนำเสนอในหัวข้อที่ 4.4

จากผลการทดลองในหัวข้อ 4.4 พบว่าอันดับที่เหมาะสมในการนำไปใช้สังเคราะห์เสียงขลุ่ยเพียงออโดยใช้การประมาณค่าเชิงเส้นแบบด้อยคืออันดับที่ 48 นั้นมีค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด

การสังเคราะห์เสียงด้วยกรรมวิธีนี้ในลำดับแรกนำสัญญาณเสียงขลุ่ยเพียงออ ซึ่งเสียงตัวอย่างที่ใช้คือเสียงโดต่ำ โดยนำสัญญาณเสียงที่ผ่านการลดทอนสัญญาณรบกวนแล้ว มาทำการแยกเป็นสัญญาณในแบนด์ความถี่ต่ำและแบนด์ความถี่สูงโดยใช้ตัวกรองตามการทดลองเบื้องต้นที่กระทำกับสัญญาณไซน์บริสุทธิ์ โดยใช้ความถี่ตัดที่ 1600 เฮิร์ตซ์ (กรณีตัวอย่างเสียงโดต่ำ) ซึ่งสัญญาณในแบนด์ความถี่ต่ำและแบนด์ความถี่สูงที่ผ่านการแยกเรียบร้อยแล้วแสดงได้ดังภาพที่ 3.18 และ 3.19

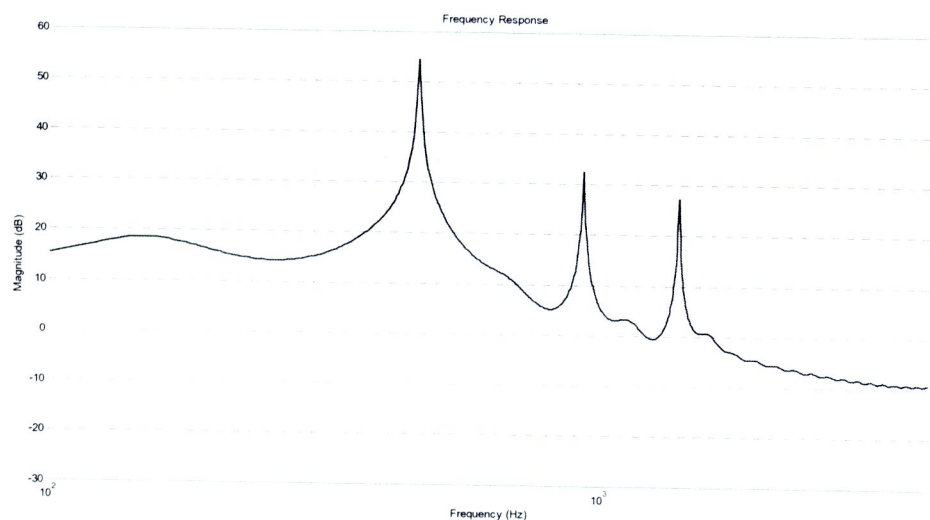


ภาพที่ 3.18 ตัวอย่างสัญญาณเสียงโดต่ำแบนด์ความถี่ต่ำ

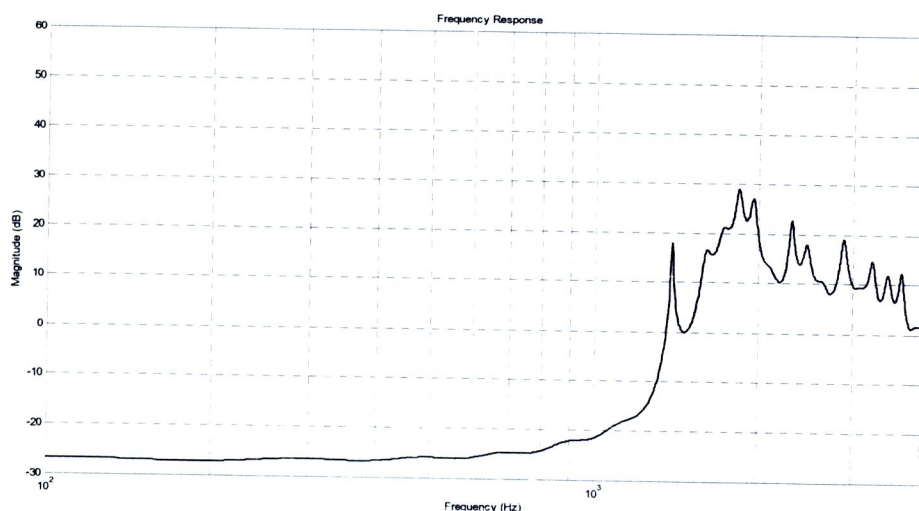


ภาพที่ 3.19 ตัวอย่างสัญญาณเสียงโดต่ำแบนด์ความถี่สูง

ลำดับถัดมาทำการลดอัตราสุ่มลงทั้งแบนด์ความถี่ต่ำและแบนด์ความถี่สูงจาก 44.1 กิโลเฮิร์ตซ์ เป็น 8 กิโลเฮิร์ตซ์ และทำการประมาณค่าเชิงเส้นในแต่ละแบนด์เพื่อหาสัมประสิทธิ์การประมาณค่าเชิงเส้น โดยใช้ช่วงสัญญาณคงที่ (Sustain) จากสัญญาณที่ผ่านการลดอัตราสุ่มแล้ว โดยใช้สัญญาณขนาด 1,024 จุดหรือเท่ากับ 128 มิลลิวินาที ซึ่งอยู่ในช่วงเวลาที่มนุษย์สามารถตรวจจับได้ (Duration of Unity Detectability : 15-150 มิลลิวินาที) (Moore, 1997) และดูผลตอบสนองเชิงความถี่จากแบบจำลองที่สร้างขึ้น โดยตัวอย่างผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองตัวกำหนดของเสียงโดต่ำที่อันดับ 48 ของแบบจำลองตัวกำหนดแบนด์ความถี่ต่ำและสูงแสดงดังภาพที่ 3.20 และ 3.21 ตามลำดับ



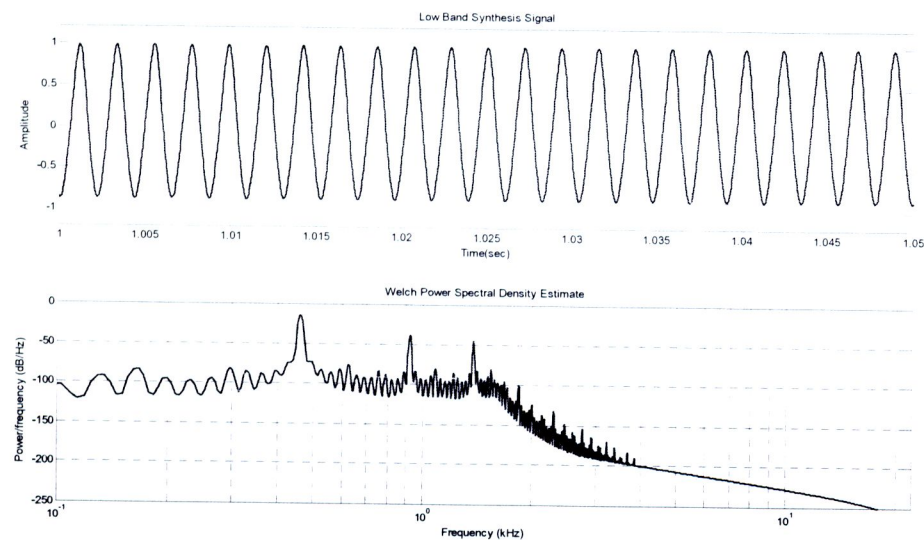
ภาพที่ 3.20 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองตัวกำหนดแบนด์ความถี่ต่ำของเสียงโดต่ำที่
อันดับ 48



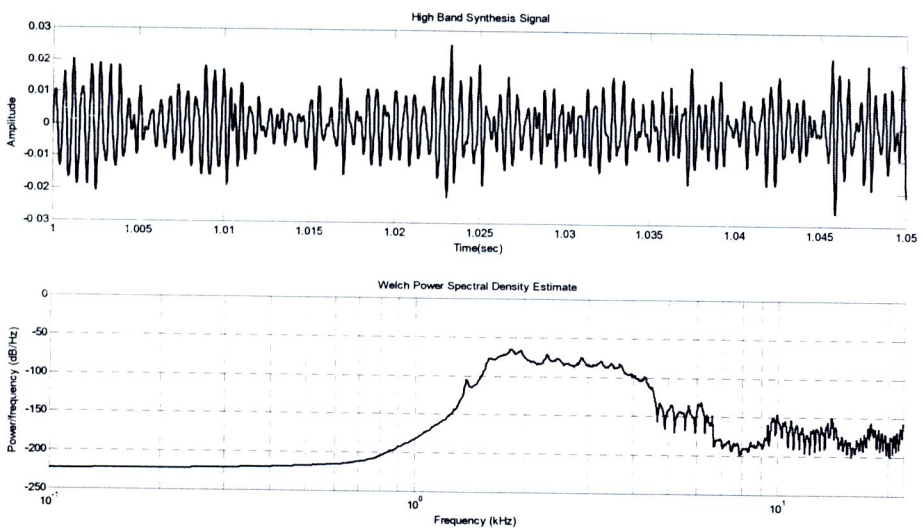
ภาพที่ 3.21 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองตัวกำหนดแบนด์ความถี่สูงของเสียงโดต่ำที่
อันดับ 48

ลำดับถัดมาทำการป้อนสัญญาณ Pulse Train ที่มีความถี่เท่ากับเสียงโดต่ำให้กับแบบจำลองตัวกำหนดในแบนด์ความถี่ต่ำ และป้อนสัญญาณ White Noise ให้กับแบบจำลองในแบนด์ความถี่สูง ซึ่งสาเหตุที่ไม่ใช้สัญญาณ Pulse Train กับแบบจำลองในแบนด์ความถี่สูงเนื่องจากผู้วิจัยสังเกตพบว่า หากป้อนสัญญาณ White Noise เข้าไปจะทำให้สัญญาณที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะของเสียงลม มากกว่าสัญญาณ Pulse Train เมื่อนำไปรวมกับสัญญาณในแบนด์ความถี่ต่ำพบว่าเสียงสังเคราะห์ที่ได้มีความเป็นธรรมชาติมากกว่าอย่างเห็นได้ชัด

ถัดมาทำการเพิ่มอัตราสุ่มสัญญาณเสียงสังเคราะห์จาก 8 กิโลเฮิร์ตซ์ ไปเป็น 44.1 กิโลเฮิร์ตซ์ จากนั้นนำสัญญาณในแบนด์ความถี่ต่ำผ่านและความถี่สูง มาผ่านตัวกรองความถี่ต่ำผ่านและความถี่สูงผ่านที่มีความถี่ตัดเท่ากับ 1600 เฮิร์ตซ์ ตามลำดับ โดยตัวอย่างสัญญาณเสียงโดสังเคราะห์ในแบนด์ความถี่ต่ำและความถี่สูงแสดงได้ดังรูปที่ 3.22 และ 3.23 ตามลำดับ

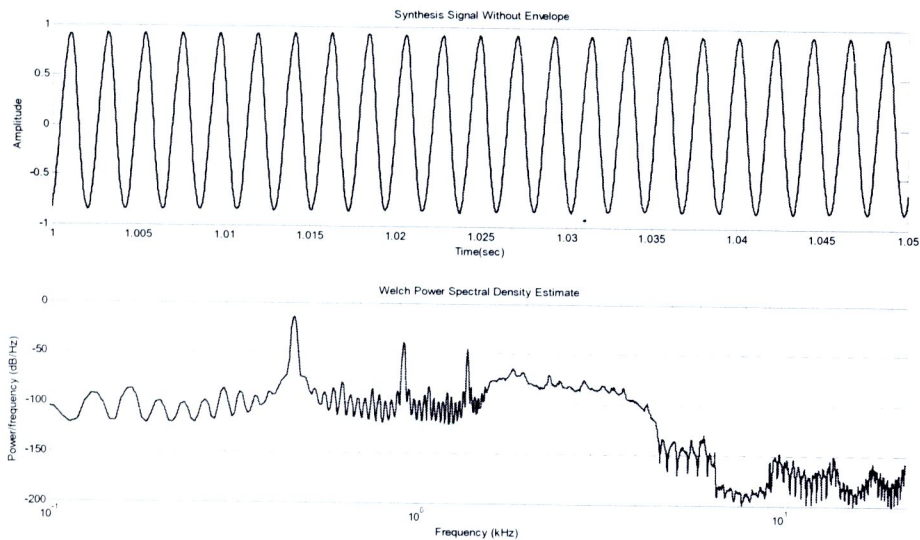


ภาพที่ 3.22 เสียงโดต่ำสังเคราะห์ในแบนด์ความถี่ต่ำ



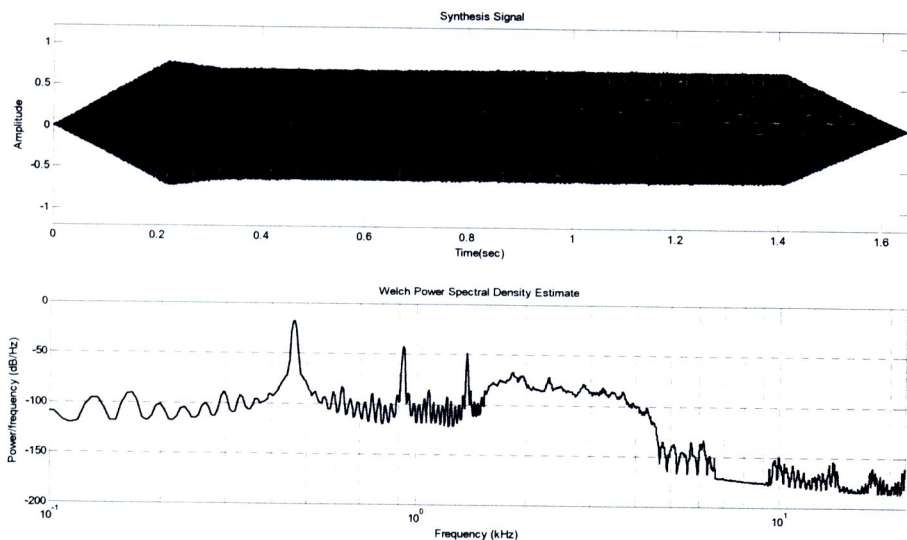
ภาพที่ 3.23 เสียงโดต่ำสังเคราะห์ในแบนด์ความถี่สูง

เมื่อได้เสียงสังเคราะห์ในแบนด์ความถี่ต่ำและสูงแล้ว ลำดับต่อมาให้นำสัญญาณทั้งสองแบนด์มารวมกันเพื่อสร้างเป็นเสียงสังเคราะห์ขึ้นมามัดังแสดงในภาพที่ 3.24



ภาพที่ 3.24 เสียงโดต่ำสังเคราะห์

จากภาพที่ 3.24 สัญญาณที่สังเคราะห์ให้ได้จะมีความสมบูรณ์จะต้องผ่านการคูณด้วยแบบจำลองขอบของสัญญาณเสียงขลุ่ยเพียงออเช่นเดียวกับกรรมวิธีในหัวข้อที่ผ่านมา จากนั้นนำเสียงสังเคราะห์ที่ได้มาคูณกับขอบของสัญญาณเสียงต้นฉบับก็จะได้สัญญาณเสียงสังเคราะห์ที่สมบูรณ์ดังแสดงดังภาพที่ 3.25



ภาพที่ 3.25 เสียงโดต่ำสังเคราะห์ที่สมบูรณ์แล้ว

ในบทต่อไปจะเป็นผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงความถี่ของเสียงขลุ่ยเพียงออแบบจำลองขอบของสัญญาณเสียงขลุ่ยเพียงออ ผลความถี่โดดเด่นของผลตอบสนองเชิงความถี่ที่

ได้จากแบบจำลองตัวกำหนดสำหรับขลุ่ยเพียงออโดยใช้การประมาณค่าเชิงเส้นและผลการสังเคราะห์เสียงขลุ่ยเพียงออด้วยกรรมวิธี Subtractive Synthesis โดยใช้การประมาณค่าเชิงเส้น ผลความถี่โดดเด่นของผลตอบสนองเชิงความถี่ที่ได้จากแบบจำลองตัวกำหนดสำหรับขลุ่ยเพียงออ โดยใช้การประมาณค่าเชิงเส้นแบบด้อยและผลการสังเคราะห์เสียงขลุ่ยเพียงออด้วยกรรมวิธี Subtractive Synthesis โดยใช้การประมาณค่าเชิงเส้นแบบด้อย เป็นลำดับสุดท้าย