

การทำลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิตอลแบบทันทันโดยใช้การแปลงเวฟเล็ต

นายพุทธรูติ ลีกุลธร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2554

**A ROBUST DIGITAL AUDIO WATERMARKING
BASED-ON WAVELET TRANSFORM**

Puttawud Leekruntorn

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Telecommunication Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2011

การทำลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัลแบบทันทันโดยใช้การแปลงเวฟเล็ต

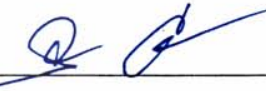
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร.กิตติ อัดถกิจมงคล)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ร.อ. ดร.ประโยชน์ คำสวัสดิ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(รศ. ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว)

กรรมการ



(ศ. ดร.ชูกิจ ลิ้มปีจันทร์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ



(รศ. ร.อ. ดร.กนัตร์ ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

พุทธาวุฒิ ลีกุลธร : การทำลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัลแบบทนทานโดยใช้การแปลงเวฟเล็ต (A ROBUST DIGITAL AUDIO WATERMARKING BASED-ON WAVELET TRANSFORM) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.ประโยชน์ คำสวัสดิ์, 88 หน้า.

การทำลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัล เป็นการนำเอาข้อมูลดิจิทัลที่อาจเป็นข้อความดิจิทัล ภาพดิจิทัล หรือข้อมูลรหัสดิจิทัลในรูปแบบต่างๆ ที่มีเอกลักษณ์เฉพาะซึ่งสามารถใช้แสดงถึงความเป็นเจ้าของเรียกว่า “ลายน้ำ (Watermark)” ผิลงในข้อมูลสัญญาณเสียงดิจิทัล โดยอาศัยเทคนิควิธีการต่างๆ ที่ได้ถูกวิจัยและพัฒนาขึ้นภายใต้กรอบมาตรฐานการทำลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัลของ International federation of the phonographic industry (IFPI) เพื่อใช้ประโยชน์ทางการป้องกันการละเมิดลิขสิทธิ์และทรัพย์สินทางปัญญาของข้อมูลดิจิทัลมัลติมีเดีย หรือใช้ในงานด้านการเฝ้าระวังการแพร่กระจายสัญญาณเสียง

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดกับลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัล จากกระบวนการแปลงสัญญาณจากสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อกและจากสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล เพื่อพัฒนาอัลกอริทึมการทำลายน้ำสำหรับสัญญาณเสียงดิจิทัลแบบที่มีความทนทานของสัญญาณลายน้ำสูง โดยคุณภาพของสัญญาณลายน้ำที่ผิลงไปจะต้องไม่ทำให้เกิดการรบกวนจนแตกต่างไปจากสัญญาณเสียงต้นฉบับเกินค่ามาตรฐาน หรือ SNR ต้องไม่ต่ำกว่า 20 dB และการตรวจจับสัญญาณลายน้ำสามารถทำงานได้ในแบบเวลาจริง

จากการทดสอบคุณภาพของสัญญาณเสียงเอาต์พุตและการทดสอบความทนทานของสัญญาณลายน้ำพบว่า วิธีการที่นำเสนอให้คุณภาพของสัญญาณเสียงเอาต์พุตที่ดี โดยมีค่าเฉลี่ย SNR ประมาณ 25.9 dB ส่วนในการทดสอบความทนทานของสัญญาณลายน้ำพบว่า ในขั้นตอนของการจำลองผลนั้นสัญญาณลายน้ำมีความทนทานสูงต่อการโจมตีแบบต่างๆ แต่ในการทดสอบอัลกอริทึมด้วยฮาร์ดแวร์เอฟพีจีเอ สำหรับการตรวจจับสัญญาณลายน้ำแบบเวลาจริงนั้นพบว่า สัญญาณลายน้ำมีความทนทานน้อยมากต่อกระบวนการแปลงสัญญาณจากสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อก และจากสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล ทั้งนี้เนื่องจากอัลกอริทึมที่ได้ทำการออกแบบไว้มีความซับซ้อนสูงจึงทำให้การตรวจจับสัญญาณลายน้ำในแบบเวลาจริงให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างไปจากการจำลองผล

สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม
ปีการศึกษา 2554

ลายมือชื่อนักศึกษา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา



PUTTAWUD LEEKRUNTORN : A ROBUST DIGITAL AUDIO

WATERMARKING BASED-ON WAVELET TRANSFORM. THESIS

ADVISOR : ASST. PROF. FLT.LT. PRAYOTH KUMSAWAT, Ph.D.,88 PP.

AUDIO WATERMARKING/DISCRETE WAVELET TRANSFORM

The watermarking of digital audio signal is an embedding of digital data, which may be of various types of a unique digital image or a digital coding that indicate the ownership of a signal called “Watermark”, into a digital audio signal by various techniques which have been researched and developed, based on “International Federation of the Phonographic Industry (IFPI)” Standards. This method is used to protect piracy and intellectual property rights of digital multimedia or in the surveillance of the spread signal.

The purpose of this research was to examine the effects on audio digital watermarking from the conversion of a digital signal to an analog signal and vice versa. This research focused on the design and development of the watermark algorithms for a digital audio signal with the durability of a high watermark, where a quality of watermark embedded into the signal must not cause interferences of the original to the point where the audio signal is different from the original signal or more than standard values, or SNR must not exceed 20 dB, and a watermark can be detected in real time.

From the experiment on the quality and watermark robustness testing of audio output, the results showed that it had a good quality output, which had the average SNR of 25.9 dB approximately. In robustness testing of the watermark, the results

indicated that in the process of simulation, where a watermark was robust against various attacks. But in the process of algorithm testing using FPGA hardware for a signal detecting, the results suggested that watermark signal with very little resistance to a process for converting a digital signal into an analog signal and an analog signal into a digital signal, caused the algorithm to have the highly sophisticated design, and made the detection of a watermark signal in real time differ materially from the simulation results.



School of Telecommunication Engineering

Academic Year 2011

Student's Signature

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากพระคุณของ คุณสมพอ ลีกุลธร มารดา ผู้วิจัย ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณที่ท่านได้มอบชีวิตอันประเสริฐ และความสำเรีงนี้คือผลงานอัน น่าภาคภูมิใจของท่าน

ขอขอบพระคุณในความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการและการดำเนินงานวิจัย จาก บุคคลและกลุ่มบุคคลต่างๆ อันได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.ประโยชน์ คำสวัสดิ์ อาจารย์ประจำวิชาวิศวกรรม โทรคมนาคน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้อยู่เบื้องหลัง ความสำเร็จทั้งหมด ซึ่งได้ทุ่มเทให้ความช่วยเหลือ และให้กำลังใจกับผู้วิจัยมาโดยตลอด โดยไม่คิด ท้อถอย

รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติ อรรถกิจมงคล รองศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว ประธาน คณะกรรมการวิทยานิพนธ์ และกรรมการวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณในความช่วยเหลืออย่าง ดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและการดำเนินการวิจัย

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้ให้ทุนอุดหนุนการวิจัย ประจำปี งบประมาณ 2553 และ 2554

ขอขอบคุณอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้ให้โอกาสในการศึกษาและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด

ผู้วิจัยขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคน สถาบันวิจัยสำนักวิชา วิศวกรรมศาสตร์และสถาบันวิจัยพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้ให้ความสะดวกใน ด้านข้อมูล งานเอกสารแบบฟอร์มต่างๆ ที่ต้องใช้ในการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ จนทำให้งาน เอกสารที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

พุทธานุภา ลีกุลธร

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ณ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฐ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 สมมุติฐานของการวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	3
2 เทคนิคการทำลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัล.....	5
2.1 กล่าวนำ.....	5
2.2 ลายนํ้าดิจิทัล.....	5
2.3 ข้อมูลสัญญาณเสียงดิจิทัล.....	8
2.4 การแปลงโดเมนสัญญาณโดยใช้การแปลงเวฟเล็ตแบบดีสครีต.....	11
2.5 การทดสอบลายนํ้าสัญญาณเสียงดิจิทัล.....	17
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18
2.7 สรุปเทคนิคการทำลายนํ้าสัญญาณเสียงดิจิทัล.....	21
3 การทำลายนํ้าโดยเทียบค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์ของการแปลงเวฟเล็ต.....	22
3.1 กล่าวนำ.....	22

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 การเตรียมข้อมูลก่อนทำลายน้ำดิจิทัล.....	23
3.3 เทคนิคการฟังและถอดลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัล.....	25
3.4 การทดลองฟังลายน้ำในกลุ่มข้อมูลย่านความถี่ต่างๆ.....	26
3.5 การปรับระดับความเข้มของการฟังลายน้ำ.....	28
3.6 การปรับขนาดกลุ่มข้อมูลที่ใช้ตัดสินใจ.....	30
3.7 ความทนทานของลายน้ำ ต่อการโจมตีรูปแบบต่างๆ.....	32
3.8 สรุปค่าความทนทานต่อการโจมตีในรูปแบบต่างๆ.....	39
3.9 สรุป.....	41
4 การค้นหาตำแหน่งเริ่มต้นของการถอดลายน้ำ.....	42
4.1 กล่าวนำ.....	42
4.2 การค้นหาตำแหน่งการถอดลายน้ำ.....	42
4.3 เทคนิคการทำลายน้ำแบบเวลาจริง.....	44
4.4 สรุป.....	47
5 การออกแบบทางฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์.....	49
5.1 กล่าวนำ.....	49
5.2 วงจรการถอดลายน้ำดิจิทัล.....	49
5.3 วงจรภาค Input Output.....	50
5.4 วงจรหน่วยประมวลผลกลางและแหล่งจ่ายพลังงาน.....	51
5.5 แผ่นวงจรฮาร์ดแวร์.....	53
5.6 โปรแกรมการถอดลายน้ำโดยอุปกรณ์ FPGA.....	57
5.7 โปรแกรมแสดงผลการถอดลายน้ำด้วยคอมพิวเตอร์.....	60
5.8 สรุป.....	61
6 ผลการทำงานวงจรถอดลายน้ำแบบเวลาจริง.....	62
6.1 กล่าวนำ.....	62
6.2 ผลการจำลองอัลกอริทึมโดยโปรแกรม MATLAB.....	62
6.2.1 การทดสอบคุณภาพของสัญญาณเสียง.....	62

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.2.2 การทดสอบความทนทานของสัญญาณลายน้ำ.....	64
6.3 ผลการทดลองอัลกอริทึม โดยใช้ FPGA.....	74
6.4 สรุป.....	76
7 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	77
7.1 กล่าวนำ.....	77
7.2 สรุปผลการวิจัย	77
7.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา	78
รายการอ้างอิง.....	80
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก แบบทดสอบคุณภาพเสียงหลังการฝังลายน้ำโดยการฟัง.....	81
ภาคผนวก ข บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	83
ประวัติผู้เขียน.....	88

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	เทคนิคการทำลายน้ำ..... 7
3.1	ค่า BER ต่อการโจมตีด้วยรูปแบบพื้นฐานต่างๆ..... 40
3.2	การโจมตีด้วยการขยายสัญญาณ และการแปลงสัญญาณ DAC & ADC..... 41
3.3	การทดลองด้วยตัวอย่างเพลงประเภทต่างๆ ที่ค่าคงที่ $\alpha = 1.4$ 41
5.1	การกำหนดขาคความคุมการทำงานของ PCM1808..... 57
6.1	ผลการทดสอบคุณภาพของสัญญาณที่ผ่านการฝังสัญญาณลายน้ำ..... 63
6.2	เกณฑ์การประเมินคุณภาพเสียง (Mean opinion score : MOS)..... 63
6.3	ผลการประเมินคุณภาพเสียง..... 63
6.4	ผลการทดสอบความทนทานของสัญญาณลายน้ำจากการโจมตีแบบต่างๆ..... 64



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ลายน้ำที่ปรากฏอยู่ในธนบัตร.....5
2.2	ตัวอย่างภาพลายน้ำในงานจิตรกรรม.....6
2.3	การทำลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัล.....8
2.4	ขั้นการมอดูเลตสัญญาณเสียงแบบ PCM.....8
2.5	ตัวอย่างต้นฉบับและสัญญาณที่ได้จากการ Sampling.....9
2.6	ตัวอย่างการทำ Quantization และการเข้ารหัส.....10
2.7	Two channel analysis filter banks.....12
2.8	Two channel synthesis filter banks.....12
2.9	Two channel analysis filter bank.....13
2.10	Octave analysis filter banks.....14
2.11	Octave synthesis filter banks 2 chanel.....15
2.12	Octave synthesis filter banks 3 chanel.....15
2.13	การใช้ฟิลเตอร์แบงก์ 2 ช่องเพื่อสังเคราะห์กลุ่มข้อมูลออกเป็น 4 ย่านความถี่.....16
2.14	การใช้ฟิลเตอร์แบงก์ 2 ช่องโครงสร้างแบบต้นไม้สังเคราะห์กลุ่มย่านความถี่ต่าง ๆ.....16
2.15	องค์ประกอบของข้อมูลสัญญาณเสียงดิจิทัล.....19
2.16	อัลกอริทึมหลักการฟังลายน้ำดิจิทัลแบบ Adaptive Tabu Search.....20
2.17	การหาค่าเฉลี่ยเพื่อปรับค่า Alpha แบบ Adaptive Tabu Search.....20
3.1	การฟังลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัล.....22
3.2	การถอดลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัล.....23
3.3	การเปลี่ยนภาพลายน้ำ 2 มิติ เป็นข้อมูล 1 มิติ.....24
3.4	การแบ่งส่วนข้อมูลก่อนการฟังลายน้ำ.....24
3.5	ขนาดของข้อมูลที่ใช้ในการฟังลายน้ำ 1 Pixel.....24
3.6	การปรับเปลี่ยนค่าเฉลี่ยข้อมูลทั้งสองกลุ่ม ตามเงื่อนไข.....25
3.7	การตัดสินใจค่าเฉลี่ยข้อมูลทั้งสองกลุ่ม เป็น บิต '1' หรือ บิต '0'.....26
3.8	ผล SNR ต่อการฟังย่านความถี่ต่ำ.....27

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.9 ผล SNR ต่อการฝังย่านความถี่กลางค่อนไปทางต่ำ.....	27
3.10 ลายน้ำที่ใช้ในการทดลองเป็นภาพ Binary ขนาด 64 X 64 Pixels.....	28
3.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Alpha เทียบกับค่า NC.....	29
3.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Alpha เทียบกับค่า BER.....	29
3.13 ผลการปรับขนาดหน้าต่างเทียบกับค่า NC.....	30
3.14 ผลการปรับขนาดหน้าต่างเทียบกับค่า BER.....	31
3.15 การปรับขนาดหน้าต่างเทียบกับค่า SNR.....	31
3.16 ค่า Alpha เทียบกับค่า NC เมื่อผ่าน Noise Attacks.....	32
3.17 ค่า Alpha เทียบกับค่า BER เมื่อผ่าน Noise Attacks.....	33
3.18 ค่า Alpha เทียบกับค่า NC เมื่อผ่าน Low-pass Filter.....	34
3.19 ค่า Alpha เทียบกับค่า BER เมื่อผ่าน Low-pass Filter.....	34
3.20 ค่า Alpha เทียบกับค่า NC เมื่อผ่าน High-pass Filter.....	35
3.21 ค่า Alpha เทียบกับค่า BER เมื่อผ่าน High-pass Filter.....	36
3.22 ค่า Alpha เทียบกับค่า NC เมื่อผ่าน Band-pass Filter.....	37
3.23 ค่า Alpha เทียบกับค่า BER เมื่อผ่าน Band-pass Filter.....	37
3.24 ค่า Alpha เทียบกับค่า NC เมื่อผ่าน MP3 Compression.....	38
3.25 ค่า Alpha เทียบกับ NC และ BER เมื่อผ่าน MP3 Compression.....	39
3.26 ภาพลายน้ำที่ผ่านการโจมตี ที่ระดับค่า BER ต่างๆ กัน.....	40
4.1 อัลกอริทึมการหาค่า BER เทียบกับการเลื่อนตำแหน่งเริ่มต้น.....	42
4.2 ค่า BER เมื่อเลื่อนตำแหน่งการถอดลายน้ำ.....	43
4.3 ค่า BER ช่วงเข้าสู่ค่าศูนย์เมื่อเลื่อนตำแหน่งการถอดลายน้ำ.....	43
4.4 ภาพลายน้ำที่ถอดได้ใกล้เคียงกับจุดเริ่มต้น.....	44
4.5 ภาพลายน้ำที่ถอดได้ใกล้เคียงกับจุดเริ่มต้นฝัง.....	45
4.6 การเตรียมหน่วยความจำของภาพลายน้ำที่ถอดได้.....	46
4.7 แผนภาพการถอดลายน้ำแบบเวลาจริง.....	47
4.8 อัลกอริทึมการถอดลายน้ำในเวลาจริง.....	47
5.1 แผนภาพวงจรถอดลายน้ำดิจิทัล.....	49

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.2 วงจรภาครับสัญญาณเสียงโดยใช้ PCM1808.....	50
5.3 วงจรเชื่อมต่อผ่าน USB ด้วยชิพ FT245RL.....	51
5.4 การเชื่อมต่อ FPGA เข้ากับภาค Input Output และหน่วยความจำ.....	51
5.5 วงจรแหล่งจ่ายแรงดันในวงจรถอดลายน้ำ.....	52
5.6 ตำแหน่งการวางอุปกรณ์บนแผ่น PCB.....	53
5.7 ตำแหน่งบัดกรีอุปกรณ์ลงบนแผ่น PCB.....	53
5.8 ลายทองแดงของวงจรด้านบน.....	54
5.9 ลายทองแดงของวงจรด้านล่าง.....	54
5.10 แผ่นทองแดงด้านบนเมื่อกัดเสร็จแล้ว.....	55
5.11 แผ่นทองแดงด้านล่างเมื่อกัดเสร็จแล้ว.....	55
5.12 วงจรด้านบนเมื่อประกอบเสร็จสมบูรณ์.....	56
5.13 วงจรด้านล่างเมื่อประกอบเสร็จสมบูรณ์.....	56
5.14 แผนภาพการถอดลายน้ำโดยอุปกรณ์ FPGA.....	57
5.15 มาตรฐานการส่งข้อมูลแบบ I ² S 24 bit.....	58
5.16 การแยกย่านความถี่กลางก่อนไปทางความถี่ต่ำโดยวิธีการของ Haar wavelet.....	58
5.17 อัลกอริทึมการจัดเรียงข้อมูล 4 กลุ่มหลังการแปลงเวฟเล็ต.....	59
5.18 การจัดเรียงข้อมูล 8 บิตก่อนส่งผ่านช่องสัญญาณการเชื่อมต่อแบบ USB.....	59
5.19 แบบจำลองของโมดูล D2XX.....	60
5.20 อัลกอริทึมการจัดเรียงภาพลายน้ำ 256 ภาพ.....	60
5.21 โปรแกรมที่ใช้ในการแสดงผลการถอดลายน้ำแบบเวลาจริง.....	61
6.1 กราฟค่า BER จากการถอดลายน้ำ แบบไม่มีการโจมตี รูปแบบเพลง Pop.....	65
6.2 กราฟค่า BER จากการถอดลายน้ำ โดยการโจมตีแบบ Noise รูปแบบเพลง Pop.....	65
6.3 กราฟค่า BER จากการถอดลายน้ำ โดยการโจมตีแบบ High pass รูปแบบเพลง Pop.....	66
6.4 กราฟค่า BER จากการถอดลายน้ำ โดยการโจมตีแบบ Low pass รูปแบบเพลง Pop.....	66
6.5 กราฟค่า BER จากการถอดลายน้ำ โดยการโจมตีแบบ MP3 รูปแบบเพลง Pop.....	67
6.6 กราฟค่า BER จากการถอดลายน้ำ โดยการโจมตีแบบ ADC&DAC รูปแบบเพลง Pop.....	67
6.7 กราฟค่า BER ในกรณีที่ไม่มีสัญญาณลายน้ำจริงด้วยรูปแบบเพลง Dance.....	68

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.8 กราฟค่า BER ในกรณีที่ไม่มีความหมายน้ำจริงด้วยรูปแบบเพลง Pop.....	68
6.9 กราฟค่า BER ในกรณีที่ไม่มีความหมายน้ำจริงด้วยรูปแบบเพลง Rock.....	69
6.10 กราฟค่า BER ในกรณีที่ไม่มีความหมายน้ำจริงด้วยรูปแบบเพลงลูกทุ่ง.....	69
6.11 กราฟค่า BER ในกรณีที่ไม่มีความหมายน้ำจริงด้วยรูปแบบเพลงขลุ่ยบรรเลง.....	70
6.12 กราฟค่า BER ในกรณีที่ไม่มีความหมายน้ำจริงด้วยรูปแบบเพลงเซิ้งโปงลาง.....	70
6.13 กราฟค่า BER ในกรณีที่ไม่ใช้ลายน้ำที่ถูกต้องด้วยรูปแบบเพลง Dance.....	71
6.14 กราฟค่า BER ในกรณีที่ไม่ใช้ลายน้ำที่ถูกต้องด้วยรูปแบบเพลง Pop.....	71
6.15 กราฟค่า BER ในกรณีที่ไม่ใช้ลายน้ำที่ถูกต้องด้วยรูปแบบเพลง Rock.....	72
6.16 กราฟค่า BER ในกรณีที่ไม่ใช้ลายน้ำที่ถูกต้องด้วยรูปแบบเพลงลูกทุ่ง.....	72
6.17 กราฟค่า BER ในกรณีที่ไม่ใช้ลายน้ำที่ถูกต้องด้วยรูปแบบเพลงขลุ่ยบรรเลง.....	73
6.18 กราฟค่า BER ในกรณีที่ไม่ใช้ลายน้ำที่ถูกต้องด้วยรูปแบบเพลงเซิ้งโปงลาง.....	73
6.19 เปรียบเทียบภาพลายน้ำที่ถอดได้และภาพลายน้ำที่ต้องการ	74
6.20 การเชื่อมต่อวงจรถอดลายน้ำ.....	74
6.21 โปรแกรมในขณะที่ทำงานด้วยสัญญาณเสียงที่มีภาพลายน้ำ.....	75
6.22 โปรแกรมในขณะที่ทำงานด้วยสัญญาณเสียงที่ไม่มีภาพลายน้ำ.....	75
6.23 ในขณะที่ทำงานด้วยสัญญาณเสียงที่มีภาพลายน้ำแต่ไม่ใช้ลายน้ำที่ถูกต้อง.....	76

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

IFPI	=	International Federation of the Phonographic Industry
SNR	=	Signal-to-Noise ratio
NC	=	Normalized correlation
BER	=	Bit error ratio



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

วิวัฒนาการของการทำลายน้ำสามารถสืบค้นย้อนไปถึงยุคฟื้นฟูศิลปวิทยาที่ 13 ด้วยวิธีการต่างๆ ไม่ว่าจะเป็น การปั๊มทอง ตอกสั้ว หรือวิธีการง่ายๆ อย่างประทับรอยนิ้วมือลงบนเครื่องปั้นดินเผา แต่ละวิธีก็เป็นการทำคำหั้นหรือจุดสังเกตเพื่อให้ชิ้นงานมีลักษณะเฉพาะที่สามารถสืบไปถึงที่มาหรือผู้ที่สร้างชิ้นงานนั้น และในบางครั้งลายน้ำเกิดขึ้นจากความบังเอิญเช่น ที่มาของลายน้ำบนกระดาษในปี ค.ศ.1260 เกิดขึ้นในโรงงานทำกระดาษประเทศอิตาลีจากขั้นตอนการรีดน้ำออกจากเยื่อกระดาษ ซึ่งบังเอิญมีเส้นลวดเล็กๆ เส้นหนึ่งติดอยู่บนตัวแม่พิมพ์สำหรับรีดน้ำ ทำให้เส้นลวดกินเนื้อกระดาษเข้าไปทำให้เกิดเป็นรอยบางๆ และเมื่อส่องกับแสงสว่างจะสามารถเห็นได้อย่างชัดเจน ต่อมาก็เริ่มมีการนำเอาลวดมาคิดเป็นรูปต่างๆ เพื่อทำให้เกิดลายน้ำรูปใหม่ๆ เพิ่มมากขึ้น มีลายละเอียดของภาพและมีความซับซ้อนมากขึ้น เช่น การทำลายน้ำรูปผู้นำของประเทศบราซิล เพื่อให้การปลอมแปลงธนบัตรยากขึ้น

ในยุคปัจจุบันซึ่งเป็นยุคที่มีเครื่องมืออำนวยความสะดวกที่เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เพิ่มขึ้นมากมาย และมีการสื่อสารผ่านคอมพิวเตอร์มากขึ้น มีการบริโภคข้อมูลที่อยู่ในรูปแบบของข้อมูลดิจิทัลกันอย่างแพร่หลาย ซึ่งเรียกยุคเทคโนโลยีนี้ว่า “ยุคดิจิทัล (The digital age)” หรือ “ยุคข้อมูลข่าวสารหรือสารสนเทศ (The information age)” และในการวิวัฒนาการบริโภคข้อมูลข่าวสารในรูปของข้อมูลดิจิทัลนี้จะต้องมาพร้อมกับเทคโนโลยีทางด้านความปลอดภัยซึ่งจะมีการพัฒนาควบคู่กันไป หนึ่งในเทคนิควิธีคือการนำกระบวนการทำลายน้ำดิจิทัลมาประยุกต์ใช้ เช่น ระบบป้องกันแผ่นดีวีดีผิดกฎหมาย โดย Copy protection technology working group (CPTWG) ซึ่งเป็นคณะกรรมการที่จัดตั้งขึ้นจาก DVD Forum โดยจะมีหน้าที่หาวิธีที่ดีที่สุดสำหรับป้องกันดีวีดีผิดกฎหมาย และในปี ค.ศ. 1998 ได้มีการพยายามสร้างมาตรฐานให้การทำลายน้ำดิจิทัลเพื่อป้องกันการคัดลอกจากข้อมูลดิจิทัลไปเป็นข้อมูลดิจิทัลด้วยกัน จนกระทั่งในเดือนกรกฎาคมปี ค.ศ.1998 ดีวีดีกว่า 6 ล้านแผ่นได้รับการเข้ารหัสป้องกันการคัดลอกที่เรียกว่า Macrovision copies ซึ่งบรรดาผู้ผลิตเครื่องเล่นดีวีดีกับผู้ผลิตดีวีดีรอมได้ให้ความร่วมมือเป็นอย่างดี ซึ่งการทำลายน้ำดิจิทัลนั้นค่อนข้างยากที่จะกำจัดออกได้ จึงเริ่มมีการประยุกต์ใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ด้วยข้อดีหลายประการ อย่างเช่น ไม่มีผลต่อคุณภาพของข้อมูล มีความปลอดภัยสูง และไม่สามารถลบลายน้ำดิจิทัลออกได้โดยง่าย คุณสมบัติที่ได้กล่าวมานั้นทำให้เกิดการประยุกต์ใช้วิธีการซ่อนไฟล์ไว้ใน

ไฟล์ข้อมูล ซึ่งเป็นการใช้อัลกอริทึมในการทำลายน้ำดิจิทัล ซ่อนข้อมูลที่ต้องการสื่อสารแฝงไปกับ ข้อมูลดิจิทัลอีกชั้นหนึ่ง โดยทั่วไปมักใช้กับข้อมูลประเภทข้อมูลเสียงเพลง ข้อมูลรูปภาพ หรือข้อมูล ที่เป็นภาพเคลื่อนไหว ซึ่งเป็นกลไกในการติดต่อสื่อสารที่สามารถซ่อนการมีอยู่ของข้อมูลสื่อสาร และมีกลไกช่วยรับประกันความถูกต้อง เพื่อยืนยันได้ว่าข้อมูลที่ได้รับถูกต้องสมบูรณ์ ส่วน ประโยชน์ของการนำวิธีการทำลายน้ำดิจิทัลรูปแบบนี้ไปใช้งาน อาจจะซ่อนข้อมูลลิขสิทธิ์ (Copyright message) ไว้บนไฟล์ข้อมูลเพื่อใช้อ้างสิทธิ์ในการฟ้องร้องดำเนินคดี และอีกรูปแบบคือ การซ่อนตัวเลข (Serial number) ที่สามารถระบุถึงตัวตนเพื่อใช้ตรวจหาการละเมิดลิขสิทธิ์ อย่างไรก็ตาม อัลกอริทึมของการทำลายน้ำในบางวิธี ก็สามารถกำจัดหรือเอาลายน้ำออกได้ง่าย ทั้งนี้เพราะ อัลกอริทึมในแต่ละแบบก็ยังมีจุดอ่อน และยังทำให้ลายน้ำไม่สามารถทนทานต่อผลกระทบต่างๆ ที่ เข้ามากระทำต่อลายน้ำได้ ดังนั้นการพัฒนาลายน้ำนอกเหนือจากการคำนึงถึงวิธีการของการฝังลาย น้ำยังต้องคิดถึงความทนทานของลายน้ำต่อการประยุกต์ใช้งาน เพื่อให้ข้อมูลที่ปลายทางมีค่าความ ถูกต้องมากที่สุด

ดังนั้นในการวิจัยชุดนี้นอกจากคิดค้นเทคนิควิธีในการทำลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัลแล้ว ยังคำนึงถึงความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้งาน เช่นการนำลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัลไปใช้ใน งานทางด้านการเฝ้าระวังการกระจายสัญญาณเสียงในธุรกิจการโฆษณาที่มีการเผยแพร่ข้อมูลของ ผลิตภัณฑ์ไปตามสื่อในหลากหลายประเภท เช่นการออกอากาศผ่านสถานีวิทยุกระจายเสียง ซึ่งจะ เป็นการแพร่กระจายคลื่นสัญญาณแอนะล็อก และสัญญาณแอนะล็อกนี้เองที่เป็นจุดมุ่งหมายในการ ทำการวิจัยชิ้นนี้ เพื่อพัฒนาเทคนิคการทำลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัลให้มีความทนทานต่อการ โจมตีในรูปแบบการเปลี่ยนแปลงสัญญาณระหว่างดิจิทัลและแอนะล็อก

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษา และคิดค้นอัลกอริทึม การฝังลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัลเพื่อทนทานต่อการ เปลี่ยนแปลงรูปแบบสัญญาณระหว่างดิจิทัลและแอนะล็อก โดยใช้อัลกอริทึมที่กะทัดรัด เพื่อ ความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ในขั้นตอนการเฝ้าระวังการกระจายสัญญาณเสียง (Broadcast monitoring)

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

1.3.1 องค์ประกอบของสัญญาณที่มีผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสัญญาณระหว่าง ดิจิทัลกับแอนะล็อกน้อยที่สุดแต่ยังสามารถคงรูปร่างอยู่คือ แอมพลิจูดของสัญญาณ

1.3.2 การบิดเบือนขนาดของสัญญาณเพื่อสร้างคำหนึ่ในการทำลายน้ำควรเลือกกลุ่มของ สัญญาณที่มีผลกระทบต่อสัญญาณน้อยที่สุด ซึ่งการแบ่งกลุ่มของสัญญาณอาศัยการแปลงเวฟเล็ต

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 คัดค้นอัลกอริทึมเพื่อรองรับการเปลี่ยนสัญญาณระหว่างดิจิตอลกับแอนะล็อก

1.4.2 พัฒนารายได้มาตรฐานของ International federation of the phonographic industry

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้อัลกอริทึมในการฝังลายน้ำเพื่อทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงสัญญาณระหว่างดิจิตอลกับแอนะล็อก

1.5.2 ได้แนวคิดในการแก้ไขประสิทธิภาพของสัญญาณลายน้ำเฉพาะบางปัญหา คือ การเปลี่ยนแปลงสัญญาณระหว่างดิจิตอลกับแอนะล็อก

1.5.3 ได้อัลกอริทึมการฝังลายน้ำที่มีความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้งานจริง

1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอ เทคนิคการทำลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิตอลที่มีความทนทานต่อการโจมตีในรูปแบบต่างๆ โดยเฉพาะการเปลี่ยนแปลงสัญญาณระหว่างดิจิตอลกับแอนะล็อก ซึ่งมีเนื้อหาทั้งหมด 7 บท โดยแต่ละบทมีเนื้อหาพอสรุปได้ดังนี้

บทที่ 1 ได้กล่าวถึงความสำคัญและที่มาของปัญหาในการทำลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิตอล โดยกล่าวถึงความเป็นมาของลายน้ำรวมถึงวิธีการในการสร้างลายน้ำให้เกิดขึ้นจนถึงประโยชน์ในการนำไปใช้ ตั้งแต่อดีตจนเข้าสู่ยุคดิจิตอล และปัญหาต่างๆ ที่น่าสนใจในการทำวิทยานิพนธ์ ซึ่งมุ่งเน้นในการแก้ไขปัญหาลักษณะเกี่ยวกับความทนทานของลายน้ำต่อการโจมตีในรูปแบบการเปลี่ยนแปลงสัญญาณระหว่างดิจิตอลกับแอนะล็อก นั่นเอง

บทที่ 2 ได้กล่าวถึงเทคนิคที่ใช้ในการทำลายน้ำ โดยจะต้องศึกษาเกี่ยวกับลักษณะในการทำลายน้ำ องค์ประกอบของชิ้นงานที่นำมาฝังลายน้ำ ทฤษฎีที่ใช้ในการแยกกลุ่มของข้อมูลเครื่องมือในการทดสอบลายน้ำเพื่อใช้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิคการทำลายน้ำที่คิดขึ้น และปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่ผ่านมา

บทที่ 3 ได้นำเสนอเทคนิคการทำลายน้ำที่ได้คิดค้นขึ้นเพื่อให้ลายน้ำมีความสามารถทนทานต่อการโจมตีจากการเปลี่ยนแปลงสัญญาณระหว่างดิจิตอลกับแอนะล็อก โดยทดสอบผ่านกระบวนการเขียนโปรแกรมจำลองเพื่อแสดงคุณภาพของลายน้ำที่ได้และผลการทดลองต่อการโจมตีในรูปแบบต่างๆ รวมไปถึงการเปลี่ยนแปลงสัญญาณระหว่างดิจิตอลกับแอนะล็อก และปัญหาที่เกิดขึ้นเพื่อใช้ในการวิเคราะห์และพัฒนาเทคนิคการทำลายน้ำในขั้นตอนต่อไป

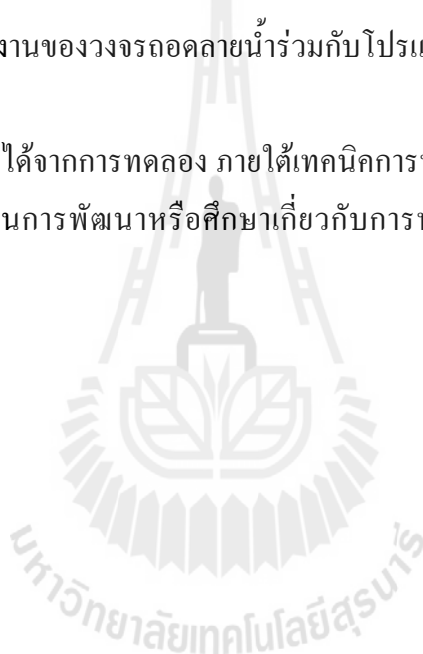
บทที่ 4 ได้นำเสนอการแก้ไขพัฒนาเทคนิคการทำลายน้ำเพื่อสามารถทำงานในรูปแบบเวลา

จริงหรือ Real-Time Systems โดยจำลองอัลกอริทึมในโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อทดสอบผลลัพธ์ และเปรียบเทียบกับเทคนิคที่ได้นำเสนอผ่านมา

บทที่ 5 แสดงถึงการออกแบบวงจรเพื่อใช้ในการถอดลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัล ซึ่งการทำงานอยู่ในระบบเวลาจริง โดยอาศัยวงจรแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัลและส่งเข้าประมวลผลผ่านชิพ FPGA แสดงผลลัพธ์ที่ได้บนหน้าจอคอมพิวเตอร์ผ่านการเชื่อมต่อแบบ USB โดยอาศัยการเขียนโปรแกรมภาษา VHDL และในส่วนการแสดงผลบนเครื่องคอมพิวเตอร์โดยอาศัยโปรแกรม Visual basic 6.0 ในการสร้างสรรค์โปรแกรม

บทที่ 6 แสดงผลการจำลองอัลกอริทึมแบบไม่ทราบตำแหน่งของลายน้ำที่ฝังอยู่ โดยการจำลองแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ การจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB ในการประมวลผลและแสดงผลลัพธ์ และการทำงานของวงจรถอดลายน้ำร่วมกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อแสดงผลออกทางหน้าจอคอมพิวเตอร์

บทที่ 7 สรุปผลที่ได้จากการทดลอง ภายใต้เทคนิคการทำลายน้ำที่ได้คิดค้นขึ้นในงานวิจัยชิ้นนี้ และข้อเสนอแนะในการพัฒนาหรือศึกษาเกี่ยวกับการทำลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัลในโอกาสต่อไป



บทที่ 2

เทคนิคการทำลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัล

2.1 กล่าวนำ

การทำลายน้ำบนวัสดุเป็นการเพิ่มเอกลักษณ์เฉพาะเพื่อให้ชิ้นงานมีจุดสังเกตซึ่งจะทำให้สามารถสืบค้นได้ถึงความเป็นตัวตนของชิ้นงานนั้น ซึ่งเทคนิคในการทำลายน้ำจะมีขั้นตอนวิธีการที่แตกต่างกันไปตามลักษณะของชิ้นงานที่นำมาทำลายน้ำ เช่นการทำลายน้ำในกระดาษ จะใช้วิธีการทำภาพที่สามารถสังเกตได้ โดยจะปรากฏเป็นสีจางๆ เมื่อนำมาส่องผ่านแสง หรือการใช้หมึกที่เรืองแสงเมื่อส่องด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต เป็นต้น ส่วนการทำลายน้ำในสัญญาณเสียงดิจิทัลนั้นจะมีขั้นตอนทางเทคนิคเฉพาะสำหรับการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติพื้นฐานของข้อมูลสัญญาณเสียงเพื่อให้เกิดลักษณะเฉพาะของลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัล โดยการปรับแก้ดังกล่าวจะต้องไม่ไปกระทบคุณภาพของสัญญาณเสียงต้นฉบับหรือทำให้มีผลกระทบน้อยที่สุด

2.2 ลายน้ำดิจิทัล

การใช้งานลายน้ำที่พบบนโดยทั่วไปคือการทำลายน้ำในธนบัตร ซึ่งเป็นการทำภาพที่สามารถสังเกตได้ด้วยวิธีการส่องผ่านแสง หรือการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตส่องเพื่อให้ภาพนั้นปรากฏขึ้นมา ซึ่งการทำลายน้ำบนธนบัตรมีจุดประสงค์เพื่อให้ผู้ใช้ทราบว่าธนบัตรใบนั้นเป็นของจริงหรือของปลอม



รูปที่ 2.1 ลายน้ำที่ปรากฏอยู่ในธนบัตร

จากการศึกษาค้นคว้าพบว่าเทคนิคการทำลายน้ำบนธนบัตรเป็นการเขียนภาพซ้อนเข้าไปในกลางเยื่อกระดาษ และวิธีการตรวจหาลายน้ำคือการใช้แสงส่องผ่าน แต่ลายน้ำบางประเภทจะใช้วิธีวาดภาพด้วยสีจางๆ ก่อนที่จะวาดภาพจริงทับลงไป เพื่อแสดงถึงความเป็นเจ้าของหรือการแสดงให้เห็นว่าภาพนั้นคือภาพของจริง โดยส่วนใหญ่จะพบได้ในงานจิตรกรรมรูปภาพ และเมื่อสังเกตให้ดีจะสามารถมองเห็นภาพลายน้ำได้อย่างชัดเจน



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างภาพลายน้ำในงานจิตรกรรม

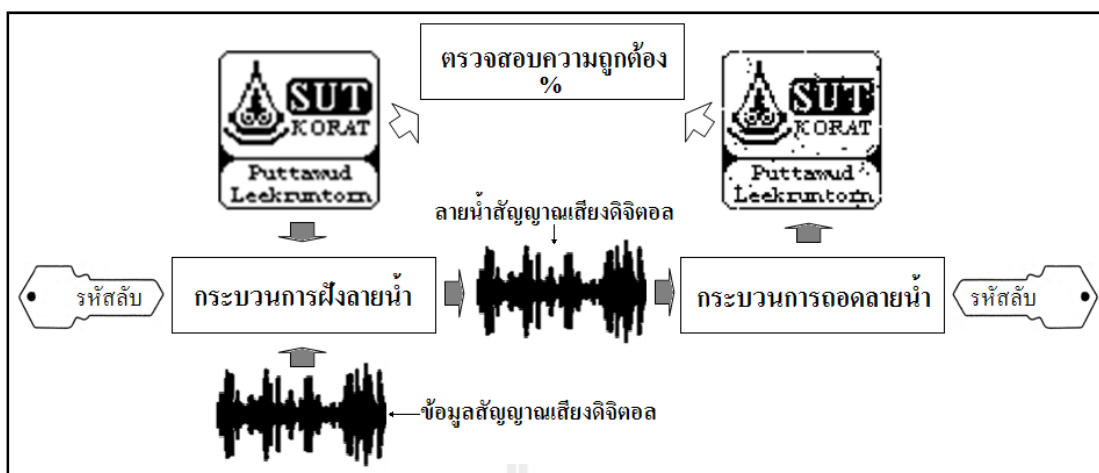
รูปแบบลายน้ำทั้งสองตัวอย่างที่กล่าวถึงนั้น เป็นรูปแบบการทำลายน้ำที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า หรือเห็นได้ด้วยวิธีการถอดลายน้ำเช่นใช้แสงส่องผ่าน ซึ่งคุณสมบัติของลายน้ำจะขึ้นอยู่กับความต้องการในการใช้งาน เช่นการทำลายน้ำดิจิทัลจะต้องคำนึงถึงลักษณะของข้อมูลไม่ว่าจะอยู่ในรูปแบบของข้อความ ข้อมูลรูปภาพ สัญญาณเสียง หรือ ภาพเคลื่อนไหว และยังคงคำนึงถึงความทนทานของลายน้ำเมื่อข้อมูลดิจิทัลได้ผ่านการใช้งานในรูปแบบต่างๆ ทั้งนี้การทำลายน้ำจะต้องมีผลกระทบกับข้อมูลดั้งเดิมให้น้อยที่สุด ซึ่งเทคนิคการทำลายน้ำดิจิทัลสามารถสรุปเป็นรูปแบบได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.1 เทคนิคการทำลายน้ำ

คุณสมบัติการทำลายน้ำ	รูปแบบการทำลายน้ำ
ประเภทของข้อมูล	Text – Image – Video – Audio
คุณสมบัติลายน้ำ	Visible – Invisible
โดเมนที่ใช้ฝังลายน้ำ	Spatial domain – Transform domain
กระบวนการถอดลายน้ำ	Private – Semi Private – Public

จากเทคนิคการทำลายน้ำในตารางที่ 2.1 ขั้นตอนแรกจะต้องคำนึงถึงประเภทของข้อมูลที่ต้องการทำลายน้ำ เพื่อจะสามารถคิดค้นวิธีการที่เหมาะสมในการทำลายน้ำ และต้องคำนึงถึงคุณสมบัติของลายน้ำเมื่อผ่านกระบวนการฝังสัญญาณลายน้ำว่าจะสามารถแสดงให้ผู้ใช้งานสังเกตเห็นได้โดยทั่วไปหรือไม่ เพราะเนื่องจากการทำลายน้ำในบางครั้งผู้ใช้งานอาจจะต้องการแสดงหรือไม่ต้องการแสดงให้บุคคลทั่วไปทราบได้ นอกจากนี้จะต้องพิจารณาถึงโดเมนที่ใช้ในกระบวนการฝังเพราะถ้าฝังลายน้ำในโดเมนปกติ (Spatial domain) ส่วนใหญ่แล้วจะเป็นการฝังลายน้ำแบบสังเกตเห็นได้โดยทั่วไป แต่ถ้าฝังลายน้ำแบบซ่อนไม่ให้ลายน้ำปรากฏเห็นได้ ส่วนใหญ่จะฝังลายน้ำโดยทำการแปลงโดเมนก่อนที่ทำการฝัง (Transform domain) และในวิธีนี้การฝังลายน้ำจะรบกวนข้อมูลต้นฉบับน้อยกว่าและสัญญาณลายน้ำมีความทนทานมากกว่า ดังนั้นจึงเป็นที่นิยมในการฝังลายน้ำ ส่วนวิธีที่ใช้ในการถอดลายน้ำผู้ฝังสามารถที่จะกำหนดได้ว่า ต้องการให้บุคคลทั่วไปสามารถถอดลายน้ำได้ด้วยวิธีการง่ายๆ เช่นการมองเห็นได้ด้วยตนเองหรือการสังเกตอย่างง่ายๆ แต่ถ้าต้องการให้ลายน้ำสามารถถอดได้เฉพาะกลุ่มบุคคลก็สามารถที่จะเข้ารหัสข้อมูลด้วยวิธีการต่างๆ ซึ่งเมื่อต้องการถอดลายน้ำจะต้องถอดรหัสด้วยวิธีการที่ทราบเฉพาะกลุ่มบุคคลที่ควรทราบเท่านั้น หรือมีการใส่ชุดตัวเลขเข้าไปในกระบวนการเข้ารหัสซึ่งตัวเลขที่ใช้นั้นอาจจะเรียกได้ว่าเป็นกุญแจสำหรับการถอดลายน้ำก็ได้

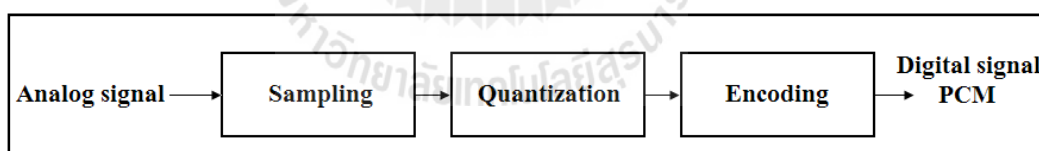
งานวิจัยชิ้นนี้มีเป้าหมายในการฝังลายน้ำเข้าไปในข้อมูลสัญญาณเสียงดิจิทัล และสัญญาณลายน้ำสามารถทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะของสัญญาณเสียงจากสัญญาณเสียงดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อก และเปลี่ยนจากแอนะล็อกเป็นดิจิทัลเพื่อถอดลายน้ำอีกครั้ง คุณสมบัติของลายน้ำเป็นรูปแบบที่ไม่สามารถรับรู้ได้ ทำให้การฝังลายน้ำต้องอาศัยการแปลงโดเมนเพื่อให้มีผลกระทบต่อเสียงน้อยที่สุด ส่วนการถอดลายน้ำจะเป็นขั้นตอนที่ทำย้อนกลับกับกระบวนการฝังสัญญาณลายน้ำ โดยมีแผนภาพการทำลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัล แสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การทำลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัล

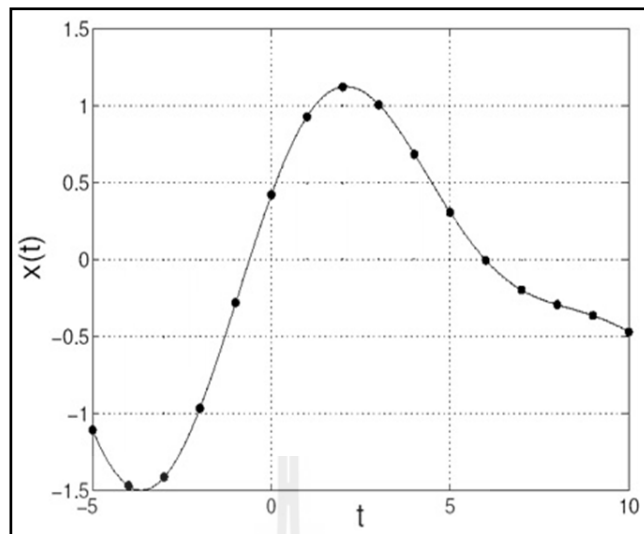
2.3 ข้อมูลสัญญาณเสียงดิจิทัล

ข้อมูลสัญญาณเสียงดิจิทัลที่ใช้กันในปัจจุบันส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปแบบการมอดูเลตโดยใช้พัลส์แบบ Pulse code modulation (PCM) ลักษณะการมอดูเลตแบบนี้สามารถแยกการทำงานออกได้เป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่ การชักตัวอย่าง (Sampling) การทำควอนไทเซชัน (Quantization) และ การเข้ารหัส (Encoding)

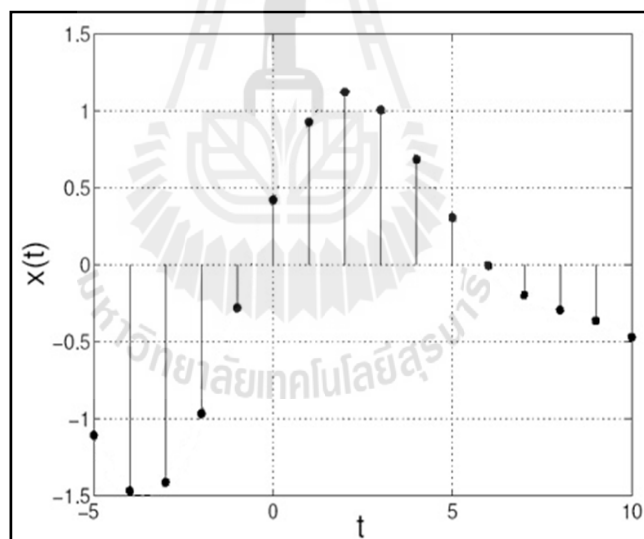


รูปที่ 2.4 ขั้นตอนการมอดูเลตสัญญาณเสียงแบบ PCM

ในขั้นตอนการทำงาน เมื่อสัญญาณเสียงแอนะล็อกเข้าสู่กระบวนการจะถูกชักตัวอย่างด้วยวงจร Sampling โดยมีการชักตัวอย่างอย่างสม่ำเสมอด้วยค่าความถี่ที่คงที่ค่าหนึ่ง และเป็นไปตามทฤษฎีของการสุ่มตัวอย่าง ซึ่งจะต้องทำการ Sampling ในความถี่ที่มากกว่า 2 เท่าของความถี่สัญญาณเสียงสูงสุด เช่นถ้าความถี่สูงสุดของสัญญาณเสียงอยู่ที่ 20KHz ค่าของความถี่ Sampling ควรมากกว่า 40KHz เป็นต้น



ก. สัญญาณต้นฉบับ

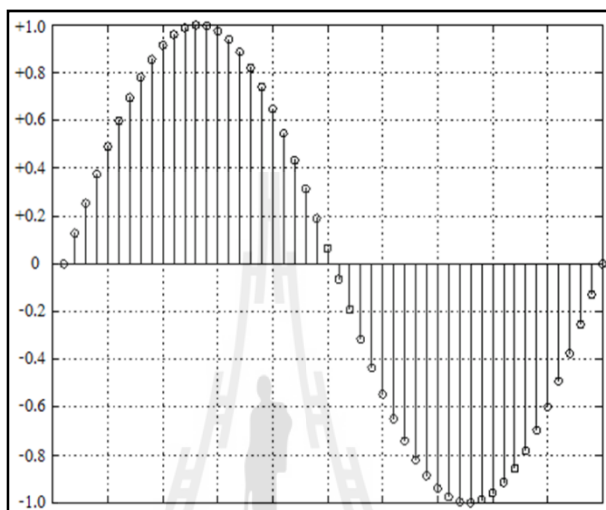


ข. สัญญาณที่ได้จากการ Sampling

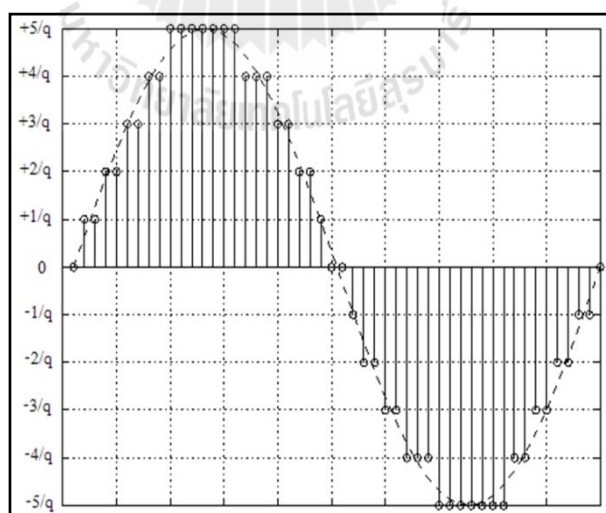
รูปที่ 2.5 ตัวอย่างต้นฉบับและสัญญาณที่ได้จากการ Sampling

ส่วนการทำ Quantization มีการแบ่งระดับแอมพลิจูดของสัญญาณออกเป็นช่วงสั้นๆ ขนาดเท่ากัน โดยที่ระดับของสัญญาณที่กำหนดขึ้นต้องครอบคลุมขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณที่เป็นไปได้ทั้งหมด เช่นขนาดของสัญญาณที่ต้องการทำ Quantization มีแอมพลิจูดสูงสุดและต่ำสุด

เท่ากับ $+1V$ ถึง $-1V$ และแบ่งช่วงของแอมพลิจูดออกเป็น q ช่วงเท่ากัน ดังนั้นความกว้างของช่วงที่ทำ Quantization มีค่าเท่ากับ $2/q$ V ซึ่งหมายถึงระยะห่างระหว่างจุดสูงสุดถึงต่ำสุดของสัญญาณ นำมาหารจำนวนช่วงของการทำ Quantization ทำให้ได้ความกว้างในแต่ละระดับในการทำ Quantization นั้นเอง



ก. Sampling



ข. Quantization

รูปที่ 2.6 ตัวอย่างการทำ Quantization และการเข้ารหัส

จากรูปตัวอย่างการทำ Quantization ในรูปที่ 2.6 นั้นข้อมูลที่ได้จะออกมาเป็นตัวเลขไบนารี ซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้ายในการเข้ารหัสข้อมูลสัญญาณเสียงแบบ PCM ซึ่งเมื่อพิจารณาให้ดีจะพบว่า ข้อมูลที่ได้ในแต่ละจุดของการ Sampling เมื่อผ่านการทำ Quantization ค่าที่ได้จะไม่ใช้ระดับที่แท้จริงขนาดแอมพลิจูดเนื่องจากการทำ Quantization จะเป็นการปัดค่าของแอมพลิจูดเข้าสู่ค่าของการทำ Quantization ที่ได้แบ่งไว้ กระบวนการนี้จึงส่งผลกระทบต่อคุณภาพของสัญญาณเสียงทำให้ ข้อมูลสัญญาณเสียงที่ได้มีโอกาสผิดเพี้ยนไปสัญญาณเสียงต้นฉบับ หรือกล่าวได้ว่าระดับของการทำ Quantization มีผลต่อคุณภาพของสัญญาณเสียง เช่นถ้าต้องการให้คุณภาพของสัญญาณเสียงดีขึ้นจะต้องเพิ่มระดับของการทำ Quantization ให้มากขึ้น และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของการเข้ารหัสไบนารีทำให้ระดับการทำ Quantization มีค่าเท่ากับ $2^{\text{บิตเลขไบนารี}}$ เช่นถ้าเข้ารหัสเลขไบนารีขนาด 16 Bits จะได้ระดับการทำ Quantization เท่ากับ 65,536 ระดับ

ข้อมูลสัญญาณเสียงดิจิทัลที่ใช้กันโดยทั่วไปนั้น จะอยู่ในชุดข้อมูลแบบ PCM และจะมีตัวเลขที่สำคัญที่จะต้องพิจารณานั้นก็คือ ค่าความถี่ Sampling และจำนวนบิตของเลขไบนารีที่ใช้ในการเข้ารหัส เช่น มาตรฐานของข้อมูลสัญญาณในแผ่น Compact disc (CD) เป็นแบบ PCM 48KHz 16Bits Stereo หมายถึงข้อมูลสัญญาณเสียงที่อยู่ในรูปแบบของ PCM ช่องสัญญาณแบบ Stereo ความถี่ในการ Sampling อยู่ที่ 48KHz หรือช่วงเวลาในการชักตัวอย่างที่ $20.833\mu\text{sec}$ และมีการเข้ารหัสเลขไบนารีขนาด 16 Bits ระดับการทำ Quantization เท่ากับ 65,536 ระดับ ซึ่งข้อมูลของสัญญาณเสียงนี้จะเป็นประโยชน์เพื่อใช้ในการออกแบบอัลกอริทึมการทำลายสัญญาณเสียงดิจิทัล

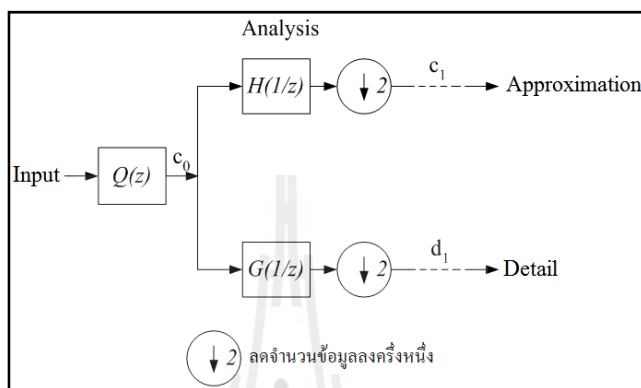
2.4 การแปลงโดเมนสัญญาณโดยใช้การแปลงเวฟเล็ตแบบดิสครีต

กระบวนการหนึ่งที่ใช้ร่วมกับการฝังลายน้ำดิจิทัลโดยทั่วไปคือการแปลงแบบ Discrete Wavelet Transform (DWT) เป็นการแยกกลุ่มของสัญญาณออกเป็น 2 ส่วน ในแต่ละระดับจะประกอบไปด้วย ข้อมูลซึ่งเป็นเนื้อหาของข้อมูล (Low Pass) และส่วนที่เป็นรายละเอียด (High Pass) ซึ่งประโยชน์ DWT จะช่วยให้สามารถเลือกกลุ่มของข้อมูลที่จะฝังลายน้ำลงไป และในด้านการถอดลายน้ำจะสามารถแยกส่วนที่เป็นสัญญาณรบกวนออกก่อนเข้าสู่ขั้นตอนการถอดลายน้ำ

การแปลงเวฟเล็ตจะมีลักษณะคล้ายกับขบวนการของ Octave filter bank เนื่องจากการพิจารณาสัญญาณผ่าน window function ที่สามารถเปลี่ยนแปลงความถี่ในอัตราครึ่งละสองเท่าซึ่งเปรียบเสมือนกับการนำสัญญาณอินพุตผ่านวงจรกรองความถี่ที่มีแบนวิธที่มีอัตราลดลงสองเท่าเหมือนกับแบนวิธของ Window function ในขณะนั้น ดังนั้นจึงสามารถนำหลักการของ Filter bank มาใช้ในการสร้างการแปลง เวฟเล็ตในทางปฏิบัติได้

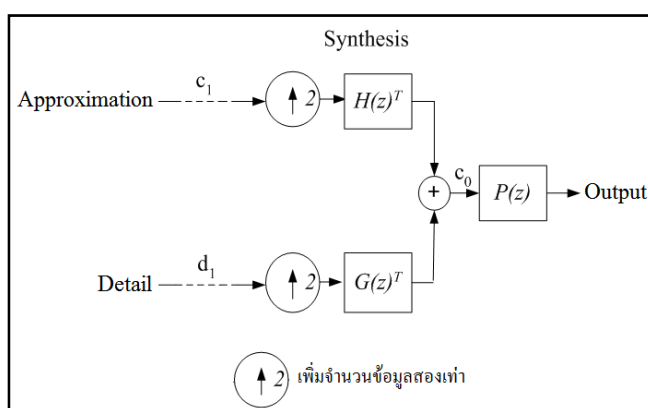
ฟิลเตอร์แบงก์แบบสองช่องสัญญาณ (Two channel filter bank) เป็นการแยกสัญญาณอินพุต ออกเป็นสองส่วนโดยแบ่งเป็นส่วนความถี่ต่ำและส่วนความถี่สูง ฟิลเตอร์แบงก์ดังกล่าวจะ

ประกอบด้วยส่วนที่เป็น Lowpass filter: H และ Highpass filter: G ดังรูปที่ 2.7 ซึ่งเป็นลักษณะของการวิเคราะห์ฟิลเตอร์แบงก์แบบสองช่องสัญญาณ (Two channel analysis filter bank) โดยที่ตัวกรองการกระจาย (Decomposition) ความถี่ต่ำและความถี่สูงคือ H และ G ซึ่งมี Impulse response เป็น $h(k)$ และ $g(h)$ ตามลำดับ

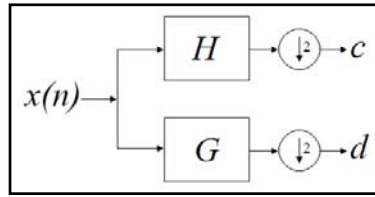


รูปที่ 2.7 Two channel analysis filter banks

สำหรับการสร้างกลับ (Reconstruction) จะมีโครงสร้างที่กลับกันกับโครงสร้างของการสังเคราะห์ การสร้างกลับฟิลเตอร์แบงก์แบบสองช่องสัญญาณ (Two channel synthesis filter bank) แสดงในรูปที่ 2.8 ตัวกรองการสร้างกลับ คือ H และ G โดยที่ตัวกรองการกระจายกับตัวกรองการสร้างกลับจะมีความสัมพันธ์ในลักษณะที่เรียกว่า Quadrature mirror filters (QMF)



รูปที่ 2.8 Two channel synthesis filter banks



รูปที่ 2.9 Two channel analysis filter bank

การใช้ฟิลเตอร์แบงก์แบบสองช่องสัญญาณในการวิเคราะห์สัญญาณดังแสดงในรูปที่ 2.9 โดยมีสมการในการวิเคราะห์ฟิลเตอร์แบงก์แบบสองช่องสัญญาณ ดังนี้

$$c(k) = \sum_k h(2k - n)x(m) \quad (2.1)$$

$$d(k) = \sum_k g(2k - n)x(m) \quad (2.2)$$

โดยที่ $c(k)$ คือสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ทขององค์ประกอบความถี่ต่ำ (Approximation)
 $d(k)$ คือสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ทขององค์ประกอบความถี่สูง (Detail)

ลักษณะของการวิเคราะห์สัญญาณด้วย Octave analysis filter banks จะเป็นโครงสร้างแบบต้นไม้ (Tree structure) ซึ่งเป็นการนำ Two channel filter banks มาต่อเรียงกันโดยใช้สัญญาณเข้าที่พุดในส่วนที่เป็นความถี่ต่ำมาทำการแยกแบนด์ความถี่ออกอีกครั้งหนึ่ง ในกรณีที่ทำการแปลงเวฟเล็ทซ้ำในแนวของ Lowpass จะเป็นลักษณะของ Dyadic tree structure ดังรูปที่ 2.10 ซึ่งโครงสร้างในรูปนี้จะเป็นการแปลงเวฟเล็ทแบบดีสครีทอัลกอริทึมนี้เรียกว่า Pyramidal algorithm โดยมีสมการในการวิเคราะห์ของการแปลงเวฟเล็ท J ระดับดังนี้

$$f(t) = \sum_n c_{0,n} \phi(t - n) \quad (2.3)$$

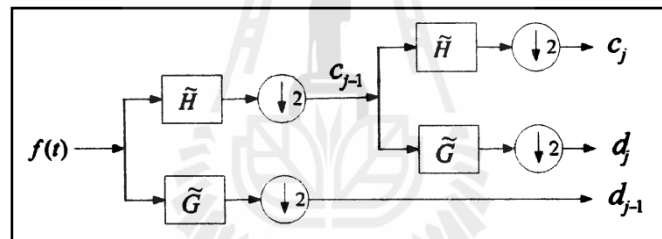
$$f(t) = \sum_k c_{j,k} \phi_{j,k}(t) + \sum_{j=1}^J \sum_k d_{j,k} \psi_{j,k}(t) \quad (2.4)$$

โดยที่สัมประสิทธิ์ $c_{j,k}$ และ $d_{j,k}$ ที่ระดับความละเอียด j จะสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์ $c_{j-1,k}$ ที่ระดับความละเอียด $j-1$ ตามสมการต่อไปนี้

$$c_{j,k} = \sum_n c_{j-1,k} h(n-2k) \quad (2.5)$$

$$d_{j,k} = \sum_n c_{j-1,k} g(n-2k) \quad (2.6)$$

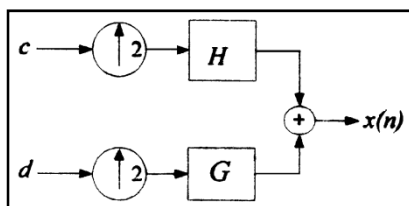
สำหรับ $j = 1, 2, \dots, j$ เมื่อ $c_{j,k}$ คือสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ทขององค์ประกอบความถี่ต่ำที่แบนด์ย่อยที่ j และ $d_{j,k}$ คือสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ทขององค์ประกอบความถี่สูงที่แบนด์ย่อยที่ j และจำนวนระดับในการแปลงเวฟเล็ทจะขึ้นกับการประยุกต์ใช้งาน



รูปที่ 2.10 Octave analysis filter banks

การแปลงเวฟเล็ทแบบดีสครีทเป็นการแตกกระจาย (Decomposition) สัญญาณหรือการโปรเจกต์สัญญาณลงไปในสเปซของ V_j และ W_j ซึ่งทำให้รายละเอียดของสัญญาณลดลงดังได้กล่าวไปแล้วข้างต้น $f(t)$ จากระดับ j ไปเป็นระดับ $j-1$ วิธีการดังกล่าวนี้จะเหมือนกับขบวนการ Two channel synthesis filter banks ซึ่งเป็นการหาค่าของ $x(n)$ จากค่า c และ d ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 2.11 โดยมีสมการในการสังเคราะห์ดังนี้

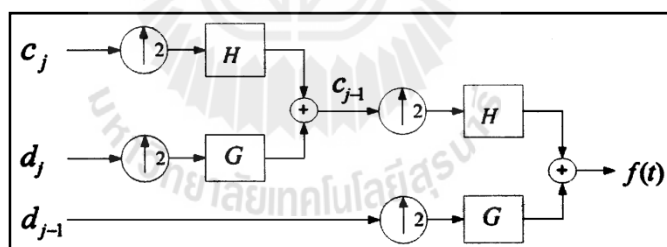
$$x(n) = \sum_m c(m)h(n-2m) + \sum_m d(m)g(n-2m) \quad (2.7)$$



รูปที่ 2.11 Octave synthesis filter banks 2 channel

การสร้างกลับโดยใช้การสังเคราะห์ฟิลเตอร์แบงก์แบบสองช่องสัญญาณแบบหลายแบนด์ย่อยแสดงในรูปที่ 2.12 ซึ่งลักษณะของ Dyadic tree structure ซึ่งจะเป็นการรวมสัมประสิทธิ์ของสเกลลิงและสัมประสิทธิ์ของเวฟเล็ตที่ระดับ Coarse resolution เข้าด้วยกันเพื่อสร้างกลับเป็นสัญญาณต้นแบบ และเนื่องจากฟังก์ชันเหล่านี้มีคุณสมบัติเป็น Orthonormal ดังนั้นจะได้สมการในการสร้างกลับหรือการสังเคราะห์ดังนี้

$$c_{j-1,k} = \sum_n c_{j,n} h(k-2n) + \sum_n d_{j,k} g(k-2n) \quad (2.8)$$

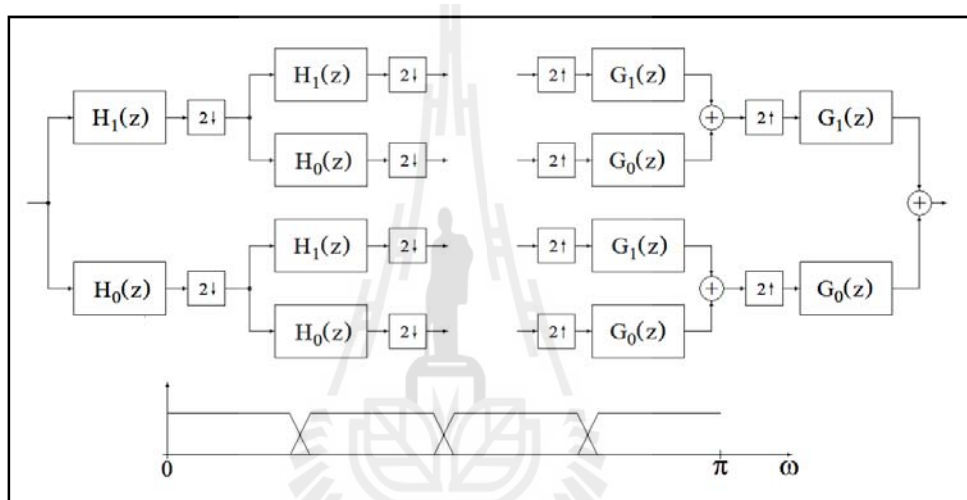


รูปที่ 2.12 Octave synthesis filter banks 3 channel

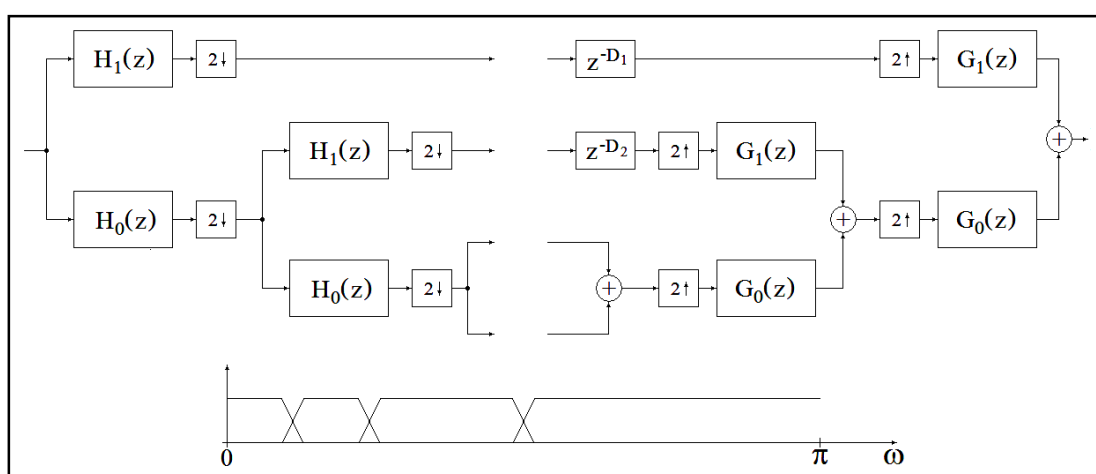
การสร้างกลับนี้จะมีการทำซ้ำไปเรื่อยๆ (Recursively) ที่ระดับจนกระทั่งถึงระดับเริ่มต้น นั่นคือจะได้สัญญาณต้นแบบกลับคืนมา ขบวนการนี้เรียกว่า การแปลงกลับเวฟเล็ต (Inverse discrete wavelet transform: IDWT) ด้วยหลักการของฟิลเตอร์แบงก์ จากกระบวนการแปลงเวฟเล็ตและการแปลงกลับเวฟเล็ตจะสังเกตได้ว่าสัญญาณเข้าที่พุทที่ได้จากการแปลงกลับจะมีค่าโดยประมาณเท่ากับสัญญาณอินพุทของการแปลงเวฟเล็ตโดยที่รูปแบบของฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) จะเป็นในลักษณะการสร้างกลับอย่างสมบูรณ์ของฟิลเตอร์แบงก์ (Perfectly reconstruction filter banks) เมื่อตัวกรองสัญญาณ H และ G เป็นกรณีของ Orthonormal wavelets

หรือ Orthonormal filter banks เท่านั้นเพื่อให้การแยกองค์ประกอบย่อยดังกล่าวสามารถทำการสร้างกลับอย่างสมบูรณ์ (Perfect reconstruction)

ในการสังเคราะห์ย่านความถี่ที่มากขึ้น สามารถที่ใช้ฟิลเตอร์แบงก์ 2 ช่องสร้างเป็นโครงสร้างแบบต้นไม้ เพื่อให้สามารถแยกแยะย่านความถี่ออกเพิ่มขึ้นได้ดังรูปที่ 2.13 ซึ่งเป็นการนำเอาฟิลเตอร์แบงก์ 2 ช่องมาทำการสังเคราะห์กลุ่มข้อมูลย่านความถี่ต่ำและสูงเพื่อแยกกลุ่มข้อมูลเพิ่มออกเป็น 4 ย่านความถี่ และถ้าต้องการสังเคราะห์ย่านความถี่อื่น ก็สามารถนำเอาฟิลเตอร์แบงก์ 2 ช่องทำเป็นโครงสร้างแบบต้นไม้ ได้อีกหลายรูปแบบดังเช่นในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.13 การใช้ฟิลเตอร์แบงก์ 2 ช่องเพื่อสังเคราะห์กลุ่มข้อมูลออกเป็น 4 ย่านความถี่



รูปที่ 2.14 การใช้ฟิลเตอร์แบงก์ 2 ช่อง โครงสร้างแบบต้นไม้สังเคราะห์กลุ่มย่านความถี่ต่าง ๆ

2.5 การทดสอบลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัล

การทำลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัลในแต่ละรูปแบบ มีความต้องการที่แตกต่างกันตามรูปแบบของการประยุกต์งานในแต่ละด้าน ซึ่งตามมาตรฐานของ International federation of the phonographic industry (IFPI) ได้กำหนดมาตรฐานไว้ คือ คุณภาพของสัญญาณลายน้ำกับความจุของสัญญาณลายน้ำ ซึ่งเป็นการหาค่าความเร็วในการส่งข้อมูลลายน้ำเข้าไปในสัญญาณเสียงเมื่อเทียบกับค่าเวลาในการเล่นสัญญาณเสียงนั้น มีหน่วยเป็นบิตต่อวินาที (Bit per second : bps) โดยค่าของความจุของสัญญาณลายน้ำนี้จะขึ้นอยู่กับเทคนิคการทำลายน้ำแต่ละรูปแบบแตกต่างกันไป ทั้งนี้ค่าความจุที่ได้ต้องไม่ต่ำกว่า 20 bps ตามมาตรฐานของ IFPI และนอกเหนือจากมาตรฐานของ IFPI ยังมีสิ่งหนึ่งที่ต้องพิจารณาคือ ประสิทธิภาพของสัญญาณลายน้ำต่อการโจมตีด้วยรูปแบบต่างๆ เช่น การโจมตีด้วยสัญญาณรบกวน (Noise attacks) การโจมตีด้วยการกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low-pass filter attacks) การโจมตีด้วยการกรองความถี่สูงผ่าน (High-pass filter attacks) การโจมตีด้วยการกรองแถบความถี่ผ่าน (Band-pass filter attacks) และ การโจมตีด้วยการบีบอัดข้อมูลแบบ MP3 (MP3 compression attacks) เป็นต้น

การทดสอบคุณภาพของลายน้ำโดยการปรับเปลี่ยนค่าระดับความเข้มในการฝังลายน้ำ เพื่อให้ทราบถึงระดับของผลกระทบที่มีต่อสัญญาณเสียงเดิม จะสามารถทดสอบได้ด้วยค่า SNR หรือ Signal-to-Noise ratio ซึ่งค่า SNR จะสามารถแสดงถึงคุณภาพของสัญญาณที่ผิดเพี้ยนไปจากเดิม โดยจะแสดงค่าออกมาอยู่ในรูปของ dB หรือ Decibel ทั้งนี้ตามมาตรฐานการทำลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัลที่กำหนดขึ้นโดย IFPI ได้กำหนดไว้ว่าการทำลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัลต้องมีค่า SNR มากกว่า 20 dB

$$\text{SNR} = 10 \log \frac{\sum_{i=1}^k X(i)^2}{\sum_{i=1}^k [X(i) - X''(i)]^2} \quad (2.9)$$

โดยที่ $X(i)$ คือ ข้อมูลสัญญาณเสียงต้นฉบับ
 $X''(i)$ คือ ข้อมูลสัญญาณเสียงที่ฝังลายน้ำ

การทดสอบความถูกต้องของข้อมูลลายน้ำที่ถอดออกมาได้ โดยทั่วไปแล้วค่าที่ใช้ในการทดสอบความถูกต้องนั้นจะปรากฏออกมาหลายค่าขึ้นอยู่กับความเหมาะสมกับการนำไปใช้ เช่น

Normalized correlation (NC) เป็นการเปรียบเทียบระดับพลังงานของข้อมูลลายน้ำ ต้นฉบับกับข้อมูลลายน้ำที่ถอดได้ตามสมการที่ 4 ซึ่งเหมาะสำหรับลายน้ำที่ไม่ใช่ภาพแบบไบนารี

$$NC(W, W') = \frac{\sum_{i=1}^{M_1} \sum_{j=1}^{M_2} \omega(i, j) \omega'(i, j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{M_1} \sum_{j=1}^{M_2} \omega(i, j)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{M_1} \sum_{j=1}^{M_2} \omega'(i, j)^2}} \quad (2.10)$$

โดยที่ $\omega(i, j)$ คือ ข้อมูลภาพลายน้ำต้นฉบับ

$\omega'(i, j)$ คือ ข้อมูลภาพลายน้ำที่ถอดได้

นอกจากนี้ยังมีวิธีการที่สามารถทดสอบความถูกต้องของลายน้ำได้อย่างชัดเจน คือ Bit error ratio (BER) เป็นการทดสอบความผิดพลาดในแต่ละบิต เทียบเป็นร้อยละของจำนวนบิตข้อมูลทั้งหมดตามสมการที่ 5 ซึ่งเหมาะสำหรับลายน้ำที่เป็นภาพแบบไบนารี

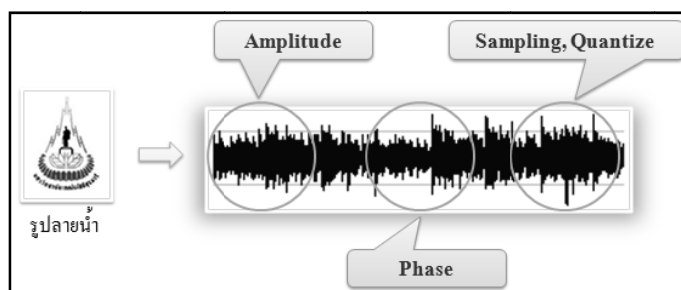
$$BER = \frac{\text{Error bits}}{\text{All bits}} \times 100\% \quad (2.11)$$

โดยที่ Error bits คือ จำนวนข้อมูลบิตลายน้ำที่ผิดพลาด

All bits คือ จำนวนข้อมูลบิตลายน้ำทั้งหมด

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากงานวิจัยที่ได้ศึกษาผ่านมานั้น ได้ใช้เทคนิคการฝังลายน้ำแตกต่างกันไป โดยทั่วไปจะอาศัยองค์ประกอบของข้อมูลสัญญาณเสียงดิจิทัล เช่นปรับเปลี่ยนระดับ Amplitude ของสัญญาณปรับเปลี่ยน Phase ของสัญญาณ หรือปรับเปลี่ยนการ Sampling และ Quantization ของข้อมูล



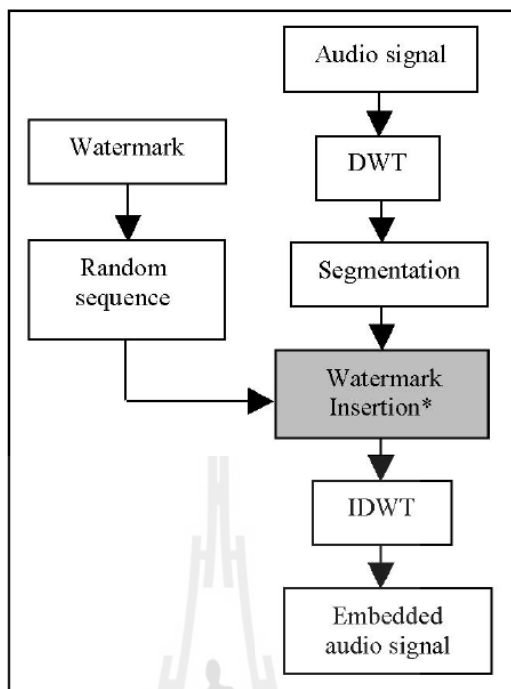
รูปที่ 2.15 องค์ประกอบของข้อมูลสัญญาณเสียงดิจิทัล

- Multiple Watermarks for Stereo Audio Signals Using Phase-Modulation Techniques

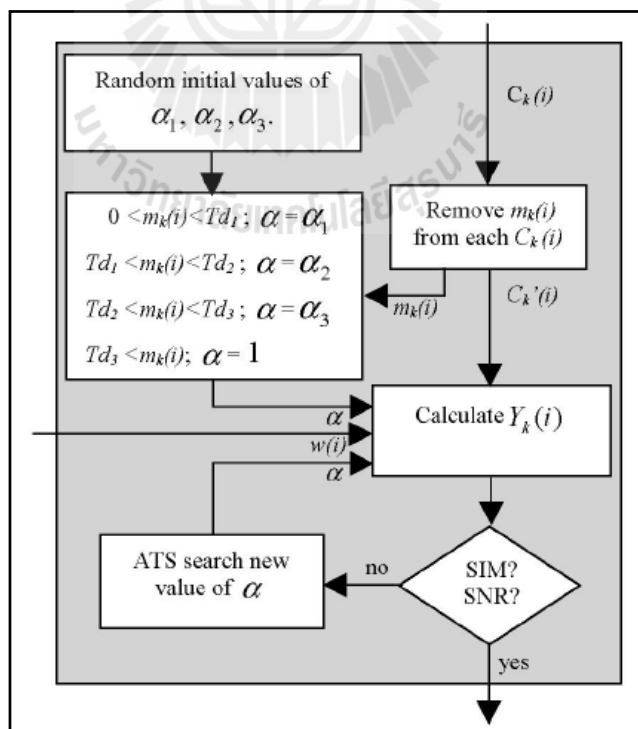
งานวิจัยนี้เสนอหลักการฝังลายน้ำโดยการปรับเปลี่ยน Phase ของสัญญาณ โดยผู้วิจัยคือ Akira Takahashi, Ryouichi, Nishimura, Yoiti Suzuki ใน IEEE เมื่อปี 2005 ซึ่งใช้วิธีการ Transform ผ่าน Transfer Function ที่มีผลเฉพาะกับ Phase ของสัญญาณเท่านั้น ทั้งนี้การถอดสัญญาณลายน้ำ จำเป็นจะต้องใช้ข้อมูลสัญญาณเสียงต้นฉบับมาเปรียบเทียบกับ Phase ของสัญญาณที่เปลี่ยนไปเพื่อให้ได้ลายน้ำที่ฝังตัวอยู่ของมันเอง

- Wavelet-Based Audio Watermarking Using Adaptive Tabu Search

งานวิจัยนี้จัดทำโดย N. Sriyingyong และ K. Attakitmongcol ใน IEEE ปี 2006 งานวิจัยนี้ฝังลายน้ำใน Spatial Domain ใช้เทคนิคการแปลง DWT หรือ Discrete wavelet transform เพื่อกรองเอาส่วนของเนื้อหาข้อมูลมาทำการฝังลายน้ำ ลายน้ำที่ใช้เป็นข้อมูลรูปภาพมีขนาด 25X25 Pixels และก่อนที่จะทำการฝังลายน้ำได้มีการหาค่าเฉลี่ยของข้อมูลฐาน เพื่อใช้ในการกำหนดระดับการฝังตัวหรือปรับค่า Alpha ให้เหมาะสมก่อนฝังลายน้ำดังอัลกอริทึมในรูปที่ 2.16 และในส่วนของการตรวจจับลายน้ำจะใช้วิธีการของ Adaptive Tabu Search (ATS) มาใช้เพื่อค้นหาสัญญาณลายน้ำที่ฝังตัวอยู่ ซึ่งวิธีนี้จะทำการค้นหาคำตอบโดยไม่ต้องอาศัยข้อมูลต้นฉบับ แต่จะใช้เวลาในการค้นหามาก



รูปที่ 2.16 อัลกอริทึมหลักการฝังลายน้ำดิจิทัลแบบ Adaptive Tabu Search



รูปที่ 2.17 การหาค่าเฉลี่ยเพื่อปรับค่า Alpha แบบ Adaptive Tabu Search

- DWT-Based Audio Watermarking Resistant to Desynchronization

เป็นงานวิจัยของ Liu Hai-yan, Zheng Xue-feng, Wang Ying, ใน IEEE ปี 2007 ได้นำเสนอเทคนิคการฝังลายน้ำใน Spatial Domain โดยใช้เทคนิคการปรับเปลี่ยนค่าระดับ Amplitude เนื้อหาข้อมูลเมื่อผ่านการแปลงเวฟเลต 3 ระดับ การฝังลายน้ำ จะฝังโดยอาศัยระดับค่าเฉลี่ยของข้อมูลในช่วงระยะของการฝังลายน้ำ เป็นจุดตัดสินใจว่าเป็นข้อมูล บิต 1 หรือ บิต 0 โดยไม่จำเป็นต้องใช้ลายน้ำหรือข้อมูลต้นฉบับมาใช้ในกระบวนการถอดลายน้ำ ทั้งนี้การฝังลายน้ำจะฝังไปในแต่ละจุดของข้อมูลต่อ 1 จุด Pixels ของภาพลายน้ำ แต่วิธีการของงานวิจัยชิ้นนี้จะส่งผลกระทบต่อความผิดเพี้ยนของข้อมูลอย่างมาก ซึ่งสังเกตได้จาก ค่า SNR เมื่อฝังลายน้ำแล้ว มีค่าเท่ากับ 23.342 dB ถึงแม้มาตรฐานของ International Federation of the Phonographic Industry (IFPI) ได้กำหนดไว้ไม่ให้ต่ำกว่า 20 dB แต่เนื่องจากความเป็นจริง ค่า SNR ที่ 23.342 dB จะทำให้เกิดการผิดเพี้ยนของสัญญาณในระดับที่มนุษย์เราสามารถสัมผัสได้

- An Audio Watermark Embedding Algorithm Based on Mean-Quantization in Wavelet Domain

นำเสนอโดย Wang Lanxun, Yin Chao, Pang Jiao ใน IEEE ปี 2007 ได้เสนอการแทรกลายน้ำ โดยการปรับเปลี่ยนค่าเฉลี่ย Quantization ของกลุ่มข้อมูลที่จะฝังลายน้ำลงไป ซึ่งวิธีนี้จะใช้การเปลี่ยนแปลงของระดับค่าเฉลี่ย Quantization มาเป็นจุดตัดสินใจว่าเป็นข้อมูลลายน้ำ บิต 1 หรือ บิต 0 งานวิจัยชิ้นนี้จึงทำให้ค่าของ SNR มีค่าสูงหรือในอีกแง่คือ มีความผิดเพี้ยนของสัญญาณน้อยมาก แต่ทั้งนี้ไม่เหมาะแก่งานที่จะต้องถูกโจมตีจากกรณีที่เป็น ADC และ DAC Conversion เพราะการโจมตีในรูปแบบนี้จะมีการทำ Sampling และ Quantization ใหม่เมื่อผ่านกระบวนการแปลง Analog เป็น Digital

2.7 สรุปเทคนิคการทำลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัล

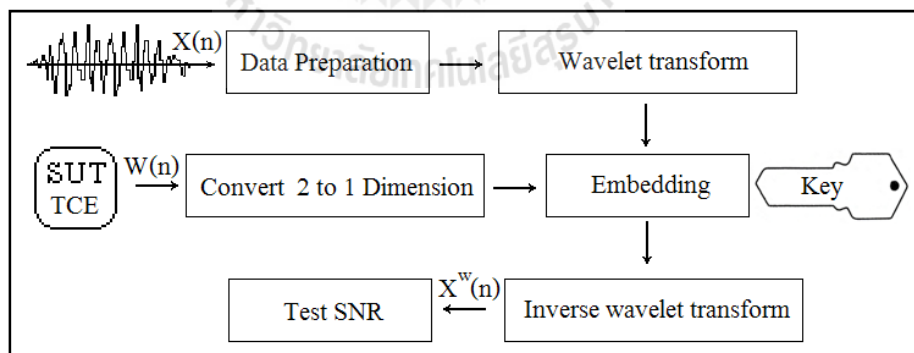
จากทฤษฎีต่างๆ ที่ได้กล่าวมาข้างต้นทำให้ทราบว่า การทำลายน้ำสัญญาณดิจิทัลเพื่อให้คุณภาพที่ได้ใกล้เคียงกับสัญญาณเสียงต้นฉบับมากที่สุด ต้องคำนึงถึงองค์ประกอบของข้อมูลสัญญาณเสียงที่จะนำมาสร้างคำนิยามในการทำลายน้ำ อีกทั้งยังสามารถทำให้คุณภาพของสัญญาณลายน้ำดีขึ้นได้โดยการทำลายน้ำในโดเมนอื่น ซึ่งอาศัยกระบวนการแปลงเวฟเลตแบบดิสครีต เพื่อช่วยให้สามารถคัดแยกกลุ่มย่านความถี่ที่ต้องการฝังลายน้ำ ทั้งนี้คุณภาพของลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัลต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขตามมาตรฐานของ International Federation of the Phonographic Industry (IFPI) และเหนือสิ่งอื่นใดลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัลจะต้องมีความทนทานต่อการโจมตีในรูปแบบต่างๆ โดยเฉพาะเป้าหมายในการพัฒนาลายน้ำที่ได้กำหนดไว้

บทที่ 3

การทำลายน้ำโดยเทียบค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์ของการแปลงเวฟเล็ต

3.1 กล่าวนำ

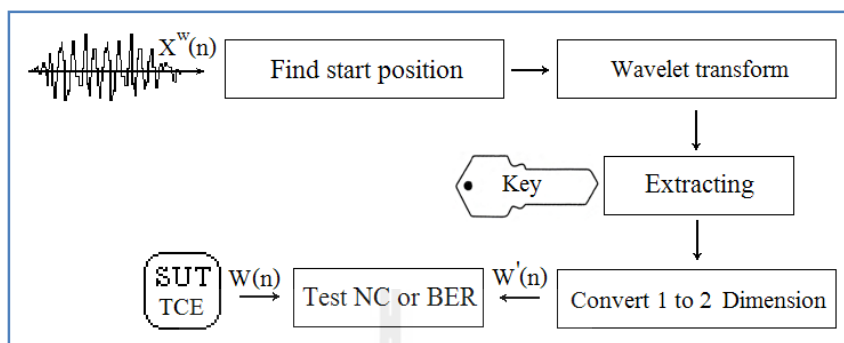
การทำลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัลเป้าหมายเพื่อให้ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะของสัญญาณระหว่างดิจิทัลและแอนะล็อก เมื่อพิจารณาลักษณะของการฝังลายน้ำในองค์ประกอบต่างๆ ของข้อมูลสัญญาณเสียง เทคนิคที่ใช้ทำลายน้ำควรเปลี่ยนแปลงหรือแก้ไขในส่วนของขนาดสัญญาณเสียงหรือแอมพลิจูด (Amplitude) เนื่องจากการฝังลายน้ำแบบนี้จะมีความคงทนต่อการโจมตีที่รุนแรงได้เป็นอย่างดี โดยเฉพาะการเปลี่ยนสัญญาณระหว่างดิจิทัลกับแอนะล็อกจะมีการเข้ารหัสและถอดรหัสระหว่างข้อมูลแบบ PCM กับสัญญาณเสียงแอนะล็อก ซึ่งองค์ประกอบของสัญญาณเสียงที่คงสภาพอยู่ควรจะเป็นแอมพลิจูดของสัญญาณ เนื่องจากเป็นองค์ประกอบหลักของสัญญาณเสียง และในส่วนของ การถอดลายน้ำก็สามารถทำได้ง่ายกว่าวิธีอื่น แต่ข้อเสียที่ทำให้วิธีการนี้ไม่เป็นที่นิยมก็เนื่องมาจากเกิดผลทำให้สัญญาณเสียงผิดเพี้ยนไปจากเดิมเป็นอย่างมาก จึงต้องนำวิธีการแปลงเวฟเล็ตมาใช้เพื่อเลือกกลุ่มของย่านความถี่ในการฝังลายน้ำ เพื่อให้ลายน้ำสัญญาณเสียงที่ได้มีค่าความผิดเพี้ยนไปจากต้นฉบับน้อยที่สุด



รูปที่ 3.1 การฝังลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัล

การฝังลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัลสามารถอธิบายได้ตามขั้นตอนในรูปที่ 3.1 ขั้นตอนแรกทำการแบ่งข้อมูลสัญญาณเสียงออกช่วงเท่าๆ กัน ก่อนเข้าสู่การแปลงเวฟเล็ต ส่วนภาพลายน้ำจะทำการจัดข้อมูลจาก 2 มิติให้เป็น 1 มิติ จากนั้นจะเข้าสู่กระบวนการฝังกับสัญญาณเสียงที่ผ่านการ

แปลงเวฟเลตและทำการแปลงกลับเวฟเลตเป็นการเสร็จสิ้นการทำลายน้ำ ขั้นตอนสุดท้ายจะทำการทดสอบคุณภาพสัญญาณเสียงจากการทำลายน้ำด้วยค่า SNR



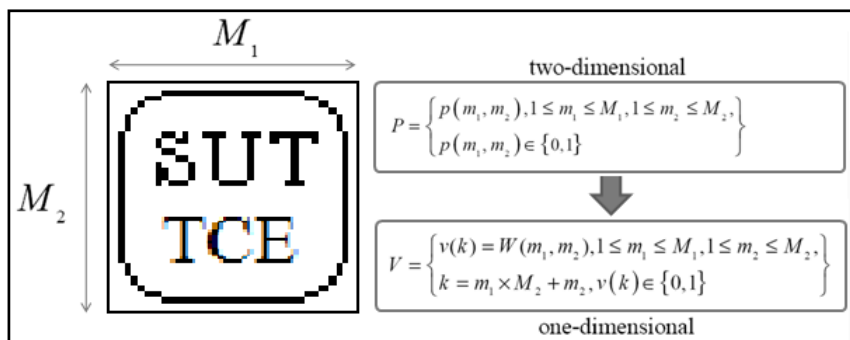
รูปที่ 3.2 การถอดลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัล

ในด้านการถอดลายน้ำ ต้องทำการค้นหาตำแหน่งเริ่มต้นของลายน้ำที่ฝังอยู่ และนำเข้าสู่ขั้นตอนการแปลงเวฟเลต ก่อนเข้าสู่ขั้นตอนการถอดลายน้ำ เมื่อได้ข้อมูลภาพลายน้ำที่ถอดมา นำเข้าสู่ขั้นตอนการแปลงข้อมูลจากข้อมูล 1 มิติเป็น 2 มิติ สุดท้ายทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้กับภาพลายน้ำต้นฉบับด้วยค่าของ NC หรือ BER เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของภาพลายน้ำที่ถอดมาได้ว่าตรงกับลายน้ำที่เจ้าของลิขสิทธิ์มีอยู่หรือไม่

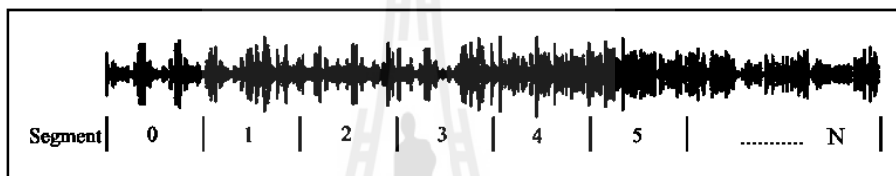
3.2 การเตรียมข้อมูลก่อนทำลายน้ำดิจิทัล

ก่อนการทำลายน้ำตามวิธีการที่ได้ออกแบบขึ้น การเตรียมข้อมูลเป็นขั้นตอนที่สำคัญ โดยเฉพาะการทำลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัล ภาพลายน้ำที่ใช้โดยส่วนมากเป็นข้อมูลภาพ Binary ที่มีข้อมูลเป็นภาพ 2 มิติ ซึ่งการทำลายน้ำบนสัญญาณเสียงจะต้องเปลี่ยนข้อมูลภาพ 2 มิติ ให้เป็นข้อมูล 1 มิติดังรูปที่ 3.3 ขนาดของข้อมูลภาพที่ได้จะมีความยาวของข้อมูลเพิ่มขึ้นเป็น $M_1 \times M_2$

ส่วนทางด้านข้อมูลสัญญาณเสียงที่ใช้ อาจจะเป็นข้อมูลของเพลงทั้งเพลง ซึ่งจะมีความยาวหรือจำนวนข้อมูลที่มาก ดังนั้นกระบวนการจึงต้องตัดข้อมูลออกเป็นช่วงๆ ดังรูปที่ 3.4 ซึ่งในแต่ละส่วนของข้อมูลที่แบ่งออกมานั้น จะใช้ฝังลายน้ำเพียง 1 จุดหรือ 1 Pixel ของภาพลายน้ำที่ใช้ฝัง

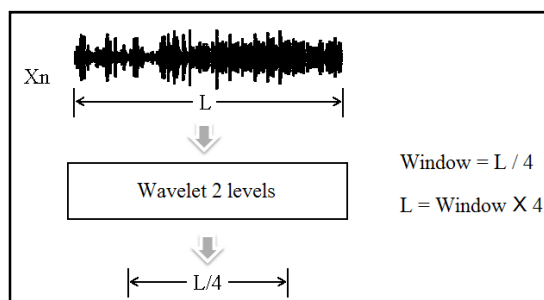


รูปที่ 3.3 การเปลี่ยนภาพลายน้ำ 2 มิติ เป็นข้อมูล 1 มิติ



รูปที่ 3.4 การแบ่งส่วนข้อมูลก่อนการฝังลายน้ำ

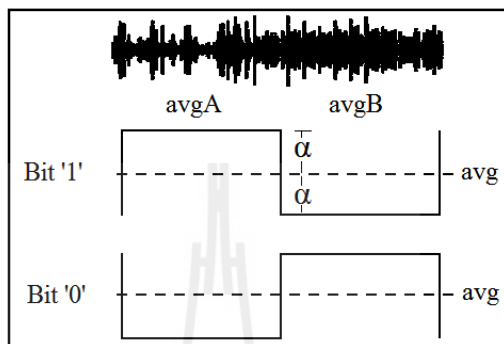
เมื่อพิจารณาเทคนิคที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะทำการแปลงเวฟเลตถึง 2 ระดับ ซึ่งสามารถคำนวณหาขนาดของข้อมูลที่ใช้ในการฝังลายน้ำ 1 Pixel ได้โดย ถ้ากำหนดให้เป็น L เป็นขนาดของข้อมูลที่ใช้ในการฝังลายน้ำ 1 Pixel และการแปลงเวฟเลตจะทำให้ขนาดของ Sampling ข้อมูลลดลงครึ่งหนึ่ง ดังนั้น เมื่อผ่านการแปลงเวฟเลต 2 ระดับจะทำให้จำนวนข้อมูลลดลง 4 เท่า ซึ่งขนาดของข้อมูลที่ได้หลังจากการแปลงเวฟเลตแล้วจะเรียกว่า หน้าต่าง (Window) ซึ่งขนาดของหน้าต่างสามารถหาได้จากการทดลองเพื่อค้นหาค่าที่เหมาะสมในการทำลายน้ำนั่นเอง



รูปที่ 3.5 ขนาดของข้อมูลที่ใช้ในการฝังลายน้ำ 1 Pixel

3.3 เทคนิคการฝังและถอดลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัล

เทคนิคที่ใช้ในการฝังลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัล จะทำการแบบกลุ่มข้อมูลออกเป็นสองกลุ่มด้วยขนาดที่เท่ากัน และทำการปรับค่าเฉลี่ย Amplitude ของสัญญาณทั้งสองกลุ่มให้เท่ากัน ก่อนที่จะปรับระดับสัญญาณตามเงื่อนไขดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.6 การปรับเปลี่ยนค่าเฉลี่ยข้อมูลทั้งสองกลุ่ม ตามเงื่อนไข

กรณีข้อมูลลายน้ำเป็นบิต '1'

$$X'(n) = X(n) \times \alpha ; n = 1, 2, 3 \dots, G/2 \quad (3.1)$$

$$X'(n) = X(n) / \alpha ; n = G/2 + 1, \dots, G \quad (3.2)$$

กรณีข้อมูลลายน้ำเป็นบิต '0'

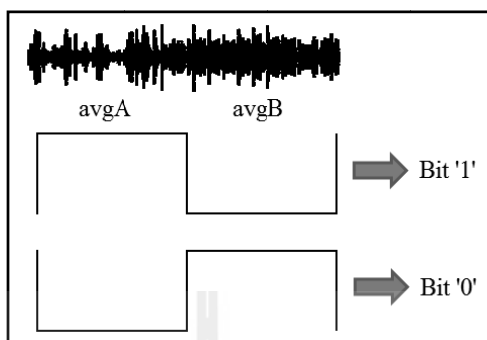
$$X'(n) = X(n) / \alpha ; n = 1, 2, 3 \dots, G/2 \quad (3.3)$$

$$X'(n) = X(n) \times \alpha ; n = G/2 + 1, \dots, G \quad (3.4)$$

โดยที่ G คือ ขนาดของหน้าต่างที่ใช้ฝังลายน้ำ 1 Pixel

α คือ ระดับความแรงในการฝังลายน้ำ (Watermark strength)

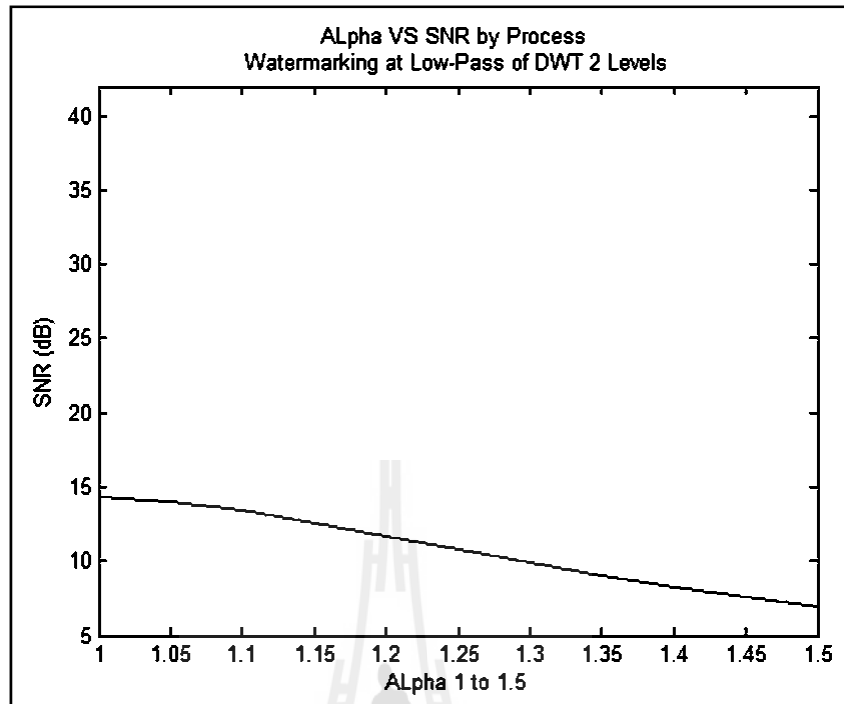
ส่วนกระบวนการถอดสัญญาณลายน้ำ ไม่ต้องใช้ข้อมูลเสียงหรือลายน้ำต้นฉบับ เนื่องจากสามารถตัดสินใจได้จากระดับของค่าเฉลี่ยกลุ่มข้อมูลสองกลุ่ม ดังรูปที่ 3.7



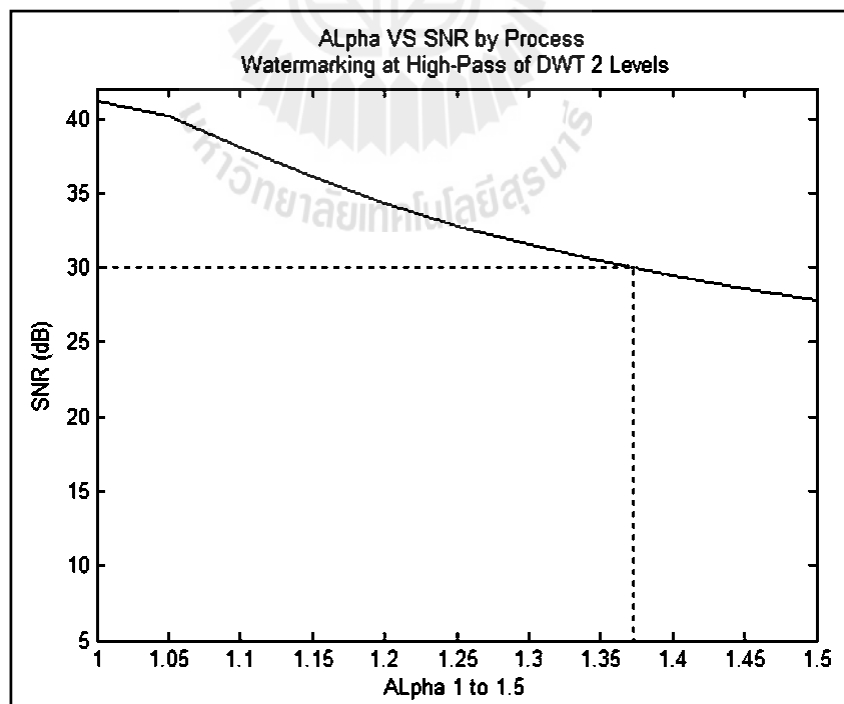
รูปที่ 3.7 การตัดสินใจค่าเฉลี่ยข้อมูลทั้งสองกลุ่ม เป็น บิต '1' หรือ บิต '0'

3.4 การทดลองฝังลายน้ำในกลุ่มข้อมูลย่านความถี่ต่างๆ

หลักการทำลายน้ำดิจิทัลในงานวิจัยชิ้นนี้ ได้ตั้งสมมติฐานการฝังลายน้ำไว้สองรูปแบบคือ ระหว่างกลุ่มข้อมูลย่านความถี่ต่ำและกลุ่มข้อมูลย่านความถี่กลางก่อนไปทางต่ำ โดยอาศัยการแปลงเวฟเล็ตแบบ Haar wavelet 1 มิติ 2 ระดับ ทั้งนี้เนื่องจากการแปลงเวฟเล็ตแบบ Haar wavelet เป็นการแปลงเวฟเล็ตที่ง่ายที่สุดทำให้ขั้นตอนการฝังลายน้ำและในขั้นตอนการถอดมีการคำนวณได้อย่างรวดเร็วในการสังเคราะห์กลุ่มของข้อมูลในแต่ละย่านออกจากกัน และเพื่อทราบถึงข้อดีข้อเสียในแต่ละวิธี จะใช้หลักการเปรียบเทียบคุณภาพของการทำลายน้ำในการฝังทั้งสองกลุ่มย่านความถี่ด้วยค่า SNR และใช้ขนาดของหน้าต่างเท่ากับ 64 จุดในการทดสอบ สัญญาณเสียงต้นฉบับที่ใช้เป็นข้อมูลเสียงแบบ PCM 16 bits 48 KHz ซึ่งเป็นสัญญาณเสียงที่มีการเคลื่อนไหว (Dynamic) ของเสียงกว้าง เช่นเป็นเพลงที่มีจังหวะช้าและเร็วในเพลงเดียว และภาพลายน้ำที่ใช้ในการทดลองใช้ภาพในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.8 ผล SNR ต่อการฝังย่านความถี่ต่ำ



รูปที่ 3.9 ผล SNR ต่อการฝังย่านความถี่กลางก่อนไปทางต่ำ



รูปที่ 3.10 ลายน้ำที่ใช้ในการทดลองเป็นภาพ Binary ขนาด 64 X 64 Pixels

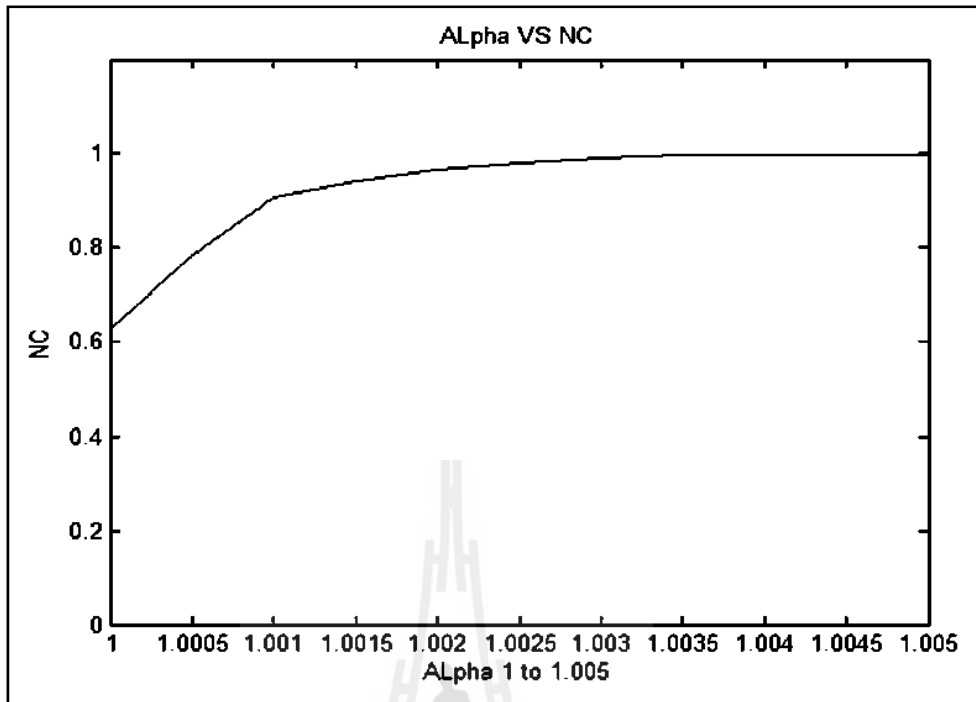
จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า การฝังลายน้ำในส่วนย่านความถี่กลางก่อนไปทางต่ำของการแปลงเวฟเลต ระดับที่สอง จะให้ผลของค่า SNR ที่ต่ำมาก เมื่อเทียบกับการฝังทางด้านความถี่ต่ำ ที่แม้กระทั่งในขณะ Alpha มีค่าเท่ากับ 1 หรือ ไม่มีการฝังลายน้ำ ค่า SNR ยังมีค่าต่ำกว่า 15 dB ทั้งนี้เนื่องจาก การปรับค่าเฉลี่ยของช่วงข้อมูลทั้งสองกลุ่มให้เท่ากันก่อนปรับค่า Alpha และอีกกรณี คือกระบวนการฝังตัวได้ทำการปรับเปลี่ยนกลุ่มข้อมูลหลัก ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ทางด้านความถี่ต่ำ ดังนั้นค่า SNR จึงมีค่าที่ต่ำมากกว่า SNR ทางย่านความถี่กลางก่อนไปทางต่ำ

นอกจากนี้ยังพบว่า การฝังในย่านความถี่ต่ำจะมีผลกระทบกับคุณภาพของลายน้ำที่ต่ำกว่า 20 dB ซึ่งต่ำกว่ามาตรฐานของ IFPI ส่วนการฝังในย่านความถี่กลางก่อนไปทางต่ำพบว่า ได้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าอย่างชัดเจน และเป็นไปตามมาตรฐานของ IFPI และงานวิจัยชิ้นนี้ได้เลือกใช้การฝังในระดับของ SNR อยู่ประมาณ 30 dB เนื่องจากการทดสอบโดยการฝังจะพบว่าถ้าฝังลายน้ำที่เข้มมากเกินไปกว่านี้จะทำให้รับรู้ถึงสัญญาณลายน้ำ หรือรับรู้ถึงสัญญาณรบกวนด้วยการฝังนั่นเอง

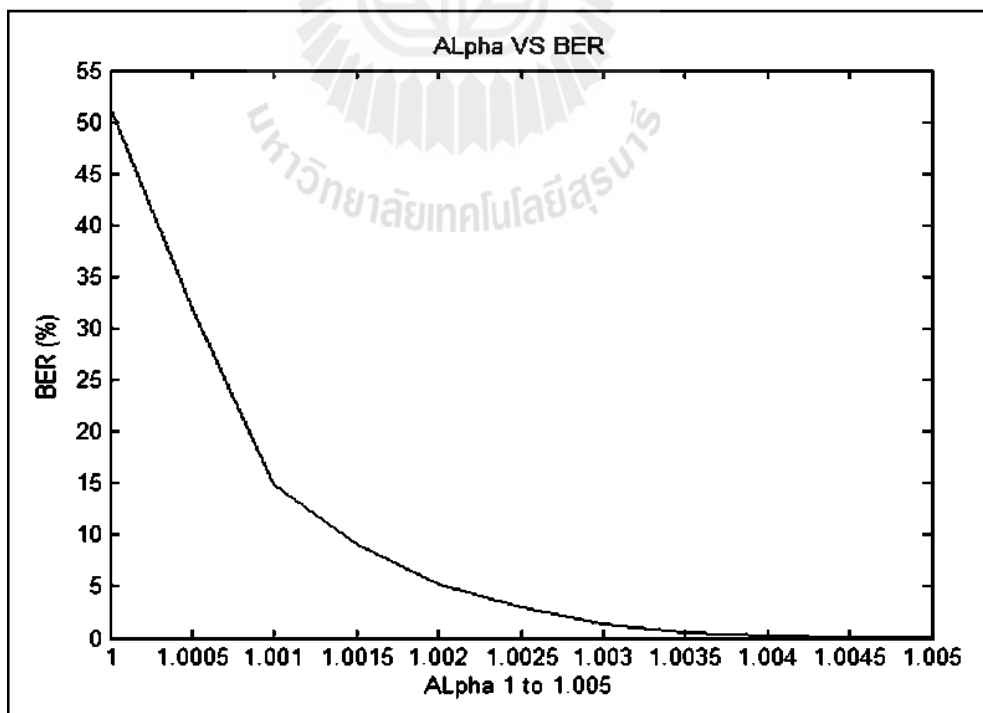
3.5 การปรับระดับความเข้มของการฝังลายน้ำ

เพื่อค้นหาผลกระทบที่เกิดจากระดับการฝังตัวเทียบกับค่า NC และ BER ในกระบวนการทดลองนี้จะต้องมีขั้นตอนการถอดลายน้ำ เพื่อให้ได้ภาพลายน้ำที่ฝังตัวอยู่ และนำภาพลายน้ำที่ได้มาเทียบกับ ภาพลายน้ำต้นฉบับ ตามสมการของ NC และ BER

จากผลการทดลองค่าของ NC และ BER มีระดับการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงของ Alpha เท่ากับ 1 ถึง 1.005 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเป็นค่าที่น้อยมากเนื่องจากการทดลองไม่ได้ผ่านการโจมตีจึงทำให้การปรับค่า Alpha จึงไม่ค่อยมีผลต่อค่าของ NC และ BER และถ้าไม่อาศัยกระบวนการบันทึกข้อมูลเป็น Wave File ก่อน ค่าของ NC และ BER จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด ผลที่ได้จึงปรากฏดังรูปที่ 3.11 และ รูปที่ 3.12 ทั้งนี้ผลลัพธ์ที่ได้จะเลือกมาเฉพาะค่า NC ที่น้อยที่สุด และ ค่าของ BER ที่มากที่สุดมาแสดงเท่านั้น เนื่องจากค่า Alpha ที่มากกว่านี้ค่าของ NC และ BER จะไม่มีการเปลี่ยนแปลง



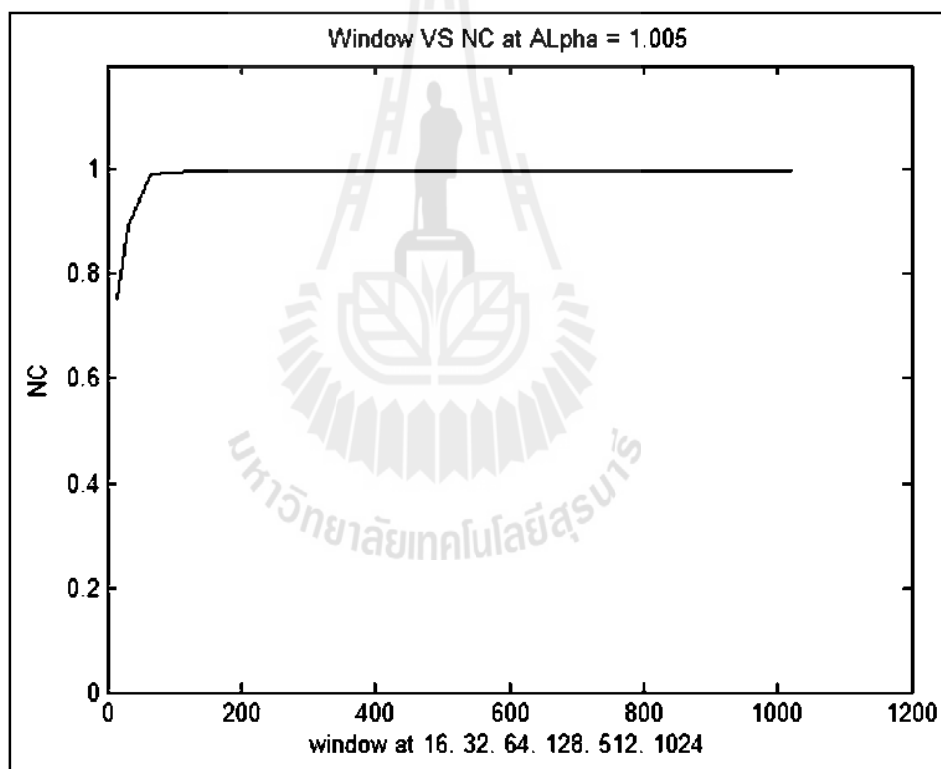
รูปที่ 3.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Alpha เทียบกับค่า NC



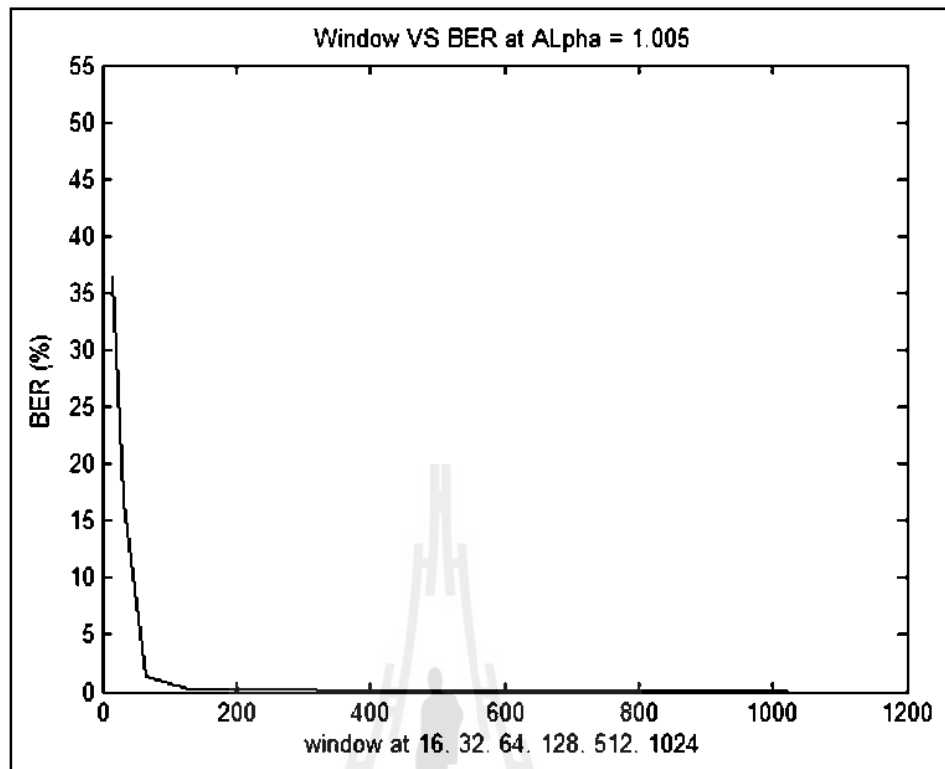
รูปที่ 3.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Alpha เทียบกับค่า BER

3.6 การปรับขนาดกลุ่มข้อมูลที่ใช้ตัดสินใจ

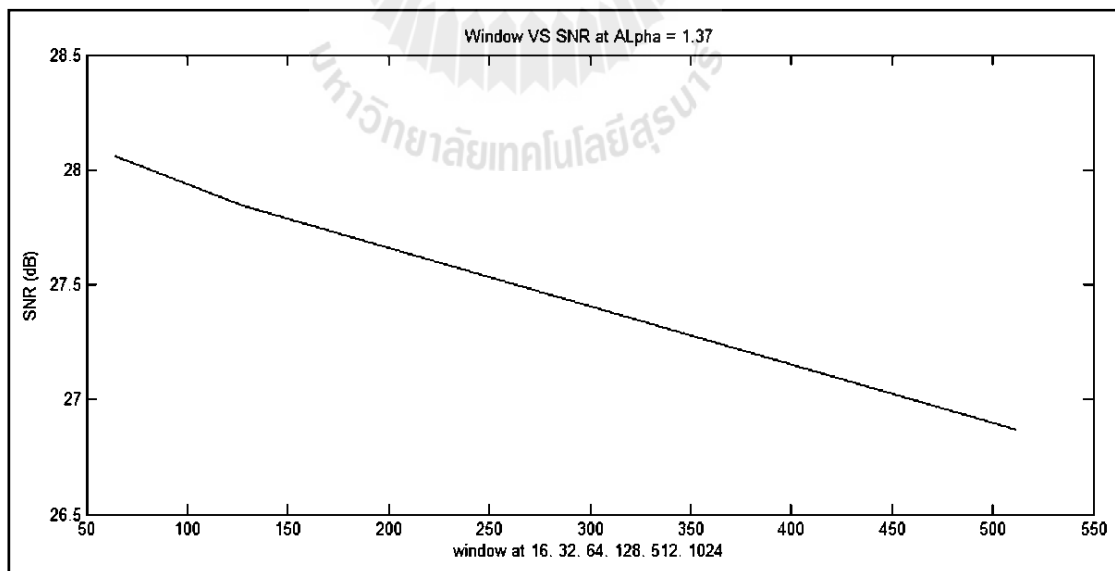
จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.5 จะเลือกใช้ค่า Alpha ที่ 1.002 ซึ่งทำให้ BER = 5.202% และ NC = 0.9679 ที่ขนาดของกลุ่มข้อมูลที่ใช้ตัดสินใจมีค่าเท่ากับ 128 จุด ทั้งนี้เพื่อให้ทราบถึงผลกระทบที่เกิดจากการปรับขนาดกลุ่มข้อมูลที่ใช้ตัดสินใจได้ชัดเจน เพราะในการทดลองการปรับขนาดของหน้าต่างมีผลกระทบต่อค่า NC และ BER น้อยมาก และการปรับหน้าต่างจะสามารถปรับได้เป็นตัวเลขชุด 2 ยกกำลัง เนื่องจากการแปลงเวฟเล็ด 2 ระดับ โดยการทดลองนี้ใช้หน้าต่างเท่ากับ 16, 32, 64, 128, 512 และ 1024 ซึ่งมีผลการทดลองดังรูปที่ 3.13 และ รูปที่ 3.14 ส่วนผลกระทบที่เกิดขึ้นกับค่า SNR เมื่อปรับขนาดหน้าต่างตามรูปที่ 3.15 จะพบว่ามีเปลี่ยนแปลงที่น้อยมาก ทั้งนี้เมื่อเทียบกับค่า Alpha เท่ากับ 1.37 ที่ได้จากการทดลองในหัวข้อที่ 3.4



รูปที่ 3.13 ผลการปรับขนาดหน้าต่างเทียบกับค่า NC



รูปที่ 3.14 ผลการปรับขนาดหน้าต่างเทียบกับค่า BER

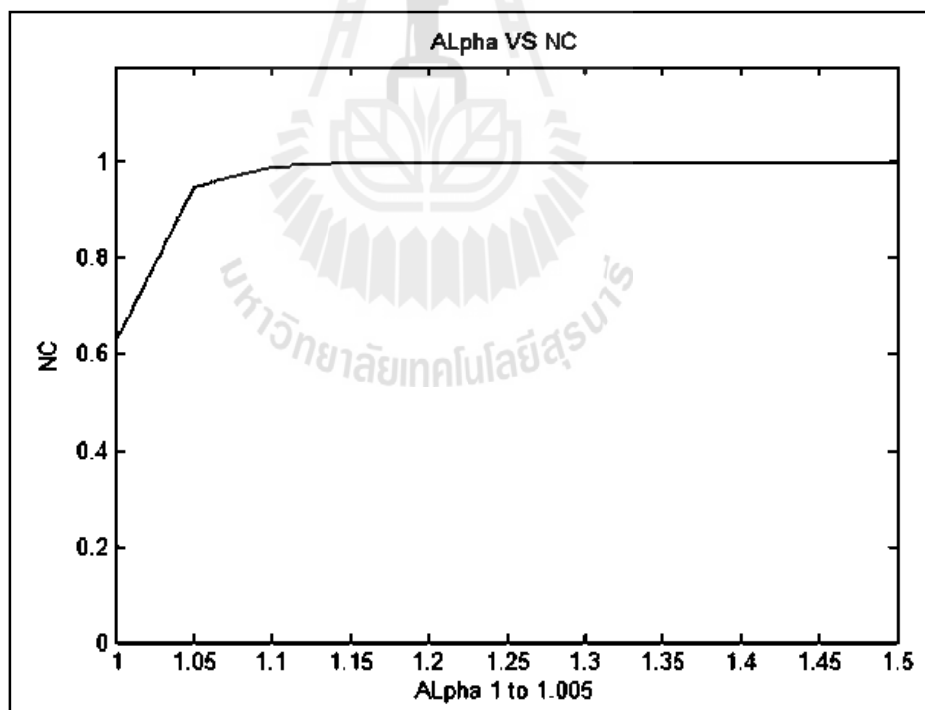


รูปที่ 3.15 การปรับขนาดหน้าต่างเทียบกับค่า SNR

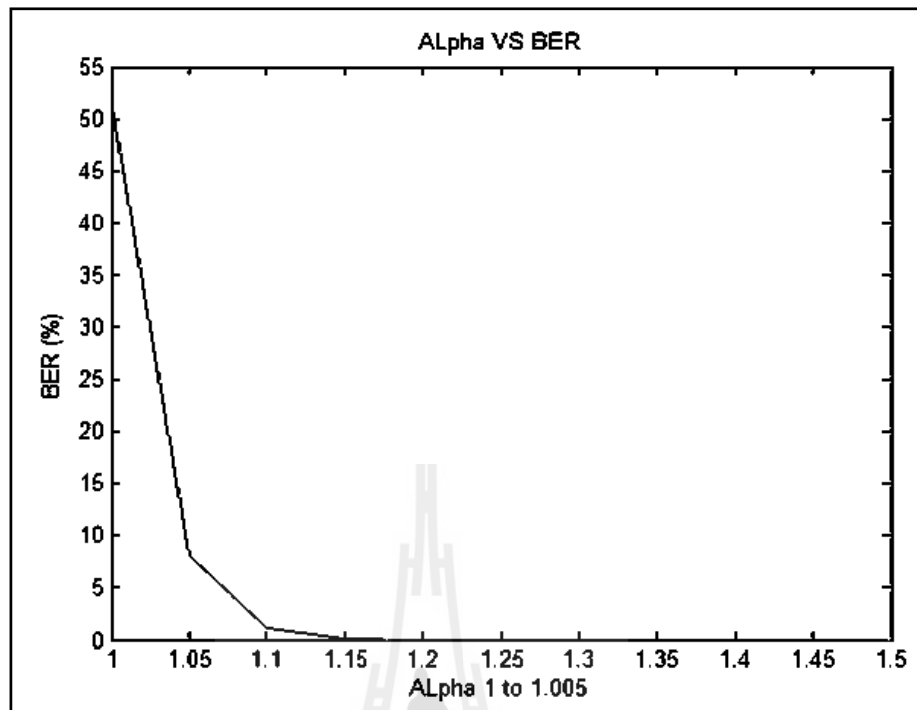
3.7 ความทนทานของลายน้ำ ต่อการโจมตีรูปแบบต่างๆ

การทดสอบลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัลที่สำคัญนั้นก็คือ การทดสอบความทนทานเมื่อถูกระทบจากการโจมตีด้วยวิธีการต่างๆ ตามพื้นฐานงานวิจัยโดยทั่วไป ซึ่งมีการทดสอบโดยการปรับเปลี่ยนค่า Alpha ตั้งแต่ 1 ถึง 1.5 และ Window เท่ากับ 64 เทียบกับค่า NC และ BER เมื่อผ่านการโจมตีดังต่อไปนี้

- การโจมตีจากสัญญาณรบกวน (Noise attacks) ซึ่งในที่นี้มีการทดสอบโดยการเพิ่มสัญญาณรบกวนเข้าไปในข้อมูลเสียงที่ผ่านการฝังลายน้ำ ก่อนที่จะทำการถอดภาพลายน้ำออกมาเพื่อทดสอบค่า NC และ BER และเมื่อเพิ่มสัญญาณรบกวนเข้าไปในข้อมูลเสียงที่ฝังลายน้ำ จะทำให้ค่าของ NC และ BER ลดลงตามระดับของสัญญาณรบกวน แต่เมื่อเพิ่มระดับการฝังลายน้ำเข้าไปจะทำให้ทนทานต่อสัญญาณรบกวนได้มากขึ้น เมื่อพิจารณาจะพบว่าตั้งแต่ระดับ Alpha มากกว่า 1.15 ขึ้นไปลายน้ำก็สามารถทนทานได้เป็นอย่างดี

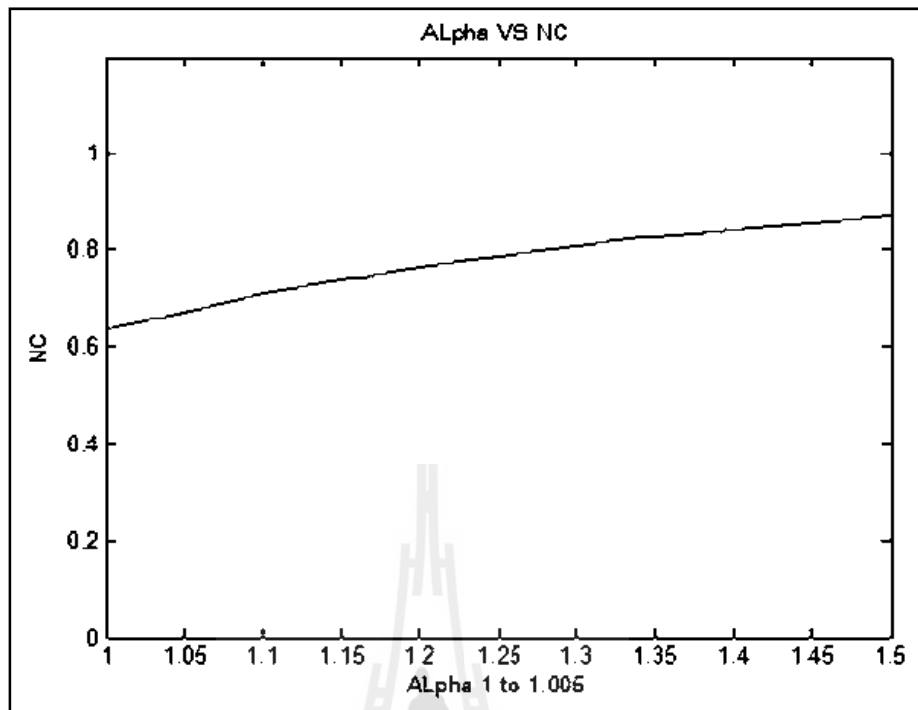


รูปที่ 3.16 ค่า Alpha เทียบกับค่า NC เมื่อผ่าน Noise Attacks

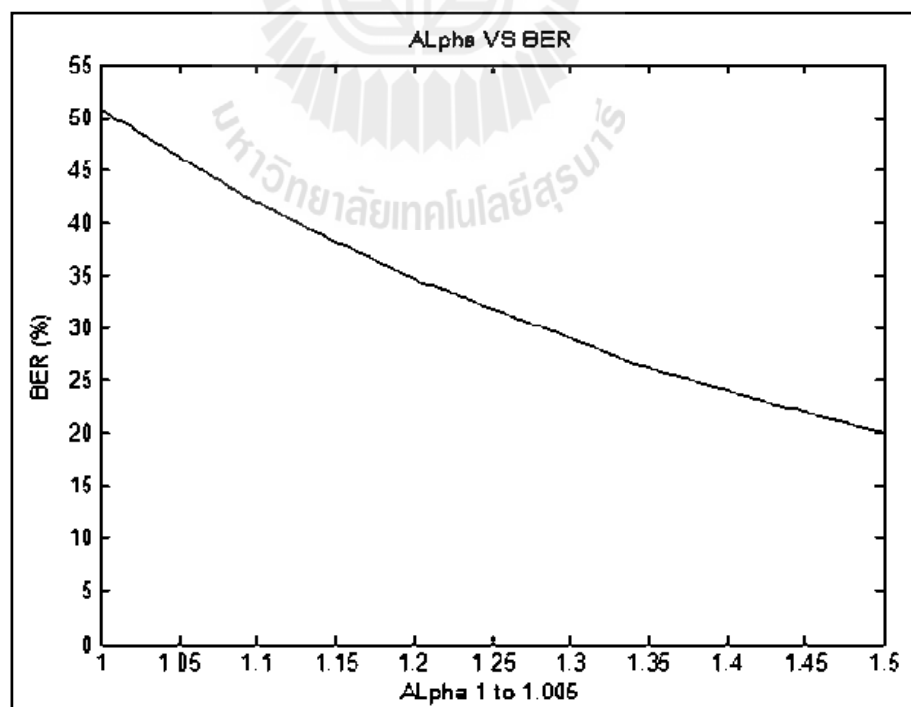


รูปที่ 3.17 ค่า Alpha เทียบกับค่า BER เมื่อผ่าน Noise Attacks

- การโจมตีด้วยการกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low-pass filter) การทดลองทำได้โดย นำเอาข้อมูลที่ได้จากการฟังลายน้ำ บันทึกเป็น Wave File และผ่านโปรแกรมปรับแต่งเสียง เพื่อทำการกรองเอาเฉพาะช่วงความถี่ต่ำ ตัดความถี่ที่ 300 Hz ที่ -15dB



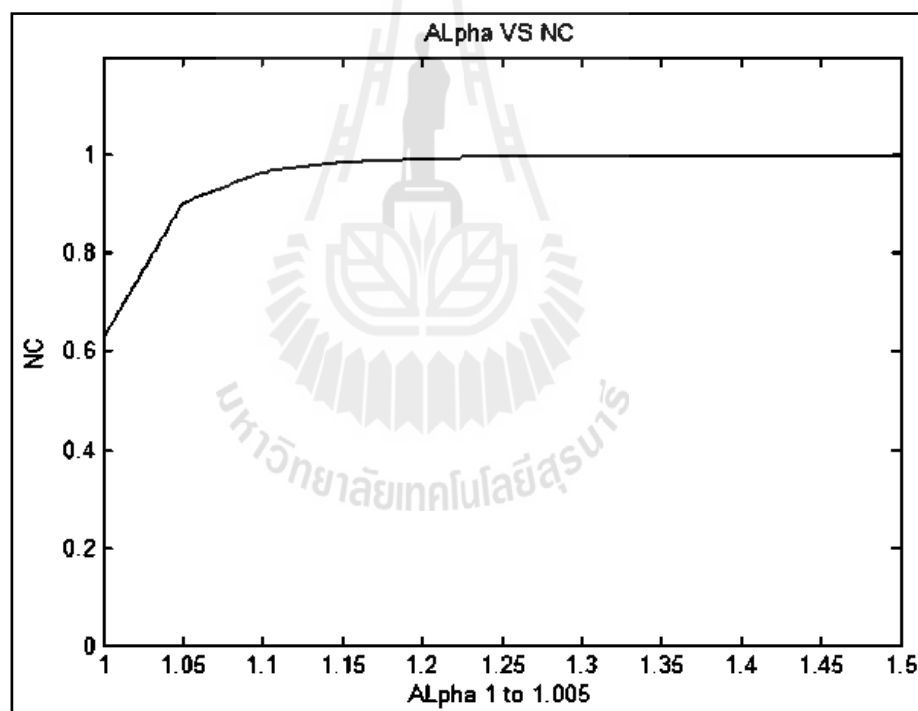
รูปที่ 3.18 ค่า Alpha เทียบกับค่า NC เมื่อผ่าน Low-pass filter



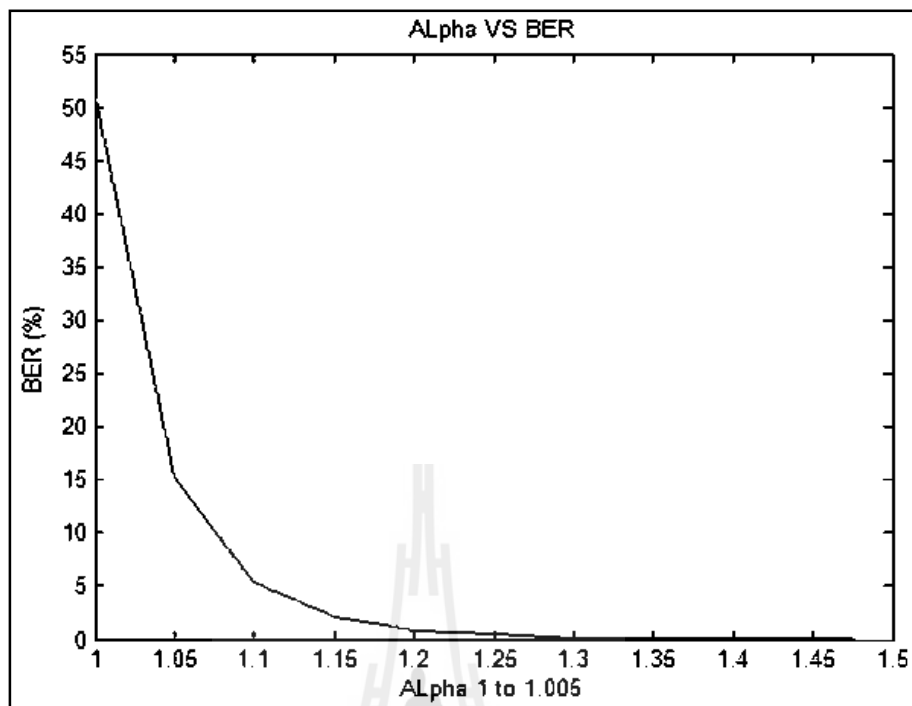
รูปที่ 3.19 ค่า Alpha เทียบกับค่า BER เมื่อผ่าน Low-pass filter

ค่า NC และ BER ที่ได้จากการทดลองตามรูปที่ 3.18 และ รูปที่ 3.19 มีค่าน้อยลงอย่างมาก ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการ Lowpass filter ได้มีการกรององค์ประกอบสัญญาณเสียงทางด้านความถี่สูงออก ซึ่งลดน้ำส่วนใหญ่นี้ได้ฝังตัวอยู่ในช่วงของความถี่กลางก่อนไปทางต่ำก็จะหายไปด้วย แต่อย่างไรนั้นจะต้องคำนึงถึงช่วงความถี่ตัดขาด (Cutoff frequency) ของ Lowpass Filter ด้วย โดยในการทดลองนี้ทำการใช้ความถี่ตัดขาดที่ 300 Hz ที่ระดับการลดทอน -15 dB ซึ่งเป็นการกรองที่รุนแรงมาก

- การโจมตีด้วยการกรองความถี่สูงผ่าน (High-pass Filter) การทดลองทำได้โดย นำเอาข้อมูลที่ได้จากการฝังลายน้ำ บันทึกเป็น Wave File และผ่านโปรแกรมปรับแต่งเสียง เพื่อทำการกรองเอาเฉพาะช่วงความถี่สูง ใช้ความถี่ตัดขาดที่ 3 KHz ที่ -15dB



รูปที่ 3.20 ค่า Alpha เทียบกับค่า NC เมื่อผ่าน High-pass filter

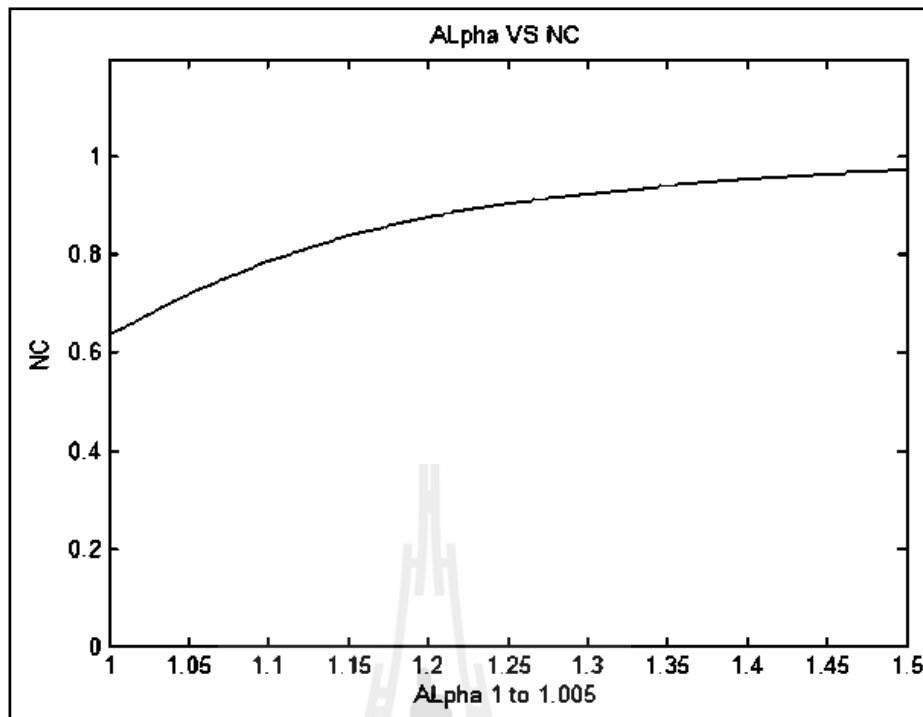


รูปที่ 3.21 ค่า Alpha เทียบกับค่า BER เมื่อผ่าน High-pass filter

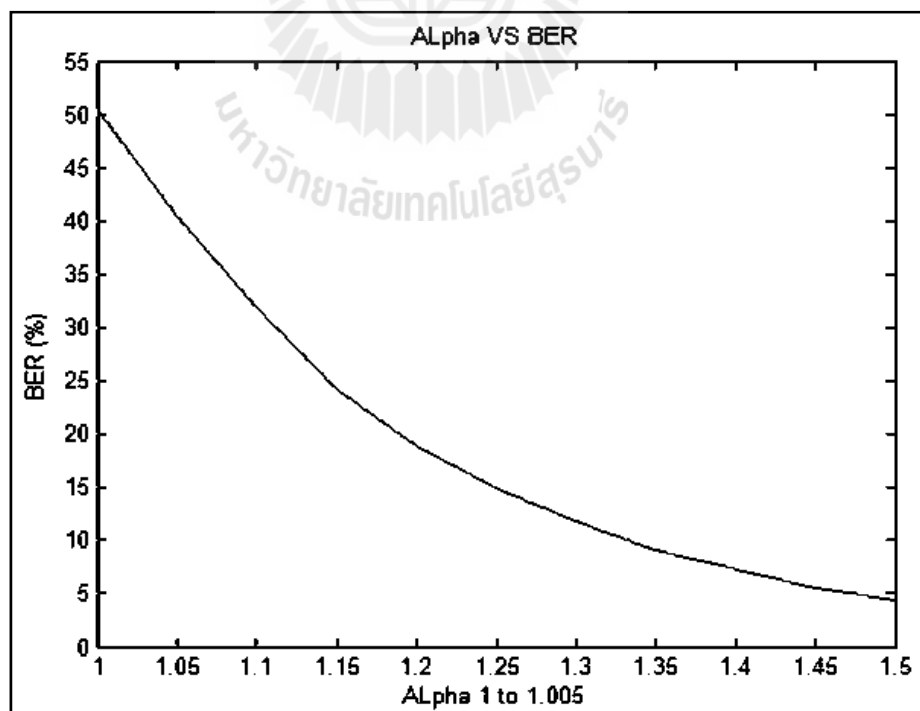
ค่า NC และ BER ที่ได้จากการทดลองมีค่าที่สูงเมื่อเทียบกับผลกระทบที่เกิดจาก Low-pass filter เพราะโดยส่วนมากลายน้ำที่ฝังอยู่ได้กระจายตัวไปในส่วนที่เป็นความถี่กลางก่อนไปทางต่ำจึงมีผลกระทบน้อยเมื่อเทียบกับผ่าน Low-pass filter

- การโจมตีด้วยการกรองแถบความถี่ผ่าน (Band-pass filter) การทดลองทำได้โดย นำเอาข้อมูลที่ได้จากการฝังลายน้ำบันทึกเป็น Wave file และผ่านโปรแกรมปรับแต่งเสียง เพื่อทำการกรองเอาเฉพาะช่วงความถี่กลาง ใช้ความถี่ตัดขาด้านต่ำที่ 300 Hz และด้านความถี่สูงที่ 3 KHz ที่ระดับการลดทอน -15dB ทั้งสองจุดตัด

ถึงแม้การทำ Band-pass filter ได้ตัดเฉพาะช่วงความถี่ตั้งแต่ 300 Hz ถึง 3kHz ส่งผลให้ค่า NC และ ค่า BER อยู่ในระดับปานกลางระหว่าง High-pass filter และ Low-pass filter attacks ทั้งนี้เพราะลายน้ำที่ฝังตัวมีบางส่วนเข้ามากระจายตัวอยู่ในช่วงความถี่กลางนี้ จึงทำให้ค่า NC และ BER มีผลกระทบอยู่ในระดับปานกลางนั่นเอง

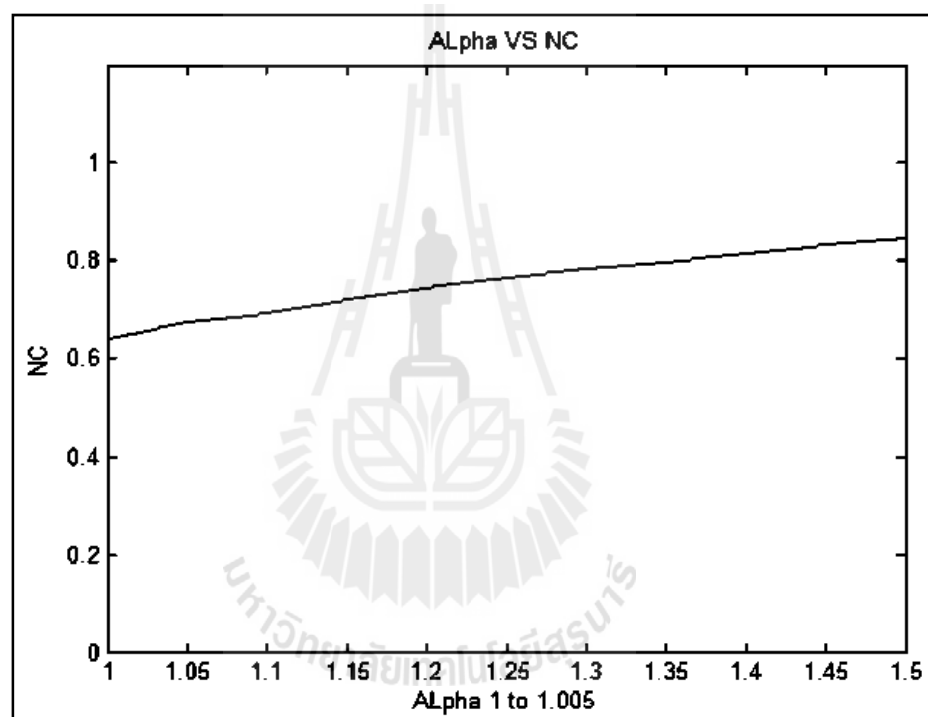


รูปที่ 3.22 ค่า Alpha เทียบกับค่า NC เมื่อผ่าน Band-pass Filter

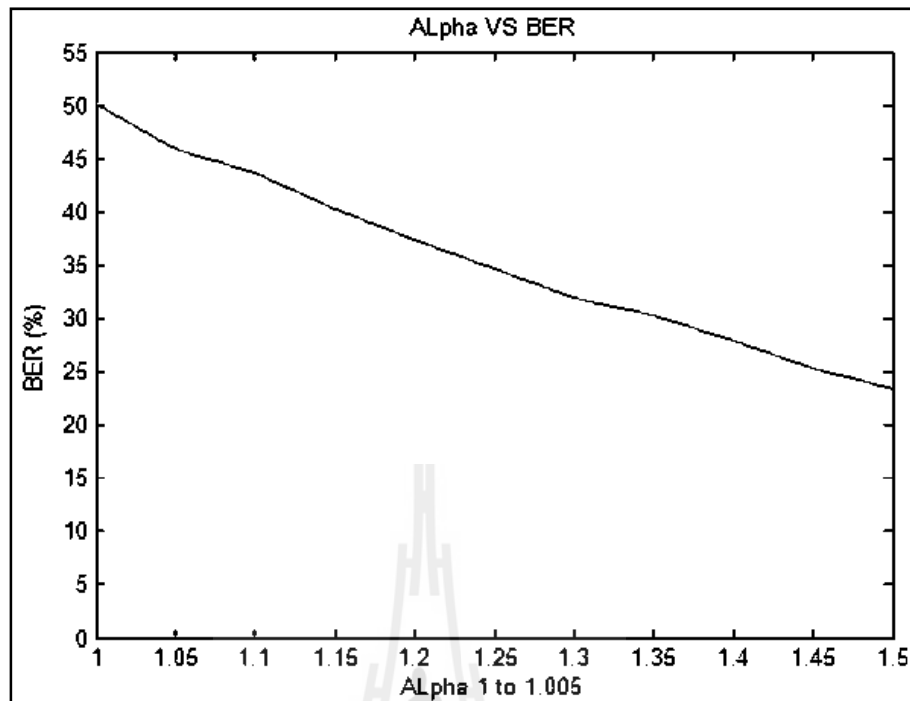


รูปที่ 3.23 ค่า Alpha เทียบกับค่า BER เมื่อผ่าน Band-pass Filter

- การโจมตีด้วยการบีบอัดข้อมูลโดย MP3 Compression ในขั้นตอนของการทดลองได้นำข้อมูลที่ได้จากการฟังลายน้มาบันทึกเป็นไฟล์ฟอร์แมต MP3 ที่อัตราบิต (Bit rate) 64Kbps และอัตราการซ้กตัวอย่างที่ 48,000 Hz ทั้งนี้ข้อมูลที่ได้จะต้องมีการค้นหาตำแหน่งของข้อมูลใหม่เนื่องจากกระบวนการแปลงเป็น MP3 จะทำให้จำนวนข้อมูลเพิ่มมากขึ้น การโจมตีในรูปแบบนี้จะมี ความรุนแรงมากเป็นพิเศษ แต่ผลที่ได้ก็ยังสามารถพบสัญญาณลายน้ที่หลงเหลืออยู่ได้ ซึ่งอาจจะสามารถปรับปรุงโดยการเพิ่มจำนวนของข้อมูลที่ใช้ในการตัดสินใจในแต่ละบิต และทั้งนี้ระดับค่าการบีบอัดข้อมูลของ MP3 นั้นการทดลองนี้ใช้ที่ 64kbps ซึ่งเป็นผลกระทบที่มากพอสมควร



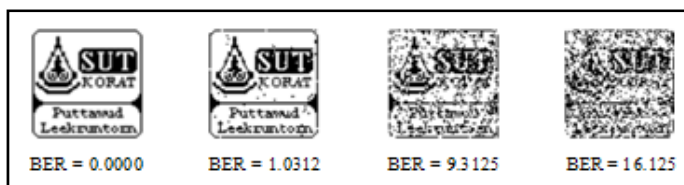
รูปที่ 3.24 ค่า Alpha เทียบกับค่า NC เมื่อผ่าน MP3 Compression



รูปที่ 3.25 ค่า Alpha เทียบกับ NC และ BER เมื่อผ่าน MP3 Compression

3.8 สรุปค่าความทนทานต่อการโจมตีในรูปแบบต่างๆ

จากการทดสอบที่ผ่านมามีผลลัพธ์ที่ได้เป็นไปตามทฤษฎีที่ได้ตั้งสมมติฐานไว้ในข้างต้น นั่นก็คือการฝังลายน้ำในกลุ่มย่านความถี่ที่มีผลกระทบน้อยที่สุด โดยใช้วิธีการแปลงเวฟเล็ทเพื่อคัดแยกย่านความถี่สำหรับฝังลายน้ำ ซึ่งได้ข้อสรุปว่าการฝังในย่านความถี่กลางก่อนไปทางต่ำนั้นเป็นย่านความถี่ที่เหมาะสม แต่ก็อาจมีข้อเสียเมื่อต้องผ่านการโจมตีโดย Low-pass Filter และ MP3 Compression ซึ่งอาจจะมีผลกระทบในย่านความถี่ที่ฝังมากกว่าการโจมตีรูปแบบอื่น ในงานวิจัยนี้ใช้ภาพลายน้ำไบนารีขนาด 64x64 บิต ขนาดหน้าต่าง 64 จุด ได้ผลการทดลองตามตารางที่ 3.1 และภาพลายน้ำที่ผ่านจากการโจมตี ที่ระดับค่า BER ต่างๆ แสดงดังรูปที่ 3.26 ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ระดับค่า BER ที่ 9.3125 ก็ยังสามารถสังเกตภาพลายน้ำที่ถูกต้องได้พอควร



รูปที่ 3.26 ภาพลายน้ำที่ผ่านการโจมตี ที่ระดับค่า BER ต่างๆ กัน

ตารางที่ 3.1 ค่า BER จากการโจมตีด้วยรูปแบบพื้นฐานต่างๆ

Alpha	SNR (dB)	BER (%)			
		Low-pass filter fc = 1KHz	High-pass filter fc = 1KHz	Noise addition -10 dB	MP3 Compression 32Kbit 48KHz
1.2	33.3859	0.0000	0.0000	1.0312	26.0156
14	28.8243	0.0000	0.0000	0.5156	21.1406
1.6	25.8898	0.0000	0.0000	0.2500	16.1250
1.8	23.7468	0.0000	0.0000	0.1250	8.0000
2.0	22.0548	0.0000	0.0000	0.1250	53906
2.2	20.6525	0.0000	0.0000	0.2344	3.5625

ในการทดลองสุดท้ายได้ทำการทดสอบโดยการโจมตีในรูปแบบการเปลี่ยนแปลงสัญญาณเสียงระหว่างสัญญาณดิจิทัล เป็นสัญญาณแอนะล็อก และเปลี่ยนเป็นข้อมูลดิจิทัลอีกครั้ง (DAC & ADC) ผ่านทางรูปสัญญาณแบบ PCM เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนการถอดภาพลายน้ำและคำนวณค่า BER ในการทดลองนี้ได้ใช้ภาพลายน้ำไบนารีขนาด 64x64 บิต ขนาดหน้าต่าง 64 จุด ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 3.2 ซึ่งจะพบว่าเทคนิคการทำลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัลที่ได้ออกแบบขึ้น มีความทนทานการเปลี่ยนแปลงระหว่างสัญญาณดิจิทัลกับสัญญาณแอนะล็อกได้เป็นอย่างดี และตารางที่ 3.3 จะแสดงถึงการทำลายน้ำในข้อมูลสัญญาณเสียงเพลงในรูปแบบต่างๆ ซึ่งใช้ค่า α คงที่เท่ากับ 1.4 และภาพลายน้ำไบนารีขนาด 64x64 บิต โดยมีขนาดหน้าต่าง 64 จุด ซึ่งพบว่า การโจมตีจากการบีบอัดสัญญาณ MP3 Compression ของไฟล์เพลงเดี่ยวขลุ่ยเพียงออและเดี่ยวระนาดเอก มีค่า BER ที่มากกว่ารูปแบบเพลงอื่นๆ เนื่องจากการฝังที่ใช้ค่า α คงที่เท่ากันหมดทำให้คุณภาพของลายน้ำหรือค่า SNR ไม่เท่ากันเนื่องจากองค์ประกอบของย่านความถี่ที่ใช้ฝังในเพลงแต่ละรูปแบบมีองค์ประกอบของความถี่ที่ไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงทำให้ค่าของ SNR ของเพลงเดี่ยวขลุ่ยเพียงออและเดี่ยวระนาดเอกมีค่าสูง หรือมีความเข้มข้นในการฝังลายน้ำไม่มาก จึงทำให้มีความทนทานที่ต่ำกว่าเพลงในรูปแบบอื่น

ตารางที่ 3.2 การโจมตีด้วยการขยายสัญญาณ และการแปลงสัญญาณ DAC & ADC

Alpha	SNR (dB)	BER (%)				
		ค่าอัตราการปรับระดับสัญญาณ (เท่า)				DAC & ADC
		0.2	0.8	1.2	1.8	
1.2	33.3859	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.06250
1.4	28.8243	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
1.6	25.8898	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
1.8	23.7468	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
2.0	22.0548	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
2.2	20.6525	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

ตารางที่ 3.3 การทดลองด้วยตัวอย่างเพลงประเภทต่างๆ ที่ค่าคงที่ $\alpha = 1.4$

รูปแบบเพลง	SNR (dB)	BER (%)			
		No Attack	Noise -10 dB	MP3 32Kbit 48KHz	DAC & ADC
Dance	21.6968	0.00000	0.00000	5.2656	0.00000
Rock	21.7068	0.00000	0.00000	8.6719	0.00000
Pop	22.7270	0.00000	0.00000	6.3906	0.00000
ลูกทุ่ง	24.2587	0.00000	0.00000	9.3125	0.00000
เดี่ยวขลุ่ยเพียงออ	25.1575	0.00000	0.0469	17.0156	0.00000
เดี่ยวระนาดเอก	28.8243	0.00000	0.5156	21.1406	0.00000

3.9 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอวิธีการทำลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัล ด้วยเทคนิคการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของกลุ่มข้อมูลสัมประสิทธิ์ของการแปลงเวฟเลตในย่านความถี่กลางก่อนไปทางด้านความถี่ต่ำ ผลการทดลองได้แสดงให้เห็นว่าอัลกอริทึมนี้มีความทนทานต่อการโจมตีด้วยการประมวลผลสัญญาณในรูปแบบต่างๆ เช่น การโจมตีด้วยสัญญาณรบกวน การโจมตีด้วยการกรองความถี่ต่ำผ่าน การโจมตีด้วยการกรองความถี่สูงผ่าน การโจมตีด้วยการกรองแถบความถี่ผ่าน การโจมตีด้วยการบีบอัดข้อมูลแบบ MP3 และยังมีมีความทนทานต่อการโจมตีด้วยการเปลี่ยนรูปแบบสัญญาณระหว่างดิจิทัลกับแอนะล็อกได้เป็นอย่างดี

บทที่ 4

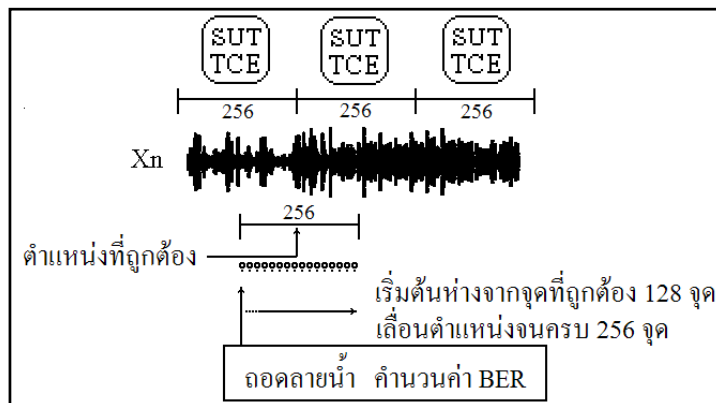
การค้นหาตำแหน่งเริ่มต้นของการถอดลายน้ำ

4.1 กล่าวนำ

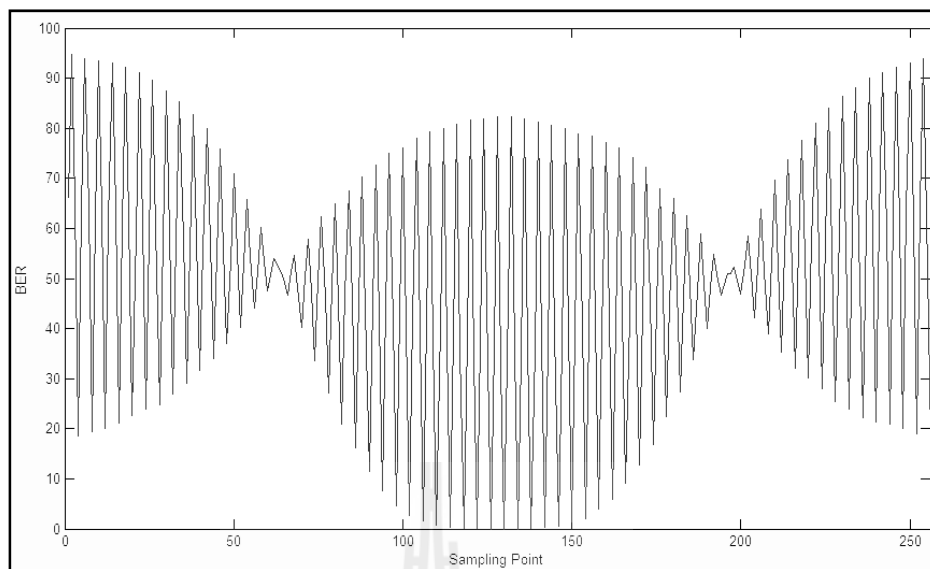
หนึ่งในขั้นตอนสำคัญในการถอดลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัลคือการค้นหาตำแหน่งเริ่มต้นในการฝังลายน้ำ ทั้งนี้ในการนำเทคนิคการทำลายน้ำไปใช้จริงการค้นหาตำแหน่งของลายน้ำมีผลต่อความถูกต้องของการถอดลายน้ำ โดยเฉพาะการทำงานในระบบเวลาจริง (Real-time system) ซึ่งข้อมูลหรือสัญญาณอินพุตเปรียบเสมือนสัญญาณคู่ม่ออยู่ตลอดเวลา ดังนั้นจึงเป็นเรื่องสำคัญอย่างมากที่จะต้องทราบถึงตำแหน่งของลายน้ำที่ฝังอยู่ ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงการวิธีการค้นหาตำแหน่งเริ่มต้นในขั้นตอนการถอดลายน้ำ เพื่อเป็นข้อมูลในการออกแบบวิธีการถอดลายน้ำในระบบเวลาจริงต่อไป

4.2 การค้นหาตำแหน่งการถอดลายน้ำ

จากการทดลองในบทที่ผ่านมาพบว่าก่อนการถอดลายน้ำจะต้องมีการค้นหาตำแหน่งของจุดเริ่มต้นในการฝังลายน้ำก่อนทำการถอดให้ข้อมูลภาพลายน้ำที่ถูกต้องสมบูรณ์ การค้นหาตำแหน่งที่ชัดเจน สามารถทำได้จากการเลื่อนตำแหน่งในการถอดลายน้ำโดยสังเกตค่าความถูกต้องของภาพลายน้ำที่ถอดมาได้ ซึ่งจะพบว่าเมื่อตำแหน่งการถอดเปลี่ยนไปความถูกต้องของสัญญาณลายน้ำจะเปลี่ยนไป

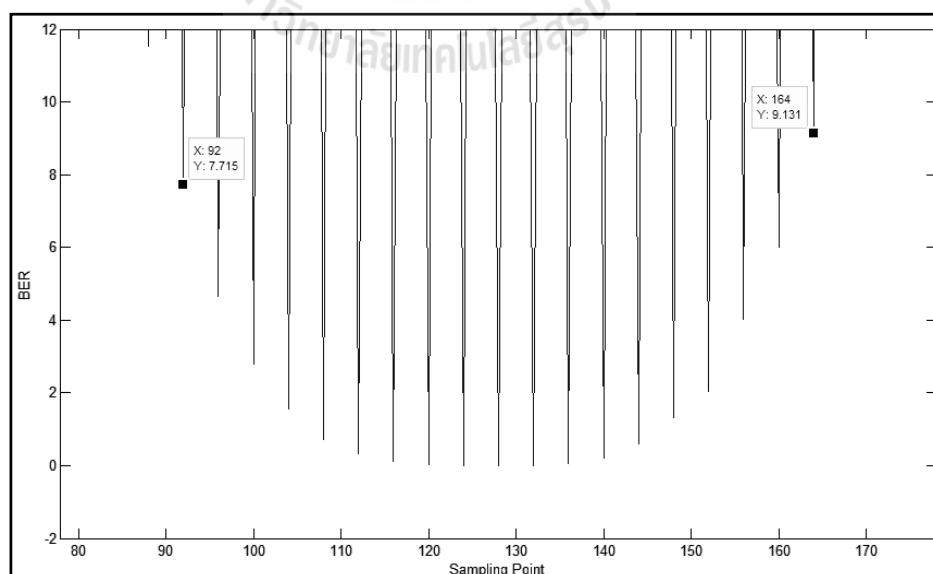


รูปที่ 4.1 อัลกอริทึมการหาค่า BER เทียบกับการเลื่อนตำแหน่งเริ่มต้น

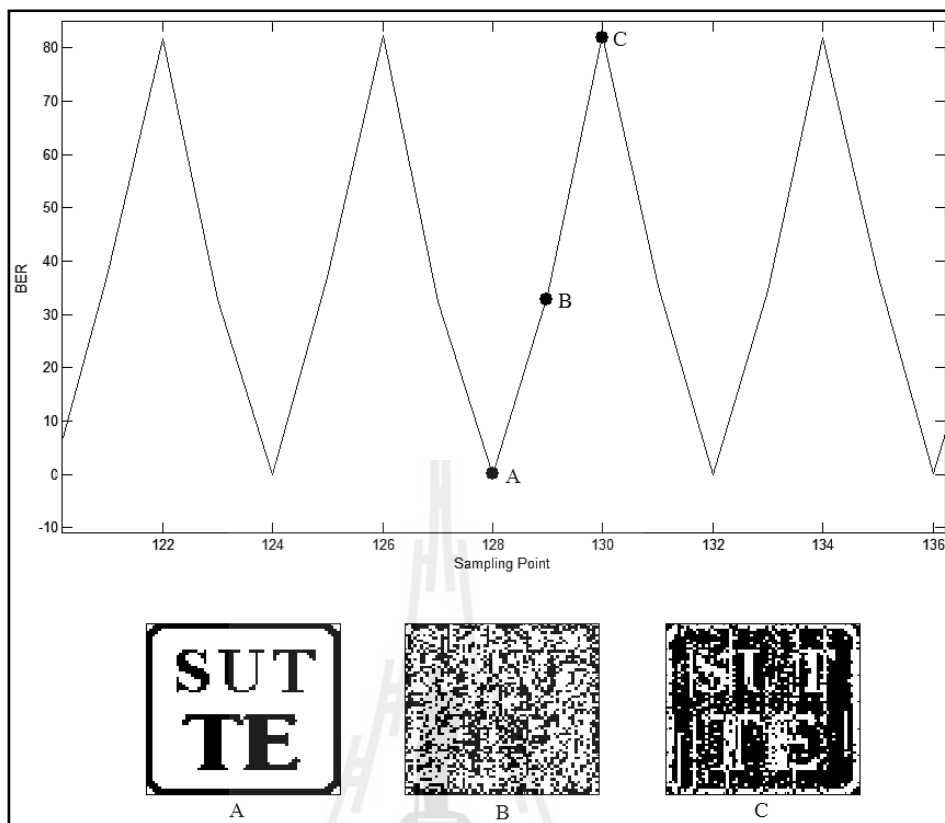


รูปที่ 4.2 ค่า BER เมื่อเลื่อนตำแหน่งการถอดลายน้ำ

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.2 พบว่าเมื่อเลื่อนตำแหน่งการถอดลายน้ำ ค่าความถูกต้องของภาพลายน้ำที่ถอดได้จะถูกตัดที่สุดเมื่อเข้าใกล้ตำแหน่งเริ่มต้นที่ 128 จุด แต่เมื่อพิจารณาขอบเขตที่ BER ต่ำกว่า 10% วิธีการนี้จะสามารถค้นหาภาพลายน้ำที่ถูกตัดได้ในช่วง 36 จุดจากจุดเริ่มต้นของการฝังลายน้ำดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ค่า BER ช่วงเข้าสู่ค่าศูนย์เมื่อเลื่อนตำแหน่งการถอดลายน้ำ



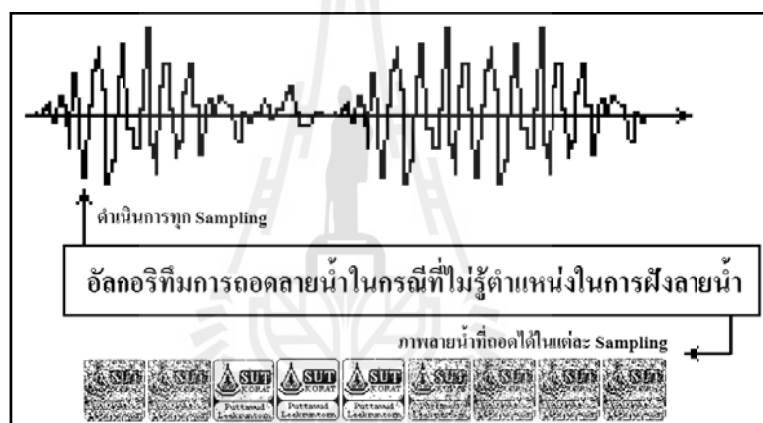
รูปที่ 4.4 ภาพลายน้ำที่ถอดได้ใกล้เคียงกับจุดเริ่มต้น

และเมื่อพิจารณาระยะ ± 4 จุด ระหว่างจุดเริ่มต้นในการฝัง ค่าความถูกต้องจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเลื่อนออกไปเพียงแค่จุดเดียว ซึ่งเมื่อพิจารณาภาพลายน้ำที่ถอดมาได้ในแต่ละจุดจะพบว่า ภาพลายน้ำจะไม่ชัดเจนเมื่อค่า BER เข้าสู่ 50% และจะแสดงออกมาเป็นภาพส่วนกลับเมื่อ BER สูงกว่า 50% ขึ้นไป แต่เมื่อเลื่อนตำแหน่งออกไปเพียงจุดเดียวภาพลายน้ำที่ได้จะเล็ยทันที และจะกลับมาถูกต้องอีกครั้งเมื่อผ่านไป 4 จุดและจะเกิดในลักษณะนี้ทุกๆ 4 จุด สาเหตุเกิดขึ้นจากขั้นตอนการแปลงเวฟเล็ต ซึ่งในงานวิจัยชิ้นนี้เลือกใช้การแปลงเวฟเล็ตในรูปแบบของ Haar wavelet ที่ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ในการแปลงเพียงสองจุด และเมื่อแปลงเวฟเล็ตสองระดับจึงต้องใช้ทั้งหมด 4 จุดทำให้เกิดความถูกต้องของกระบวนการเมื่อครบรอบที่ละ 4 จุด

4.3 เทคนิคการทำลายน้ำแบบเวลาจริง

การทำลายน้ำแบบเวลาจริงจะต้องดำเนินการบนพื้นฐานการประมวลผลที่มีค่าความเร็วสูง อัลกอริทึมที่ไม่ซับซ้อน และสามารถตอบสนองต่อความถูกต้องได้อย่างชัดเจน ดังนั้นในงานวิจัยชิ้นนี้จึงได้ค้นคิดอัลกอริทึมที่สามารถตอบสนองความถูกต้องบนความเรียบง่ายที่สุด และเมื่อ

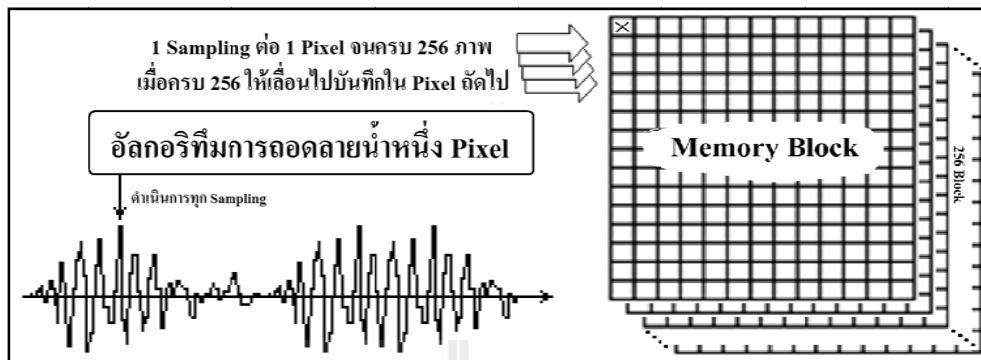
พิจารณาผลการทดลองที่ผ่านมา การค้นหาภาพลายน้ำโดยการค้นหาที่ละจุดของสัญญาณ นั้นพบว่า เป็นวิธีการพื้นฐานที่ง่ายที่สุด เพราะการค้นหาตำแหน่งเริ่มต้นของลายน้ำที่ฝังอยู่นั้น จะต้องมีการทำงานอยู่ตลอดเวลา เนื่องจากไม่ใช่เรื่องง่ายที่จะใช้วิธีการค้นหาด้วยการค้นหาเพียงแค่ครั้งแรกครั้งเดียว เพราะในครั้งต่อไปในการทำงานจริงอาจจะอยู่ในคาบเวลาเดิมหรืออาจจะมีการเลื่อนออกไปจากเดิมก็ได้ และโดยเฉพาะวิธีการค้นหาจุดเริ่มต้นของการฝังนั้นจะมีการถอดภาพลายน้ำเพื่อเปรียบเทียบกับภาพลายน้ำต้นฉบับเพื่อให้ทราบตำแหน่งที่แน่นอนอยู่แล้ว ดังนั้นวิธีการค้นหาโดยการดำเนินการที่ละ Sampling ตำแหน่งของการฝังก็ไม่สำคัญอีกต่อไป เพราะจะสามารถรับรู้ถึงภาพลายน้ำที่ถอดได้ในทุก Sampling อยู่แล้วเพียงแค่นำภาพลายน้ำที่ถูกต้องที่สุดแสดงต่อผู้ใช้งานในช่วงเวลาที่อัลกอริทึมพบเจอเป็นการเสร็จสิ้นกระบวนการ



รูปที่ 4.5 ภาพลายน้ำที่ถอดได้ใกล้เคียงกับจุดเริ่มต้นฝัง

ขั้นตอนการถอดลายน้ำ ในกรณีที่ไม่รู้ตำแหน่งในการฝังลายน้ำ จะทำเหมือนกันกับกรณีที่รู้ตำแหน่ง แตกต่างกันตรงที่มีขั้นตอนดำเนินการในทุก Sampling ซึ่งอัลกอริทึมการถอดลายน้ำใหม่นี้ จะต้องใช้การประมวลผลที่มีความไวสูงเนื่องจากการค้นหาภาพลายน้ำต้องดำเนินการให้ทันภายในค่าเวลาของการ Sampling สัญญาณเสียง เพราะการถอดภาพลายน้ำในหนึ่งพิกเซล ของภาพลายน้ำจะต้องใช้ข้อมูลสัญญาณเสียงเป็นจำนวน 4 เท่าของหน้าต่างเนื่องจากการแปลงเวฟเล็ตสองระดับ และถ้าต้องการหนึ่งภาพจะต้องใช้ข้อมูลสัญญาณเสียงเป็นจำนวน $4 \times$ หน้าต่าง \times ขนาดของภาพลายน้ำ เช่นภาพลายน้ำที่ใช้ฝังเป็นภาพไบนารีขนาด 64×64 บิต และใช้หน้าต่างขนาด 64 จุด จะใช้ข้อมูลสัญญาณเสียงทั้งสิ้น $4 \times 64 \times 64 \times 64$ เท่ากับ 1,048,576 จุด ซึ่งถ้าหากใช้สัญญาณเสียงในรูปแบบ 16 bits 48 KHz ขั้นตอนการทำงานทั้งหมดจะต้องประมวลผลข้อมูลขนาด 16.77 Mbits หรือ 2.09 Mbyte ใน 20.83 μ s ดังนั้นจึงต้องอาศัยวงจรอิเล็กทรอนิกส์และอัลกอริทึมที่มีสมรรถนะ

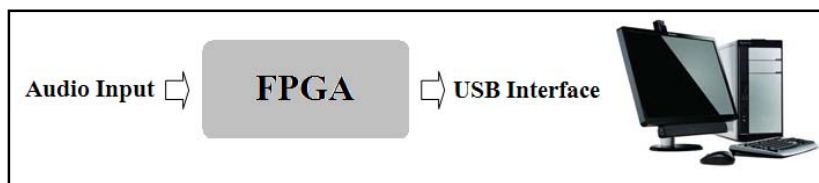
สูงเข้ามาแก้ไขปัญหานั้นได้



รูปที่ 4.6 การเตรียมหน่วยความจำของภาพลายน้ำที่ถอดได้

สิ่งที่จะต้องคำนึงเป็นอย่างแรกคือ โครงสร้างของลายน้ำที่ฝังตัวอยู่ในข้อมูลสัญญาณเสียง ซึ่งการฝังลายน้ำในแต่ละพิกเซล ต้องใช้จำนวนข้อมูลเสียงทั้งหมด 256 Sampling ในกรณีที่ยกตัวอย่างขนาดของ windows เท่ากับ 64 จุด ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะมีข้อมูลทั้งหมด 256 พิกเซล ซึ่งเป็นเพียงหนึ่งพิกเซล ในองค์ประกอบของแต่ละภาพลายน้ำทั้งหมด 256 ภาพและหนึ่งใน 256 พิกเซล จะมีเพียง 1 พิกเซลเท่านั้นที่เป็นภาพลายน้ำที่ถูกต้อง ในการทำเช่นนี้จะต้องเตรียมพื้นที่สำหรับทำเป็นหน่วยความจำ (Memory) ทั้งหมด 256 Block โดยในแต่ละ Block จะขึ้นอยู่กับจำนวนพิกเซลของภาพลายน้ำที่ใช้ในการฝัง เช่น ใช้ภาพไบนารีขนาด 64x64 บิต ดังนั้นต้องใช้ขนาด 4,096 บิต หรือขนาด 500 byte ในหนึ่ง Block ซึ่งต้องใช้หน่วยความจำทั้งหมด 128 Kbyte เพื่อให้ได้ภาพลายน้ำ 256 ภาพ

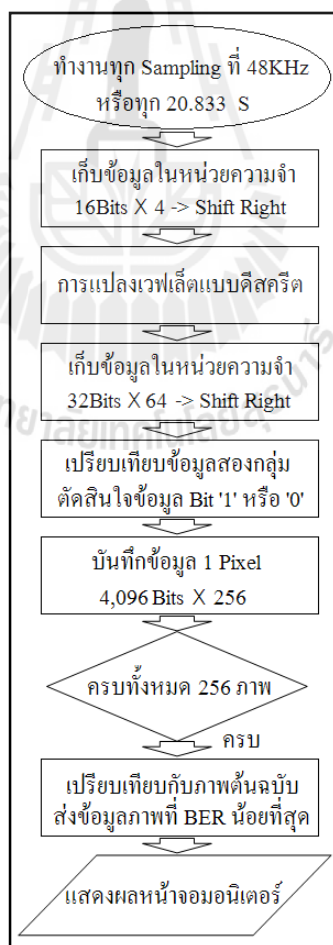
เมื่อได้ภาพลายน้ำทั้งหมด 256 ภาพครบทุกพิกเซล จึงทำการเปรียบเทียบภาพลายน้ำที่ได้กับภาพลายน้ำต้นฉบับเพื่อนำภาพที่มีค่า BER น้อยที่สุดส่งเข้าสู่คอมพิวเตอร์เพื่อทำการแสดงผลออกทางหน้าจอจอมอนิเตอร์ ซึ่งถ้าหากใช้สัญญาณเสียงที่มีการเข้ารหัสสัญญาณขนาด 16 บิต และมีอัตราการซีกตัวอย่าง 48 KHz ภาพลายน้ำเป็นภาพไบนารี ขนาด 64x64 บิตและใช้ขนาดของหน้าต่างเท่ากับ 64 จุด กระบวนการทั้งหมดจะใช้เวลาทั้งหมด 21.84533 วินาทีต่อภาพลายน้ำหนึ่งภาพ และในส่วนของวงจรที่ใช้ในการดำเนินงาน มีสองทางเลือกที่สามารถทำได้ นั่นก็คือการใช้งาน Digital signal processor (DSP) และอีกเทคโนโลยีคือ Field programmable gate array (FPGA) ในงานวิจัยชิ้นนี้ได้เลือก FPGA เนื่องจากมีความสามารถและความยืดหยุ่นเพียงพอสำหรับออกแบบระบบการถอดลายน้ำแบบเวลาจริง



รูปที่ 4.7 แผนภาพการถอดลายน้ําแบบเวลาจริง

4.4 สรุป

จากการวิเคราะห์ที่ผ่านมาจะสามารถถอดออกแบบอัลกอริทึมได้ โดยพิจารณาทางด้านวงจร อุปกรณ์ที่ใช้ และวิธีการบันทึกข้อมูลในหน่วยหน่วยความจำ กระบวนการทั้งหมดสามารถเขียนอัลกอริทึมได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.8 อัลกอริทึมการถอดลายน้ําแบบเวลาจริง

จากอัลกอริทึมข้างต้นจะทำงานภาพได้เร็วขึ้นโดยใช้การแปลงข้อมูลจากสัญญาณขาเข้าในรูปแบบ PCM 16 Bits 48KHz ฝั่งโดยใช้ภาพลายน้ำไปนาฬิกาขนาด 64x64 พิกเซล และขนาดของ Windows เท่ากับ 64 จุด การทำงานจะทำทุก Sampling ข้อมูลที่เข้ามาจะถูกเก็บเข้าสู่หน่วยความจำขนาด 16 Bits ทั้งหมด 4 ชุด เนื่องจากการแปลงเวฟเล็ทจะใช้ข้อมูล 4 Sampling เพื่อแปลงเวฟเล็ท 2 ระดับ และเมื่อแปลงเวฟเล็ทแล้วจะนำข้อมูลที่ได้ออกมาเก็บไว้ในแหล่งบันทึกข้อมูลที่มีขนาด 64 Bits ทั้งหมด 64 ชุดตามขนาดของ Windows และทำการเปรียบเทียบข้อมูลโดยแบ่งเป็นสองส่วน และเปรียบเทียบกันเพื่อตัดสินใจว่าจะเป็น Bit '0' หรือ Bit '1'

ข้อมูลภาพลายน้ำที่ได้จากการตัดสินใจจะถูกส่งเข้าเก็บไว้ในหน่วยความจำซึ่งได้ออกแบบตามเทคนิคที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.3 ซึ่งจะเก็บข้อมูล Pixel ที่ได้ให้ครบทั้ง 256 ภาพ (ที่หน้าต่างเท่ากับ 64 จุด) ก่อนที่จะเปลี่ยนไปเก็บใน Pixel ถัดไปโดยเริ่มที่หน่วยความจำภาพลายน้ำภาพแรกเมื่อเก็บข้อมูลได้ทั้งหมด 256 ภาพ ครบทุกพิกเซลจะนำข้อมูลทั้งหมดเปรียบเทียบกับภาพลายน้ำต้นฉบับและส่งข้อมูลภาพลายน้ำที่ค่าความถูกต้องดีที่สุดเข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อแสดงผลบนจอมอนิเตอร์ให้ผู้ใช้งานได้รับทราบ จากนั้นจะวนกลับไปทำงานในรอบใหม่โดยใช้กระบวนการเดิม



บทที่ 5

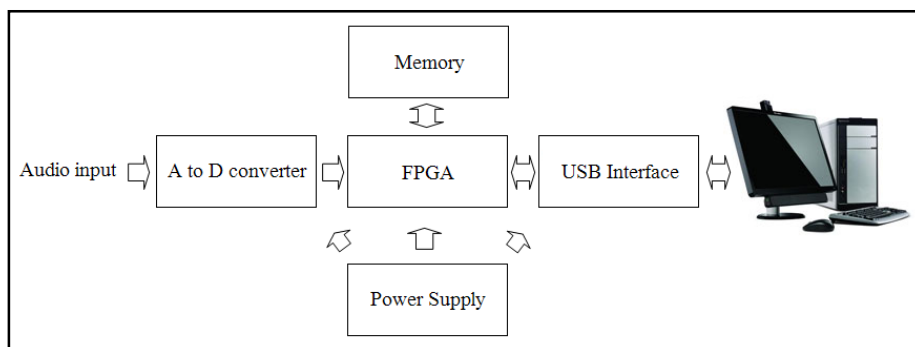
การออกแบบทางฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์

5.1 กล่าวนำ

ในการทำงานของวงจรถอดลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัลสามารถแยกออกได้เป็นสองส่วน นั่นก็คือ ส่วนฮาร์ดแวร์ซึ่งเป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ และส่วนซอฟต์แวร์ซึ่งเป็นโปรแกรมประมวลผลสัญญาณและแสดงผลของการถอดลายน้ำ ทั้งในส่วนที่ทำงานบนวงจรและในส่วนของการแสดงผลโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ โดยหัวใจหลักที่งานวิจัยชิ้นนี้ได้เลือกใช้คือ Field programmable gate array (FPGA) ซึ่งมีการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภาครับสัญญาณเข้าในรูปแบบของ PCM โดยใช้ชิพ PCM1808 ที่สามารถรับสัญญาณเสียงเข้าและแปลงออกเป็นข้อมูลดิจิทัลในรูปแบบ PCM 16 bits 48 KHz sampling ซึ่งเป็นรูปแบบมาตรฐานของข้อมูลสัญญาณเสียงที่ใช้ในงานวิจัยชิ้นนี้ ส่วนทางภาคส่งข้อมูลภาพลายน้ำขาออกได้ออกแบบโดยการใช้ชิพ FT245RL ซึ่งเป็นชิพที่มีหน้าที่เชื่อมต่อเครื่องคอมพิวเตอร์กับวงจรภายนอกผ่าน Universal serial bus (USB) ซึ่งทั้งหมดได้มีการจัดการตามที่ได้กล่าวในบทนี้

5.2 วงจรการถอดลายน้ำดิจิทัล

วงจรการถอดลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัลประกอบไปด้วย ภาครับสัญญาณเสียง หน่วยประมวลผลกลาง หน่วยความจำ และภาคส่งข้อมูลเข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งสามารถแสดงเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังต่อไปนี้

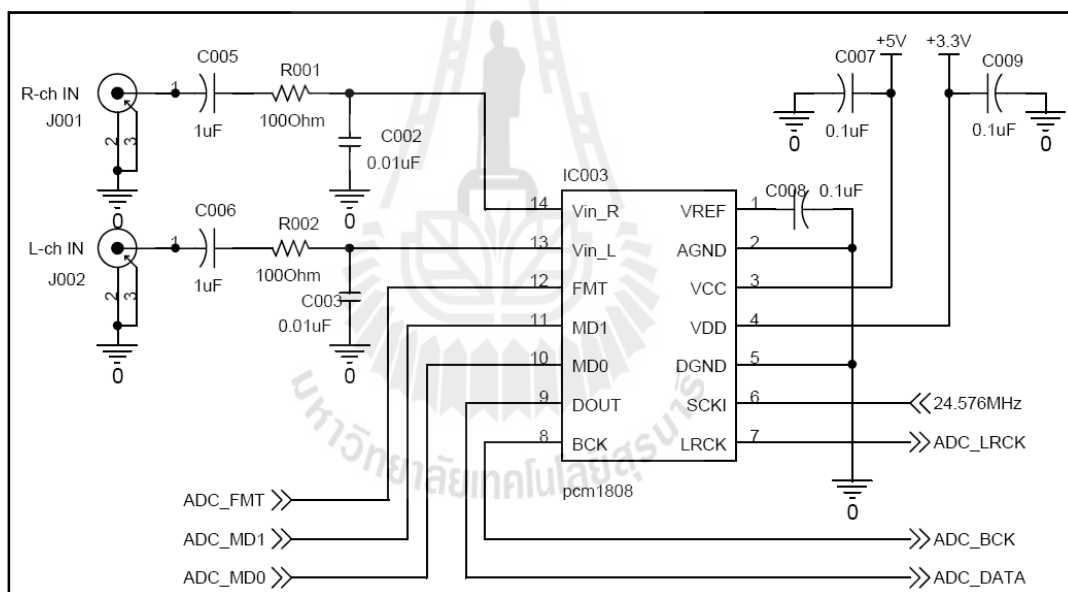


รูปที่ 5.1 แผนภาพวงจรถอดลายน้ำดิจิทัล

ในบล็อกไดอะแกรมสัญญาณขาเข้าซึ่งเป็นสัญญาณแอนะล็อกจะเข้าสู่กระบวนการแปลงแบบ PCM (Pulse code modulation) เป็นข้อมูลดิจิทัลในรูปแบบ PCM 16 Bits 48KHz และจะส่งเข้าสู่หน่วยประมวลผลกลางที่ใช้ชิพ FPGA ทำหน้าที่ถอดคลายน้ําและส่งภาพคลายน้ําที่มีค่าความถูกต้องที่สุดเข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์ผ่านพอร์ต USB เพื่อแสดงผลทางหน้าจอมอนิเตอร์ และการทำงานของวงจรทั้งหมดจะอาศัยแหล่งจ่ายพลังงานจากวงจรรักษาระดับแรงดันทั้งหมด 4 ระดับคือ +5V +3.3V +2.5V +1.2V ซึ่งรายละเอียดของวงจรจะแสดงในหัวข้อถัดไป

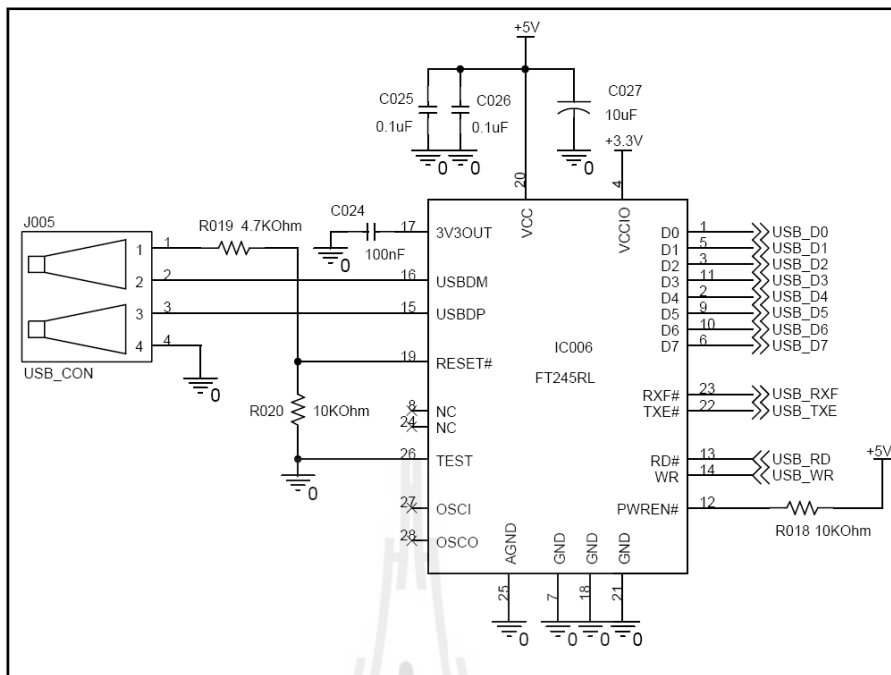
5.3 วงจรภาค Input Output

ในวงจรภาครับส่งจะมีอยู่สองส่วนคือภาพรับสัญญาณเสียงและเปลี่ยนเป็น PCM และส่งข้อมูลภาพคลายน้ําเข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์ผ่าน USB



รูปที่ 5.2 วงจรภาครับสัญญาณเสียงโดยใช้ PCM1808

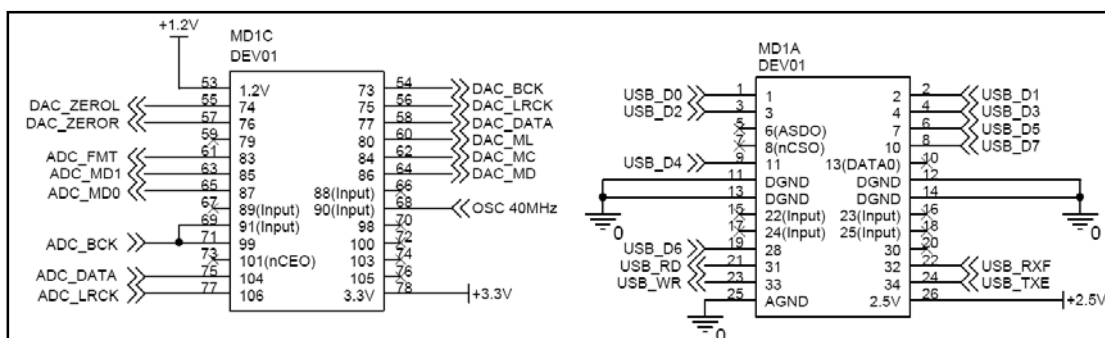
ในวงจรรูปที่ 5.2 แสดงการเชื่อมต่อของชิพ PCM1808 ซึ่งเป็นวงจรแปลงสัญญาณเสียงในรูปแอนะล็อกเป็นข้อมูลสัญญาณดิจิทัลแบบ PCM โดยสัญญาณขาเข้าจะรับสัญญาณเสียงได้ไม่เกิน 3 Vp-p และสามารถดำเนินการได้ในช่วง 8KHz ถึง 96KHz Sampling ซึ่งจะสามารเลือกทำงานได้ที่ 48KHz ทำงานโดยอาศัยการกระตุ้นด้วยสัญญาณนาฬิกาความถี่ 24.576MHz และส่งถ่ายข้อมูลดิจิทัลที่ได้เข้าสู่ชิพ FPGA ด้วยระดับแรงดัน 0 ถึง 3.3V วงจรนี้ไม่จำเป็นต้องมีวงจรคั่นกลางระหว่างสัญญาณอินพุตกับตัวชิพเพราะชิพได้ออกแบบมาในรูปแบบของ Single-Ended



รูปที่ 5.3 วงจรเชื่อมต่อผ่าน USB ด้วยชิพ FT245RL

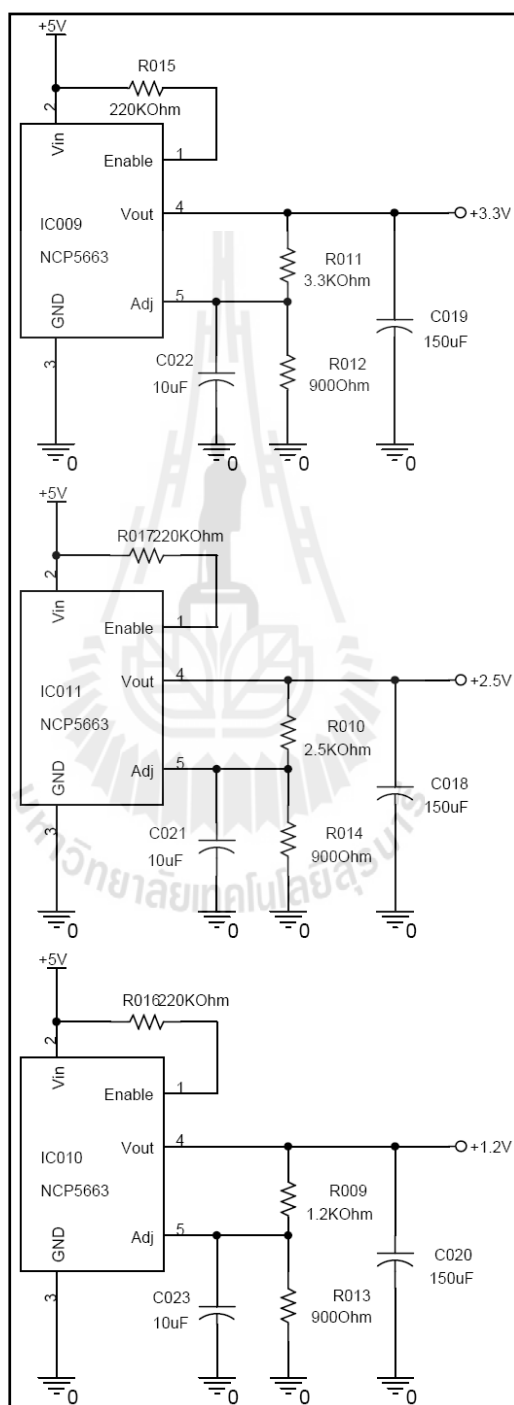
5.4 วงจรหน่วยประมวลผลกลางและแหล่งจ่ายพลังงาน

หน่วยประมวลผลกลางใช้ชิพ FPGA เบอร์ EP3C5E144C8N ซึ่งเป็นชิพ FPGA ของบริษัท ALTERA รุ่น Cyclone III มีจำนวนของชิ้นส่วน Logic อยู่ที่ 5,136 Logic elements มีหน่วยความจำ (RAM) ในตัว 423,936 Bits การทำงานของชิพ FPGA จะอาศัยการเขียนโปรแกรมเพื่อทำการตั้งเครื่องจักรก่อนที่จะโปรแกรมให้ชิพทำงานตามโปรแกรมที่ได้ออกแบบไว้ และจะเชื่อมต่อกับวงจรในภาคต่างๆ เข้ากับชิพ FPGA ตามรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 การเชื่อมต่อ FPGA เข้ากับภาค Input Output และหน่วยความจำ

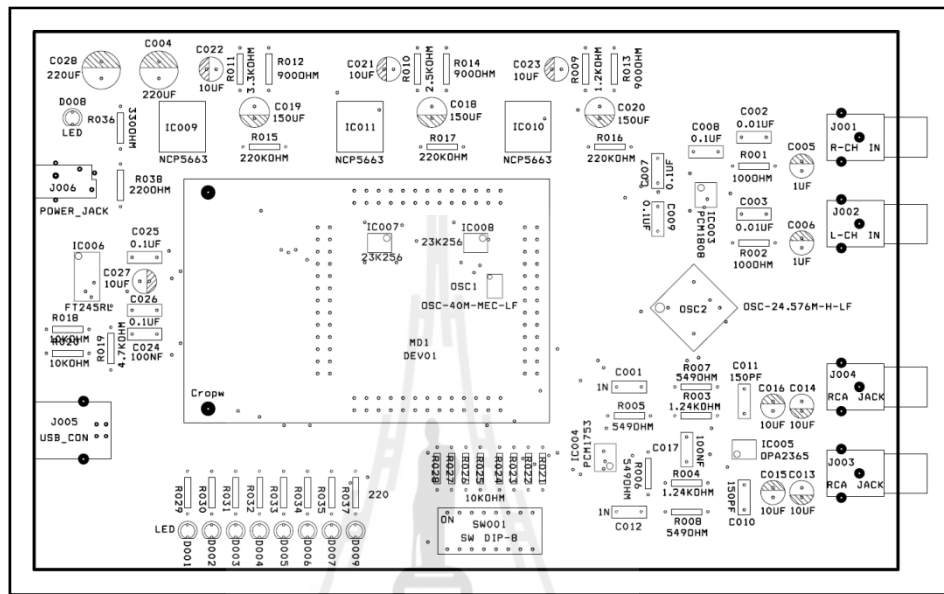
ในการทำงานของวงจรจะต้องอาศัยพลังงานจากแหล่งจ่าย 4 ระดับคือ +5V +3.3V +2.5V +1.2V ซึ่งได้ออกแบบโดยอาศัยชิพ NCP5663 ในการแบ่งแรงดันจากแหล่งจ่ายหลักที่ +5V ออกเป็นระดับแรงดันที่น้อยๆ ดังกล่าวข้างต้น



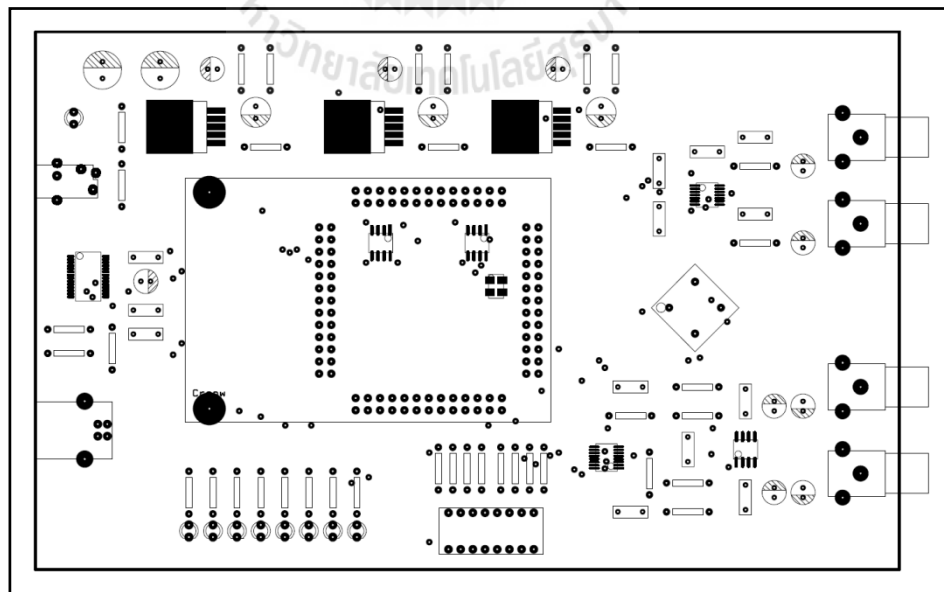
รูปที่ 5.5 วงจรแหล่งจ่ายแรงดันในวงจรถอดคลายน้ำ

5.5 แผ่นวงจรฮาร์ดแวร์

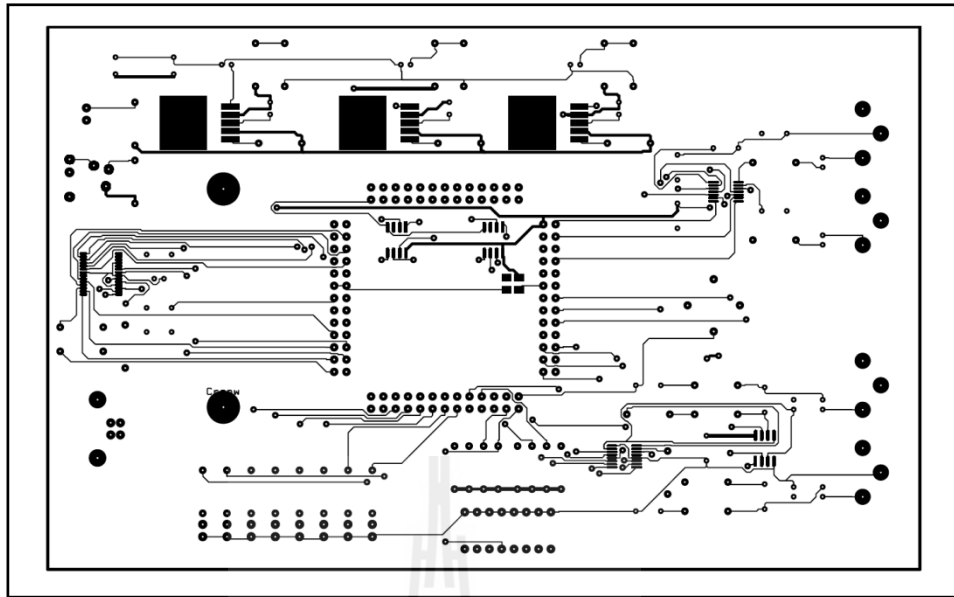
แผ่นวงจรที่ได้จากการออกแบบโดยโปรแกรมสร้างลายวงจร ซึ่งมีการออกแบบแผ่น PCB แบบสองหน้าตามรูปที่ 5.6 ถึง 5.9 เมื่อประกอบวงจรสมบูรณ์แล้วจะได้วงจรดังรูปที่ 5.10 ถึง 5.13



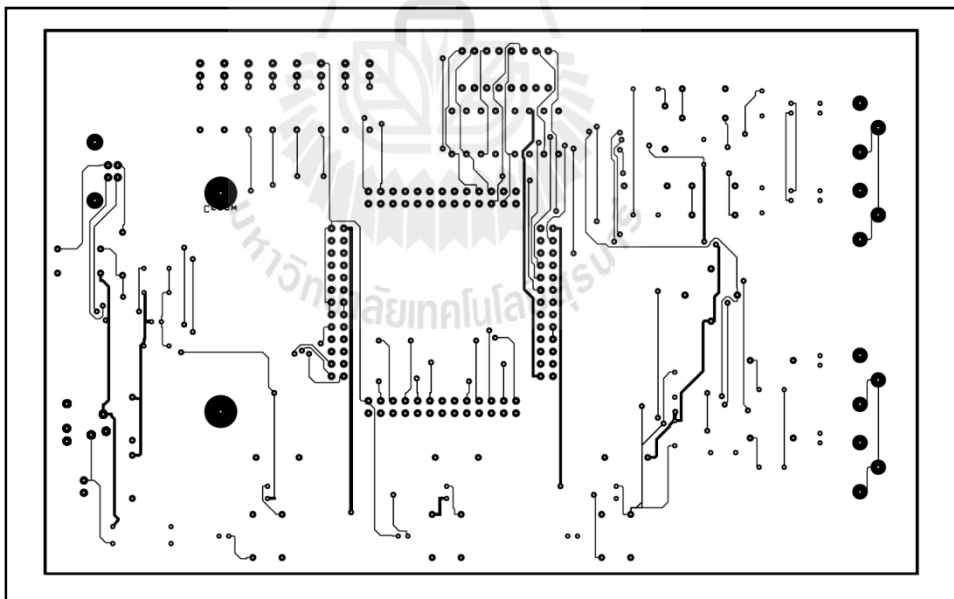
รูปที่ 5.6 ตำแหน่งการวางอุปกรณ์บนแผ่น PCB



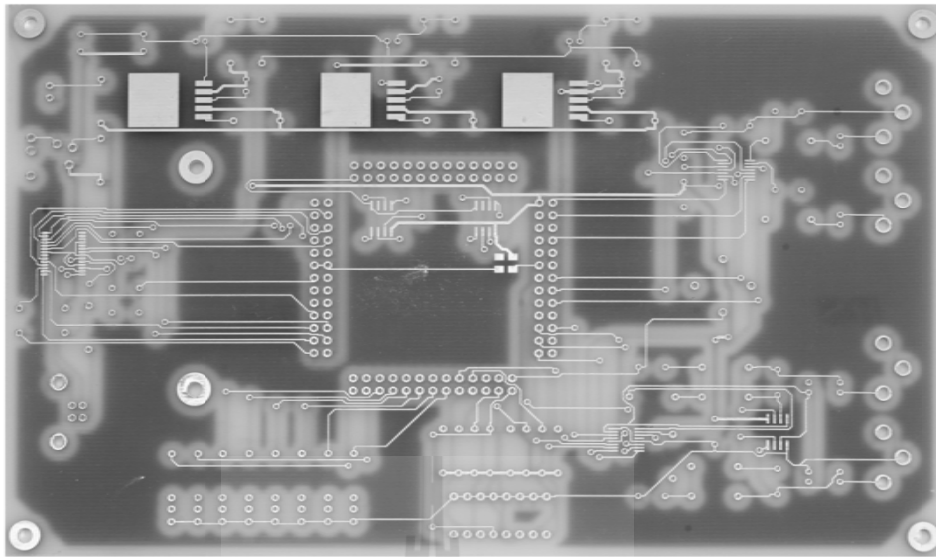
รูปที่ 5.7 ตำแหน่งบัดกรีอุปกรณ์ลงบนแผ่น PCB



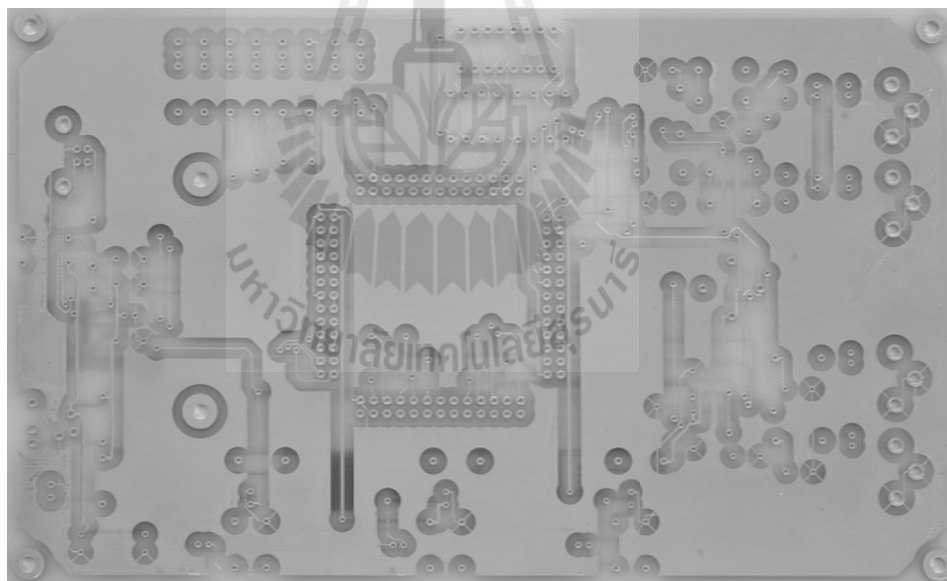
รูปที่ 5.8 ลายทองแดงของวงจรด้านบน



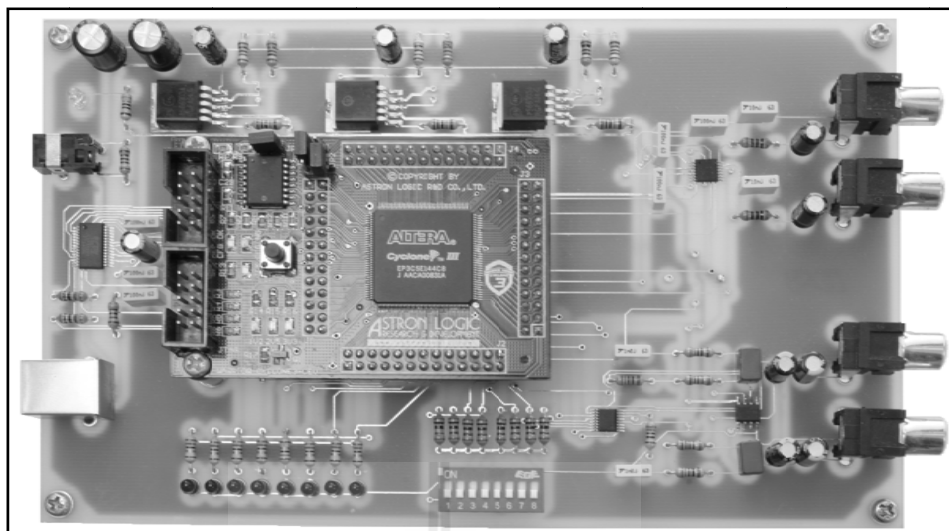
รูปที่ 5.9 ลายทองแดงของวงจรด้านล่าง



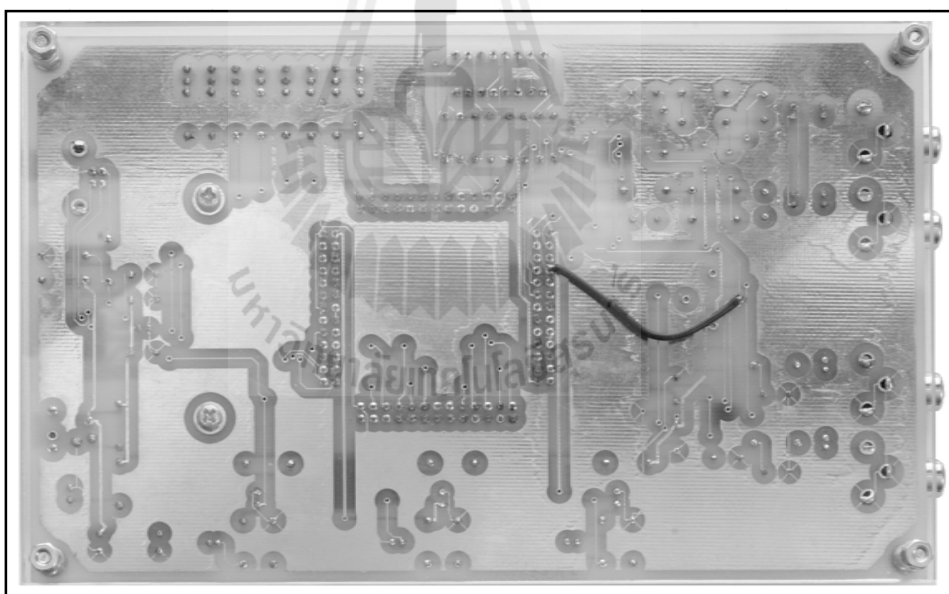
รูปที่ 5.10 แผ่นทองแดงด้านบนเมื่อกัดเสร็จแล้ว



รูปที่ 5.11 แผ่นทองแดงด้านล่างเมื่อกัดเสร็จแล้ว



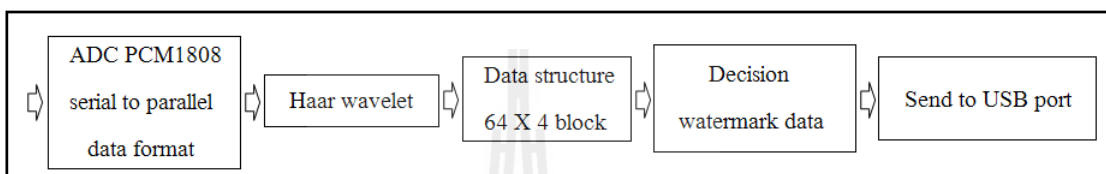
รูปที่ 5.12 วงจรด้านบนเมื่อประกอบเสร็จสมบูรณ์



รูปที่ 5.13 วงจรด้านล่างเมื่อประกอบเสร็จสมบูรณ์

5.6 โปรแกรมการถอดลายน้ำโดยอุปกรณ์ FPGA

โปรแกรมในส่วนของวงจรถอดลายน้ำจะทำงานตามแผนภาพในรูปที่ 5.14 โดยเริ่มจากส่วนของการรับข้อมูลสัญญาณเสียงจากภาครับสัญญาณเสียง PCM1808 เมื่อได้ข้อมูลสัญญาณเสียงก็จะถูกส่งให้ส่วนของการแปลงเวฟเล็ตก่อนเข้าสู่ขั้นตอนของการเก็บข้อมูลก่อนการเปรียบเทียบข้อมูลลายน้ำ บิต '1' หรือ '0' และขั้นตอนสุดท้ายจะทำการจัดการข้อมูลก่อนส่งผ่านการเชื่อมต่อ USB เพื่อส่งเข้าเครื่องคอมพิวเตอร์

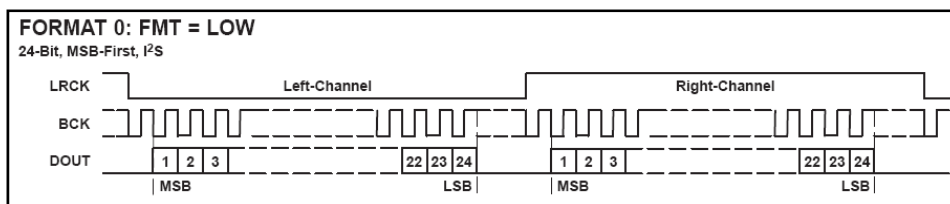


รูปที่ 5.14 แผนภาพการถอดลายน้ำโดยอุปกรณ์ FPGA

ในการรับข้อมูลจากวงจร PCM1808 จะต้องมีการควบคุมการทำงานของวงจรซึ่งมีขาควบคุมสองส่วน คือขา FMT ใช้ในการกำหนดรูปแบบการส่งข้อมูล ขา MD1 และ MD0 ใช้ในการกำหนดโหมดการทำงานพร้อมทั้ง กำหนดความถี่ของการซิกตัวอย่าง (Sampling frequency)

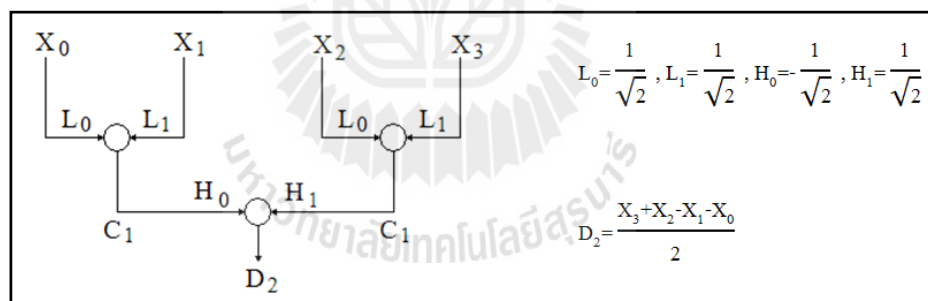
ตารางที่ 5.1 การกำหนดขาควบคุมการทำงานของ PCM1808

MD1 (Pin 11)	MD0 (Pin 10)	INTERFACE MODE
Low	Low	Slave mode (256 f _s , 384 f _s , 512 f _s auto detection)
Low	High	Master mode (512 f _s)
High	Low	Master mode (384 f _s)
High	High	Master mode (256 f _s)
FORMAT N0.	FMT (Pin 12)	FORMAT
0	Low	I ² S, 24-bit
1	High	Left-justified, 24-bit

รูปที่ 5.15 มาตรฐานการส่งข้อมูลแบบ I²S 24 bit

การกำหนดค่าการทำงานจะกำหนดให้วงจรทำงานที่ความถี่ Sampling 48KHz และกำหนดให้มีการส่งถ่ายข้อมูลแบบ I²S 24 bit ดังนั้นการทำงานของโปรแกรมในส่วนนี้จึงเป็นการแปลงข้อมูลจากรูปแบบอนุกรมมาเป็นแบบขนานเพื่อส่งให้กับโปรแกรมแปลงเวฟเล็ด

ในการแปลงเวฟเล็ดแบบ Haar wavelet ใช้ค่าสัมประสิทธิ์สองชุดคือ $L_{0,1}$ และ $H_{0,1}$ ในการแปลงเวฟเล็ดสองระดับ โดยในระดับแรกจะนำเอาค่า C_1 ซึ่งเป็นกลุ่มข้อมูลในย่านความถี่ต่ำมาแยกเอาค่า D_2 จะทำให้ได้กลุ่มข้อมูลในย่านความถี่กลางก่อนไปทางต่ำซึ่งเป็นกลุ่มที่มีลายน้ำฝังอยู่ ผลที่ได้จะถูกส่งเข้าสู่ขั้นตอนการเก็บในหน่วยความจำก่อนนำไปใช้ในการตัดสินใจค่าข้อมูลบิตของลายน้ำ

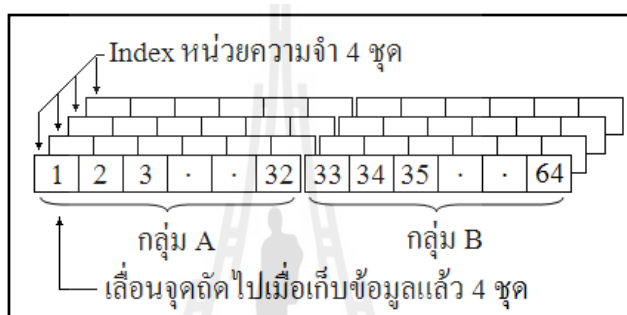


รูปที่ 5.16 การแยกย่านความถี่กลางก่อนไปทางความถี่ต่ำโดยวิธีการของ Haar wavelet

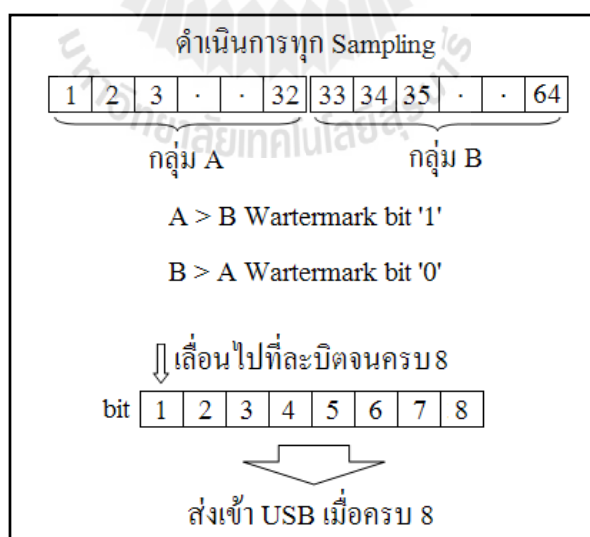
ก่อนการตัดสินใจข้อมูลบิตของลายน้ำจะต้องการจัดกลุ่มข้อมูลเพื่อใช้ในการตัดสินใจเนื่องการถอดลายน้ำด้วยการค้นหาที่ละจุด Sampling ข้อมูลลายน้ำที่ถูกต้องจะปรากฏขึ้นเมื่อครบรอบ 4 จุด Sampling ซึ่งได้อธิบายในหัวข้อ 4.2 ที่ผ่านมา ดังนั้นข้อมูลที่จะนำมาจัดเรียงเพื่อให้ได้ขนาดของหน้าต่าง 64 จุด จึงต้องจัดออกเป็นกลุ่มข้อมูล 4 กลุ่ม ก่อนเข้าขั้นตอนการตัดสินใจตามอัลกอริทึมที่ใช้ในงานวิจัยชิ้นนี้ ซึ่งจะมีการตัดสินใจจะดำเนินการทีละกลุ่มด้วยการแบ่งข้อมูลออกเป็นสองส่วนขนาด 32 จุดข้อมูลกำหนดเป็นกลุ่ม A และกลุ่ม B เปรียบเทียบกันระหว่างสองกลุ่มตามเงื่อนไขที่ได้กำหนดขึ้น เช่น ขนาดของกลุ่ม A มากกว่า B ให้เป็นลายน้ำบิต '1' และถ้า

ขนาดของ B มากกว่า A ให้เป็นบิต '0' เมื่อได้ข้อมูลบิตหลายน้ำแล้วจึงเข้าสู่ขั้นตอนการส่งข้อมูลเข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์ผ่านช่องสัญญาณการเชื่อมต่อแบบ USB

อย่างไรก็ตามก่อนที่จะส่งข้อมูลบิตที่ได้เข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์ จะต้องรอให้ข้อมูลของบิตหลายน้ำครบทั้ง 8 บิตก่อน เนื่องจากการส่งข้อมูลผ่านช่องทาง USB จะต้องส่งข้อมูลขนาด 8 บิต ด้วยเหตุนี้ความเร็วในการส่งข้อมูลจึงมีค่าเท่ากับ 6 Kbyte ต่อวินาที หรือข้อมูล 8 บิตจะถูกส่งเข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์เมื่อครบรอบที่ละ 4 จุด Sampling อย่างต่อเนื่อง เป็นการเสร็จสิ้นขั้นตอนทางด้านโปรแกรมภายนอกที่ใช้อุปกรณ์ FPGA เป็นตัวประมวลผลหลัก



รูปที่ 5.17 อัลกอริทึมการจัดเรียงข้อมูล 4 กลุ่มภายหลังการแปลงเวฟเล็ด

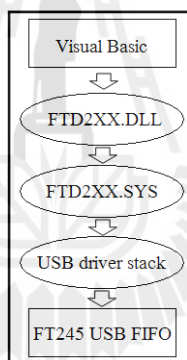


รูปที่ 5.18 การจัดเรียงข้อมูล 8 บิตก่อนส่งผ่านช่องสัญญาณการเชื่อมต่อแบบ USB

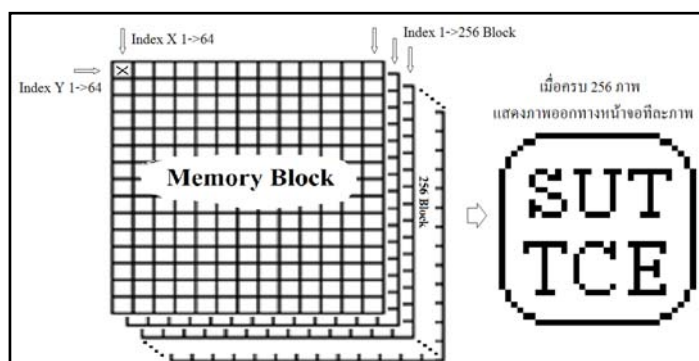
5.7 โปรแกรมแสดงผลการถอดลายน้ำด้วยคอมพิวเตอร์

ในการแสดงผลการถอดลายน้ำโดยใช้คอมพิวเตอร์เป็นตัวประมวลผลหลักจะต้องทำการเขียนโปรแกรม Visual basic จัดการกับข้อมูลที่ส่งมาจากอุปกรณ์ FPGA โดยการรับข้อมูลผ่านช่องทาง USB ในการเขียนจะใช้โมดูล D2XX ซึ่งพัฒนาขึ้นโดยบริษัท Future technology devices international ltd (FTDI) เพื่อเป็นโมดูลที่ใช้ในการเชื่อมต่อโดยตรงกับตัวจัดการการสื่อสารผ่านช่องทาง USB ด้วยชิพ FT245RL

ข้อมูลที่ได้มาจะทำการจัดเรียงใหม่เพื่อให้ได้ภาพลายน้ำในรูปแบบข้อมูล 2 มิติ แต่เนื่องจากข้อมูลบิตลายน้ำที่ส่งมาในแต่ละบิตจะเป็นข้อมูลลายน้ำ 1 จุดของภาพที่เรียงต่อกันรอบละ 256 จุด ก่อนจะเป็นบิตลายน้ำในจุดถัดไปของภาพลายน้ำที่มีขนาด 64x64 พิกเซล การจัดเรียงดังกล่าวจะทำให้เกิดภาพลายน้ำทั้งหมด 256 ภาพตามรูปที่ 5.20 เมื่อได้ภาพลายน้ำมาแล้วทั้งหมดแล้วจึงแสดงผลภาพลายน้ำออกทางหน้าจอคอมพิวเตอร์

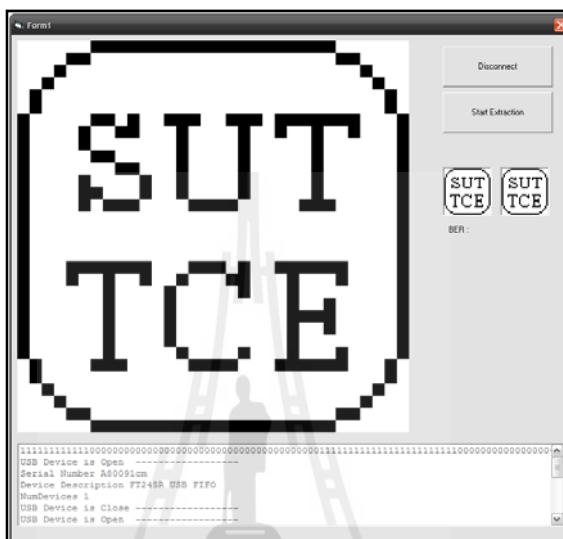


รูปที่ 5.19 แบบจำลองของโมดูล D2XX



รูปที่ 5.20 อัลกอริทึมการจัดเรียงภาพลายน้ำ 256 ภาพ

ส่วนของโปรแกรมการใช้งาน ได้ทำการออกแบบโปรแกรมให้มีปุ่มกดสำหรับใช้ในการเชื่อมต่อและเริ่มการอ่านข้อมูลจากพอร์ต USB นอกจากนี้ยังมีส่วนที่ใช้ในการแสดงผลเพื่อใช้ในการแสดงภาพลายน้ำที่ได้ในหน่วยความจำที่ถูกจัดเรียงเรียบร้อยแล้วทีละภาพโดยมีหน้าต่างโปรแกรมแสดงในรูปที่ 5.21



รูปที่ 5.21 โปรแกรมที่ใช้ในการแสดงผลการถอดลายน้ำแบบเวลาจริง

5.8 สรุป

บทนี้นำเสนอการออกแบบฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์สำหรับการถอดลายน้ำแบบเวลาจริง ในการออกแบบในส่วนฮาร์ดแวร์ จะเริ่มต้นทำงานด้วยการเปลี่ยนสัญญาณเสียงแอนะล็อกเป็นดิจิทัลด้วยชิพ PCM1808 จากนั้นสัญญาณเสียงจะถูกประมวลผลในชิพ FPGA ตามกระบวนการถอดลายน้ำที่ได้ออกแบบขึ้น และส่งลายน้ำที่ได้ไปแสดงผลออกทางคอมพิวเตอร์ผ่านพอร์ต USB ด้วยชิพ FT245RL ส่วนโปรแกรมการถอดลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัล มีด้วยกันอยู่สองส่วน คือ โปรแกรมที่ใช้ในส่วนของวงจร โดยใช้โปรแกรมภาษา Very-high-speed integrated circuits hardware description language (VHDL) ทำงานร่วมกับ Block diagram design บนโปรแกรม Quartus II Version 8.1 ของบริษัท Altera corporation ซึ่งเป็นบริษัทผลิตชิพ FPGA ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ และส่วนสุดท้ายโปรแกรมนำเสนอการแสดงผลลัพท์บนเครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งพัฒนาโปรแกรมโดยใช้ Visual basic ในการรับข้อมูลที่ได้จากวงจรผ่านการเชื่อมต่อทาง USB โดยข้อมูลที่รับมานั้น จะถูกทำการจัดเรียงและแสดงผลออกเป็นภาพลายน้ำทางหน้าจอคอมพิวเตอร์เพื่อตรวจสอบความถูกต้องในลักษณะของสัญญาณเสียงดิจิทัล

บทที่ 6

ผลการทำงานวงจรถอดลายน้ำแบบเวลาจริง

6.1 กล่าวนำ

ในการออกแบบอัลกอริทึมสำหรับการถอดลายน้ำแบบเวลาจริง จะดำเนินการออกแบบให้มีการทำงานของอัลกอริทึมที่ไม่สนใจจุดเริ่มต้นในการถอดลายน้ำหรือจุดเริ่มต้นของภาพลายน้ำที่ฝังอยู่ ซึ่งจะต้องทำการถอดลายน้ำทุกจุด Sampling ซึ่งผลที่ได้พบว่าทุกจุด Sampling ของสัญญาณเสียงจะปรากฏค่า BER ของภาพลายน้ำที่ถอดได้หนึ่งค่า ดังนั้นจึงต้องมีการทำงานของโปรแกรมที่เร็วมาก และก่อนที่ทำการทดลองโดยวงจร FPGA เพื่อประมวลผลแบบเวลาจริงได้ทำการจำลองการทำงานและแสดงผลโดยใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อพิสูจน์ถึงความถูกต้องของอัลกอริทึมที่ได้ออกแบบไว้

6.2 ผลการจำลองอัลกอริทึมโดยโปรแกรม MATLAB

เพื่อให้ทราบถึงความถูกต้องของอัลกอริทึม ผู้วิจัยได้จำลองการทำงานโดยโปรแกรม MATLAB ซึ่งในการจำลองผลดังกล่าวจะใช้รูปแบบเพลงตามตารางที่ 6.1 ทดสอบเสียงโดยใช้ค่า Alpha ในการทดสอบอยู่ที่ 1.357 ขนาดหน้าต่างเท่ากับ 64 ชนิดของข้อมูลสัญญาณเสียง PCM 48KHz 16Bits Mono ความยาวของเพลงประมาณ 1 นาที และภาพลายน้ำที่ทำการทดสอบมีขนาด 64X64 Pixel หรือ 4,096 บิต

6.2.1 การทดสอบคุณภาพของสัญญาณเสียง

ในการทดสอบคุณภาพเสียงได้ทำการฝังลายน้ำตามอัลกอริทึมที่ออกแบบขึ้นและคำนวณค่า SNR เทียบกับสัญญาณเสียงต้นฉบับ ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 6.1 โดยมีค่าเฉลี่ย SNR ที่ประมาณ 26.04365 dB ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานที่ IFPI กำหนด

นอกจากการทดสอบคุณภาพโดยการคำนวณ SNR แล้วยังได้ทำการทดสอบคุณภาพเสียงในห้องสตูดิโอของศูนย์นวัตกรรม และเทคโนโลยีการศึกษามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยใช้ผู้ร่วมประเมินคุณภาพเสียงจำนวน 6 คน ซึ่งมีรายละเอียดตามแบบทดสอบในภาคผนวก ก โดยมีเกณฑ์การประเมินคุณภาพเสียงแสดงในตารางที่ 6.2 และผลการประเมินแสดงในตารางที่ 6.3

ตารางที่ 6.1 ผลการทดสอบคุณภาพของสัญญาณที่ผ่านการฟังสัญญาณลายน้ำ

รูปแบบเพลง	SNR (dB)
Dance	26.7810
Pop	27.3661
Rock	23.3226
ลูกทุ่ง	27.9860
ขลุ่ยบรรเลง	27.5180
เซ็งโปงกลาง	23.2882
ค่าเฉลี่ย	26.04365

ตารางที่ 6.2 เกณฑ์การประเมินคุณภาพเสียง (Mean opinion score : MOS)

ระดับ	รายละเอียด
5	ดีมาก เสียงที่ได้เหมือนเสียงต้นฉบับ (Excellent)
4	ดี (Good)
3	พอใช้ (Fair)
2	มีการรบกวน (Poor)
1	มีการรบกวนมาก (Bad)

ตารางที่ 6.3 ผลการประเมินคุณภาพเสียง

รูปแบบเพลง	SNR (dB)	ผลการทดสอบ (คนที่/ผลประเมิน)						ค่าเฉลี่ย
		1	2	3	4	5	6	
Dance	26.7810	4	5	4	4	4	5	4.33
Pop	27.3661	5	4	3	4	5	4	4.17
Rock	23.3226	4	5	4	5	4	4	4.33
ลูกทุ่ง	27.9860	5	4	4	4	5	5	4.50
ขลุ่ยบรรเลง	27.5180	5	4	5	5	5	5	4.83
เซ็งโปงกลาง	23.2882	4	5	5	5	5	5	4.83

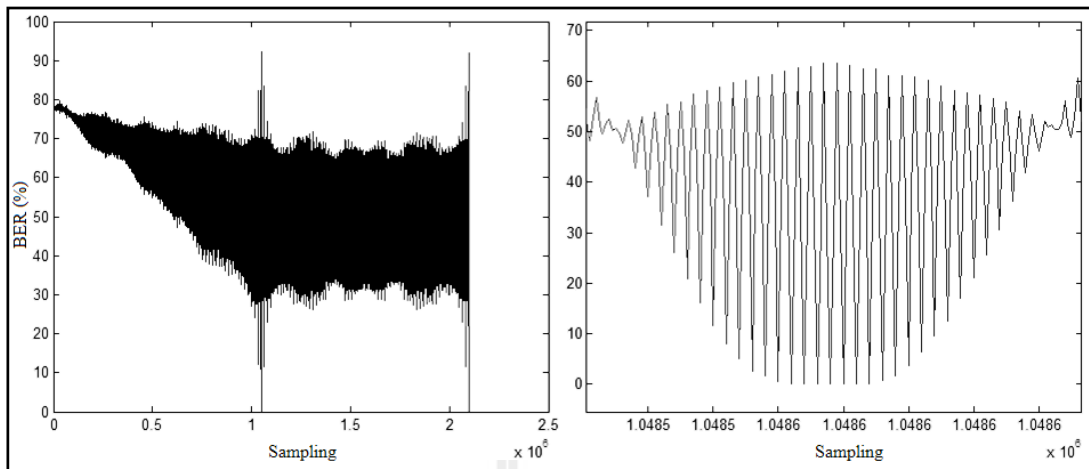
จากการทดลองนี้สามารถแสดงให้เห็นว่า การทำลายน้ำสัญญาณเสียงมีผลกระทบต่อเพลงในรูปแบบที่มีองค์ประกอบของสัญญาณเสียงที่มาก เช่นรูปแบบเพลง Dance Pop Rock ลูกทุ่ง ซึ่งทำให้คุณภาพของลายน้ำสัญญาณเสียงข้างต้นคือดีกว่ารูปแบบเพลงที่มีองค์ประกอบของสัญญาณเสียงที่น้อย แต่อย่างไรก็ดีผลค่าเฉลี่ยรวมของการประเมินสัญญาณเสียงเพลงในทุกรูปแบบ อยู่ที่ 4.498 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ระดับที่ดี (Good) ค่อนข้างดีหรือเสียงที่ได้เหมือนเสียงต้นฉบับ (Excellent)

6.2.2 การทดสอบความทนทานของสัญญาณลายน้ำ

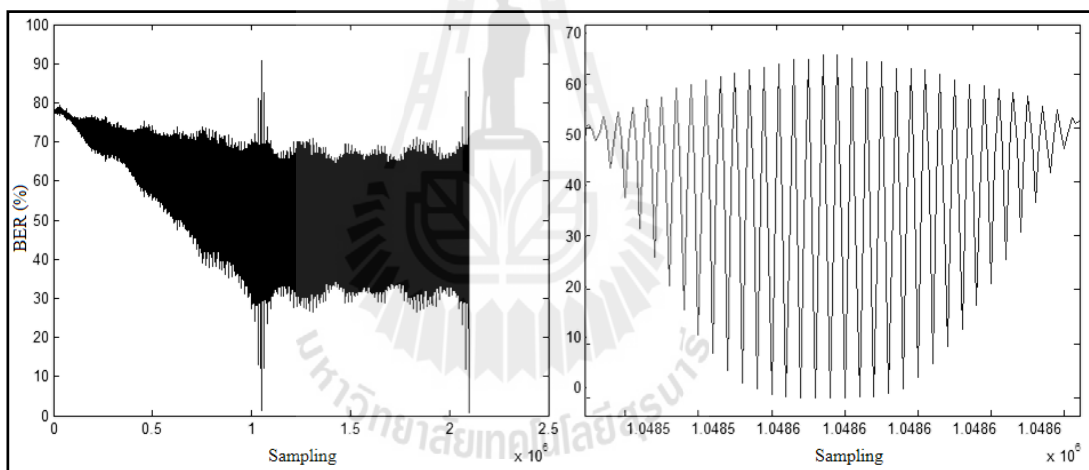
ผลการถอดลายน้ำในกรณีที่มีสัญญาณลายน้ำจริง โดยการทดลองใช้รูปแบบเพลง Pop ผ่านการโจมตีในรูปแบบต่างๆ ซึ่งสัญญาณลายน้ำมีการฝังภาพลายน้ำเป็นจำนวนสองภาพ ขนาด 64X64 Pixel หรือ 4,096 บิตค่า Alpha ในการทดสอบอยู่ที่ 1.357 ทำให้ได้ค่า SNR เท่ากับ 27.3661 dB จากผลการทดสอบที่แสดงอยู่ในรูปของกราฟค่า BER ในรูปที่ 6.1 ถึง 6.6 ทำให้ทราบว่าอัลกอริทึมสามารถค้นพบภาพลายน้ำเมื่อจำนวนจุด Sampling ผ่านไปจนเข้าถึงจำนวนทั้งหมดที่ใช้ฝังลายน้ำหนึ่งภาพ โดยคำนวณจุดที่ใช้ได้จาก จำนวน Pixel ภาพลายน้ำ 4,096 x ขนาดหน้าต่าง 64 x 4 มีค่าเท่ากับ 1,048,576 จุด

ตารางที่ 6.4 ผลการทดสอบความทนทานของสัญญาณลายน้ำจากการโจมตีแบบต่างๆ

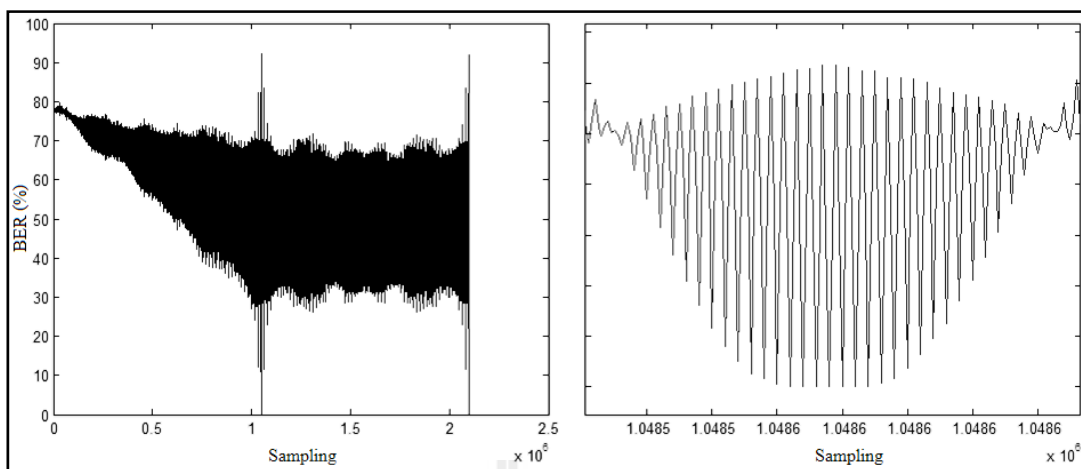
รูปแบบเพลง	BER (%)					
	No Attack	Noise Addition	High pass filter	Low pass filter	Compression MP3 64 Kbps	ADC&DAC
Dance	0.00000	0.58590	0.00000	3.78417	0.90332	0.00000
Pop	0.00000	0.46390	0.00000	2.92968	0.09765	0.00000
Rock	0.00000	0.00000	0.00000	0.63476	0.39062	0.00000
ลูกทุ่ง	0.00000	0.02440	0.00000	3.97949	0.02441	0.00000
ขลุ่ยบรรเลง	0.00000	0.78130	0.00000	4.41894	0.00000	0.00000
เซ็งโปงกลาง	0.00000	0.04880	0.00000	0.46386	0.14648	0.00000



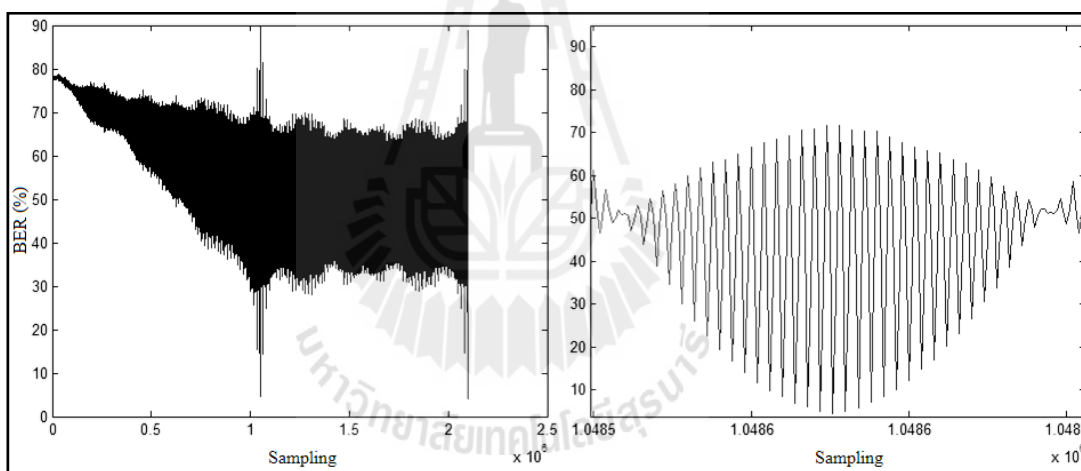
รูปที่ 6.1 กราฟค่า BER จากการถอดลายน้ำ แบบไม่มีการ โจมตี รูปแบบเพลง Pop



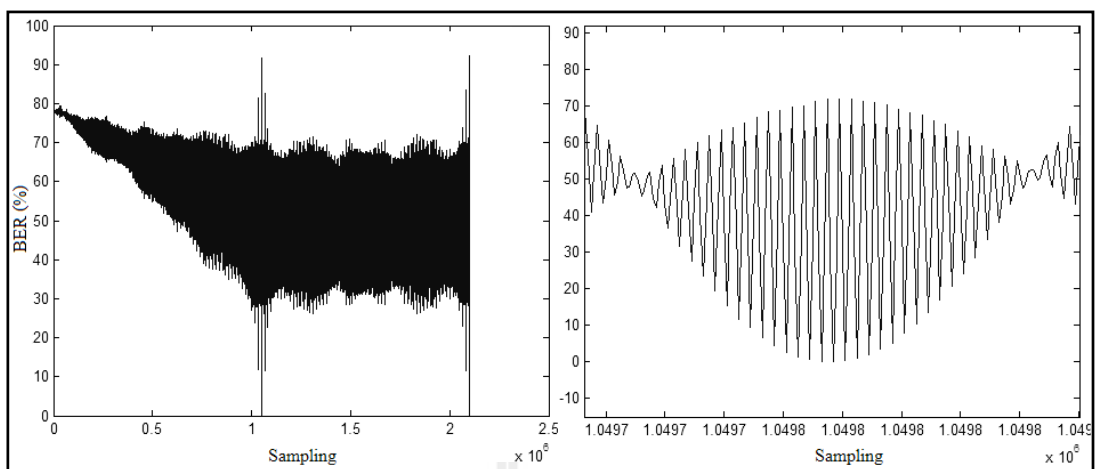
รูปที่ 6.2 กราฟค่า BER จากการถอดลายน้ำ โดยการ โจมตีแบบ Noise รูปแบบเพลง Pop



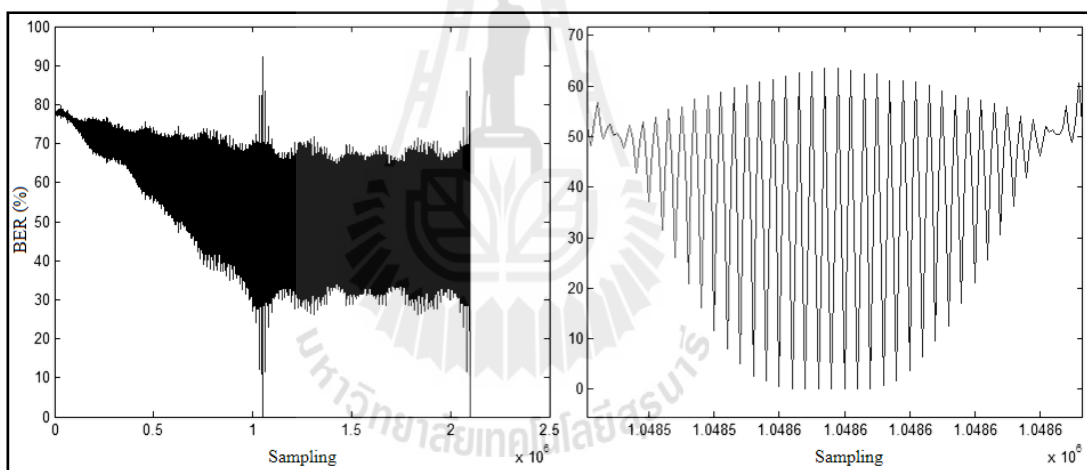
รูปที่ 6.3 กราฟค่า BER จากการถอดลายน้ำ โดยการโจมตีแบบ High pass รูปแบบเพลง Pop



รูปที่ 6.4 กราฟค่า BER จากการถอดลายน้ำ โดยการโจมตีแบบ Low pass รูปแบบเพลง Pop

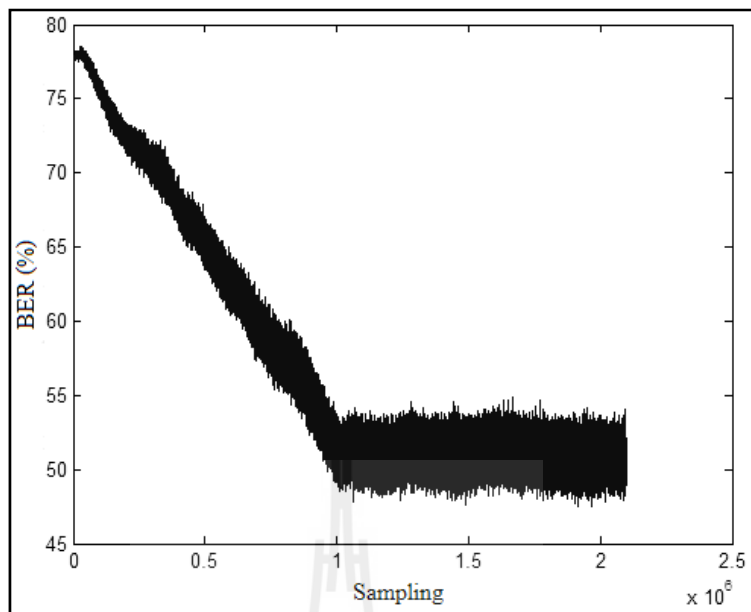


รูปที่ 6.5 กราฟค่า BER จากการถอดลายน้ำ โดยการ โจมตีแบบ MP3 รูปแบบเพลง Pop

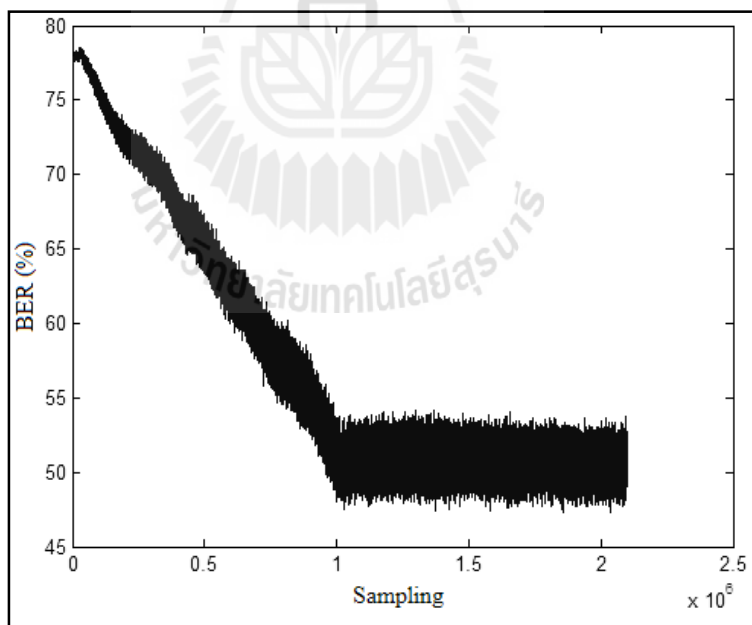


รูปที่ 6.6 กราฟค่า BER จากการถอดลายน้ำ โดยการ โจมตีแบบ ADC&DAC รูปแบบเพลง Pop

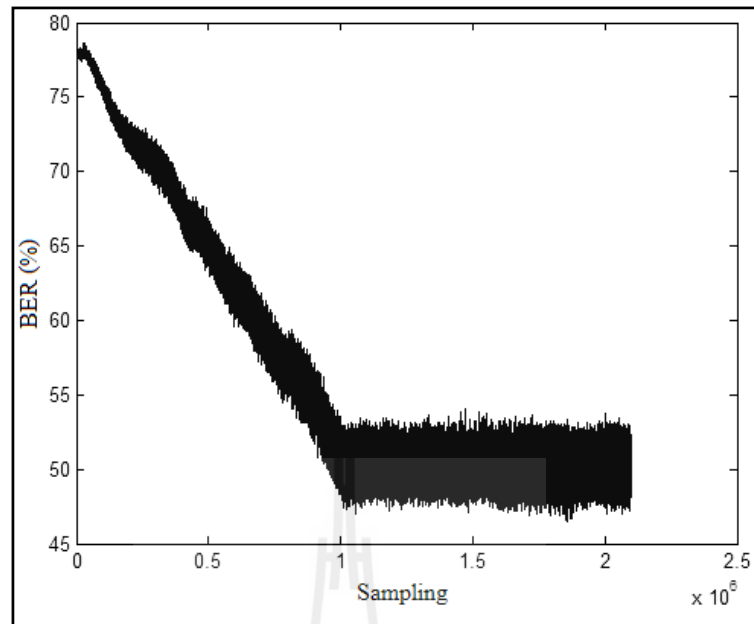
ผลการถอดลายน้ำในกรณีที่ไม่มีสัญญาณลายน้ำจริง ซึ่งในกรณีนี้จะใช้สัญญาณเสียงในแต่ละรูปแบบที่ไม่ได้ฝังลายน้ำ มาทำการทดสอบกับอัลกอริทึมการถอดลายน้ำในแบบเวลาจริง เพื่อสังเกตพฤติกรรมของค่า BER ผลลัพธ์ที่ได้แสดงในรูปที่ 6.7 ถึง 6.12



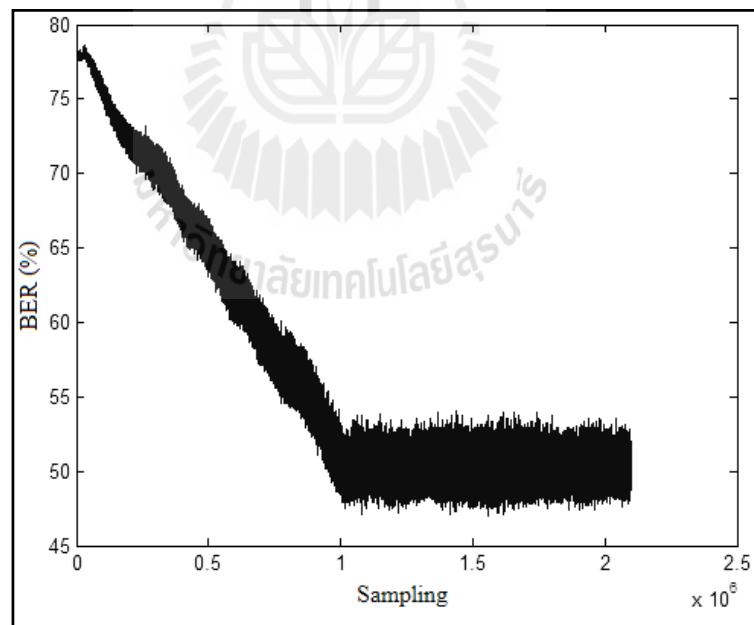
รูปที่ 6.7 กราฟค่า BER ในกรณีที่ไม่มีสัญญาณลายน้ําจริงด้วยรูปแบบเพลง Dance



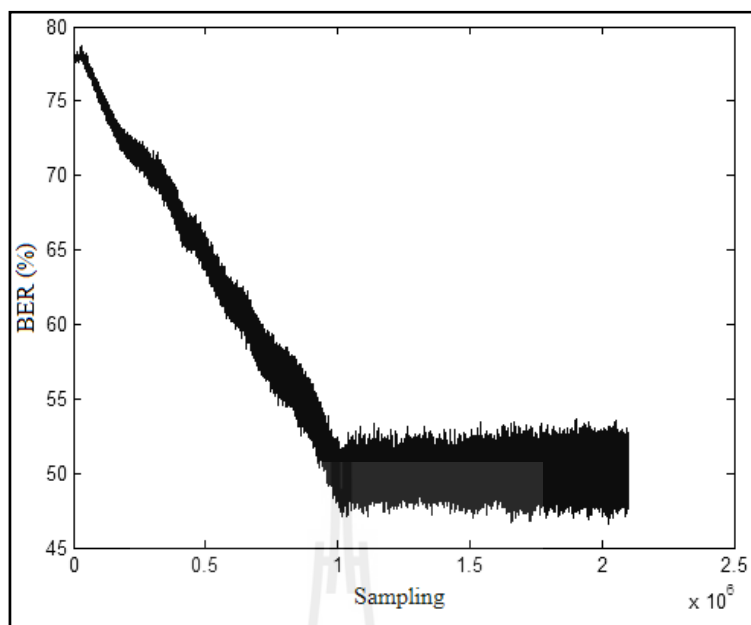
รูปที่ 6.8 กราฟค่า BER ในกรณีที่ไม่มีสัญญาณลายน้ําจริงด้วยรูปแบบเพลง Pop



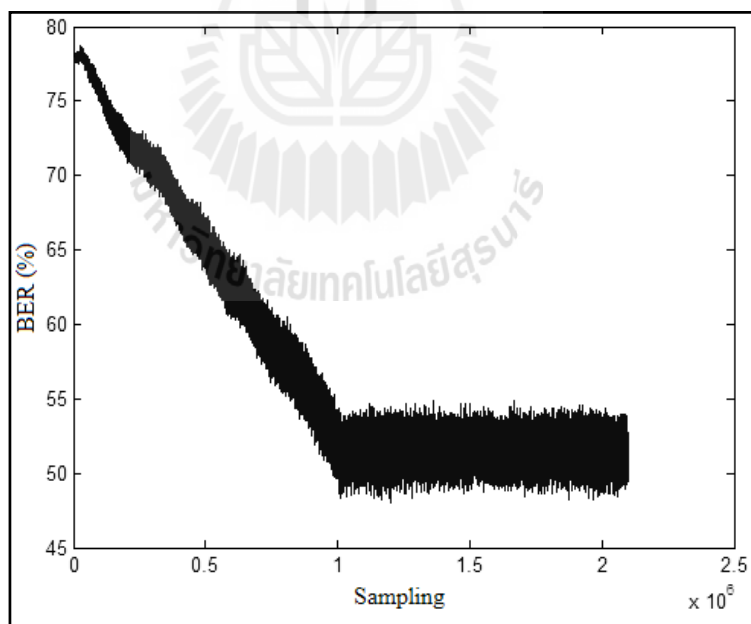
รูปที่ 6.9 กราฟค่า BER ในกรณีที่ไม่มีความผันผวนด้วยรูปแบบเพลง Rock



รูปที่ 6.10 กราฟค่า BER ในกรณีที่ไม่มีความผันผวนด้วยรูปแบบเพลงลูกทุ่ง



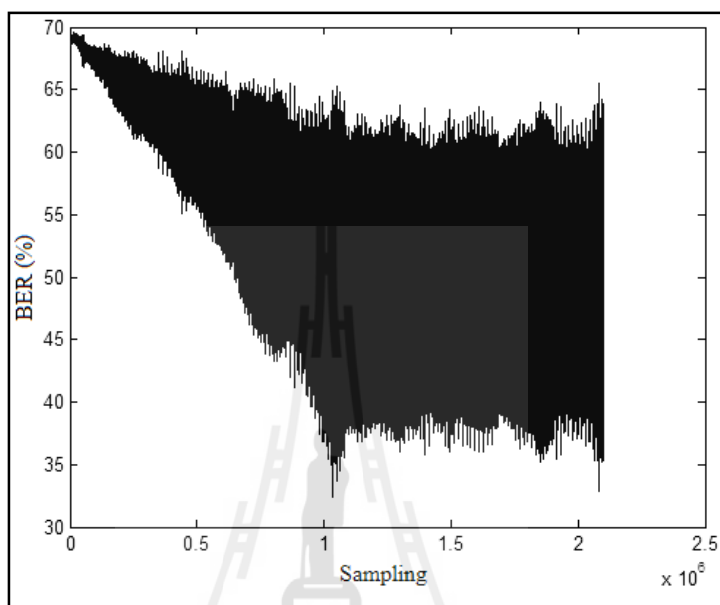
รูปที่ 6.11 กราฟค่า BER ในกรณีที่ไม่มีความคลาดเคลื่อนด้วยรูปแบบเพลงขลุ่ยบรรเลง



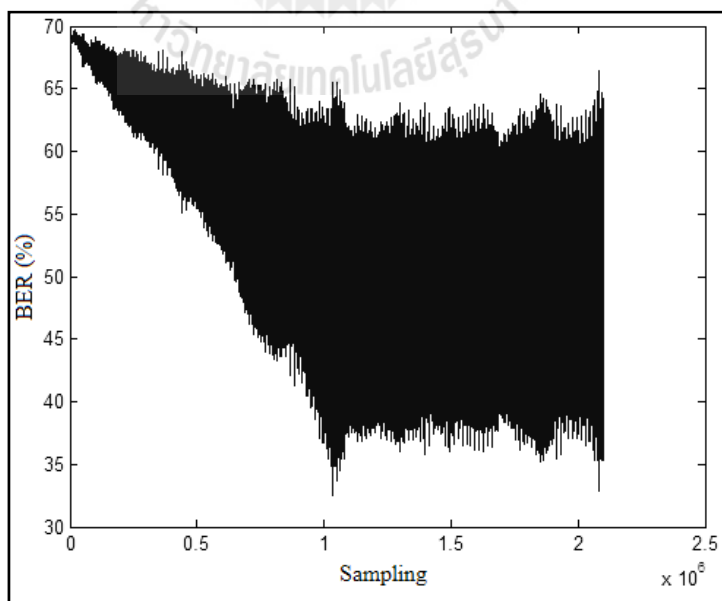
รูปที่ 6.12 กราฟค่า BER ในกรณีที่ไม่มีความคลาดเคลื่อนด้วยรูปแบบเพลงเชิงโปงลาง

ผลการถอดลายน้ำในกรณีที่มีสัญญาณลายน้ำแต่ไม่ใช่ลายน้ำที่ถูกต้อง ทั้งนี้เพื่อต้องการ ทดสอบว่าอัลกอริทึมที่คิดค้นขึ้นสามารถคัดแยกสัญญาณลายน้ำได้ถูกต้องหรือไม่ ถ้ามี

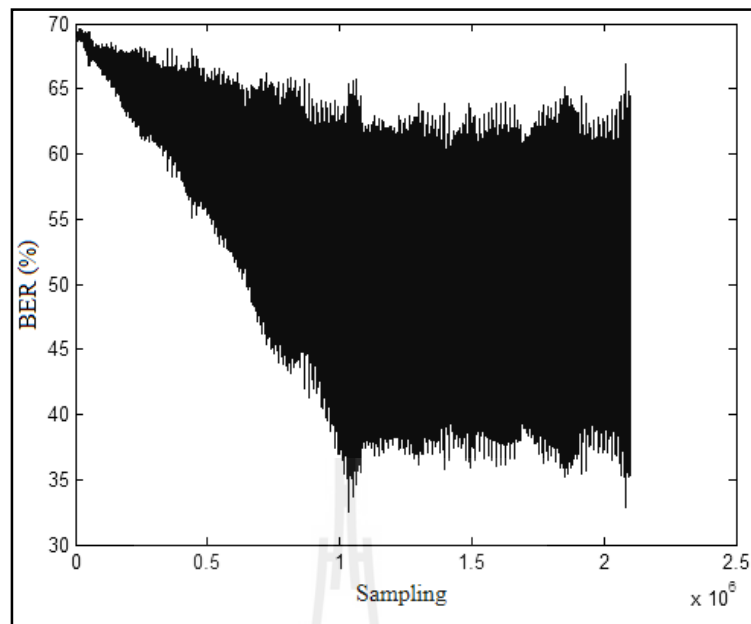
สัญญาณลายน้ำในสัญญาณเสียงที่กำลังทดสอบ แต่ไม่ใช่ลายน้ำที่กำลังค้นหา โปรแกรมจะต้องสามารถรายงานการตรวจจับลายน้ำได้ถูกต้องโดยไม่เกิดความคลาดเคลื่อนตามทฤษฎีการตรวจจับสัญญาณ (Signal detection theory)



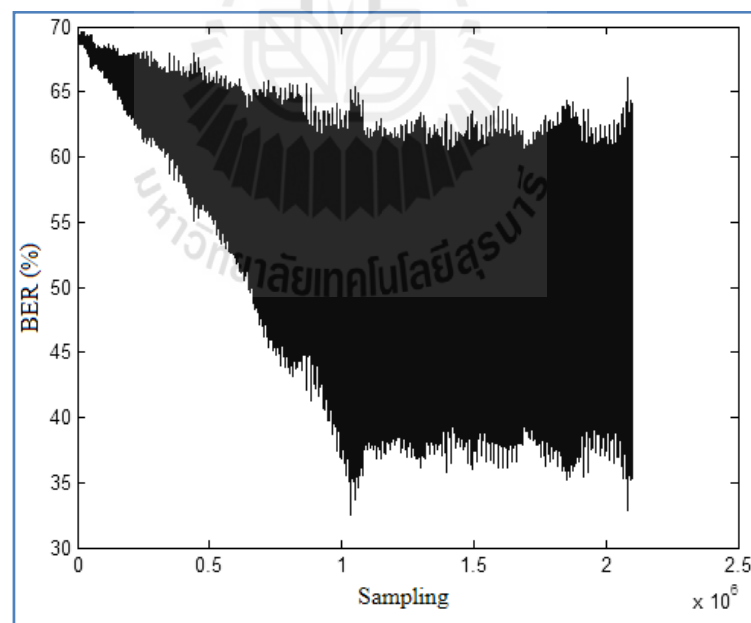
รูปที่ 6.13 กราฟค่า BER ในกรณีที่ไม่ใช่ลายน้ำที่ถูกต้องด้วยรูปแบบเพลง Dance



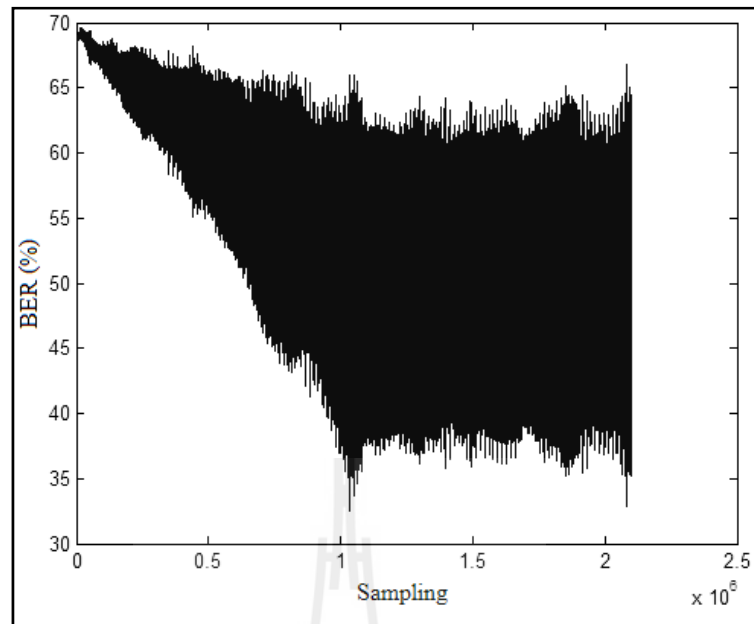
รูปที่ 6.14 กราฟค่า BER ในกรณีที่ไม่ใช่ลายน้ำที่ถูกต้องด้วยรูปแบบเพลง Pop



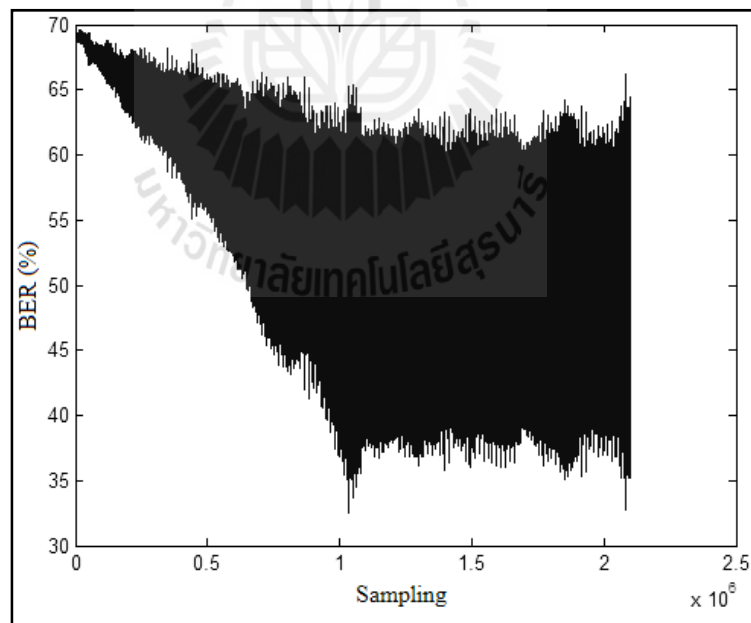
รูปที่ 6.15 กราฟค่า BER ในกรณีที่ไม่ใช้ลายน้ำที่ถูกต้องด้วยรูปแบบเพลง Rock



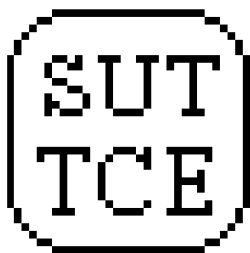
รูปที่ 6.16 กราฟค่า BER ในกรณีที่ไม่ใช้ลายน้ำที่ถูกต้องด้วยรูปแบบเพลงลูกทุ่ง



รูปที่ 6.17 กราฟค่า BER ในกรณีที่ไมใช้ลายน้ำที่ถูกต้องด้วยรูปแบบเพลงขลุ่ยบรรเลง



รูปที่ 6.18 กราฟค่า BER ในกรณีที่ไมใช้ลายน้ำที่ถูกต้องด้วยรูปแบบเพลงเซ็งโปงกลาง



ก. ลายน้ำที่ถอดได้



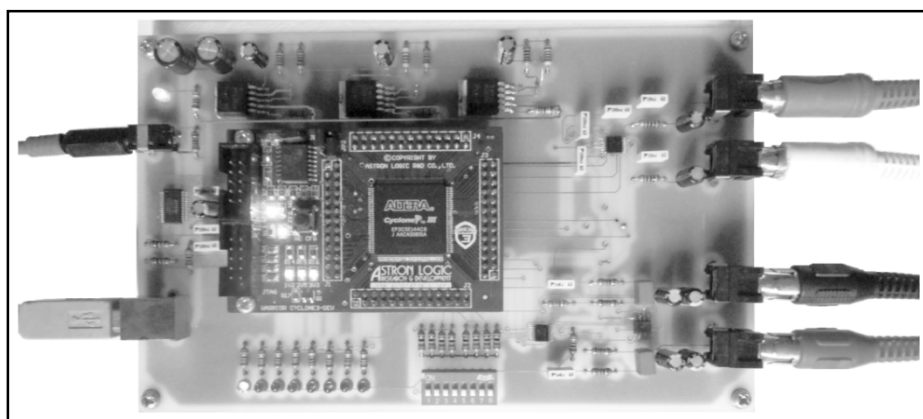
ข. ลายน้ำที่ต้องการ

รูปที่ 6.19 เปรียบเทียบภาพลายน้ำที่ถอดได้และภาพลายน้ำที่ต้องการ

จากรูปที่ 6.13 ถึง 6.18 เป็นการถอดลายน้ำโดยภาพลายน้ำที่ได้ ไม่ใช่ภาพลายน้ำที่ต้องการ ดังรูปที่ 6.19 ซึ่งจะสังเกตได้ว่ากราฟของ BER ที่แสดงนั้นจะมีการกระจายตัวสูงกว่ากรณีที่ไม่มีภาพลายน้ำ ซึ่งค่าของ BER อยู่ในช่วง 70% ถึง 30% แต่อย่างไรก็ตามค่าของ BER ไม่สามารถลดลงต่ำกว่า 30% หรือลดลงไปเข้าใกล้กลับศูนย์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าภาพลายน้ำที่ถอดมาได้ไม่ใช่ภาพลายน้ำที่ถูกต้อง

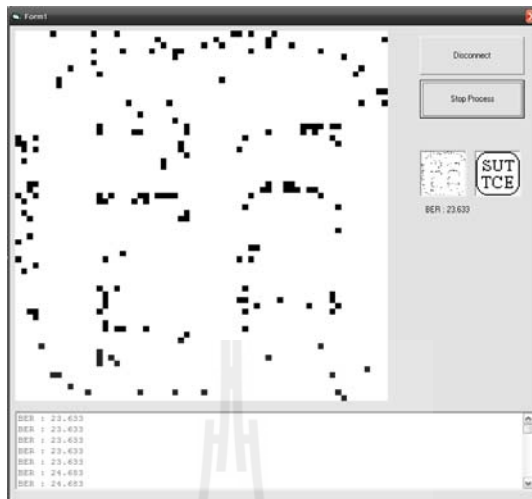
6.3 ผลการทดลองอัลกอริทึมโดยใช้ FPGA

การทดลองโดยการถอดลายน้ำด้วยวงจรประมวลผลแบบเวลาจริงจะมีการเชื่อมต่อโดยการนำเอาสัญญาณเสียงเชื่อมต่อเข้าทางอินพุตของวงจรและเชื่อมต่อสาย USB เข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์ และเปิดโปรแกรมแสดงผลเพื่อให้โปรแกรมเชื่อมต่อกับวงจร



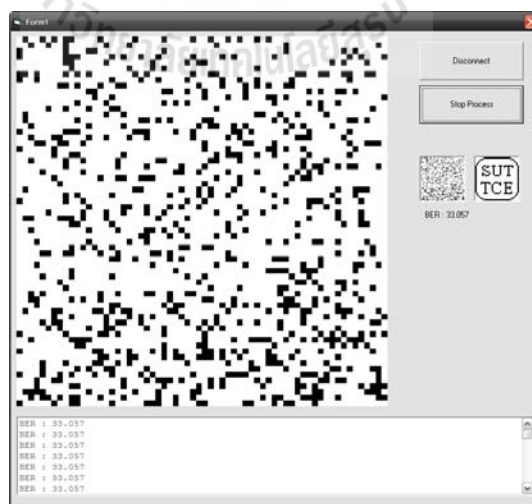
รูปที่ 6.20 การเชื่อมต่อวงจรถอดลายน้ำ

กรณีที่ 1 ผลการถอดลายน้ำในกรณีที่มีสัญญาณลายน้ำจริง ในรูปที่ 6.21 ค่า BER = 23.633



รูปที่ 6.21 โปรแกรมในขณะที่ทำงานด้วยสัญญาณเสียงที่มีภาพลายน้ำ

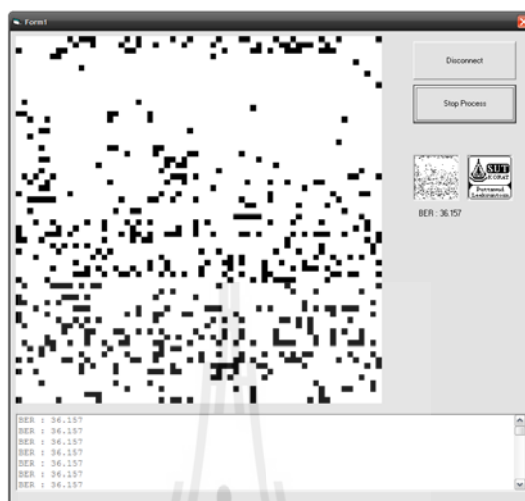
กรณีที่ 2 ผลการถอดลายน้ำในกรณีที่ไม่มีสัญญาณลายน้ำจริง ซึ่งสัญญาณเสียงที่ใช้จะไม่มีภาพลายน้ำฝังอยู่ ค่า BER ที่ได้มีค่าเท่ากับ 33.057 และภาพลายน้ำที่ได้จะเป็นสัญญาณแบบสุ่มโดยไม่มีเค้าโครงของภาพลายน้ำอยู่เลย



รูปที่ 6.22 โปรแกรมในขณะที่ทำงานด้วยสัญญาณเสียงที่ไม่มีภาพลายน้ำ

กรณีที่ 3 ผลการถอดลายน้ำในกรณีที่มีสัญญาณลายน้ำแต่ไม่ใช่ลายน้ำที่ถูกต้อง ในรูปที่

6.23 ค่า BER = 36.157



รูปที่ 6.23 ในขณะที่ทำงานด้วยสัญญาณเสียงที่มีภาพลายน้ำแต่ไม่ใช่ลายน้ำที่ถูกต้อง

ทางด้านผลการทดลองที่เกิดขึ้นจากวงจรประมวลผลแบบเวลาจริง ผลที่ได้ไม่ค่อยชัดเจนนักเนื่องจากการประมวลผลต้องมีการวนลูบอย่างน้อย 4,096 รอบใน 1/48 KHz หรือ 20.833 μ s ในการใช้ภาพลายน้ำขนาด 64 X 64 บิต ซึ่งการประมวลผลในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ไม่สามารถทำได้ จึงทำให้การแสดงผลค่า BER จะต้องใช้วิธีการสุ่มภาพลายน้ำขึ้นมาเพื่อแสดงออกทางหน้าจอ ดังนั้นจึงทำให้การแสดงผลไม่ชัดเจน

6.4 สรุป

เพื่อให้ค้นหาภาพลายน้ำในกรณีที่ไม่ทราบตำแหน่งของภาพลายน้ำที่ฝังอยู่นั้น ได้มีการออกแบบเพื่อให้สามารถทำงานในระบบของเวลาจริงได้ ดังนั้นการประมวลผลจึงมีการลดขนาดการวนลูบในหลายส่วนโดยการใช้เทคนิคการจัดการหน่วยความจำเข้าช่วย และในการคำนวณจะใช้ตัวแปรชนิดตัวเลขจำนวนเต็ม ซึ่งจะทำให้เกิดความผิดพลาดในการปิดจุดทศนิยมเกิดขึ้นได้ ดังนั้นจึงทำให้การถอดลายน้ำที่ได้มีผลที่ไม่ดีเท่าที่ควร และในส่วนของการทำงานในแบบเวลาจริงนั้น การประมวลผลในขั้นตอนสุดท้ายจำเป็นต้องมีการวนลูบถึง 4,096 รอบใน 20.833 μ s จึงทำให้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ไม่สามารถค้นหาค่า BER ที่ดีที่สุดออกมาแสดงได้

บทที่ 7

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 กล่าวนำ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการศึกษา และการวิเคราะห์เทคนิคการทำลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัล ด้วยวิธีการสร้างลักษณะเฉพาะทางด้านแอมพลิจูดของสัมประสิทธิ์ที่เป็นองค์ประกอบความถี่ต่ำก่อนไปทางความถี่สูงที่ได้จากกระบวนการแปลงเวฟเล็ต และแบ่งกลุ่มของข้อมูลออกเป็นสองกลุ่มตามขนาดที่ได้กำหนดขึ้น เพื่อใช้ในการปรับขนาดของค่าเฉลี่ยของทั้งสองกลุ่มให้มีปริมาณที่แตกต่างกันตามเงื่อนไข และการทดสอบคุณภาพของลายน้ำจะวัดจากค่าของกำลังงานที่เปลี่ยนไปตามสมการของ SNR ส่วนการทดสอบความทนทานได้จากค่า BER ที่ได้จากการเปรียบเทียบความถูกต้องของภาพลายน้ำที่ได้จากการถอดเทียบกับภาพลายน้ำต้นฉบับ ทั้งนี้ก่อนการถอดลายน้ำสัญญาณลายน้ำต้องผ่านการโจมตีด้วยรูปแบบวิธีต่างๆ ที่ใช้ทดสอบความทนทานของลายน้ำ และการถอดลายน้ำที่ออกแบบไว้ในงานวิจัยชิ้นนี้ ได้ออกแบบไว้สองแบบคือการถอดลายน้ำโดยรู้ตำแหน่งที่ถูกต้องของลายน้ำที่ฝังอยู่ในข้อมูลสัญญาณเสียง และอีกแบบคือการถอดลายน้ำแบบไม่ทราบตำแหน่งเริ่มต้นทั้งนี้การถอดลายน้ำจะใช้อัลกอริทึมที่ออกแบบเพื่อถอดลายน้ำแบบวงจรถอดลายน้ำแบบเวลาจริง ซึ่งกระบวนการทั้งหมดนั้นได้นำเสนอและทำการทดลองการถอดลายน้ำทั้งสองแบบโดยจำลองในโปรแกรม MATLAB และในส่วนของวงจรที่ได้สร้างขึ้นเพื่อถอดลายน้ำ ในบทต่างๆที่ผ่านมา

7.2 สรุปผลการวิจัย

คุณภาพของลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัลที่ได้จากฝังลายน้ำตามเทคนิควิธีที่ได้ออกแบบขึ้นนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าของ Alpha ที่กำหนดขึ้น เช่นถ้ากำหนดค่า Alpha มากค่าของ SNR จะน้อย และถ้ากำหนดค่า Alpha น้อยก็จะทำให้ค่าของ SNR จะมากขึ้นหรือทำให้คุณภาพของลายน้ำดีขึ้นนั่นเอง อย่างไรก็ตามการทำให้คุณภาพของลายน้ำดีขึ้นก็จะบั่นทอนค่าความทนทานของลายน้ำให้น้อยลงค่า Alpha ที่เหมาะสมในการฝังลายน้ำจะขึ้นอยู่กับนำไปใช้งาน ในการศึกษาพบว่าค่าความทนทานของลายน้ำจะขึ้นอยู่กับค่าของ SNR เมื่อกำหนดค่า Alpha ที่คงที่ในรูปแบบของเพลงที่แตกต่างกันจะสังเกตได้ว่าค่าของ SNR จะไม่เท่ากัน แต่ค่าความทนทานที่ได้จะดีขึ้นเมื่อค่า SNR ดีขึ้นทั้งที่ Alpha เท่ากันหมด ดังนั้นการฝังลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัลตามเทคนิควิธีการนี้จึงควรฝังโดยคำนึงถึงค่าของ SNR มากกว่าค่า Alpha ซึ่งในหนึ่งเพลงอาจจะใช้ค่า Alpha หลายค่าขึ้นอยู่กับ

กลุ่มข้อมูลในหนึ่งหน้าต่างที่นำมาฝังลายน้ำ เช่นถ้าต้องการค่า SNR เท่า 25 dB ให้ดำเนินการโดยการค้นหาว่าในแต่ละหน้าต่างจะใช้ค่า Alpha ด้วยค่าเท่าไร เพื่อให้ในแต่ละหน้าต่างนั้นมีค่า SNR โดยเฉลี่ยแล้วเท่ากันหรือใกล้เคียงกัน

การออกแบบอัลกอริทึมที่ทราบตำแหน่งของภาพลายน้ำ ทำให้ภาพลายน้ำที่ถอดได้มีคุณภาพที่สมบูรณ์ ทั้งนี้เนื่องจากการแปลงเวฟเล็ดจะมีการกระทำด้วยกลุ่มก้อนข้อมูลในหนึ่งหน้าต่างพร้อมกัน และอัลกอริทึมมีการดำเนินการได้อย่างเต็มที่ ทั้งนี้เพราะไม่ต้องคำนึงถึงการทำงานแบบเวลาจริง ดังนั้นการคำนวณข้อมูลทั้งในส่วนการแปลงเวฟเล็ดและในส่วนของการค้นหาค่าเฉลี่ยของกลุ่มข้อมูลทั้งสองกลุ่มได้มีการคำนวณตัวเลขได้อย่างสมบูรณ์ ภาพลายน้ำที่ถอดได้จึงมีค่าความถูกต้องที่ดี หรือค่าของ BER น้อย ส่วนอัลกอริทึมที่ไม่คำนึงถึงจุดเริ่มต้นในการถอดลายน้ำ จำเป็นต้องออกแบบโดยคำนึงถึงการทำงานแบบเวลาจริง ซึ่งอัลกอริทึมที่ออกแบบให้มีการจัดการกับหน่วยความจำเพื่อหลีกเลี่ยงการประมวลผลและความต้องการใช้หน่วยความจำที่มากเมื่อดำเนินการถอดลายน้ำโดยตรง และในส่วนการคำนวณทั้งทางด้านการแปลงเวฟเล็ดและทางด้านการคำนวณค่าเฉลี่ยของกลุ่มข้อมูลก่อนการเปรียบเทียบมีการดำเนินการโดยใช้ตัวแปรแบบจำนวนเต็ม จึงอาจทำให้เกิดความผิดพลาดจากการปัดจุดทศนิยม ผลการทดลองที่ได้จึงแตกต่างไปจากผลของอัลกอริทึมที่ทราบตำแหน่งการฝังลายน้ำ ผลการทดลองในบทที่ 6 ได้แสดงกราฟค่า BER ที่เข้าสู่ค่า 0 เมื่อค้นพบภาพลายน้ำ ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่าสัญญาณเสียงที่กำลังทดสอบมีลายน้ำฝังอยู่ โดยการแสดงผลของค่า BER อยู่ในรูปของกราฟ ในการตรวจจับลายน้ำที่มีการประมวลผลแบบเวลาจริงนั้นการแสดงผลค่า BER แต่ละ Sampling ต้องมีการคำนวณค่า BER ตลอดทุก Sampling โดยมีการคำนวณแบบวนลูปเพื่อหาค่า BER อย่างน้อย 4,096 รอบในหนึ่ง Sampling ในกรณีใช้ภาพลายน้ำ 64x64 บิต ทำให้การดำเนินการแบบเวลาจริงจึงเป็นไปได้ยากที่โปรแกรมคอมพิวเตอร์จะทำงานได้ทัน ซึ่งถือเป็นจุดอ่อนของอัลกอริทึมที่นำเสนอ

อย่างไรก็ตามผลจากการทดลองที่ผ่านมาได้แสดงให้เห็นว่าเทคนิคการทำลายน้ำในงานวิจัยชิ้นนี้มีคุณภาพที่ดีพอและมีความทนทานต่อการโจมตีในรูปแบบต่างๆ ซึ่งสามารถที่จะใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาอัลกอริทึมการทำลายน้ำแบบเวลาจริงต่อไป

7.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

จากผลการวิจัยเทคนิคการทำลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัลที่ใช้การแก้ไขของค้ประกอบหลักของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดของสัญญาณเสียง พบว่าสัญญาณลายน้ำมีความทนทานต่อการโจมตีได้เป็นอย่างดี ดังนั้นแนวทางการพัฒนาต่อควรทดลองฝังโดยการแก้ไขของค้ประกอบย่านความถี่ต่างๆ ของสัญญาณเสียง การปรับเปลี่ยนของค้ประกอบด้านความถี่ของสัญญาณเสียงจะมีคุณลักษณะที่แตกต่างกันไป จะทำให้มีข้อเด่นและข้อด้อยที่แตกต่างกันไป ส่วนทางด้านอัลกอริทึม

การประมวลผลเพื่อใช้ในการถอดลายน้ำในแบบเวลาจริงก็สามารถปรับเปลี่ยนให้มีความสามารถที่ดีขึ้นได้โดยใช้หลักการวิเคราะห์เชิงตัวเลขมาใช้ในการคำนวณ หรือทำการปรับเปลี่ยนมาใช้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลที่มีสมรรถนะสูงในการทำงานเพื่อประมวลผลให้ทันทุกๆ จุดของสัญญาณก็จะทำให้การตรวจจับสัญญาณลายน้ำมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น



รายการอ้างอิง

- Takahashi, A., Nishimura, R., and Suzuki, Y. (2005). Multiple Watermarks for Stereo Audio Signals Using Phase-Modulation Techniques. **IEEE Trans. Signal Processing**, 53(2): 806 - 815.
- Xiang, S., and Huang, J., (2006). Analysis of D/A and A/D Conversions in Quantization-based Audio Watermarking. **International Journal of Network Security**, 3: 230–238.
- Sriyingyong, N., and Attakitmongcol, K. (2006). Wavelet-Based Watermarking Using Adaptive Tabu Search. **International Symposium on Wireless Pervasive Computing**, 16 - 18
- Liu, H., Zheng, X., and Wang, Y. (2007). Dwt-Based Audio Watermarking Resistant to Desynchronization. **IEEE Conf. Computer and Information Technology**, 745 - 748
- Lanxun, W., Chao, Y., and Jiao, P. (2007). An Audio Watermark Embedding Algorithm Based on Mean-Quantization in Wavelet Domain. **ICEMI Conf. Electronic Measurement and Instruments**, 2-423 - 2-425
- Movassagh, M., and Shirazi, A.A.B. (2008). A novel method for real-time audio watermarking using wavelet transform. **CCECE Conf. Electrical and Computer Engineering**, 83 - 88.
- Shao, Y., Wu, G. and Lin, X. (2001). A wavelet based adaptive watermarking algorithm. **ICII Conf. Info-tech and Info-net**, 3: 384 – 389.
- Xu, C., Wu, J., and Sun, Q. (1999). Digital Audio Watermarking and Its Application in Multimedia database. **ISSPA Conf. on Signal Processing and its Applications**, 1: 91 - 94.
- Cui, L., Wang, S. and Sun, T. (2003). The application of binary image in digital audio watermarking. **Neural Networks and Signal Processing**, 2: 1497 – 1500.
- Bassia, P., Pitas, I., and Nikolaidis, N. (2001). Robust audio watermarking in the time domain. **IEEE Trans. Multimedia**, 3(2): 232 - 241
- Cox, I.J., Kilian, J., Leighton, F.T., and Shamoon, T. (1997). Secure Spread Spectrum Watermarking for Multimedia. **IEEE Trans. Image Processing**, 6(12): 1673 - 1687.

ภาคผนวก ก

แบบทดสอบคุณภาพเสียงหลังจากการฟังลายน้ำโดยการฟัง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

แบบทดสอบคุณภาพเสียงหลังจากการฟังลายน้ำโดยการฟัง

ชื่อ(นาย / นาง / นางสาว).....นามสกุล.....

สถานที่ทำงาน / สถานศึกษา.....e-mail.....

ความรู้ความเข้าใจในกระบวนการฟังลายน้ำ มาก ปานกลาง น้อย ไม่เลย

เกณฑ์การประเมินคุณภาพเสียง (Mean opinion score : MOS)

ระดับ	รายละเอียด
5	ดีมาก เสียงที่ได้เหมือนเสียงต้นฉบับ (Excellent)
4	ดี (Good)
3	พอใช้ (Fair)
2	มีการรบกวน (Poor)
1	มีการรบกวนมาก (Bad)

ทำเครื่องหมาย ✓ ในช่องประเมินคุณภาพเสียง

รูปแบบเพลง	SNR (dB)	ผลการทดสอบ				
		5	4	3	2	1
Dance	26.7810					
Pop	27.3661					
Rock	23.3226					
ลูกทุ่ง	27.9860					
ขลุ่ยบรรเลง	27.5180					
เซ็งโปงกลาง	23.2882					



ภาคผนวก ข

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

การทำลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัลแบบทนทานโดยใช้การแปลงเวฟเล็ต

A Robust Digital Audio Watermarking Based-on Wavelet Transform

พุทธาวุฒิ ลีกุลธร และ ประโยชน์ คำสวัสดิ์

สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 ถนนมหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

โทร 0-4422-4394 โทรสาร 0-4422-4220 E-mail: Cropw@Hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการทำลายน้ำดิจิทัลบนข้อมูลสัญญาณเสียงด้วยวิธีการฝังลายน้ำในสัมประสิทธิ์ของการแปลงเวฟเล็ตด้านความถี่กลางก่อนไปทางความถี่ต่ำโดยใช้เทคนิคการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของกลุ่มข้อมูลที่ได้จากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ตเพื่อให้มีความสามารถด้านทนต่อการรบกวนการทางสัญญาณต่างๆ การบีบอัดข้อมูลและการเปลี่ยนรูปแบบของสัญญาณ ซึ่งเทคนิคนี้ไม่ต้องใช้ข้อมูลสัญญาณเสียงต้นฉบับในการถอดลายน้ำ ผลการทดลองพบว่าสัญญาณเสียงที่ฝังลายน้ำดิจิทัลมีคุณภาพสูงและลายน้ำดิจิทัลสามารถทนทานต่อการโจมตีในรูปแบบต่างๆ ตามผลการทดลองที่ปรากฏในบทความนี้

Abstract

In this paper, a robust watermarking scheme for digital audio signal is proposed. The watermarks are embedded into the middle-low frequency coefficients in discrete wavelet transform domain to achieve robust performance against common signal processing procedures, signal compression and signal conversion. The embedding technique is based on comparing the mean of data segment of wavelet coefficient and this technique does not require the original audio signal in the watermark extraction. The experimental results show that: the proposed scheme yields the watermark audio signal with high quality and the watermark survives to most of the attacks which were included in this study.

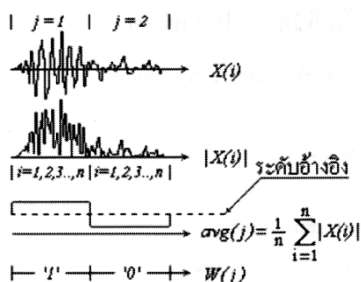
1. บทนำ

การทำลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัลคือการเพิ่มความเป็นเอกลักษณ์ลงในข้อมูลสัญญาณเสียง โดยอาศัยเทคนิคการทำลายน้ำดิจิทัลด้วยวิธีการต่างๆ และอยู่ในกรอบมาตรฐานของ International Federation of the Phonographic Industry (IFPI) [1] ซึ่งกำหนดให้ลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัลต้องมีค่า Signal-to-Noise Ratio (SNR) ไม่ต่ำกว่า 20 dB เมื่อเทียบกับสัญญาณเสียงต้นฉบับ และความจุลายน้ำต้องไม่ต่ำกว่า 20 bps ภายใต้กรอบมาตรฐานนี้ ลายน้ำจำเป็นต้องทนทานต่อผลกระทบหรือเรียกว่าการโจมตีในรูปแบบต่างๆ ได้เป็นอย่างดี ทั้งนี้เพื่อความ

เหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้งานลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัล ซึ่งนอกจากการนำลายน้ำไปใช้ที่เกี่ยวข้องกับงานทางด้านลิขสิทธิ์แล้ว ยังสามารถใช้ในการงานตรวจจับสัญญาณเสียงที่มีลายน้ำฝังอยู่ได้ ซึ่งลายน้ำนี้ต้องมีความทนทานต่อการโจมตีในรูปแบบการเปลี่ยนแปลงสัญญาณเสียงระหว่างดิจิทัลกับแอนะล็อก (D to A & A to D Conversions) มากเป็นพิเศษ

เทคนิคการทำลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัลในปัจจุบัน มีการทำลายน้ำที่สร้างเงื่อนไขจากระดับของการทำ Quantization ในแต่ละจุดข้อมูล [1] รวมไปถึงค่าเฉลี่ยของระดับการทำ Quantization ในกลุ่มข้อมูลแต่ละกลุ่ม [2] ซึ่งค่าของการทำ Quantization จะบ่งบอกถึงลักษณะข้อมูลลายน้ำว่าเป็นบิต '0' หรือบิต '1' และผลจากเทคนิคนี้ทำให้ทราบว่า ลายน้ำมีความทนทานต่อการรบกวนการเปลี่ยนแปลงทางข้อมูลเป็นอย่างดีเช่น การบีบอัดข้อมูลด้วยวิธี MP3 Compression แต่เมื่อผ่านการโจมตีในรูปแบบการเปลี่ยนแปลงสัญญาณเสียงระหว่างดิจิทัลกับแอนะล็อกพบว่า มีการโจมตีอีกรูปแบบคือ การปรับขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณ [1] โดยเป็นผลพวงจากการส่งถ่ายสัญญาณเสียงในรูปแบบแอนะล็อกส่งผลให้เทคนิคการทำลายน้ำจากการทำ Quantization มีความทนทานต่อการโจมตีรูปแบบนี้ไม่ดีเท่าที่ควร และหากแก้ไขโดยการใช้เทคนิคของการบิดเบือนเฟสของสัญญาณเสียง [3] เพื่อหลีกเลี่ยงการโจมตีเทคนิคการปรับเปลี่ยนแอมพลิจูด แต่ในขั้นตอนการถอดลายน้ำ ของเทคนิคที่ใช้เฟสของสัญญาณเสียงเป็นเงื่อนไขนั้น จำเป็นต้องใช้เฟสอ้างอิงจากข้อมูลสัญญาณเสียงต้นฉบับ จึงไม่สะดวกในการนำมาใช้งานจริง รวมไปถึงเทคนิคที่ใช้อัลกอริทึมค้นหาสัญญาณลายน้ำในสัญญาณเสียงดิจิทัล ซึ่งอัลกอริทึมจะมีความซับซ้อนจนไม่สะดวกต่อการนำมาใช้งานจริง

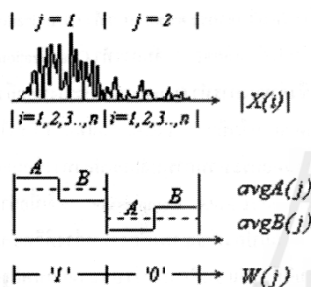
ดังนั้นงานวิจัยชิ้นนี้จึงกลับไปเริ่มต้นศึกษาจากเทคนิคในยุคเริ่มแรกของการทำลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัล คือเทคนิคที่อาศัยระดับอ้างอิงเทียบกับค่าเฉลี่ยของแอมพลิจูดในกลุ่มสัญญาณเสียงของแต่ละกลุ่ม ดังอัลกอริทึมในรูปที่ 1 ซึ่งยังสามารถแก้ไขหรือปรับเปลี่ยนวิธีการโดยใช้เทคนิคการเพิ่มระดับอ้างอิงลงในกลุ่มข้อมูล เพื่อให้ลายน้ำมีความทนทานต่อการโจมตีในรูปแบบการปรับเปลี่ยนขนาดของสัญญาณ และส่งผลให้ลายน้ำสามารถรองรับการโจมตีในรูปแบบการเปลี่ยนแปลงสัญญาณเสียงระหว่างดิจิทัลกับแอนะล็อก ดังผลการทดลองที่ปรากฏในบทความงานวิจัย ชิ้นนี้นั่นเอง



รูปที่ 1. การปรับเปลี่ยนค่าเฉลี่ยกลุ่มสัญญาณเทียบกับระดับอ้างอิง

2. แนวทางการออกแบบอัลกอริทึม

อัลกอริทึมในงานวิจัยนี้ ปรับเปลี่ยนด้วยการเพิ่มจุดอ้างอิงในกลุ่มข้อมูลที่ใช้ฟังลายน้ำ แทนการตั้งค่าระดับอ้างอิงในรูปแบบเดิม ตามวิธีการในรูปที่ 2 ซึ่งสามารถคำนวณค่าเฉลี่ยในกลุ่มของสัญญาณทั้งสองกลุ่มที่แบ่งไว้ตามสมการที่ 1 และ 2



รูปที่ 2. ลักษณะการเพิ่มจุดอ้างอิงในกลุ่มสัญญาณที่ปรับเปลี่ยน

$$avgA(j) = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^{\frac{n}{2}} |X(i)| \tag{1}$$

$$avgB(j) = \frac{2}{n} \sum_{i=\frac{n}{2}+1}^n |X(i)| \tag{2}$$

- ถ้าลายน้ำ บิต '1'
$$\begin{cases} avgA'(j) = avgA(j) \times \alpha \\ avgB'(j) = avgB(j) / \alpha \end{cases} \tag{3}$$

- ถ้าลายน้ำ บิต '0'
$$\begin{cases} avgA'(j) = avgA(j) / \alpha \\ avgB'(j) = avgB(j) \times \alpha \end{cases} \tag{4}$$

โดยที่ avgA(j) คือ ค่าเฉลี่ยของกลุ่มข้อมูล A
 avgB(j) คือ ค่าเฉลี่ยของกลุ่มข้อมูล B
 X(i) คือ ข้อมูลสัญญาณเสียง

ในการฟังข้อมูลลายน้ำลงในสัมประสิทธิ์ทางการแปลงเวฟเลต จะต้องทำการปรับเปลี่ยนค่าเฉลี่ยในกลุ่มของสัญญาณทั้งสองกลุ่มที่แบ่งไว้ให้มีระดับของค่าเฉลี่ยอยู่ระดับเดียวกัน ก่อนปรับค่าเฉลี่ยของทั้ง

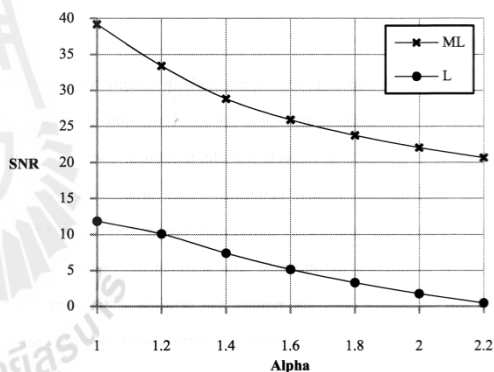
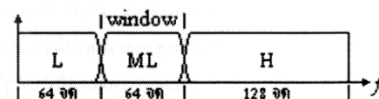
สองกลุ่มสัญญาณ ให้มีระดับที่ต่างกันด้วยอัตราค่า Alpha (α) โดยมีเงื่อนไขของการฟังสัญญาณลายน้ำ ตามสมการที่ 3 และ 4

เพื่อให้สัญญาณเสียงที่ได้หลังจากการฟังสัญญาณลายน้ำมีคุณภาพเสียงที่ดี จึงได้ทำการทดสอบหาช่วงของสัมประสิทธิ์ของการแปลงเวฟเลตที่เหมาะสมสำหรับการฟังลายน้ำ โดยทดสอบในย่านความถี่ต่ำ (L) และย่านความถี่กลางที่ค่อนข้างไปทางด้านความถี่ต่ำ (ML) ดังมีกราฟเปรียบเทียบค่า Signal-to-Noise Ratio (SNR) [5] กับ Alpha แสดงดังรูปที่ 3 ซึ่งจะเห็นว่าย่านความถี่ที่เหมาะสมคือ ML

$$SNR = 10 \log \frac{\sum_{i=1}^k X(i)^2}{\sum_{i=1}^k [X(i) - X''(i)]^2} \tag{5}$$

โดยที่

X(i) คือ ข้อมูลสัญญาณเสียงต้นฉบับ
 X''(i) คือ ข้อมูลสัญญาณเสียงที่ฟังลายน้ำ



รูปที่ 3. ค่าของ SNR เทียบกับ Alpha โดยการฟังตัวในแต่ละแถบความถี่

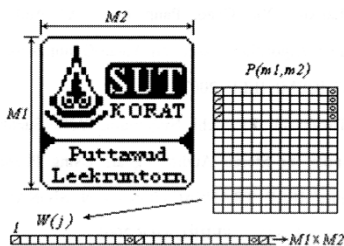
จากการทดลองข้างต้นพบว่า ผลที่เกิดขึ้นจากการปรับขนาดของกลุ่มข้อมูล (window) จะไม่ส่งผลกระทบต่อค่า SNR แต่มีผลต่อค่าความจุสัญญาณลายน้ำ ตามสมการที่ 6 ดังนั้นจึงสามารถปรับขนาดของกลุ่มข้อมูลได้ตามความเหมาะสม เช่น ถ้ามีขนาดน้อยเกินไปจะทำให้การจับกลุ่มข้อมูลเพื่อใช้ในขั้นตอนการถอดสัญญาณลายน้ำทำได้ยาก แต่ถ้าปรับขนาดมากเกินไปค่าความจุสัญญาณลายน้ำจะมีค่าลดน้อยลง เป็นต้น

$$\text{ค่าความจุสัญญาณลายน้ำ} = \frac{f_s}{\text{window} \times 4} \text{ bps} \tag{6}$$

โดยที่ f_s คือ ความถี่ของการซัดตัวอย่าง
 window คือ ขนาดของกลุ่มข้อมูล

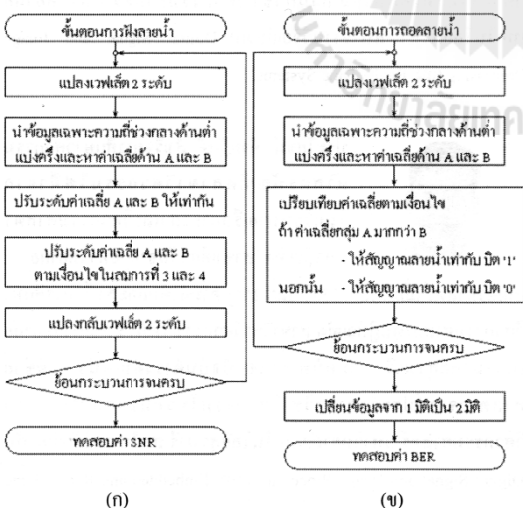
3. ขั้นตอนการฝังและถอดลายน้ำดิจิทัล

ในงานวิจัยนี้ใช้ลายน้ำดิจิทัลที่เป็นภาพไบนารีทั้งนี้เพื่อเป็นการบ่งบอกให้เห็นได้อย่างชัดเจนถึงผู้ที่เป็นเจ้าของลายน้ำนั้น และเนื่องจากข้อมูลสัญญาณเสียงที่ใช้ทำการฝังลายน้ำอยู่ในรูปแบบสัญญาณ 1 มิติ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องปรับเปลี่ยนภาพลายน้ำให้เป็น 1 มิติตามวิธีการในรูปที่ 4 เมื่อได้ลายน้ำดิจิทัลซึ่งเป็นข้อมูล 1 มิติ ก็สามารถดำเนินการฝังสัญญาณลายน้ำตามอัลกอริทึมที่ได้ออกแบบไว้



รูปที่ 4. ลักษณะการเปลี่ยนข้อมูลลายน้ำจาก 1 มิติเป็น 2 มิติ

แผนภาพแสดงอัลกอริทึมของการฝังสัญญาณลายน้ำแสดงในรูปที่ 5(ก) โดยอาศัยเทคนิคของการออกแบบอัลกอริทึมที่แสดงในหัวข้อที่ 2 คุณภาพของสัญญาณเสียงที่ได้หลังจากการฝังลายน้ำ จะทำการประเมินค่าด้วยการคำนวณ SNR ดังแสดงสมการการคำนวณในสมการที่ 5 ขั้นตอนการถอดสัญญาณลายน้ำ เป็นกระบวนการที่ย้อนกลับจากขั้นตอนการฝังสัญญาณลายน้ำ ซึ่งขั้นตอนดังกล่าวนี้ไม่จำเป็นต้องใช้ข้อมูลเสียงต้นฉบับในกระบวนการถอดสัญญาณลายน้ำแต่อย่างใด และภาพลายน้ำที่ได้จากขั้นตอนการถอดสัญญาณลายน้ำที่แสดงในรูปที่ 5(ข) สามารถประเมินความถูกต้องด้วยค่า Bit Error Ratio (BER)[5] ตามสมการที่ 7



รูปที่ 5. แผนภาพแสดงขั้นตอน การฝังและการถอดลายน้ำดิจิทัล

$$BER = \frac{\text{จำนวนบิตข้อมูลที่ผิดพลาด}}{\text{จำนวนบิตข้อมูลทั้งหมด}} \times 100 \% \quad (7)$$

4. การทดลองและผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ใช้สัญญาณเสียงดิจิทัลที่บันทึกจากเสียงเพลงประเภท Dance, Rock, Pop, ลูกทุ่ง, เด็ชขลุ่ย และ เด็ชระนาด โดยมีค่าความถี่ของการสุ่มตัวอย่างที่ 48KHz เข้ารหัสสัญญาณด้วยจำนวนบิต 16 บิต ความยาวของสัญญาณประมาณ 3 ถึง 4 นาที สัญญาณลายน้ำเป็นภาพไบนารีขนาด 64x64 บิต โดยค่าความจุของลายน้ำอยู่ที่ 187.5 bps การทดสอบประสิทธิภาพของอัลกอริทึม ประกอบด้วย การทดสอบคุณภาพด้วยการคำนวณค่า SNR และการทดสอบความคงทนของสัญญาณลายน้ำด้วยการโจมตีสัญญาณลายน้ำโดยวิธี กรองความถี่ต่ำผ่าน กรองความถี่สูงผ่าน แทรกสัญญาณรบกวนและการบีบอัดข้อมูลด้วยวิธี MP3 Compression ผลการทดสอบค่า SNR และ BER ที่แสดงในตารางที่ 1 ใช้สัญญาณเสียงเพลงประเภทเด็ชระนาดซึ่งพบว่าลายน้ำมีความทนทานมากขึ้นเมื่อค่าของ SNR น้อยลงหรือระดับของ Alpha มีค่ามากขึ้นโดยลักษณะของภาพสัญญาณลายน้ำที่ถอดได้มีระดับค่า BER ต่างๆ จะแสดงในรูปที่ 6

ตารางที่ 1. ค่า BER ต่อการโจมตีด้วยรูปแบบพื้นฐานต่างๆ

Alpha	SNR (dB)	BER (%)			
		LowPass fc = 1KHz	HighPass fc = 1KHz	Noise -10 dB	MP3 32Kbit 48KHz
1.2	33.3859	0.0000	0.0000	1.0312	26.0156
1.4	28.8243	0.0000	0.0000	0.5156	21.1406
1.6	25.8898	0.0000	0.0000	0.2500	16.1250
1.8	23.7468	0.0000	0.0000	0.1250	8.0000
2.0	22.0548	0.0000	0.0000	0.1250	5.3906
2.2	20.6525	0.0000	0.0000	0.2344	3.5625



BER = 0.0000 BER = 1.0312 BER = 9.3125 BER = 16.125

รูปที่ 6. ภาพลายน้ำที่ผ่านการโจมตี โดยมีระดับค่า BER ต่างๆ

ในงานวิจัยนี้สนใจการโจมตีอยู่ 2 รูปแบบคือ การโจมตีด้วยการปรับขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณด้วยระดับอัตรา 0.2 ถึง 1.8 เท่า และการโจมตีด้วยการเปลี่ยนรูปสัญญาณระหว่างดิจิทัลกลับแอนะล็อก โดยใช้สายส่งสัญญาณเสียงแบบแอนะล็อก เป็นสื่อกลางในการเชื่อมต่อ ผลการทดลองจากการโจมตีทั้งสองแบบ แสดงในตารางที่ 2 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า อัลกอริทึมของการฝังสัญญาณลายน้ำนี้มีความทนทานต่อการโจมตีทั้งสองรูปแบบนี้เป็นอย่างดี

ตารางที่ 2. ผลจากการโจมตีด้วย การขยายสัญญาณ และ DAC & ADC

Alpha	SNR (dB)	BER (%)				DAC & ADC
		ค่าอัตราการปรับระดับสัญญาณ (เท่า)				
		0.2	0.8	1.2	1.8	
1.2	33.3859	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.06250
1.4	28.8243	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
1.6	25.8898	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
1.8	23.7468	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
2.0	22.0548	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
2.2	20.6525	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

ตารางที่ 3 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมกับข้อมูลเสียงเพลงประเภทต่างๆ โดยกำหนดค่า Alpha เท่ากับ 1.4 และขนาดของกลุ่มข้อมูลเท่ากับ 64 จุด ซึ่งพบว่าเพลงประเภท Dance, Rock และ Pop มีค่า SNR ที่ต่ำ เนื่องจากเพลงประเภทดังกล่าวมีรายละเอียดของข้อมูลกระจายตัวอยู่ในช่วงความถี่ที่ใกล้เคียงกับย่านความถี่ที่ใช้ฝังสัญญาณลายน้ำ แต่ผลที่ได้คือ มีความทนทานต่อการโจมตีได้ดีขึ้น โดยที่ค่าเฉลี่ยของ SNR มีค่าเท่ากับ 24.0619 dB ซึ่งสูงกว่าข้อกำหนดตามมาตรฐานของ IPFI และค่าเฉลี่ยของ BER จากการโจมตีด้วยการแทรกสัญญาณรบกวน การบีบอัดข้อมูลด้วยวิธี MP3 Compression และการเปลี่ยนรูปสัญญาณระหว่างดิจิทัลกับแอนะล็อก มีค่าเท่ากับ 0.0938% 11.2995% และ 0.0000% ตามลำดับ

ตารางที่ 3. ผลการทดลองด้วยตัวอย่างเพลงตามประเภทต่างๆ

รูปแบบเพลง	SNR (dB)	BER (%)			
		No Attack	Noise -10 dB	MP3 32Kbit 48KHz	DAC & ADC
Dance	21.6968	0.0000	0.0000	5.2656	0.0000
Rock	21.7068	0.0000	0.0000	8.6719	0.0000
Pop	22.7270	0.0000	0.0000	6.3906	0.0000
ทุกทั้ง	24.2587	0.0000	0.0000	9.3125	0.0000
เคียวลุยเพียงขอ	25.1575	0.0000	0.0469	17.0156	0.0000
เคียวระนาดเอก	28.8243	0.0000	0.5156	21.1406	0.0000

จากผลการทดลองในตารางที่ 3 จะสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อทดสอบด้วยเพลงแต่ละแบบจะได้ค่า SNR ที่ไม่เท่ากันทั้งที่ระดับค่า Alpha เท่ากัน แต่พบว่าระดับของ SNR จะมีความเกี่ยวพันกับคุณภาพของลายน้ำโดยตรง ดังนั้นค่าของ Alpha จึงขึ้นอยู่กับความเหมาะสมระหว่างประสิทธิภาพของลายน้ำดิจิทัลต่อการใช้งานในแต่ละรูปแบบนั่นเอง

5. สรุปผลการทดลอง

บทความนี้ได้นำเสนอวิธีการทำลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัลด้วยเทคนิคการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของกลุ่มข้อมูลสัมประสิทธิ์ของการแปลงเวฟเลตในย่านความถี่กลางก่อนไปทางด้านความถี่ต่ำ ผลการทดลองได้แสดงให้เห็นว่าอัลกอริทึมนี้มีความทนทานต่อการโจมตีโดยการปรับขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณด้วยระดับอัตราต่างๆ และยังมี ความทนทานต่อการโจมตีด้วยการเปลี่ยนรูปแบบสัญญาณระหว่างดิจิทัลกับแอนะล็อกได้เป็นอย่างดี ส่งผลให้ไม่จำเป็นต้องใช้ขั้นตอนการคืนระดับสัญญาณในระดับที่เหมาะสมก่อนทำการถอดสัญญาณลายน้ำ

แนวทางการวิจัยต่อไปในอนาคตคือ การสร้างระบบการทำลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัลที่มีการประมวลผลแบบเวลาจริง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Shijun Xiang, Jiwu Huang, "Analysis of D/A and A/D Conversions in Quantization-based Audio Watermarking", International Journal of Network Security, Vol.3, No.3, PP.230-238, Nov. 2006.
- [2] Wang Lanxun, Yin Chao, Pang Jiao, "An Audio Watermark Embedding Algorithm Based on Mean-Quantization in Wavelet Domain", ICEMI, IEEE, 2007.
- [3] Akira Takahashi, Ryouichi Nishimura, Yōiti Suzuki, "Multiple Watermarks for Stereo Audio Signals Using Phase-Modulation Techniques", IEEE TRANSACTIONS ON SIGNAL PROCESSING, VOL. 53, NO. 2, FEBRUARY 2005.
- [4] N. Sriyingyong, K. Attakitmongcol, "Wavelet-Based Audio Watermarking Using Adaptive Tabu Search", IEEE 2006.
- [5] Liu Hai-yan, Zheng Xue-feng, Wang Ying, "DWT-Based Audio Watermarking Resistant to Desynchronization", IEEE International Conference on Computer and Information Technology, 2007.

ประวัติผู้เขียนบทความ



พุทชาวุฒิ ลิขุทธสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า-โทรคมนาคม จากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ นครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2544 ปัจจุบันกำลังศึกษา ระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชา วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สนใจงานวิจัยเกี่ยวกับ Digital Signal and Image Processing และ Real - Time Systems.



ประโชชน์ คำสวัสดิ์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าจาก โรงเรียนนายเรืออากาศ และวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเดียวกันจาก มหาวิทยาลัย

เกษตรศาสตร์ เมื่อปี พ.ศ. 2537 และ 2541 ตามลำดับและสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อปีพ.ศ.2548 ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชา วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สนใจงานวิจัยเกี่ยวกับ Digital Signal and Image Processing และ Embedded and Real - Time Systems.

ประวัติผู้เขียน

พุทธาวุฒิ ลีกุลธร เกิดเมื่อวันที่ 14 พฤศจิกายน พ.ศ.2522 เริ่มศึกษาชั้นประถมศึกษาที่โรงเรียนสุขานารี จังหวัดนครราชสีมา ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 1-3 ที่โรงเรียนโคราชพิทยาคม จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาในหลักสูตรประกาศนียบัตรวิชาชีพ(ปวช.) สาขาวิชาช่างอิเล็กทรอนิกส์ โรงเรียนเทคโนโลยีชนะพลจันทร์ จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ.2540 สำเร็จการศึกษาในหลักสูตรประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง(ปวส.) สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ.2542 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า-โทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ.2545 เริ่มทำงานที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ตำแหน่งอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เมื่อปี พ.ศ.2547 และปี พ.ศ.2550 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัย: ได้เสนอบทความเข้าร่วมในงานประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 31 ประจำปี พ.ศ.2551 เรื่องการทำลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิตอลแบบทันทัน โดยใช้การแปลงเวฟเล็ต