

การฝังลายน้ำดิจิทัลบนสัญญาณเสียงโดยใช้วิธีการเชิงพันธุกรรม และดีสครีต เวฟเล็ตทรานฟอร์ม



นายมหศักดิ์ เกตุขำ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

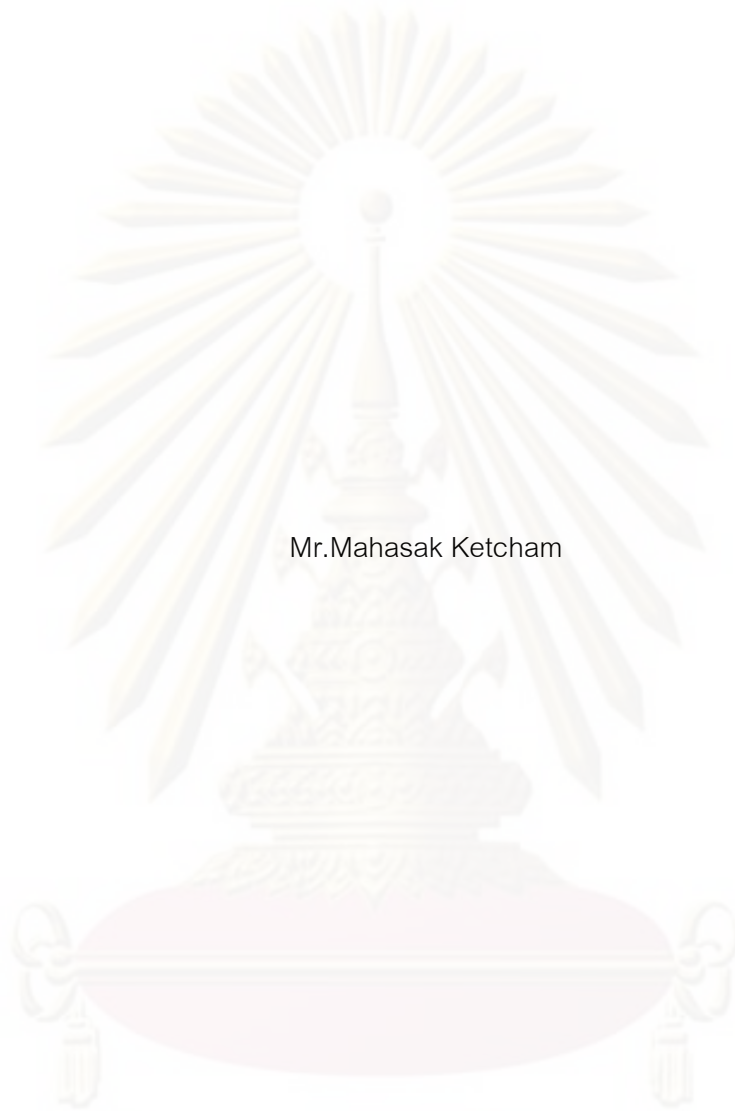
สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EMBEDDING DIGITAL WATERMARKS IN AUDIO SIGNALS USING GENETIC  
ALGORITHM AND DISCRETE WAVELET TRANSFORM



Mr.Mahasak Ketcham

A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Doctor of Philosophy Program in Computer Engineering

Department of Computer Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การฝังลายน้ำดิจิทัลบนสัญญาณเสียงโดยใช้วิธีการเชิง  
พันธุกรรม และ ดิสครีต เวฟเล็ต ทรานส์ฟอร์ม

โดย

นายมหศักดิ์ เกตุสิงห์

สาขาวิชา

วิศวกรรมคอมพิวเตอร์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.สาธิต วงศ์ประทีป

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาตรีบัณฑิต

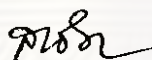


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศศิริวงค์)

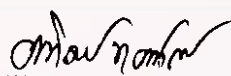
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



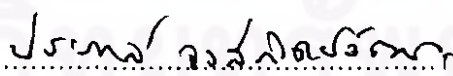
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย รั้วไพบุลย์)



..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สาธิต วงศ์ประทีป)



..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ ทองทังษ์)



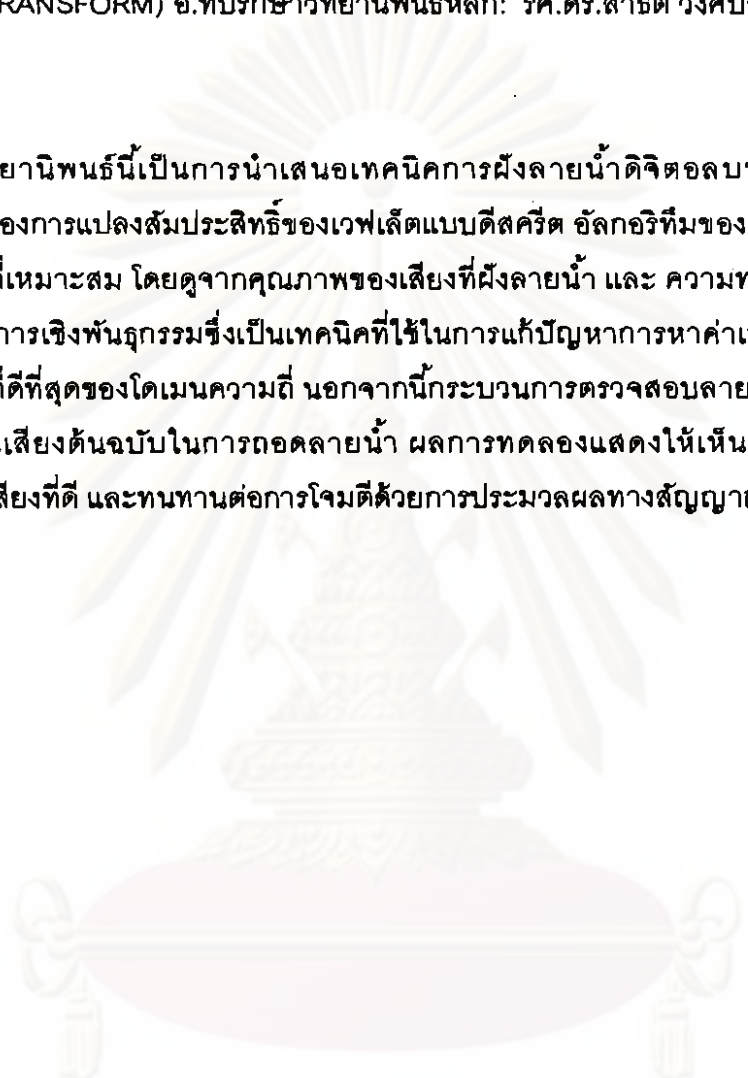
..... กรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร.ประภาส จงสถิตย์วัฒนา)



..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร.วิเชียร เกตุสิงห์)

มหัศจรรย์ เกตุฉำ : การฝังลายน้ำดิจิทัลอลบนสัญญาณเสียงโดยใช้วิธีการเชิงพันธุกรรม และ  
ดิสครีต เวฟเล็ต ทรานฟอร์ม. (EMBEDDING DIGITAL WATERMARKS IN AUDIO  
SIGNALS USING GENETIC ALGORITHM AND DISCETE WAVELET  
TRANSFORM) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ.ดร.สาธิต วงศ์ประทีป, 162หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการนำเสนอเทคนิคการฝังลายน้ำดิจิทัลอลบนสัญญาณเสียงซึ่งใช้  
หลักการของการแปลงสัมประสิทธิ์ของเวฟเล็ตแบบดิสครีต อัลกอริทึมของการฝังลายน้ำจะค้นหา  
ตำแหน่งที่เหมาะสม โดยดูจากคุณภาพของเสียงที่ฝังลายน้ำ และ ความทนทานของลายน้ำ โดย  
การใช้วิธีการเชิงพันธุกรรมซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้ในการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมในการการหา  
ตำแหน่งที่ดีที่สุดของโดเมนความถี่ นอกจากนี้กระบวนการตรวจสอบลายน้ำนั้นไม่จำเป็นต้องใช้  
สัญญาณเสียงต้นฉบับในการถอดลายน้ำ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอัลกอริทึมที่เสนอมี  
คุณภาพเสียงที่ดี และทนทานต่อการโจมตีด้วยการประมวลผลทางสัญญาณในรูปแบบต่าง ๆ



ภาควิชา.....วิศวกรรมคอมพิวเตอร์.....ลายมือชื่อนิสิต.....  
สาขาวิชา.....วิศวกรรมคอมพิวเตอร์.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ปีการศึกษา.....2552.....

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 4771861421 : MAJOR COMPUTER ENGINEERING

KEYWORDS : DATA HIDING / AUDIO WATERMARKING / SECURITY

MAHASAK KETCHAM : EMBEDDING DIGITAL WATERMARKS IN AUDIO SIGNALS USING GENETIC ALGORITHM AND DISCRETE WAVELET TRANSFORM. THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF. SARTID VONGPRADHIP, Ph.D., 162 pp.

In this thesis a novel digital audio watermarking scheme has been proposed based on discrete wavelet transform. In the watermark embedding algorithm, we search for the optimal localization of watermark to trade off the quality and robustness using the Genetic Algorithm (GA). The technique is used optimization frequency embedding. Furthermore, the original audio is not needed for detection in this technique. Experimental results demonstrate performance of the proposed scheme which is inaudible and robust to many signal manipulations.

Department : .....Computer Engineering.....

Student's Signature

Field of Study : .. Computer Engineering.....

Advisor's Signature

Academic Year : .....2009.....

*Ming Ketcham*

*Sartid*

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความ อนุเคราะห์อย่าง ดียิ่งของท่าน รศ.ดร. สาทิต วงศ์ประทีป อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ สละเวลา ให้ความรู้ ให้ คำปรึกษา ตรวจสอบ ให้คำแนะนำแนวทางการ วิจัย และการสนับสนุนเป็นอย่างดี จนทำให้การ วิจัยในครั้งนี้สำเร็จออกมาด้วยดี

ขอขอบ พระคุณ ศ.ดร.ประภาส จงสิตวัฒนา ผศ.ดร. อาทิตย์ ทองทักษ์ รศ.ดร.วันชัย ธีรไพบูลย์ และ ดร.วิเชียร เกตุสิงห์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาเสียสละเวลา ให้คำแนะนำ ตรวจสอบ และแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

มหศักดิ์ เกตุฉ่ำ

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 แนวคิดและทฤษฎี.....	4
2.2 ประวัติการทำลายน้ำ.....	4
2.3 การซ่อนข้อมูลข่าวสาร สเตกาโนกราฟี.....	5
2.4 ลายน้ำดิจิทัล.....	6
2.5 การแปลงเวฟเล็ต.....	16
2.6 ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithms).....	34
2.7 การใช้ประโยชน์จากภาพ.....	45
2.8 รูปแบบสัญญาณเสียงดิจิทัล.....	49
2.9 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	51
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	70
3.1 วิธีการแทรกลายน้ำดิจิทัล.....	70
3.2 วิธีการถอดลายน้ำดิจิทัล.....	78
3.3 การทดสอบความคงทนของลายน้ำดิจิทัล.....	79
3.4 การวัดค่าประสิทธิภาพ.....	79

บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์และข้อมูล.....	80
4.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	80
4.2 ผลการทดลอง.....	80
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	153
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	153
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	153
5.3 แนวทางการวิจัยต่อ.....	153
รายการอ้างอิง.....	155
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	162

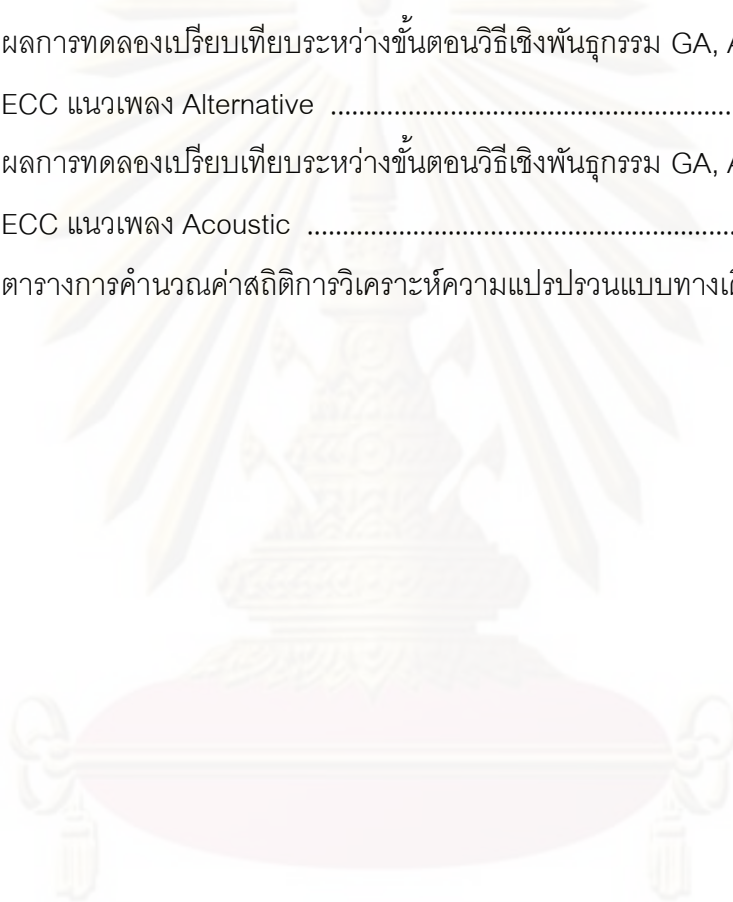
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
4.1	สัญญาณเสียงต้นฉบับ ลายนํ้าดิจิตอลต้นฉบับ และลายนํ้าดิจิตอลที่ถอดออกมาได้.....	81
4.2	ค่า SNR ระหว่างสัญญาณเสียงต้นฉบับกับสัญญาณที่ผ่านการแทรกลายนํ้าดิจิตอลแล้วและค่า SIM และ BER ระหว่างลายนํ้าดิจิตอลต้นฉบับกับลายนํ้าดิจิตอลที่ถอดได้.....	86
4.3	ลายนํ้าดิจิตอลที่ถอดได้จากภาพผลลัพธ์ที่ผ่านการโจมตี และความแตกต่างระหว่างลายนํ้าดิจิตอลต้นฉบับกับลายนํ้าดิจิตอลที่ถอดได้ จากแนวเพลง Rock .....	88
4.4	ลายนํ้าดิจิตอลที่ถอดได้จากภาพผลลัพธ์ที่ผ่านการโจมตี และความแตกต่างระหว่างลายนํ้าดิจิตอลต้นฉบับกับลายนํ้าดิจิตอลที่ถอดได้ จากแนวเพลง Dance.....	93
4.5	ลายนํ้าดิจิตอลที่ถอดได้จากภาพผลลัพธ์ที่ผ่านการโจมตี และความแตกต่างระหว่างลายนํ้าดิจิตอลต้นฉบับกับลายนํ้าดิจิตอลที่ถอดได้ จากแนวเพลง Country.....	98
4.6	ลายนํ้าดิจิตอลที่ถอดได้จากภาพผลลัพธ์ที่ผ่านการโจมตี และความแตกต่างระหว่างลายนํ้าดิจิตอลต้นฉบับกับลายนํ้าดิจิตอลที่ถอดได้ จากแนวเพลง Classic.....	103
4.7	ลายนํ้าดิจิตอลที่ถอดได้จากภาพผลลัพธ์ที่ผ่านการโจมตี และความแตกต่างระหว่างลายนํ้าดิจิตอลต้นฉบับกับลายนํ้าดิจิตอลที่ถอดได้ จากแนวเพลง Alternative.....	108
4.8	ลายนํ้าดิจิตอลที่ถอดได้จากภาพผลลัพธ์ที่ผ่านการโจมตี และความแตกต่างระหว่างลายนํ้าดิจิตอลต้นฉบับกับลายนํ้าดิจิตอลที่ถอดได้ จากแนวเพลง Acoustic.....	113
4.9	ผลการเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น.....	118
4.10	ผลการทดลองเปรียบเทียบระหว่างขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม GA, ATS และ ECC แนวเพลง Rock .....	119

4.11	ผลการทดลองเปรียบเทียบระหว่างขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม GA, ATS และ ECC แนวเพลง Dance .....	124
4.12	ผลการทดลองเปรียบเทียบระหว่างขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม GA, ATS และ ECC แนวเพลง Country .....	129
4.13	ผลการทดลองเปรียบเทียบระหว่างขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม GA, ATS และ ECC แนวเพลง Classic .....	134
4.14	ผลการทดลองเปรียบเทียบระหว่างขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม GA, ATS และ ECC แนวเพลง Alternative .....	139
4.15	ผลการทดลองเปรียบเทียบระหว่างขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม GA, ATS และ ECC แนวเพลง Acoustic .....	144
4.16	ตารางการคำนวณค่าสถิติการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว .....	152



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2-1	โครงสร้างของวิธีซ็อนข้อมูล..... 9
2-2	การแทรกกลายน้ำดิจิตอลลงในภาพต้นฉบับ..... 10
2-3	การตรวจหาลายน้ำดิจิตอลที่อาจแฝงอยู่ในภาพต้นฉบับ..... 11
2-4	การถอดกลายน้ำดิจิตอลออกจากภาพผลลัพธ์ที่ลายน้ำดิจิตอลฝังอยู่..... 11
2-5	ลักษณะคลื่นเวฟเล็ต แบบ Morlet ..... 16
2-6	ลักษณะของสัญญาณ Sinusoidal Signal ..... 17
2-7	ลักษณะของ Window Function..... 17
2-8	คุณสมบัติการสเกลและการเลื่อนตำแหน่งของฟังก์ชันเวฟเล็ต..... 18
2-9	การกระจายสัญญาณด้วยการแปลงเวฟเล็ต..... 19
2-10	การสร้างกลับสัญญาณด้วยการแปลงเวฟเล็ต..... 19
2-11	ขั้นตอนที่หนึ่ง และ สอง ของการแปลงเวฟเล็ต..... 20
2-12	ขั้นตอนที่สาม ของการแปลงเวฟเล็ต..... 21
2-13	ขั้นตอนที่สี่ ของการแปลงเวฟเล็ต..... 21
2-14	การแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง (CWT)..... 22
2-15	การเปรียบเทียบลักษณะการกระจาย (Decomposition) ของ $\eta$ สเปซของ เวกเตอร์..... 25
2-16	การแปลงแยกสัญญาณด้วยฟิลเตอร์แบบสองช่องสัญญาณ..... 27
2-17	การแปลงกลับสัญญาณด้วยฟิลเตอร์แบบสองช่องสัญญาณ..... 28
2-18	ลักษณะการแปลงเวฟเล็ตโดยใช้หลักการวิเคราะห์แบบออกเทพฟิลเตอร์แบงก์.. 28
2-19	การแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่อง (DWT) ในสเกลที่ 1-4..... 25
2-20	ลักษณะการกระจายสัมประสิทธิ์โดยใช้การแปลงเวฟเล็ต 3 ระดับ..... 30
2-21	การคำนวณหารฟังก์เตอร์ทั้งสี่ตัวโดยที่ qmf คือ quadrature mirror filters, wrev คือ การกลับลำดับเวกเตอร์จากซ้ายไปขวา..... 32
2-22	ภาพตัวอย่างฟิลเตอร์สำหรับการแปลงเวฟเล็ต db3..... 32
2-23	การคำนวณ $c_{Aj}$ และ $c_{Dj}$ ..... 33
2-24	การคำนวณ $c_{Aj-1}$ และ $c_{Dj-1}$ ..... 33
2-25	โครงสร้างแบบต้นไม้ที่ $j = 3$ ..... 34

2-26	ขั้นตอนการทำงานของจีเนติกอัลกอริทึม .....	39
2-27	การเข้ารหัสแบบ Binary Encoding.....	40
2-28	การเข้ารหัสแบบ Value Encoding.....	40
2-29	การเข้ารหัสแบบ Permutation Encoding.....	40
2-30	การเข้ารหัสแบบ Tree Encoding.....	41
2-31	Roulette Wheel.....	43
2-32	การกลายพันธุ์.....	45
2-33	กระบวนการในการฝังลายน้ำใช้การแปลง Cepstrum.....	54
2-34	ลักษณะของ Octave band pass filter.....	55
2-35	องค์ประกอบของเสียงสะท้อน.....	58
2-36	แสดงการเกิดเสียงสะท้อนและอัตราการเสื่อมสลาย.....	58
2-37	แสดงการจัดระยะห่างของเสียงสะท้อนสำหรับแฝงข้อมูล.....	59
2-38	แสดงการแบ่งสัญญาณเสียงออกเป็น 3 ส่วน.....	59
2-39	วงจรวางจร Linear Feedback Shift Register.....	61
2-40	แสดงตัวอย่างวงจรวางจร LFSR.....	61
2-41	แสดงการสร้าง PN Code โดยใช้ Linear Feedback Shift Register.....	63
3-1	การเปลี่ยนรูปภาพลายน้ำดิจิทัลโดยวิธีการ Permutation.....	71
3-2	การนำลายน้ำรูปภาพมาเรียงต่อกันให้เป็นสายลำดับบิต.....	71
3-3	ขั้นตอนการทำงานของจีเนติกอัลกอริทึม .....	73
3-4	การฝังตัวโครโมโซม.....	74
3-5	ภาพลายน้ำที่ใช้ในการทดลอง.....	75
3-6	ตัวอย่างกระบวนการการสลับสายพันธุ์.....	76
3-7	ปฏิบัติการผสม.....	77
3-8	การจัดเรียงสายลำดับบิตของลายน้ำให้เป็นรูปภาพ.....	78
3-9	ลายน้ำดิจิทัลที่ถอดมาได้จากสัญญาณเสียง.....	78
4-1	ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของ SNR ของอัลกอริทึมที่ใช้ GA อัลกอริทึม ECC และ อัลกอริทึม ATS.....	149
4-2	ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของ SIM ของอัลกอริทึมที่ใช้ GA อัลกอริทึม ECC และ อัลกอริทึม ATS.....	150

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันสื่อมัลติมีเดียมีการใช้งานอย่างแพร่หลายผ่านเครือข่ายคอมพิวเตอร์ ทำให้ข้อมูลการใช้ประโยชน์จากข้อมูลมัลติมีเดีย เช่น ตัวหนังสือ ภาพ วีดีโอ และสัญญาณเสียงต่าง ๆ เป็นไปอย่างรวดเร็วและง่ายดายขึ้น จึงทำให้เกิดปัญหาการทำสำเนาอย่างผิดกฎหมายส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อเจ้าของสื่อ นั้น แม้จะมีการกำหนดให้สิทธิ์ในการเผยแพร่สื่อ วิธีการป้องกันปัญหาดังกล่าวขึ้น วิธีการหนึ่งคือการใช้ตัวบทกฎหมาย โดยให้ผู้ที่คิดค้นสร้างสรรค์ผลงานขึ้นมาทำการจดลิขสิทธิ์เพื่อให้ผลงานของตนได้รับการคุ้มครองทางกฎหมาย ซึ่งวิธีการนี้สามารถใช้แก้ปัญหาการละเมิดสิทธิ์ทางปัญญาได้ในระดับหนึ่ง แม้ว่าในปัจจุบันจะมีกฎหมายปกป้องสิทธิ์ทางปัญญาออกมาบังคับใช้อย่างชัดเจน แต่บางครั้งกฎหมายที่มีอยู่ไม่สามารถดำเนินการกับผู้กระทำผิดได้โดยง่ายเนื่องจากยังมีช่อง ทางกระทำผิดที่สำคัญหลายประการ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องพัฒนาวิธีการอื่น ๆ เพื่อใช้ในการป้องกันและแก้ไขปัญหาของข้อมูลที่ได้จดลิขสิทธิ์ไว้ วิธีการหนึ่งที่มีการยอมรับว่ามีประสิทธิภาพคือ การป้องกันการคัดลอกที่ตัวข้อมูลนั้น โดยตรง ถึงแม้ว่าจะมีการป้องกันการละเมิด ลิขสิทธิ์หลายวิธี เช่น การเข้ารหัส การลงทะเบียน หรือการใส่เลขทะเบียน เมื่อผู้ที่ได้รับอนุญาตได้ถอดรหัสข้อมูลแล้ว ก็อาจทำสำเนา คัดลอก หรือทำซ้ำข้อมูลนั้นและเผยแพร่ให้กับบุคคลอื่นที่ไม่ได้รับอนุญาตต่อได้ โดยที่ไม่สามารถที่จะติดตามหาผู้ที่กระทำผิดดังกล่าวมาลงโทษได้ ดังนั้นเพื่อที่จะยับยั้งหรือติดตามร่องรอยของการละเมิด จึงได้มีการพัฒนาเทคนิคการสร้างลายน้ำดิจิทัล วิธีการนี้จะแตกต่างจากวิธีการเข้ารหัสลับทั่วไป โดยที่ข้อมูลภายหลังจากการเข้ารหัสสามารถตรวจสอบได้ โดยที่ผู้ที่มีกุญแจรหัส แต่วิธีดังกล่าวจะใช้การซ่อนลายน้ำดิจิทัล ลงในข้อมูลโดยจะไม่ทำให้คุณภาพของข้อมูลนั้นลดต่ำจนเกินไป

การสร้างลายน้ำดิจิทัล [1] เป็นแนวคิดในการฝังข้อมูลที่ไม่สามารถตรวจรู้ได้ทันทีโดยประสาทสัมผัสของมนุษย์ ลงในสื่อประเภท รูปภาพ เสียง และ วีดีโอ ข้อมูลที่ฝังเรียกว่า “ลายน้ำดิจิทัล” เมื่อมีการสำเนาสื่อ ลายน้ำที่ฝังลงไปนั้นก็จะติดไปกับสื่อที่ถูกทำซ้ำขึ้นมาใหม่ และลายน้ำสามารถถอดออกจากสื่อได้ในภายหลัง เพื่อใช้แสดงสิทธิ์ความเป็นเจ้าของ

ปัจจุบันเทคนิคการสร้างลายน้ำสำหรับสื่อประเภทเสียงที่ใช้มีอยู่หลายวิธี ได้แก่ วิธีกระจายลายน้ำลงในแถบความถี่ (Spread Spectrum) เป็นการฝังลายน้ำลงในโดเมนความถี่ [2] และการสร้างลายน้ำโดยฝังลายน้ำลงในแต่ละแซมเปิลของเสียงในโดเมนเวลา [3-5] การฝังลายน้ำโดยวิธีนี้มีข้อจำกัด หลายประการได้แก่ ต้องใช้เสียงต้นฉบับในการถอดลายน้ำดิจิทัล ไม่ทนต่อการเปลี่ยนแปลงในแกนเวลา คุณภาพของ เสียงที่ถูกฝังลายน้ำแล้วมีคุณภาพต่ำ กระบวนการ



การฝังลายน้ำดิจิทัลมีความซับซ้อน และเมื่อทราบกระบวนการฝังก็ทำให้สามารถถอดลายน้ำได้ง่าย ซึ่งวิธีการฝังลายน้ำด้วย โดเมนความถี่สามารถช่วยแก้ปัญหาดังกล่าวได้ อย่างไรก็ตามการฝังลายน้ำด้วยวิธีนี้ก็ยังมีข้อจำกัดคือ ลายน้ำที่ถูกฝังด้วยวิธีการนี้จะไม่ทนต่อการกรองและการบีบอัดข้อมูล

นอกจากวิธีในการฝังลายน้ำที่มีผลต่อคุณภาพของการฝังแล้ว การเลือกพื้นที่ในการฝังลายน้ำก็ส่งผลกระทบต่อคุณภาพลายน้ำเช่นกัน มีวิธีหนึ่งที่ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพของลายน้ำดิจิทัลโดยใช้เทคนิคของปัญญาประดิษฐ์ [6-9] เช่น วิธีเชิงพันธุกรรม [10-16] เป็นการเลือกพื้นที่ในการฝังลายน้ำที่จะให้คุณภาพของลายน้ำมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้กระบวนการวิธีเชิงพันธุกรรมเป็นเทคนิคที่ใช้ในการแก้ปัญหา ความเหมาะสมกับการหาตำแหน่งที่ดีที่สุดของโดเมนความถี่ในการฝังลายน้ำ โดยตำแหน่งที่ดีที่สุด นั่นคือ ตำแหน่ง ที่ทนต่อการโจมตี และไม่ลดทอนคุณภาพของสัญญาณเสียง

จากสภาพปัญหาดังกล่าววิธีการในการฝังลายน้ำด้วยวิธีที่กล่าวมาและแนวทางในการประยุกต์ใช้วิธีเชิงพันธุกรรมผู้วิจัยจึงมีความสนใจในการพัฒนากระบวนการในการฝังลายน้ำด้วยวิธีการเชิง พันธุกรรม และ ดีสครีต เวฟเล็ต ทรานฟอร์ม

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

ในงานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและพัฒนาเทคนิคการทำลายน้ำดิจิทัลสำหรับสื่อประเภทเสียงเพื่อใช้พิสูจน์ความเป็นเจ้าของ (Ownership identification) ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาเฉพาะสื่อประเภทเสียงและรูปภาพที่เป็นลายน้ำ และลายน้ำมีคุณสมบัติในด้านความคงทนต่อกระบวนการประมวลผลใด ๆ และไม่ลดทอนคุณภาพของสัญญาณเสียง

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ขอบเขตงานวิจัย มีดังต่อไปนี้

1.3.1 การฝังและถอดลายน้ำดิจิทัลกระทำในโดเมนความถี่ (Frequency Domain) โดยใช้วิธีการแปลงเวฟเล็ตทรานฟอร์ม (Wavelet Transform)

1.3.2 งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการฝังข้อมูลแบบลายน้ำดิจิทัล โดยมุ่งเน้นบนสื่อประเภทเสียงเป็นหลัก

1.3.3 เสียงต้นฉบับที่ใช้เป็นเสียงเพลง (อยู่ในรูปของแฟ้ม .wav)

1.3.4 ลายน้ำเป็นรูปภาพขาวดำขนาด 60 บิต จำนวน 1 ภาพ มีไฟล์ภาพนามสกุล .jpg ใช้แทนลายน้ำดิจิทัล

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ทำให้ได้เทคนิคการฝังลายน้ำดิจิทัลสำหรับสัญญาณเสียง
- 1.4.2 สามารถนำไปพัฒนาได้จริง
- 1.4.3 เป็นลายน้ำดิจิทัลที่มีความคงทนต่อกระบวนการเปลี่ยนแปลงแก้ไขต่าง ๆ สูง
- 1.4.4 ไม่จำเป็นต้องมีการจัดเก็บรูปภาพต้นฉบับไว้เพื่อใช้ในการตรวจหาลายน้ำดิจิทัล

#### 1.5 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย มีดังต่อไปนี้

- 1.5.1 กำหนดหัวข้อ เป้าหมาย จุดประสงค์ และขอบเขตของการทำวิทยานิพนธ์ ศึกษาศาสตร์ และหลักการพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย
- 1.5.3 ศึกษาเทคนิคต่าง ๆ ที่มีอยู่ถึงแนวคิด หลักการ ข้อดี และข้อบกพร่องของแต่ละเทคนิค
- 1.5.4 พัฒนาวิธีการทำลายน้ำดิจิทัลซึ่งสามารถซ่อนข้อมูลได้ภายใต้กระบวนการต่าง ๆ ข้างต้น
- 1.5.5 ทำการทดลอง ปรับปรุง และสรุปผล
- 1.5.6 จัดทำเอกสารประกอบวิทยานิพนธ์

#### 1.6 บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

- Sartid Vongpradhip and Mahasak Ketcham An Intelligence Audio Watermarking Based on DWT-SVD Using ATS Global Congress on Intelligent Systems (GCIS 2009), Xiamen, China (May 19-21, 2009).
- Mahasak Ketcham and Sartid Vongpradhip An Algorithm for Intelligent AudioWatermarking Using Genetic Algorithm IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC 2007) Singapore, (September 2007).
- Mahasak Ketcham and Sartid Vongpradhip Genetic Algorithm Audio Watermarking using Multiple Image-based Watermarks ISCIT 2007 (October 2007).
- M. Ketcham, Sartid Vongpradhip Intelligent Audio Watermarking Using Genetic Algorithm in DWT Domain International Conference on Computer, Information, and System Science and Engineering, Barcelona, Spain (April 25-27, 2007).
- M. Ketcham, and S.Vongpradhip. Intelligent Audio Watermarking using Genetic Algorithm in DWT Domain. International Journal of Computer Systems Science and Engineering 2,2 (2007): 135-140



## บทที่ 2

### แนวคิดและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 แนวคิดและทฤษฎี

ในส่วนนี้จะเป็นทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการทำลายน้ำดิจิทัลอล ประวัติการทำลายน้ำ ชนิดลายน้ำ ข้อกำหนดในการทำลายน้ำดิจิทัลอล การประยุกต์ใช้เทคนิคการฝังลายน้ำดิจิทัลอลสำหรับการป้องกันลิขสิทธิ์ในด้านต่าง ๆ คุณสมบัติที่สำคัญของลายน้ำ เช่น ความปลอดภัย ความคงทน การโจมตีลายน้ำ การจำแนกเทคนิคการทำลายน้ำประเภทต่าง ๆ

#### 2.2 ประวัติการทำลายน้ำ

ศิลปะของการทำลายน้ำบนกระดาษถูกคิดขึ้นในประเทศจีนมากกว่าหนึ่งพันปี ลายน้ำบนกระดาษไม่ปรากฏให้เห็นอีกเลยจนกระทั่งประมาณปี ค.ศ. 1282 ในประเทศอิตาลีมีการทำเครื่องหมายโดยใส่ลายเส้นบาง ๆ ลงที่แม่พิมพ์ของกระดาษ แผ่นกระดาษ จึงเกิดเป็นแถบเส้นบาง ๆ ที่มีความโปร่งใส จุดประสงค์ของการทำลายน้ำในอดีตไม่เป็นที่ชัดเจน โดยลายน้ำอาจถูกนำมาใช้งานเพื่อพิสูจน์ว่าแม่พิมพ์กระดาษลายน้ำเป็นตัวเดียวกันกับแผ่นกระดาษที่ทำขึ้นมาหรือไม่ หรือใช้เป็นเครื่องหมายการค้าของผู้ทำกระดาษแผ่นนั้นขึ้นมา วัตถุประสงค์อื่น ๆ ของลายน้ำอาจนำมาใช้เพื่อแสดงสัญลักษณ์พิเศษหรือเพื่อเอาไว้ประดับบนแผ่นกระดาษ

ในศตวรรษที่ สิบแปด การทำลายน้ำบนกระดาษในทวีปยุโรปและทวีปอเมริกาเริ่มนำมาใช้ประโยชน์มากขึ้น พวกเขาใช้เป็นเหมือนเครื่องหมายการค้า เพื่อบันทึกวันที่กระดาษผลิต และเพื่อบอกถึงขนาดของแผ่นต้นฉบับ และเริ่มมีการนำลายน้ำมาใช้ป้องกันการปลอมแปลงธนบัตรและเอกสารชนิดอื่น ๆ คำว่า “Watermark” เกิดขึ้นมาตอนปลายศตวรรษที่ สิบแปด และอาจจะมาจากคำว่า “Wassermarke” J. Simpson and E. Weiner ในภาษาเยอรมัน

ตัวอย่างของแนวความคิดการทำลายน้ำโดยซ่อน ข้อความที่มองไม่เห็น เกี่ยวกับวัตถุประสงค์ที่ฝังซ่อนไว้จากหนังสือ The Codebreakers ของ David Kahn ได้บันทึกประวัติศาสตร์อันน่าสนใจ โดยเฉพาะเรื่องราวอ้างอิงถึงข้อความซุกซ่อนในหนังสือ Hypnerotomachia Poliphili ที่พิมพ์ขึ้นในปี ค.ศ. 1499 คือตัวอักษรแรกของในแต่ละบทสะกดคำว่า “Poliam Frater Franciscus Columna Peramavit” โดยสันนิษฐานว่าอาจหมายถึงความรักของหลวงพ่อก Francesco Columna ที่มีต่อผู้หญิงคนหนึ่งชื่อ Polia

สี่ร้อยปีต่อมาได้พบเทคโนโลยีตัวอย่างแรกคล้ายกับวิธีการดิจิทัลอลที่นำมาพิจารณาในปี 1954 Emil Hembrooke ของบริษัท Muzak Corporation ได้จดสิทธิบัตร “การทำลายน้ำ” ในงาน

เพลง โดยใส่รหัสเฉพาะลงในเสียงเพลง เป็นเรื่องยากที่บอกได้ว่าการทำลายน้ำดิจิตอล ได้เริ่มมี ลวดลายที่ใส่ในเอกสารเพื่อป้องกันจากการถูกลบแปลงขึ้น จากนั้น เก้าปีต่อมา ใน[25] ได้ กล่าวถึงวิธีในการฝังรหัสเฉพาะลงในสัญญาณเสียง อย่างไรก็ตามในปี 1998 งานวิจัย [26] เป็น ผู้ที่เริ่มนำคำว่า “ลายน้ำดิจิตอล” มาใช้เป็นครั้งแรก แม้กระนั้นก็ยังไม่ใช่ที่รู้จักมากนัก จนกระทั่ง ต้นปี ค.ศ. 1990 คำว่า “การทำลายน้ำดิจิตอล” จึงกลายเป็นที่นิยม

ในปี ค.ศ. 1995 การทำลายน้ำดิจิตอลได้เริ่มมีขึ้นอย่างกว้างขวางจนถึงทศวรรษที่ เก้าสิบ ได้มีการสัมมนาครั้งแรกเกี่ยวกับการซ่อนข้อมูลข่าวสาร “The first Information Hiding Workshop: IHW” [27] ในปี 1996 ได้มีการรวมหัวข้อเกี่ยวกับการทำลายน้ำดิจิตอลเข้าไปด้วย และในปี 1999 การประชุมวิชาการของ SPIE ได้เริ่มมีการประชุมวิชาการในหัวข้อเกี่ยวกับ Security and Watermarking of Multimedia Contents ขึ้นมา [28, 29]

## 2.3 การซ่อนข้อมูลข่าวสาร สเตกาโนกราฟี

การทำลายน้ำมีความสัมพันธ์กับสาขาการซ่อนข้อมูลข่าวสารและ สเตกาโนกราฟี นิยาม พื้นฐานมีความแตกต่างในข้อกำหนดและการออกแบบทางเทคนิค โดยสามารถพิจารณาถึงความ แตกต่างดังนี้

**2.3.1 การซ่อนข้อมูลข่าวสาร (Information Hiding)** เป็นการฝังข่าวสารลงในเนื้อหา ข้อมูล คำว่า *hiding* หมายถึงการทำให้ข้อมูลข่าวสารไม่สามารถมองเห็นได้ ซึ่งคล้ายกับการ ทำลายน้ำ หรือ เป็นการเก็บรักษาความลับ ของข้อมูลข่าวสาร เช่น การรักษาความลับของ ฐานข้อมูลสำหรับผู้ที่ไม่ได้รับอนุญาต

**2.3.2 สเตกาโนกราฟี (Steganography)** มาจากคำในภาษากรีก “*Stegano*” ที่หมายถึง “*Covered*” และ “*graphia*” ที่หมายถึง “*writing*” สเตกาโนกราฟีเป็นศาสตร์ของการปกปิด ข้อมูลข่าวสารในการสื่อสารซึ่งยังคงมีอยู่ในการสื่อสารปัจจุบัน วัตถุประสงค์ของสเตกาโนกราฟี คือการซ่อนข้อมูลข่าวสารไว้ในข้อมูลที่ไม่เป็นที่น่าสงสัย ซึ่งทำให้ไม่สามารถตรวจหาได้ว่ามี ข่าวสารที่เป็นความลับปรากฏซ่อนอยู่ภายใน ตัวอย่างเรื่องราวที่เกี่ยวกับเทคนิคสเตกาโนกราฟี คือ พงศาวดารของ [30] โดยมีผู้ดีชาวเปอร์เซียชื่อว่า Histiaeus ต้องการส่งสารลับไปยังเมือง Miletus โดยทำการโกนผมทาสของเขาออกและสักข่าวสารไว้บนหัวของทาส หลังจากที่เส้นผมของทาสผู้นั้นยาวขึ้นปกปิดข้อความเหล่านั้น จึงให้ทาสผู้นั้นเดินทางไปยังเมือง Miletus เมื่อไปถึงจึงให้โกนหัว ทาสผู้นั้นเปิดเผยสารลับนั้นแก่ Aristagoras ผู้สำเร็จราชการแห่งเมือง Miletus จากนั้น Aristagoras จึงเริ่มก่อการจลาจลต่อกษัตริย์เปอร์เซีย

## 2.4 ลายน้ำดิจิทัล

ลายน้ำถูกนำมาใช้ประโยชน์ในกิจกรรมต่าง ๆ มาเป็นเวลานาน ตัวอย่างเช่น การฝังลายน้ำลงในธนบัตร และแสตมป์ วัตถุประสงค์หลักคือป้องกันการปลอมแปลง ต่อมาเมื่อระบบเปลี่ยนรูปแบบไปเป็นระบบดิจิทัล ลายน้ำอนาล็อกก็เปลี่ยนรูปแบบมาเป็นลายน้ำดิจิทัล [31]

### 2.4.1 นิยามของลายน้ำดิจิทัล

ลายน้ำดิจิทัลคือข้อมูลดิจิทัลที่ถูกฝังลงในสื่อประสม เช่น ตัวอักษร ภาพนิ่ง ภาพกราฟิก ภาพเคลื่อนไหวที่สร้างขึ้น เสียง และวิดีโอ ทัศน เป็นต้น เพื่อใช้แสดงความเป็นเจ้าของ ติดตามและป้องกันการละเมิดสิทธิ์ทางปัญญา [31] ทั้งในลักษณะที่สามารถมองเห็นได้ซึ่งจะแสดงให้เห็นลายน้ำดิจิทัลได้อย่างชัดเจนและลักษณะที่ไม่สามารถมองเห็นได้ซึ่งจะต้องใช้วิธีการเฉพาะเพื่อการสืบค้น โดยลายน้ำดิจิทัลทั้งสองแบบจะต้องไม่สามารถถูกดึงออกจากสื่อได้ง่าย

### 2.4.2 ประเภทของลายน้ำดิจิทัล

ลายน้ำดิจิทัลสามารถแบ่งออกได้เป็น สองประเภท คือ

2.4.2.1 ลายน้ำดิจิทัลแบบมองเห็นได้ (Visible Watermarking) จะเป็นการฝังลายน้ำดิจิทัลลงในภาพต้นฉบับโดยตรง เมื่อฝังลายน้ำดิจิทัลเข้าไปแล้วจะต้องไม่รบกวนภาพต้นฉบับหรือรบกวนให้น้อยที่สุด [32] หมายถึงยังคงมองเห็นลักษณะของภาพต้นฉบับเดิมได้อย่างชัดเจนและยังสามารถเห็นลายน้ำดิจิทัลที่ฝังลงในภาพต้นฉบับด้วย เพื่อแสดงความเป็นเจ้าของในภาพนั้น ๆ บุคคลทั่วไปที่พบเห็นจะสามารถรับรู้ได้โดยทันทีว่าภาพนั้น ๆ เป็นของผู้ใด นอกจากนี้ยังเป็นการยับยั้งการกระทำที่จะเป็นการละเมิดสิทธิ์ของภาพนั้น ๆ แต่อย่างไรก็ตามวิธีการรูปแบบนี้มีข้อด้อยคือภาพต้นฉบับจะมีคุณภาพลดลงเนื่องจากตัวลายน้ำดิจิทัลจะไปบดบังรายละเอียดของภาพต้นฉบับ แต่การฝังลายน้ำดิจิทัลในรูปแบบนี้ยังคงเป็นที่นิยมใช้ในการแสดงความเป็นเจ้าของเพราะสามารถดำเนินการได้ง่ายและไม่ซับซ้อน ในบางครั้งความพยายามที่จะกำจัดลายน้ำดิจิทัลที่อยู่ในภาพนั้น ๆ ออกอาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพของรูปภาพ ซึ่งอาจจะเสียหายและมีคุณภาพต่ำลง

2.4.2.2 ลายน้ำดิจิทัลแบบมองไม่เห็น (Invisible Watermarking) ลักษณะที่สำคัญของการทำลายน้ำดิจิทัลชนิดนี้ คือเมื่อทำการฝังลายน้ำดิจิทัลลงในภาพต้นฉบับแล้วจะไม่สามารถมองเห็นลายน้ำดิจิทัลในภาพต้นฉบับ และต้องไม่ทำให้ภาพต้นฉบับเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมหรือเปลี่ยนลักษณะไปจากเดิมให้น้อยที่สุด การฝังลายน้ำดิจิทัลในรูปแบบนี้บุคคลอื่นจะไม่สามารถล่วงรู้เลยว่ามีการฝังลายน้ำดิจิทัลซ่อนอยู่ในรูปภาพนั้น ๆ หรือไม่

จึงทำให้บุคคลที่จะทำการคัดลอกย่อมกลัวการถูกติดตามและฟ้องร้องอันเนื่องมาจากลายน้ำดิจิทัลที่ฝังอยู่ในตัวภาพ นอกจากนี้การใช้รูปภาพที่ไม่ทราบที่มาที่ไปก็จะมีควมระมัดระวังมากขึ้นด้วย เพราะในกรณีที่เจ้าของภาพนั้นมาพบและพิสูจน์โดยใช้ลายน้ำดิจิทัลที่ซ่อนอยู่ในภาพ แสดงถึงความเป็นเจ้าของได้ ก็จะสามารถฟ้องร้องต่อบุคคลที่นำรูปภาพดังกล่าวมาใช้งาน [32]

#### 2.4.3 คุณสมบัติที่ต้องการของลายน้ำดิจิทัล

ประเด็นของปัญหาการซ่อนข้อมูลข่าวสารทั่วไป มีความสัมพันธ์กันระหว่างความคงทน (robustness) ความสามารถในการรับรู้ (visibility) และขนาดความจุของข้อมูลข่าวสาร (capacity) โดยที่ความคงทนนั้นเป็นความสามารถของข้อมูลข่าวสารที่ถูกใส่ลงในข้อมูลต้นฉบับ และ ข้อมูลนั้นทนต่อการดัดแปลงแก้ไข อีกสิ่งหนึ่งที่นำมาพิจารณาในการซ่อนข้อมูลข่าวสารนั้นคือ ความสามารถในการรับรู้ โดยที่ข่าวสารที่ซ่อนลงไปไม่ควรสังเกตเห็นเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับต้นฉบับ และสุดท้ายคือ ความจุของข้อมูลข่าวสารที่สามารถใส่ลงไปในข้อมูลเสียงต้นฉบับ ในการออกแบบ อัลกอริทึมเพื่อนำมาใช้งานได้อย่างเหมาะสม จึงจำเป็นต้องคำนึงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง ข้อกำหนดที่สำคัญทั้งสาม ส่วนนี้ โดยทั่วไปแล้วการทำลายน้ำดิจิทัลมีข้อกำหนดมากมายขึ้นอยู่กับการประยุกต์ใช้งานแต่ละชนิด ดังนั้นข้อกำหนดบางข้ออาจจะไม่มีในเทคนิคการทำลายน้ำบางเทคนิค การทำลายน้ำส่วนใหญ่มีข้อกำหนดดังต่อไปนี้

2.4.3.1 ภายหลังจากการฝังลายน้ำดิจิทัลแล้วคุณภาพของสัญญาณเสียงไม่ควรลดลง

2.4.3.2 มีความคงทน เมื่อนำสัญญาณเสียงที่มีลายน้ำดิจิทัล ฝังอยู่มาถูกโจมตีโดยวิธีการประมวลสัญญาณต่าง ๆ ทั้งแบบเชิงเส้นและแบบไม่เป็นเชิงเส้น รวมถึงการบีบอัดแบบมีการสูญเสีย วิธีการเหล่านี้ต้องไม่ทำให้ลายน้ำดิจิทัลหายไปหรือถูกทำลายได้

2.4.3.3 แม้ลายน้ำดิจิทัลบางส่วนจะหายไป ลายน้ำดิจิทัลที่คงอยู่ต้องชัดเจนพอที่จะสามารถระบุเจ้าของผลงานที่แน่นอนได้

2.4.3.4 มีความปลอดภัย เทคนิคการทำลายน้ำต้องมีความปลอดภัยถึงแม้ว่าจะรู้ อัลกอริทึมที่แท้จริงในการฝังหรือแยกลายน้ำ บุคคลอื่น นอกจากเจ้าของผลงานแล้ว บุคคลอื่นต้องไม่สามารถถอดลายน้ำดิจิทัล ออกได้

2.4.3.5 การทำลายข้อมูลลายน้ำดิจิทัลทำได้ต่อเมื่อสัญญาณเสียงที่ใส่ลายน้ำถูกโจมตีด้วยวิธีการใด ๆ จนคุณภาพของเสียงลดต่ำจนไม่อาจใช้การใด ๆ ได้

#### 2.4.4 หลักการในการทำลายน้ำดิจิทัล

โดยทั่วไปเทคนิคในการทำลายน้ำดิจิทัล ทั้งลายน้ำนั้นมีรูปแบบคล้ายกัน คือเป็นการใส่สัญญาณชนิดใด ชนิดหนึ่งเข้าไปในตัวขั้ ข้อมูลเสียงก่อนที่จะทำการเผยแพร่ ซึ่งสัญญาณนี้อาจถูก



เปลี่ยนแปลงแก้ไขหรือตรวจสอบได้โดยผู้เป็นเจ้าของหรือผู้ที่ได้รับอนุญาตเท่านั้น การทำลายน้ำดิจิทัลทุกประเภทประกอบด้วยขั้นตอนทั่ว ๆ ไปคือ

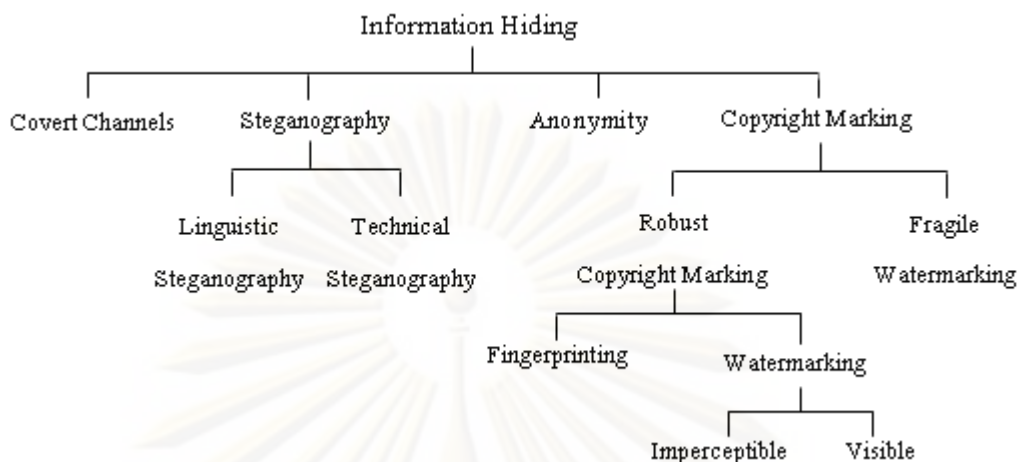
#### 2.4.4.1 การใส่ลายน้ำดิจิทัล (Watermark embedding)

2.4.4.2 การตรวจสอบ (Detection) หรือการนำลายน้ำดิจิทัลออกมา ข้อมูลเสียงจะผ่านกระบวนการใส่สัญญาณลายน้ำ โดยสัญญาณที่ใส่เข้าไปจะมีค่าขึ้นอยู่กับกุญแจลับ ที่ใช้ในการเข้ารหัสเพื่อที่จะได้มีเพียงผู้ที่ถือกุญแจลับนี้เท่านั้นที่จะสามารถเปลี่ยนแปลงแก้ไขสัญญาณลายน้ำดังกล่าวได้ เช่นเดียวกับกระบวนการตรวจสอบสัญญาณลายน้ำซึ่งจำเป็นต้องใช้กุญแจลับในการนำสัญญาณลายน้ำที่ถูกต้องกลับคืนมาในการแบ่งแยกประเภทของเทคนิคการทำลายน้ำดิจิทัล อาจใช้ตำแหน่งที่ทำการใส่สัญญาณเป็นหลักคือ ใช้ลักษณะวิธีการของกระบวนการใส่ลายน้ำดิจิทัล หรือกระบวนการตรวจสอบลายน้ำดิจิทัลเป็นหลักก็ได้

#### 2.4.5 วิธีการฝังลายน้ำดิจิทัล

วิธีการฝังลายน้ำดิจิทัลเข้าไปในสัญญาณเสียงต้นฉบับแบ่งออกเป็น สองวิธี วิธีแรกคือการฝังลายน้ำดิจิทัลในรูปแบบ โดเมนเวลาซึ่งเป็นการเลือกจุด ตำแหน่งของเสียง แล้วทำการปรับแต่งค่าโดยพิจารณาจากตำแหน่งของจุด เสียงที่อยู่ในเสียงต้นฉบับนั้น ๆ เป็นสำคัญ ส่วนอีกวิธีหนึ่งนั้นเป็นการ ฝังลายน้ำดิจิทัลในรูปแบบ โดเมนความถี่ ซึ่งเป็นผลมาจากการใช้วิธีการแปลง (Transform) แบบต่าง ๆ เช่น การแปลงดีสครีตฟูเรียร์ทรานฟอร์ม (Discrete Fourier Transform, DFT) หรือการแปลงโคไซน์แบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Cosine Transform, DCT) หรือการแปลงเวฟเล็ต โดยทำการแก้ไขค่าสัมประสิทธิ์ของการแปลงที่มีค่าอยู่ในช่วงความถี่ที่เหมาะสม ซึ่งจะมีผลต่อการตัดสินใจเพื่อกำหนดปริมาณลายน้ำดิจิทัลที่จะฝังลงบนภาพต้นฉบับเพื่อให้มีความสมดุลกันระหว่างการมองเห็นและความคงทน

วิธีการฝังลายน้ำดิจิทัล ถือเป็นส่วนหนึ่งของวิธีซ่อนข้อมูล (Information Hiding) แสดงดังภาพที่ 2-1 ซึ่งนับว่าเป็นวิธีการที่มีความสำคัญที่สามารถประยุกต์ใช้ได้อย่างกว้างขวางไม่ว่าจะเป็นในภาพนิ่ง วิดีโอ ทัศนและเสียง แต่ละวิธีจะมีวิธีการ ฝังลายน้ำดิจิทัลที่แตกต่างกันออกไป แต่มีหลักการพื้นฐานเหมือนกันคือการรักษาคุณภาพของภาพที่ฝังลายน้ำดิจิทัลแล้วให้ใกล้เคียงกับภาพต้นฉบับมากที่สุดและลายน้ำดิจิทัลที่ฝังไว้จะต้องไม่ถูกทำลายได้โดยง่าย ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้จะเป็นดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพของวิธีการฝังลายน้ำดิจิทัล



ภาพที่ 2-1 โครงสร้างของวิธีซ่อนข้อมูล

วิธีการฝังลายน้ำดิจิทัลสามารถจำแนกได้ตามปัจจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น จำแนกตามคุณสมบัติของสื่อและความต้องการของเจ้าของสื่อ นั้น ๆ โดยจำแนกเป็นหกประเภทดังนี้ [33, 34]

2.4.5.1 Perceptible Technique การฝังด้วยวิธีนี้จะมองเห็นลายน้ำดิจิทัลวางซ้อนอยู่บนภาพอย่างชัดเจน

2.4.5.2 Imperceptible Technique เป็นวิธีฝังลายน้ำดิจิทัลโดยเจตนาไม่ให้เห็นด้วยตามนุษย์ ข้อดีคือผู้ละเมิดลิขสิทธิ์จะไม่รู้ว่ามีการฝังลายน้ำดิจิทัลอยู่ในภาพ

2.4.5.3 Fragile Technique เป็นวิธีที่มุ่งเน้นไปที่ความเปราะบางของลายน้ำดิจิทัล ซึ่งลายน้ำดิจิทัลที่ถูกฝังไว้ในข้อมูลจะมีความไวต่อการเสียหายและการเปลี่ยนแปลงแม้เพียงเล็กน้อย เช่น ถ้าข้อมูลที่มีลายน้ำดิจิทัลฝังอยู่ภายในถูกเปลี่ยนแปลงหรือแก้ไข ลายน้ำดิจิทัลที่อยู่ภายในก็จะเสียหายและสามารถตรวจสอบบริเวณที่ถูกเปลี่ยนแปลงได้ วิธีการประเภทนี้จะไม่มีความเหมาะสมที่จะใช้ในการสร้างความน่าเชื่อถือของข้อมูลว่าเป็นของแท้ที่ไม่ได้ผ่านการเปลี่ยนแปลงแก้ไขใด ๆ มาก่อน

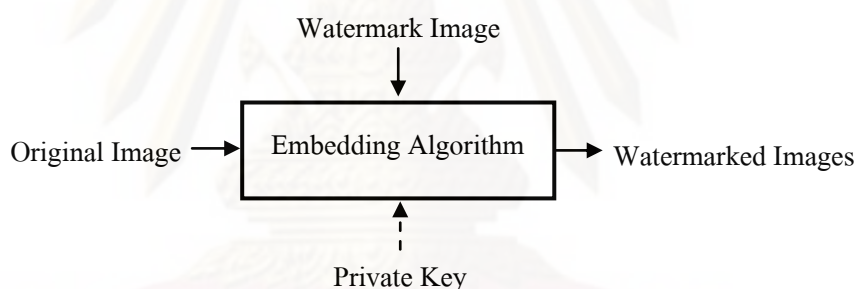
2.4.5.4 Robust Technique เป็นวิธีฝังลายน้ำดิจิทัลที่ภายหลังการฝังลายน้ำดิจิทัลแล้วลายน้ำดิจิทัลจะยังคงอยู่ตราบเท่าที่การโจมตีมีขนาดไม่รุนแรงเกินไป วิธีนี้จะมี ความเหมาะสมกับการใช้งานที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันการละเมิดลิขสิทธิ์ของตัวข้อมูล เนื่องจากความยากลำบากในการเปลี่ยนแปลงแก้ไขทำลายลายน้ำดิจิทัลที่อยู่ข้อมูลต้นฉบับ

2.4.5.5 Source Extraction Technique หรือ Non-Blind Technique เป็นวิธีฝังลายน้ำดิจิทัลที่ต้องใช้ภาพต้นฉบับเพื่อช่วยในการถอดลายน้ำดิจิทัลที่ซ่อนไว้กลับคืนมา

2.4.5.6 Destination Extraction Technique หรือ Blind Technique เป็นวิธีที่ไม่ต้องใช้ภาพต้นฉบับเพื่อช่วยในการถอดลายน้ำดิจิทัลที่ซ่อนไว้กลับคืนมา

#### 2.4.6 การฝังลายน้ำดิจิทัล (Watermark embedding)

การฝังลายน้ำดิจิทัลคือกระบวนการใส่ลายน้ำดิจิทัลให้ ฝังเข้าอยู่ในสื่อประสมต้นฉบับ โดยให้มีจำนวนมากที่สุดเท่าที่จะทำได้และไม่ทำให้คุณภาพของสื่อเสียไป อีกทั้งจะต้องคงทนต่อการโจมตีทำลายทั้งที่ตั้งใจและไม่ได้ตั้งใจ ข้อมูลเข้า ของกระบวนการ ฝังลายน้ำดิจิทัลนี้จะประกอบด้วย ภาพต้นฉบับ ลายน้ำดิจิทัลที่จะนำมาใส่ลงในภาพต้นฉบับ และในบางกรณีจำเป็นต้องใช้รหัสลับส่วนตัว (Private Key) ด้วย [33] ภาพทั้งสองส่วนนี้จะถูกนำเข้าสู่กระบวนการฝัง (Embedding Algorithm) หลังจากผ่านกระบวนการดังกล่าวแล้วข้อมูลผลลัพธ์ ที่ได้ก็คือภาพผลลัพธ์ที่มีลายน้ำดิจิทัลฝังอยู่ ดังภาพที่ 2-2

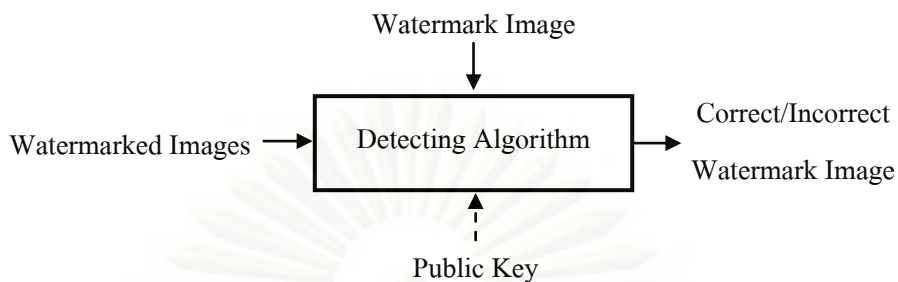


ภาพที่ 2-2 การฝังลายน้ำดิจิทัลลงในภาพต้นฉบับ

#### 2.4.7 การตรวจหาลายน้ำดิจิทัล (Watermark detection)

เมื่อมีความต้องการพิสูจน์ความเป็นเจ้าของ โดยเฉพาะในกรณีที่เป็นการ ฝังลายน้ำดิจิทัลแบบไม่สามารถมองเห็นได้นั้น จะเริ่มต้นด้วยการตรวจหาว่าในภาพที่ต้องสงสัยนั้นมีลายน้ำดิจิทัลฝังอยู่หรือไม่ โดยใช้กระบวนการแสดงดังภาพที่ 2-3 ข้อมูลเข้าของกระบวนการตรวจหาลายน้ำดิจิทัลนี้คือภาพที่ต้องสงสัยว่ามีลายน้ำดิจิทัลฝังอยู่ ลายน้ำดิจิทัล ในบางกรณีอาจมีรหัสลับ หรือภาพต้นฉบับด้วย

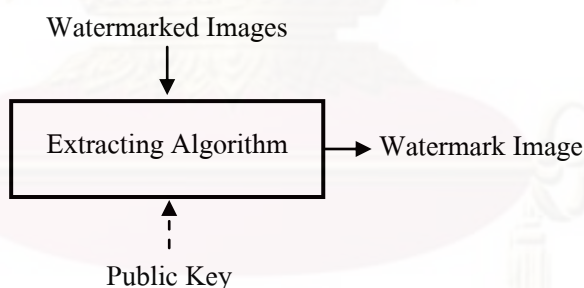




ภาพที่ 2-3 การตรวจหาลายน้ำดิจิทัลที่อาจฝังอยู่ในภาพต้นฉบับ

#### 2.4.8 การถอดลายน้ำดิจิทัล (Watermark Extraction)

ในกรณีที่ตรวจพบลายน้ำดิจิทัลในภาพนั้นขั้นตอนถัดมาก็คือ การถอดลายน้ำดิจิทัล การถอดลายน้ำดิจิทัลจะมีแนวทางปฏิบัติอยู่สองแบบ แบบแรกคือการถอดลายน้ำดิจิทัลโดยไม่ต้องใช้ภาพต้นฉบับ (Blind Watermarking) เกิดขึ้นเมื่อในบางกรณีที่ไม่สามารถหาภาพต้นฉบับได้อีกแบบหนึ่งเป็นการถอดลายน้ำดิจิทัลที่ต้องใช้ภาพต้นฉบับ ซึ่งทั้งสองรูปแบบเป็นกระบวนการที่ทำให้ได้ลายน้ำดิจิทัลและภาพต้นฉบับก่อนถูกฝังลายน้ำดิจิทัลกลับมา แสดงดังภาพที่ 2-4



ภาพที่ 2-4 การถอดลายน้ำดิจิทัลออกจากภาพผลลัพธ์ที่ลายน้ำดิจิทัลฝังอยู่

#### 2.4.9 เกณฑ์การวัดประสิทธิภาพของลายน้ำดิจิทัล

2.4.9.1 เกณฑ์การวัดประสิทธิภาพของการฝังลายน้ำดิจิทัลนั้น ประยุกต์ใช้เกณฑ์การวัดคุณภาพของภาพ [34, 35] โดยแบ่งออกเป็น

ก) เกณฑ์เชิงคุณภาพ (Subjective Fidelity Criteria) เพื่อวัดประสิทธิภาพการได้ยินเสียงของมนุษย์มีวิธีการคือสุ่มกลุ่มตัวอย่างที่แตกต่างกันมาทำการทดลอง โดยแบ่ง เป็น สองกลุ่ม คือกลุ่มคนที่มีพื้นฐานด้านดนตรีและ กลุ่มคนที่ไม่มีความรู้ด้านนี้มาก่อน

ขั้นต่อมาคือให้กลุ่มตัวอย่างทั้งสองมาพิจารณาเสียงที่ฟังภาพลายน้ำดิจิตอลแล้วพร้อมกัน จากนั้นให้คะแนนตามเกณฑ์ที่กำหนด (Subjective Fidelity Scoring Scale) แต่วิธีนี้มีข้อเสียคือผลการทดลองจะไม่มีมาตรฐานเพียงพอ ทั้งนี้อาจเกิดจากกลุ่มตัวอย่างมีความลำเอียงในการให้คะแนน

ข) เกณฑ์เชิงปริมาณ (Objective Fidelity Criteria) คือใช้การคำนวณทางคณิตศาสตร์เป็นเกณฑ์วัดผลการทดลอง ข้อดีคือสะดวกต่อการใช้งาน เช่น การใช้ค่า SNR (Signal-to-Noise Ratio) ในการวัดความผิดเพี้ยนของเสียงที่ผ่านการ ฟังลายน้ำดิจิตอลแล้วเทียบกับเสียงต้นฉบับ และการวัดสัดส่วนความเหมือนของลายน้ำดิจิตอลที่ถอดออกได้ทั้งก่อนและหลังการโจมตีเชิงสัญญาณเปรียบเทียบกับลายน้ำดิจิตอลต้นฉบับใช้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

การวัดประสิทธิภาพของการ ฟังลายน้ำดิจิตอลสำหรับงานวิจัยนี้ ใช้เกณฑ์เชิงปริมาณเป็นเกณฑ์การวัดผลการทดลอง ซึ่งแบ่งเป็น 2 ส่วนตามกระบวนการวิจัย คือกระบวนการ ฟังลายน้ำดิจิตอล ใช้ค่า SNR เป็นเกณฑ์การวัดผลการทดลอง และกระบวนการถอดลายน้ำดิจิตอลใช้การวัดสัดส่วนความเหมือนเป็นเกณฑ์การวัดผลการทดลอง SIM

2.4.9.2 การตรวจสอบหาค่าความผิดเพี้ยนของเสียง โดยใช้ค่า SNR เป็นตัววัดเกณฑ์เชิงปริมาณที่ใช้ประเมินค่าสัญญาณรบกวน (ลายน้ำดิจิตอล) ที่ใส่เพิ่มลงไปสัญญาณหลัก (เสียงต้นฉบับ) โดยมีหน่วยวัดเป็นเดซิเบล (dB:Decibel) ซึ่งวิธีคำนวณแสดงได้ดังสม การที่ 2-1 และสมการที่ 2-1

$$SNR = 10 \log_{10} \left( \frac{\sum_i (Y_i^2)}{\sum_i (Y_i - y_i)^2} \right) \quad (2-1)$$

โดยที่ค่า  $Y$  และ  $y$  เป็นสัญญาณเสียงดั้งเดิมและสัญญาณเสียงที่ถูกฟังตัวแล้วตามลำดับ โดยคุณภาพการผิดเพี้ยนของเสียงผลลัพธ์ที่ผ่านการ ฟังลายน้ำดิจิตอลแล้ว จะแปรผกผันตามค่า SNR คือหากค่า SNR น้อยแสดงว่าเสียงมีการผิดเพี้ยนจากเสียงต้นฉบับมากและหากค่า SNR มากแสดงว่าภาพมีการผิดเพี้ยนน้อย

2.4.9.3 การวัดค่าความเหมือนของภาพ (Similarity Measurement) ด้วยค่า SIM คือจะใช้วัดค่าความเหมือนระหว่างลายน้ำดิจิตอลต้นฉบับและลายน้ำดิจิตอลที่ถอดออกมาได้ทั้งก่อนและหลังผ่านการโจมตีแล้วโดยค่าผลลัพธ์ที่ได้จะอยู่ในช่วงระหว่างค่า 0 ถึงค่า 1 สำหรับวิธีการคำนวณค่าความเหมือนของภาพสองมิติ สามารถทำได้ตามสมการที่ 2-2

$$Sim = \frac{\sum_{i=1}^{M1} \sum_{j=1}^{M2} W(i,j)W'(i,j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{M1} \sum_{j=1}^{M2} W(i,j)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{M1} \sum_{j=1}^{M2} W'(i,j)^2}} \quad (2-2)$$

เมื่อ  $W_{(i,j)}$  และ  $w'_{(i,j)}$  แทนค่าความเข้มสีของจุดภาพ ณ ตำแหน่ง  $(i,j)$  ในลายน้ำดิจิทัลลดต้นฉบับและลายน้ำดิจิทัลที่ถอดออกมาตามลำดับ โดยคุณภาพของลายน้ำดิจิทัลจะแปรผันตาม ค่าความเหมือนของภาพคือค่าความเหมือนสูงมากเท่าใดแสดงว่าลายน้ำดิจิทัลที่ถอดออกมาจะเหมือนกับภาพต้นฉบับมากขึ้นด้วยเช่นกัน

#### 2.4.10 การทดสอบความคงทนของลายน้ำดิจิทัล

การฝังลายน้ำดิจิทัลจำเป็นต้องมีกระบวนการทดสอบประสิทธิภาพของวิธีการที่ใช้ โดยเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบก็คือการโจมตี ซึ่งลายน้ำดิจิทัลที่มีประสิทธิภาพสูงจะต้องมีความคงทนต่อการโจมตีในรูปแบบต่าง ๆ การโจมตีอาจเกิดจากการกระทำพื้นฐานที่ผู้กระทำไม่ได้ตั้งใจทำลายลายน้ำดิจิทัล หรือเกิดจากความตั้งใจของผู้กระทำที่ต้องการทำลาย ลายน้ำดิจิทัลโดยใช้วิธีการโจมตีเชิงสัญญาณ ซึ่งสามารถแบ่งออกโดยใช้วิธีการโจมตีเป็นเกณฑ์ได้สี่ กลุ่มดังนี้

2.4.10.1 Simple Attacks เป็นการดัดแปลงเสียงที่มีลายน้ำดิจิทัล ฝังอยู่ โดยไม่ตั้งใจจะทำลายลายน้ำดิจิทัล แต่การดัดแปลงนั้นส่งผลกระทบต่อลายน้ำดิจิทัลที่ฝังอยู่ภายในถูกทำลาย ซึ่งประกอบด้วย

- ก) Filtering คือการกรองสัญญาณแบบเชิงเส้นและแบบไม่เชิงเส้น
- ข) Compression คือการบีบอัดข้อมูลเพื่อลดขนาดของเสียง เช่น การบีบอัดข้อมูลในมาตรฐาน MP3
- ค) Noise Addition คือการฝังสัญญาณรบกวนอื่นเพิ่มเติมเข้ามาในเสียง เช่น สัญญาณรบกวนแบบ Gaussian และแบบ Salt & Pepper

2.4.10.2 Synchronization Attacks คือการดัดแปลงเสียงที่ผ่านการฝังลายน้ำดิจิทัล โดยมีความตั้งใจที่ไม่ต้องการให้ตรวจหาและถอดลายน้ำดิจิทัลกลับคืนมาได้

- ก) Cropping คือการตัดเสียงเป็นบางส่วน มีผลให้ลายน้ำดิจิทัลบริเวณนั้นหายไปซึ่งส่งผลกระทบต่อตรงในขั้นตอนการถอดลายน้ำดิจิทัลกลับคืน
- ข) Jitter Attack คือการฝัง/ตัดแถวหรือคอลัมน์ของเสียง ซึ่งส่งผลให้ได้ค่าลายน้ำดิจิทัลที่ผิดพลาดเมื่อมีการถอดลายน้ำดิจิทัลกลับคืนมา

2.4.10.3 Collusion Attacks เป็นการพยายามลบลายน้ำดิจิตอลออกจากเสียงที่มีการฝังลายน้ำดิจิตอลลงไปแล้ว โดยการใช้ข้อมูลชนิดเดียวกันที่มีลายน้ำดิจิตอลที่แตกต่างกันมากกว่าสองแบบมาทำการเฉลี่ยค่ากันหรือลบส่วนที่แตกต่างกันระหว่างเสียง

ก) De-noise Attack เป็นการกำจัดสัญญาณรบกวน เพื่อให้ลายน้ำดิจิตอลที่ถอดออกมาได้มีความคมชัดมากขึ้น อาจทำให้ลายน้ำดิจิตอลถูกกำจัดออกไปด้วย

ข) Interleaving คือการฝังจุดสัญญาณใหม่เข้าไปในลายน้ำดิจิตอล ซึ่งทำให้ลายน้ำดิจิตอลที่ใส่เข้าไปในภาพนั้นถูกรบกวน

#### 2.4.11 การประยุกต์ใช้ลายน้ำดิจิตอล

การประยุกต์ใช้ลายน้ำดิจิตอล คือ การนำเสนอสื่อดิจิตอลที่มีการจัดลิขสิทธิ์ เช่น วีดีโอ เพลง และ ภาพ ที่มีการนำเสนอทางสื่ออินเทอร์เน็ตเพื่อป้องกันคัดลอกสำเนาหรือปัญหาการทำซ้ำ ผลงานโดยผิดกฎหมาย และเทคนิคที่ช่วยในการปกป้องสิทธิ์ข้อมูลของเจ้าของ ผลงาน นั้นคือ เทคนิคการเข้ารหัสลับ การเข้ารหัสลับเป็นการป้องกันเนื้อหาข้อมูลในระหว่างการส่งผ่านข้อมูลจากผู้ส่งไปยังผู้รับ หลังจากผู้รับทำการถอดรหัสลับ ข้อมูล ข้อมูลยังถูกคัดลอกทำซ้ำได้ การเข้ารหัสลายน้ำโดยใช้ลายน้ำดิจิตอลเป็นส่วนหนึ่งของข้อมูลข่าวสารที่ซ่อนไว้ ในเนื้อหาข้อมูลของสื่อต่าง ๆ โดยที่ไม่สามารถรับรู้ได้จากสัมผัสของมนุษย์ แต่สามารถตรวจสอบได้ด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ ข้อดีของวิธีการนี้นั้นคือ เนื้อหาข้อมูลไม่สามารถแยกลายน้ำออกได้ กางฝังลายน้ำได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ เช่น

##### 2.4.11.1 ใช้เป็นลายเซ็น

ลายน้ำเป็นสิ่งที่สามารถพิสูจน์การเป็นเจ้าของผลงาน ในข้อมูลข่าวสารสามารถนำมาใช้ได้ โดยที่ผู้ใช้ได้รับสิทธิ์ที่ถูกต้องตามกฎหมายในการทำซ้ำ หรือตีพิมพ์ผลงานจากการติดต่อกับเจ้าของผลงาน ซึ่งในอนาคตลายน้ำอาจจะถูกนำมาใช้ในการช่วยในการกำหนดสิทธิในการเป็นเจ้าของ

##### 2.4.11.2 ใช้แทนการพิมพ์ลายนิ้วมือ

ลายน้ำสามารถใช้พิสูจน์ผู้สิทธิของผลงาน ซึ่งอาจช่วยตามรอยแหล่งที่ทำการทำซ้ำผลงานผิดกฎหมาย ตัวอย่างเช่น ในธุรกิจ สิ่งพิมพ์ หากการทำลายน้ำภาพดิจิตอลมีความทนทานต่อการแปลงสัญญาณจากระบบดิจิตอลเป็นอนาล็อก และ จากระบบอนาล็อกเป็นดิจิตอล การที่จะพิมพ์ หน้าปกหนังสือโดยใช้ภาพที่มีลายน้ำดิจิตอลอยู่ก็จะเป็นไปได้ เพื่อป้องกันการคัดลอกภาพนำไปใช้อย่างผิดกฎหมาย หรืออาจนำมาใช้ในการทำธุรกรรมบนอินเทอร์เน็ต เพื่อที่ป้องกันมิให้รูปภาพที่ถูกคัดลอกมีการเผยแพร่หรือจำหน่ายและนำไปใช้อย่างผิดกฎหมาย เพราะบุคคลที่จะทำการ



คัดลอกข้อมูลที่غلัวการถูกติดตามและฟ้องร้องอันเนื่องมาจาก ลายน้ำที่ซ่อนอยู่ในตัวสื่อต้นฉบับ นอกจากนี้การใช้ภาพที่ไม่ทราบที่มาที่ไปก็มีความระมัดระวังมากยิ่งขึ้นด้วย เนื่องจากเจ้าของภาพนั้นมาพบและพิสูจน์สิทธิโดยใช้ลายน้ำดิจิทัลที่ซ่อนอยู่ในภาพถึงความเป็นเจ้าของได้ ก็สามารพฟ้องร้องต่อบุคคลที่นำภาพดังกล่าวมาใช้งาน

#### 2.4.11.3 การถ่ายทออสัญญาณ และแสดงสัญลักษณ์

สัญลักษณ์ลายน้ำใช้บ่งบอกถึงการเป็นเจ้าของผลงาน แต่ไม่เป็นการตรวจสอบโดยระบบอัตโนมัติทางโทรทัศน์และการถ่ายทออสัญญาณเสียงทางวิทยุ ในธุรกิจภาพยนตร์ การทำลายน้ำดิจิทัลจะชว้ลดปัญหาการละเมิดลิขสิทธิ์โดยการคัดลอกตัวข้อมูลลงในแผ่นซีดี ดีวีดี เพื่อจัดจำหน่ายอย่างผิดกฎหมาย เพราะหากมีตัวอย่างของข้อมูลที่มีสัญลักษณ์ลายน้ำอยู่ ก็จะสามารถตามจับผู้กระทำความผิดมาลงโทษได้ และการส่งผ่านข้อมูลวีดีโอผ่านทางระบบเครือข่ายยังได้รับการป้องกันการทำซ้ำ

#### 2.4.11.4 การรับรองความถูกต้อง

ข้อมูลที่มีความสำคัญมาก ตัวอย่างเช่น การธุรกรรมพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์เกี่ยวกับข้อมูลมัลติมีเดีย ภาพถ่ายทางการแพทย์ ภาพข่าว หากมีการปรับเปลี่ยนหรือแต่งเติมรายละเอียดข้อมูลลงไปให้แตกต่างจากต้นฉบับอาจก่อให้เกิดผลเสียหายอย่างมาก หรือภาพตัดต่อของดารา ลายน้ำที่ถูกเข้ารหัสข่าวสารเพื่อใช้รับรองความถูกต้องในเนื้อหาข้อมูล จึงต้องถูกออกแบบให้มีความเปราะบาง (Fragile) สมมติว่าข้อมูลสำคัญถูกแก้ไขก็จะทำลายน้ำเสียหายได้ง่าย และระบู่ถึงผู้สร้างลายน้ำได้ หรือใช้รับรองสิทธิการฝังข้อมูลโดยตรงลงในเนื้อหาซึ่งง่ายต่อการตรวจสอบ ถ้าลายน้ำไม่ตรงกับรหัสที่ฝังไว้แสดงว่าเกิดความผิดปกติขึ้นในข้อมูล

#### 2.4.11.5 ควบคุมการคัดลอก

ลายน้ำสามารถบรรจุข้อมูลเกี่ยวกับกฎเกณฑ์การใช้งาน และการทำซ้ำของเจ้าของผลงานเพื่อบังคับใช้ทั่วไป ตัวอย่างเช่น “เนื้อหาข้อมูลไม่สามารถทำซ้ำได้” อุปกรณ์ที่มีความสามารถคัดลอกข้อมูล จะใช้ลายน้ำเพื่อป้องกันข้อมูลดิจิทัลในระบบที่ปิด โดยใช้ฮาร์ดแวร์พิเศษสำหรับทำสำเนาและดูรายละเอียด ซึ่งจะมีรหัสที่แสดงถึงจำนวนครั้งที่อนุญาตให้ทำสำเนา ดังนั้นทุกครั้งที่มีการทำสำเนาฮาร์ดแวร์ตัวนี้จะ ทำการเปลี่ยนแปลงรหัสและเมื่อจำนวนเท่ากับศูนย์ระบบจะไม่สามารถดูข้อมูลได้อีก ตัวอย่างเช่น เครื่องเล่นดีวีดี

#### 2.4.11.6 การสื่อสารข้อมูลลับ

สัญญาณที่ฝังไว้ นำมาใช้ส่งข้อมูลลับจากบุคคลหนึ่งไปยังอีกคนหนึ่งโดยไม่ทำให้บุคคลอื่นที่ไม่เกี่ยวข้องทราบถึงข้อมูลข่าวสารที่ถูกส่งออกไป วิธีนี้เป็นารประยุกต์ใช้เทคนิค สเตกาโนกราฟฟีที่

ใช้การซ่อนข้อมูลข่าวสารส่งไปให้บุคคลอื่น วิธีนี้ถูกนำมาประยุกต์ใช้มากในการทหาร ตัวอย่างเช่น เหตุการณ์ก่อการร้ายตึกเวิลด์เทรดเซ็นเตอร์

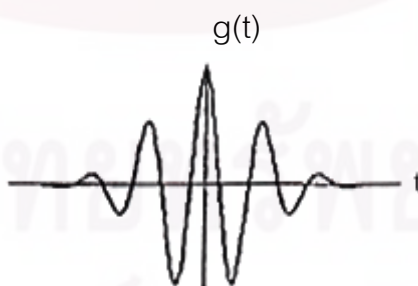
## 2.5 การแปลงเวฟเล็ต

### 2.5.1 ทฤษฎีพื้นฐานของการแปลงเวฟเล็ต

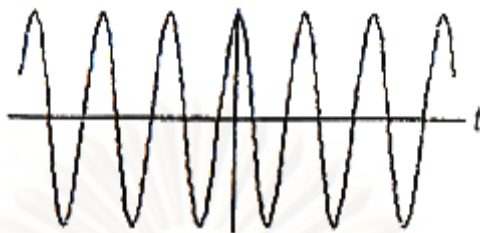
ทฤษฎีเวฟเล็ต (Wavelet Theory) เป็นคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการอธิบายการสร้างโมเดลของ สัญญาณระบบหรือกระบวนการทางฟิสิกส์ใด ๆ ซึ่งประกอบขึ้นด้วยเซตของสัญญาณเฉพาะ หรือระบบย่อย ๆ มารวมกันเป็นสัญญาณ หรือระบบนั้น ๆ โดยสัญญาณเฉพาะนี้จะเป็นคลื่นเล็ก ๆ ซึ่งถูกเรียกว่า “เวฟเล็ต” ลักษณะของเวฟเล็ตจะเป็นคลื่นที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง (Oscillatory) และขนาดของคลื่นจะลดลงสู่ศูนย์อย่างรวดเร็วทั้งสองด้าน

ในภาพที่ 2-5 เป็นตัวอย่างของเวฟเล็ตชนิดหนึ่งซึ่งเรียกว่า “เวฟเล็ตแบบมอร์เล็ต” (Morlet)  $g(t) = e^{-\frac{t^2}{64}} \cos(t)$  เมื่อสังเกตจะพบว่ามีความสมบัติของเวฟเล็ตตามที่กล่าวมาทั้ง 2 เงื่อนไข นั่นคือมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องในลักษณะของสัญญาณคลื่นรูปไซน์ (Sinusoidal Signal) :  $\cos(t)$  ดังแสดงในภาพที่ 2-6 รวมกับเงื่อนไขการลดลงอย่างรวดเร็วตามลักษณะของ Windows Function  $f(t) = e^{-\frac{t^2}{64}}$  ดังแสดงในภาพที่ 2-7

โดยเมื่อทั้งสองเงื่อนไขเกิดขึ้นพร้อมกันจะทำให้เกิดคลื่นเล็ก ๆ ที่เรียกว่าเวฟเล็ต ดังนั้นการ คูณกันของฟังก์ชันออสซิลเลท (Oscillate Function) และฟังก์ชันการลดลง (Decay Function) จะให้ผลเป็นคลื่นเวฟเล็ต ดังแสดงในภาพที่ 2-5 [36]



ภาพที่ 2-5 ลักษณะคลื่นเวฟเล็ต แบบ Morlet



ภาพที่ 2-6 ลักษณะของสัญญาณ Sinusoidal Signal



ภาพที่ 2-7 ลักษณะของ Window Function

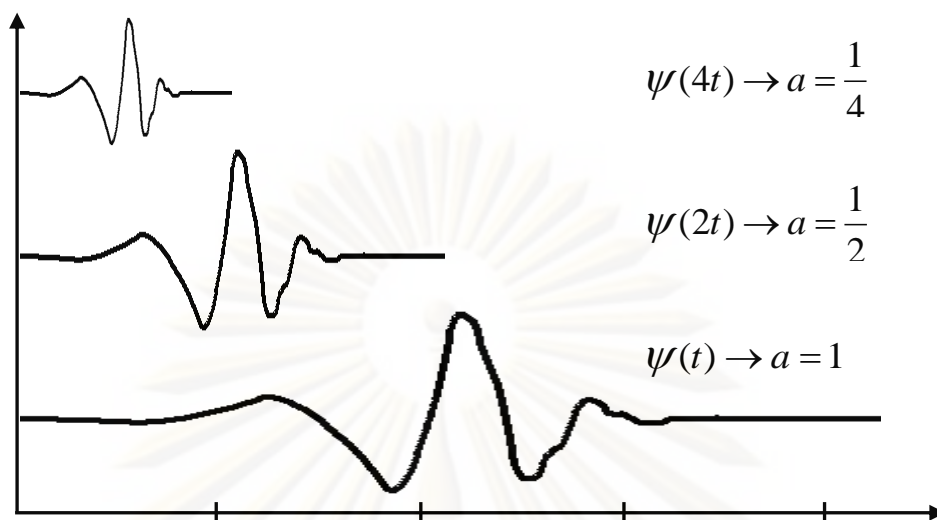
ดังนั้นการอธิบายถึงสัญญาณใด ๆ ด้วยการแปลงเวฟเล็ตคือการนำกลุ่มของคลื่นเวฟเล็ตแต่ละตัวที่มีโครงสร้างมาจากฟังก์ชันเดียวกันมาเป็นตัวอธิบาย ซึ่งฟังก์ชันนี้จะเป็นเวฟเล็ตแม่ (Mother Wavelets) โดยที่คลื่นเวฟเล็ตแต่ละคลื่นจะเกิดจากการสเกล (Scaling:  $a$ ) ซึ่งเป็นการยืดหรือหดตัวและการเลื่อนตำแหน่ง (Translation or Shifting:  $b$ ) ของเวฟเล็ตแม่ นั่นเอง ซึ่งเป็นการเปลี่ยนตำแหน่งบนแกนเวลา ดังนั้นถ้าให้  $\psi(t)$  เป็นฟังก์ชันเวฟเล็ตแม่จะสามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ของพจน์ต่าง ๆ ได้ดังนี้

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2-3)$$

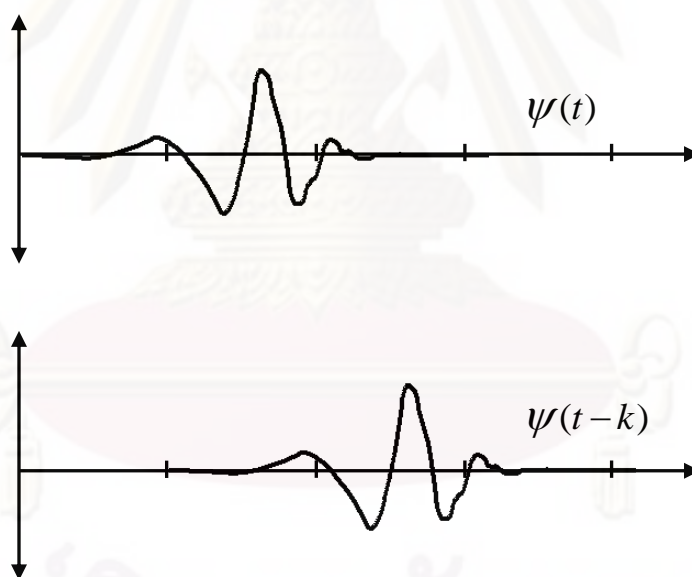
$\psi(t)$  เป็นฟังก์ชันเวฟเล็ตแม่ที่มีการปรับเปลี่ยนสเกลและตำแหน่ง โดยที่เวฟเล็ตแม่จะมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะไปตามการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์  $a$  และ  $b$  แต่ยังคงอยู่ในเซตหรือมีความสัมพันธ์กับเวฟเล็ตแม่เดิมอยู่ ดังแสดงในภาพที่ 2-8 และเพื่อให้เวฟเล็ตที่ถูกสเกลไปแล้วยังคงมีพลังงานเช่นเดียวกับเวฟเล็ตแม่ จึงจะต้องทำการนอร์มัลไลซ์

(Normalize) ด้วย  $\frac{1}{\sqrt{a}}$  เสมอ





ก) คุณสมบัติการเปลี่ยนสเกล (Scaling)

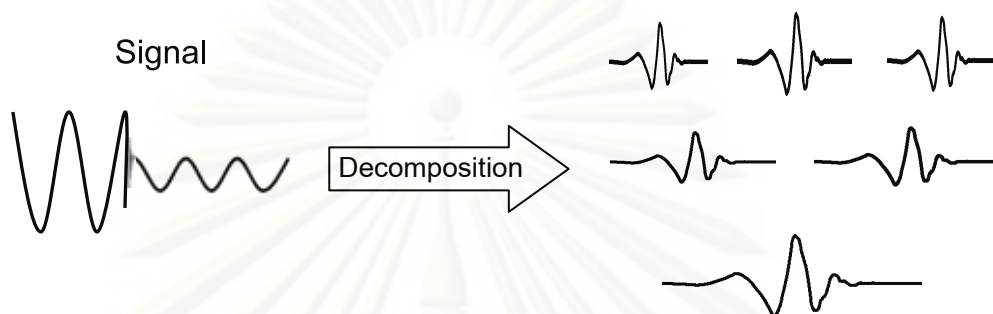


ข) คุณสมบัติการเลื่อนตำแหน่ง (Shifting)

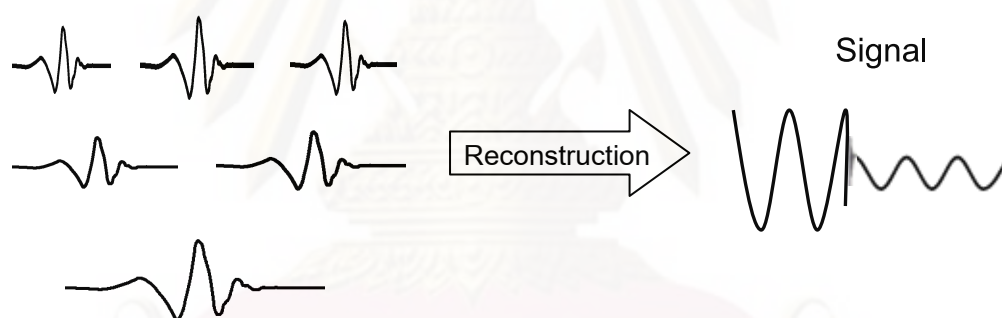
ภาพที่ 2-8 คุณสมบัติการสเกลและการเลื่อนตำแหน่งของฟังก์ชันเวฟเล็ต

และเมื่อนำสัญญาณใด ๆ มาผ่านการแปลงเวฟเล็ตก็เปรียบเสมือนการแตกสัญญาณนั้นออกมาอยู่ในรูปของฟังก์ชันเวฟเล็ตแม่ที่มีตำแหน่งทางเวลาและสเกลที่แตกต่างกันออกไป โดยเวฟเล็ตแต่ละตัวจะมีค่า น้ำหนัก (weight) คุณอยู่ ซึ่งรูปแบบการแตกกระจายสัญญาณนี้ เรียกว่าการกระจายเวฟเล็ต (Wavelet Decomposition) ซึ่งก็คือการแปลงเวฟเล็ตนั่นเอง

ดังแสดงในภาพที่ 2-9 ในทำนองเดียวกันการรวมกลับเวฟเล็ต (Wavelet Reconstruction) ซึ่งเป็นการแปลงกลับเวฟเล็ต (Inverse Wavelet Transform) เป็นการรวมกลุ่มของเวฟเล็ตแต่ละตัวมาประกอบขึ้นเป็นสัญญาณเดิม ดังแสดงในภาพที่ 2-10



ภาพที่ 2-9 การกระจายสัญญาณด้วยการแปลงเวฟเล็ต



ภาพที่ 2-10 การสร้างกลับสัญญาณด้วยการแปลงเวฟเล็ต

โดยทั่วไปแล้วรูปแบบของการแปลงเวฟเล็ต สามารถแบ่งออกได้เป็น สอง ประเภท คือ การแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่องและการแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่อง

#### 2.5.2 การแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง (Continuous Wavelet Transform, CWT)

รูปแบบของการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง มีลักษณะการวิเคราะห์สัญญาณโดยอาศัยการปรับเปลี่ยนคุณ สมบัติของเวฟเล็ตแม่ที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือ ช่วงเวลาในการวิเคราะห์ที่แคบในการวิเคราะห์องค์ประกอบความถี่สูง และช่วงเวลาในการวิเคราะห์ที่กว้างในการวิเคราะห์องค์ประกอบความถี่ต่ำ ซึ่งก็เป็นการปรับระดับความละเอียดในการวิเคราะห์อย่างต่อเนื่องให้เหมาะสมกับความถี่ที่ทำการวิเคราะห์ สามารถแสดงสมการคณิตศาสตร์สำหรับ การวิเคราะห์ที่ได้ดังต่อไปนี้ [37]

$$CWT(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (2-4)$$

เมื่อ  $f(t)$  = สัญญาณที่ทำการแปลง

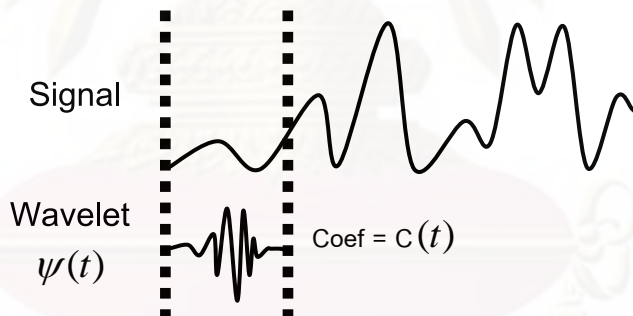
$\psi(t)$  = เวฟเล็ตแม่

$a$  = แพลคเตอร์สเกล (Scaling)

$b$  = แพลคเตอร์การเลื่อนตำแหน่ง (Shifting)

จากสมการที่ 2-4 เมื่อพิจารณาเทอมของ  $\psi(t)$  ซึ่งเป็นเทอมของเวฟเล็ตแม่ที่เทียบได้กับเทอมของฟังก์ชันหน้าต่างในการแปลงฟูเรียร์ช่วงเวลานั้นเอง แต่เมื่อพิจารณาในเทอมของ  $\psi(t)$  จะมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติไปตามพารามิเตอร์  $a$  และ  $b$  ซึ่งสามารถแสดงลักษณะในการวิเคราะห์ได้ดังนี้

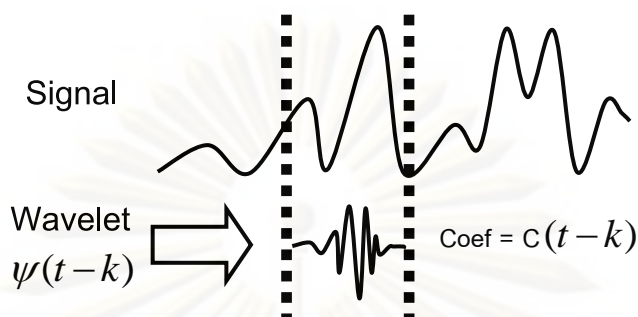
2.5.2.1 นำเวฟเล็ตแม่มาเปรียบเทียบกับส่วนแรกซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของสัญญาณในสเกลแรก



ภาพที่ 2-11 ขั้นตอนที่หนึ่ง และ สอง ของการแปลงเวฟเล็ต

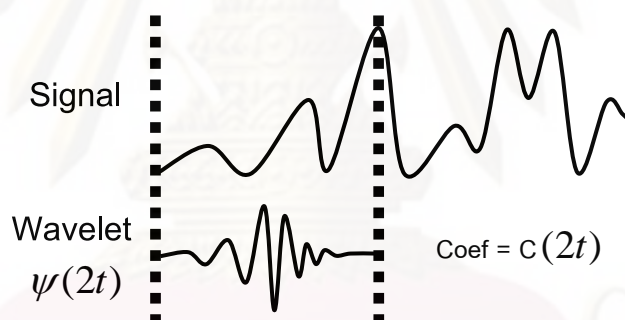
2.5.2.2 ทำการคำนวณสัมประสิทธิ์  $C$  ซึ่งผลที่ได้การวิเคราะห์จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง เวฟเล็ตแม่ในสเกลแรกกับสัญญาณในส่วนแรก โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์นี้จะขึ้นอยู่กับรูปร่างของเวฟเล็ตแม่ ด้วย

2.5.2.3 เลื่อนตำแหน่งการวิเคราะห์ไปทางขวาและทำซ้ำในขั้นตอนที่หนึ่ง และสอง จนกระทั่งครอบคลุมช่วงสัญญาณทั้งหมด ซึ่งในขั้นตอนที่หนึ่ง ถึง สาม นี้เป็นการแปลงเวฟเล็ตตลอดช่วงสัญญาณในสเกลแรก



ภาพที่ 2-12 ขั้นตอนที่สาม ของการแปลงเวฟเล็ต

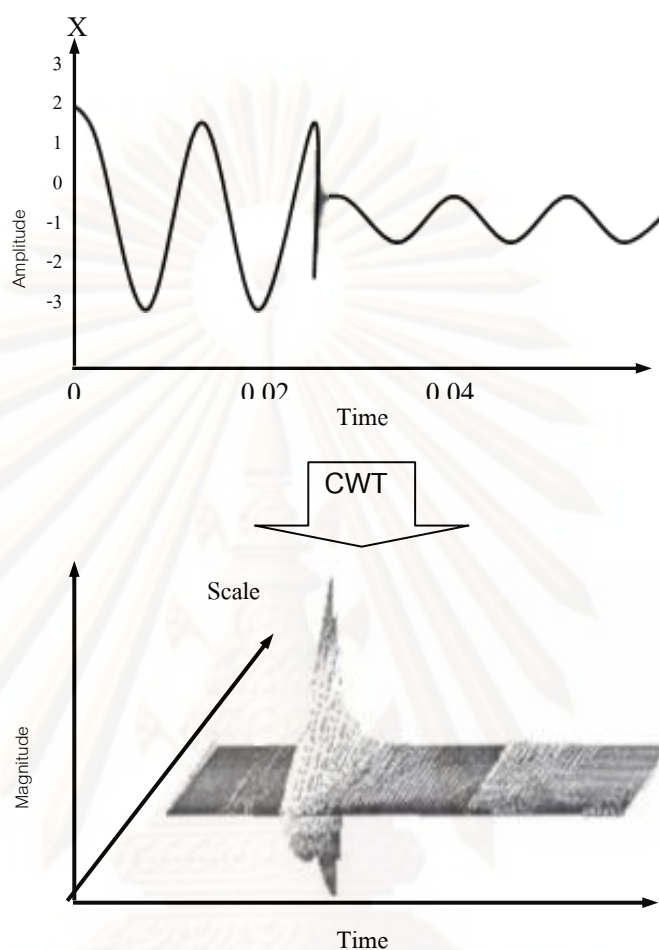
2.5.2.4 เปลี่ยนสเกลในการวิเคราะห์โดยการขยายสเกลและทำตามขั้นตอนที่หนึ่ง ถึง สี่ ใหม่



ภาพที่ 2-13 ขั้นตอนที่สี่ ของการแปลงเวฟเล็ต

2.5.2.5 ทำตามขั้นตอนที่ หนึ่ง ถึง สี่ จนกระทั่งครบทุกสเกล

จากขั้นตอนทั้งหมด ผลการวิเคราะห์จะออกมาในรูป ปริซึมประสิทธิที่ได้จากการวิเคราะห์ของแต่ละสเกลในแต่ละส่วนของสัญญาณและเนื่องจากการแปลงเป็นไปในลักษณะที่มีการเปลี่ยนแปลงสเกลและการเลื่อนตำแหน่งในการวิเคราะห์อย่างต่อเนื่อง เมื่อนำผลการวิเคราะห์ทั้งหมดมาแสดงรูปแบบความสัมพันธ์ของเวลาและความถี่ได้ดังภาพที่ 2-14



ภาพที่ 2-14 การแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง (CWT)

จากภาพที่ 2-14 แสดงให้เห็นว่าผลการวิเคราะห์เมื่อนำมาเขียนเป็นกราฟจะออกมาในรูปของพื้นผิวที่ต่อเนื่องกัน ซึ่งการปรับเปลี่ยนสเกลในการวิเคราะห์ที่ต่อเนื่องจะให้ความแม่นยำทางด้านเวลา และความถี่ที่ดี แต่มีข้อเสียคือถ้าหากนำไปใช้งานที่ต้องการความรวดเร็วในการวิเคราะห์การแปลงเวฟเล็ตต่อเนื่องอาจจะไม่เหมาะสม เนื่องจากต้องใช้เวลาในการวิเคราะห์ที่ค่อนข้างมากและบางครั้งให้ข้อมูลที่ซ้ำซ้อนมากเกินไปจนเกิดความจำเป็น

### 2.5.3 การแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Wavelet Transform, DWT)

จากข้อจำกัดของการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง จึงมีการพัฒนารูปแบบการแปลงเวฟเล็ตมาสู่การแปลงเวฟเล็ตเต็มหน่วยหรือการแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่องที่มีลักษณะการวิเคราะห์โดยเปลี่ยนสเกลและการเลื่อนตำแหน่งในลักษณะเป็นช่วง ๆ ไม่ต่อเนื่องกัน ก่อนที่



จะกล่าวถึงรายละเอียดของการแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่อง จำเป็นต้องกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการอธิบายก่อน

### 2.5.3.1 การวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายระดับความละเอียด

การวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายระดับความละเอียด (Multi-Resolution Analysis, MRA) คือการวิเคราะห์สัญญาณที่สามารถเลือกระดับความละเอียดได้ โดยการนำสัญญาณเล็ก ๆ ที่ระดับความละเอียด  $a$  ซึ่งมี  $b$  หลาย ๆ ตำแหน่งมารวมกันทำให้เกิดเป็นสัญญาณที่ระดับความละเอียดที่เลือกไว้ เมื่อนำสัญญาณที่ทุกระดับความละเอียดมารวมกันก็จะได้สัญญาณอินพุทจริง ๆ ซึ่งหลักการของการวิเคราะห์สัญญาณหลายระดับความละเอียดนั้น จะสามารถอธิบายได้โดยอาศัยทฤษฎีของสเปซเวกเตอร์ (Space Vector Theory)

ความหมายของสเปซเวกเตอร์ในการวิเคราะห์สัญญาณ คือ สเปซของสัญญาณที่เกิดจากการรวมกันของสัญญาณพื้นฐานย่อย ๆ ที่เรียกว่า “ฟังก์ชันพื้นฐาน (Basic Function)” โดยสมมติว่า  $V$  เป็นสเปซเวกเตอร์ มี  $j$  แสดงถึงระดับความละเอียดและจำนวนของฟังก์ชันพื้นฐานที่ประกอบขึ้นเป็นฟังก์ชันนั้น ซึ่งถ้า  $j$  มีค่าสูงขึ้นก็แสดงว่าที่ระดับความละเอียดสูงขึ้นและมีจำนวนฟังก์ชันพื้นฐานมากขึ้น ซึ่งจะทำให้สัญญาณที่  $j$  ได้เกิดจากการประกอบกันจากฟังก์ชันที่มีความละเอียดมากขึ้นด้วย ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า  $j$  เป็นค่าแสดงถึงระดับความละเอียดของสัญญาณนั่นเอง โดยที่สามารถสรุปคุณสมบัติของการวิเคราะห์สัญญาณที่ระดับความละเอียดต่าง ๆ ได้ดังนี้

1.  $V^{-\infty} \dots \subset V^{-1} \subset V^1 \dots \subset V^{\infty}$
2.  $Close_{L^2}(\cup_{j \in \mathbb{Z}} V^j) = L^2(R)$  ;  $R =$  เซตของจำนวนจริง
3.  $(\cap_{j \in \mathbb{Z}} V^j) = \{0\}$
4.  $V^j + W^j = V^{j+1}$  ;  $j \in \mathbb{Z}$  ;  $\mathbb{Z} =$  เซตของจำนวนจริง
5.  $f(x) \in V^j \Leftrightarrow f(2x) \in V^{j+1}$  ;  $j \in \mathbb{Z}$

จากการที่ฟังก์ชันพื้นฐานประกอบกันเป็นสัญญาณที่ระดับความละเอียด  $j$  ภายในสเปซ  $V$  จะเรียกฟังก์ชันนี้ว่าเป็น “ฟังก์ชันสเกลลิง (Scaling Function:  $\Phi(t)$ )” และฟังก์ชันสเกลลิงที่ระดับสูงจะมีความถี่สูง และระดับที่ต่ำลงมาจะมีความถี่ต่ำกว่า ตามความสัมพันธ์ที่แสดง

ใน คุณสมบัติข้อที่ สี่ ทำให้สามารถเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันสเกลในสเปซ ใด ๆ ได้ดังนี้

$$\Phi_{j,k} = 2^{\frac{j}{2}} \Phi(2^j t - k) ; j, k \in Z \quad (2-5)$$

จากสมการที่ 2-6 จะพบว่าถ้าระดับความละเอียดลดลงมาหนึ่งระดับ ฟังก์ชันพื้นฐานจะมีความถี่ลดลงมาครึ่งละ สอง เท่า และอาศัยคุณสมบัติ MRA จะทำให้สามารถทำการประมาณสัญญาณ  $f(t) \in L^2(R)$  ไปอยู่ในสเปซที่ระดับความละเอียด  $j$  ใด ๆ ได้ดังนี้

$$f(t) = \sum_k c_k^j \Phi_{j,k}(t) \quad (2-6)$$

โดยที่  $c_k^j$  เป็นสัมประสิทธิ์หรือน้ำหนักที่คูณกับฟังก์ชันสเกลลิงที่ตำแหน่ง  $k$  ใด ๆ แล้วประกอบขึ้นเป็น  $f(t)$  ที่ระดับความละเอียด  $j$

จากคุณสมบัติข้อ สี่ ของ MRA การวิเคราะห์สัญญาณที่ระดับความละเอียดต่ำลงมาจะทำให้พลังงานหรือสัญญาณบางส่วนหายไปอยู่อีกสเปซหนึ่งที่เรียกว่า “สเปซของเวกเตอร์เวฟเล็ต (Wavelet Vector Space :  $W^j$ )” ซึ่งจะประกอบด้วยฟังก์ชันพื้นฐานที่เรียกว่า “ฟังก์ชันเวฟเล็ต (Wavelet Function :  $\psi(t)$ )” โดยสามารถเขียนสมการฟังก์ชันเวฟเล็ตได้ดังต่อไปนี้

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{\frac{j}{2}} \psi(2^j t - k) \quad (2-7)$$

และถ้ากำหนดให้  $g_j(t)$  เป็นสัญญาณที่เกิดจากฟังก์ชันพื้นฐาน ( $\psi_{j,k}(t)$ ) ภายในสเปซเดียวกันมารวมเป็นสัญญาณใด ๆ จะได้ว่า

$$g(t) = \sum_k d_k^j \psi_{j,k}(t) \quad (2-8)$$

โดยที่  $d_k^j$  เป็นสัมประสิทธิ์หรือน้ำหนักที่คูณกับฟังก์ชันเวฟเล็ตที่ตำแหน่งนั้น ๆ เพื่อเกิดเป็นสัญญาณ  $g(t)$  ดังนั้นจากความสัมพันธ์  $V^j + W^j = V^{j+1}$  จะได้ว่า

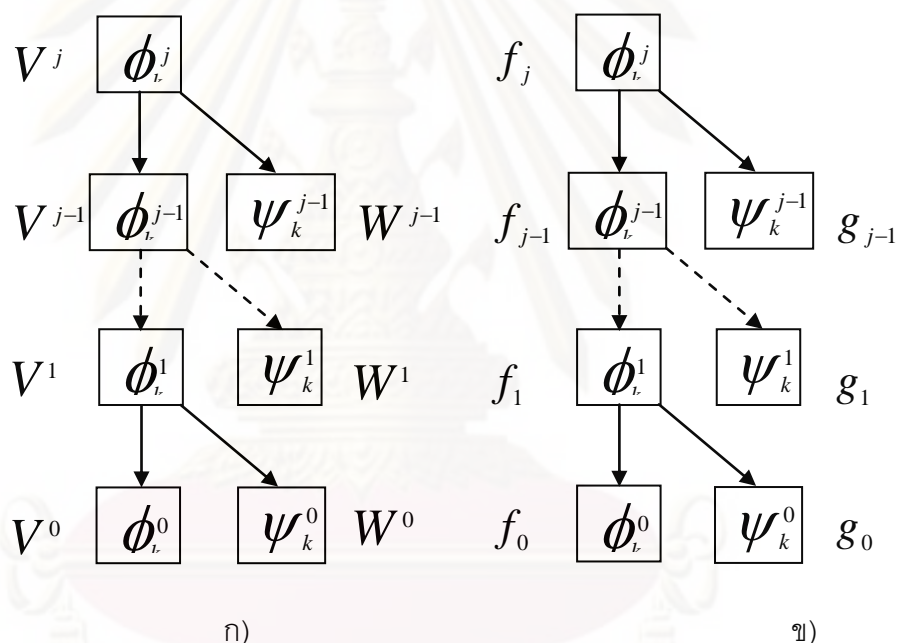
$$f_{j+1} = f_j + g_j \quad (2-9)$$



โดยสมมติให้  $f(t) \in V^{j+1}$  จะสามารถแตกกระจายให้  $f(t)$  มีความละเอียดน้อยลงได้ จากความสัมพันธ์ของ  $V^j + W^j = V^{j+1}$  ในขณะเดียวกัน  $V^j$  สามารถแตกต่อไปอีกได้เรื่อยๆ จนกระทั่ง  $j=0$  ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ว่า

$$V^{j+1} = V^0 + W^0 + W^1 + \dots + W^j \quad (2-10)$$

ในทำนองเดียวกัน  $f_{j+1} = f_j + g_j$  สามารถแตกกระจายเป็น  $f_j$  และ  $g_j$  ได้แสดงดังภาพที่ 2-15



ภาพที่ 2-15 การเปรียบเทียบลักษณะการกระจาย (Decomposition) ของ ก) สเปซของเวกเตอร์ ข) สัญญาณที่มีความละเอียดต่าง ๆ

โดยที่สามารถแสดงลักษณะของสัญญาณ  $f(t)$  ในรูปของฟังก์ชันสเกลลิ่งและฟังก์ชันเวฟเล็ตได้ดังนี้

$$f(t) = f_j + g_j + g_{j+1} + g_{j+2} + \dots + g_\infty \quad (2-11)$$

รูปแบบการแตกกระจายสัญญาณ  $f(t)$  ใด ๆ ในสเปซ  $V^0$  ไปจนถึงระดับความละเอียด  
ที่  $j$  ในรูปของสัมประสิทธิ์  $c_j(m)$  และ  $d_j(m)$  นี้เรียกว่า “การแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่อง  
(Discrete Wavelet Transform, DWT)” โดยมีสมการที่ใช้อธิบายดังต่อไปนี้ [38]

$$DWT(m,n) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi\left(\frac{t - nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right) dt \quad (2-12)$$

โดยที่  $a_0^m$  คือ การสเกล  
 $nb_0 a_0^m$  คือ การเลื่อนตำแหน่ง  
 $m, n$  คือ เลขจำนวนเต็มบวก

ในทางปฏิบัติการนำมาใช้งานจริง สัญญาณที่เข้ามานี้จะอยู่ในรูปของการสุ่ม (Sample)  
 ดังนั้นสมการที่ 2-12 จึงพัฒนามาสู่สมการที่ 2-13

$$DWT(m,n) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_k f(k) \psi\left(\frac{n - kb_0 a_0^m}{a_0^m}\right) \quad (2-13)$$

เมื่อ  $m, n, k$  เป็นเลขจำนวนเต็ม โดยที่

$n$  คือ จำนวนข้อมูล  
 $m$  คือ เลขแสดงการเปลี่ยนแปลงของสเกล  
 $k$  คือ เลขแสดงการเลื่อนตำแหน่ง

เมื่อพิจารณาในรูปแบบของการวิเคราะห์หลายระดับความละเอียดแล้ว โดยที่จะมีการ  
 เปลี่ยนแปลงสเกลในการวิเคราะห์ให้ลดลงครึ่งละ สอง เท่า ( $a_0 = 2$  ;  $b_0 = 1$ ) แล้วจะได้  
 รูปแบบการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย ซึ่งมีชื่อเรียกเฉพาะว่า Dyadic Wavelet Transform  
 ดังสมการต่อไปนี้

$$DWT(m,n) = \frac{1}{\sqrt{2^m}} \sum_k f(k) \psi\left(\frac{n - k2^m}{2^m}\right) \quad (2-14)$$

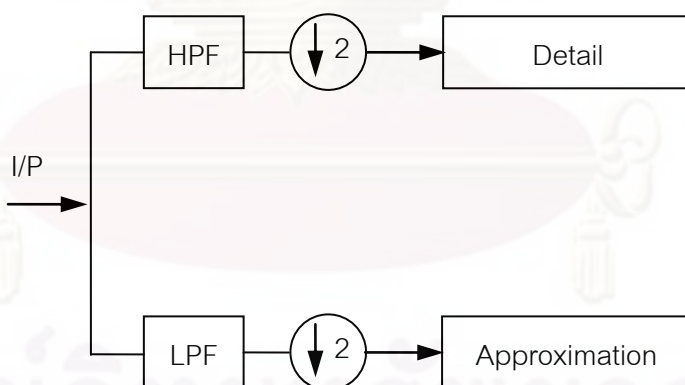
ซึ่งสามารถอธิบายหลักการการทำงานโดยอาศัยหลักการวิเคราะห์ของฟิลเตอร์แบงก์ดังนี้

### 2.5.3.2 การวิเคราะห์ด้วยตัวกรองสัญญาณ (Filter Bank Analysis)

ก่อนจะทำการอธิบายการสร้างการแปลงเวฟเล็ตใน ลักษณะฟิลเตอร์แบงก์นั้น ขอ อธิบาย หลักการพื้นฐานของฟิลเตอร์แบงก์ก่อน ฟิลเตอร์แบบสอง ช่องสัญญาณ (Two Channel Banks) จะเป็นการแยกสัญญาณอินพุตออกเป็นสอง ส่วน คือส่วนของความถี่ต่ำ และส่วนของความถี่สูงสัญญาณ โดยจะถูกวิเคราะห์ด้วยคู่ชุดกรองซึ่งมีการลดความถี่ออกมา ครึ่งหนึ่งดังในภาพที่ 2-16 ซึ่งเทอมของ  $\downarrow 2$  แสดงการลดอัตราสุ่มลง (Down Sampling) ด้วยสอง หรือลดผลการวิเคราะห์จากตัวกรองออกครึ่งหนึ่งในแต่ละขั้นตอนของการวิเคราะห์ เมื่อนำสัญญาณอินพุตมาผ่านการแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่อง สัญญาณจะถูกแยก องค์ประกอบ (Decomposition) โดยตัวกรองแบบสอง ช่อง (Two Channel Filter Banks) ซึ่ง จะแยกความถี่ในแบนด์ที่ต้องการเป็น สอง ส่วน คือ

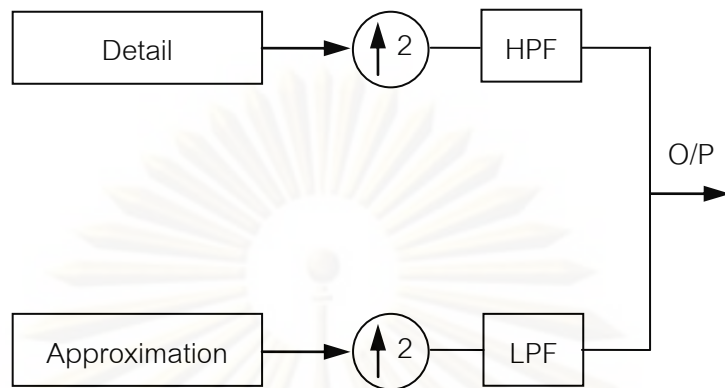
ก) องค์ประกอบความถี่สูง จะผ่านตัวกรองความถี่สูง (High-Pass Filter ,HPF) ที่เรียกว่า “Detail (cD)”

ข) องค์ประกอบความถี่ต่ำ จะผ่านตัวกรองคว ามถี่ต่ำ (Low-Pass Filter ,LPF) ที่เรียกว่า “Approximation (cA)”



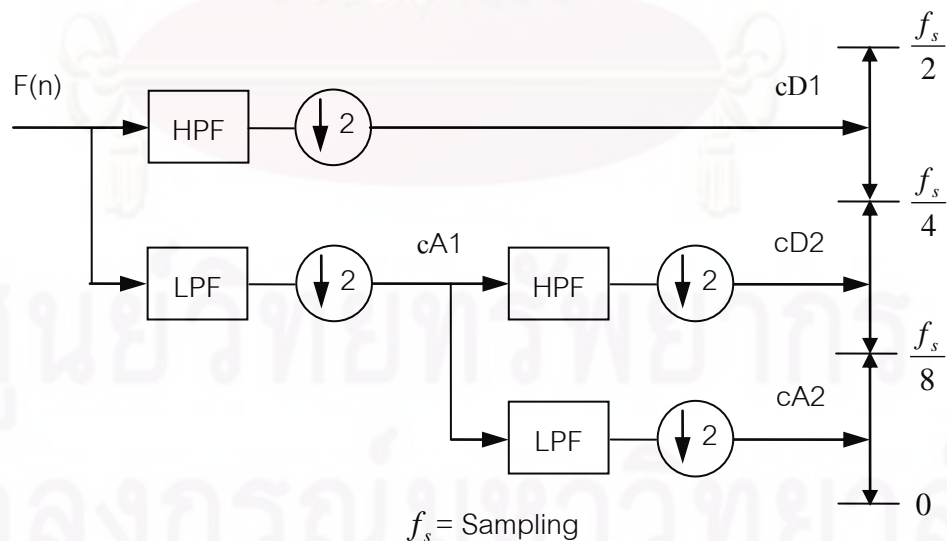
ภาพที่ 2-16 การแปลงแยกสัญญาณด้วยฟิลเตอร์แบบสองช่องสัญญาณ

และในทางกลับกันก็สามารถสังเคราะห์เพื่อสร้างกลับฟิลเตอร์แบบส องช่องสัญญาณโดย การนำส่วนของความถี่ต่ำและความถี่สูงมารวมกันเป็นสัญญาณเดิม แสดงดังภาพที่ 2-17 จะ สังเกตได้ว่าเทอม  $\uparrow 2$  แสดงการเพิ่มอัตราสุ่มขึ้น (Upsampling) เป็น สอง เท่า



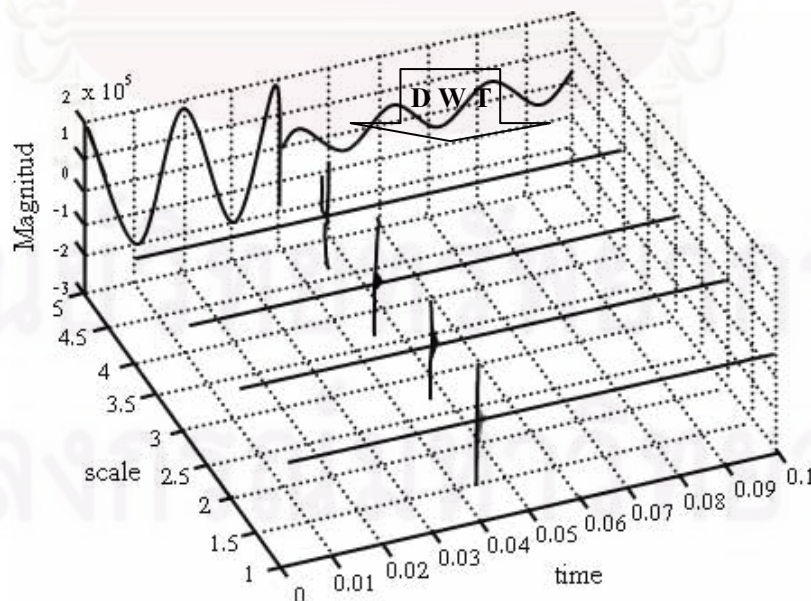
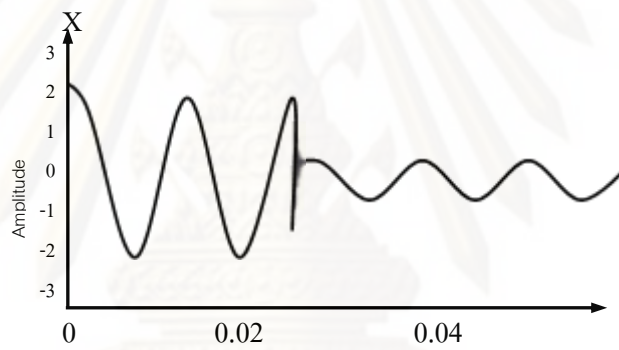
ภาพที่ 2-17 การแปลงกลับสัญญาณด้วยฟิลเตอร์แบบสองช่องสัญญาณ

ลักษณะของตัวกรองแบบ สองช่องสัญญาณ ในลักษณะนี้เรียกว่า “Quadrature Mirror Filters (QMF)” ในลักษณะของ Dyadic Wavelet Transform จะเป็นการนำฟิลเตอร์แบบสองช่องสัญญาณ มาเรียงต่อกันในลักษณะโครงสร้างแบบต้นไม้ โดยใช้สัญญาณเอาท์พุทในส่วนความถี่ต่ำมาทำการแยกความถี่ออกอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งเป็นลักษณะของการวิเคราะห์แบบออกเทฟฟิลเตอร์แบงก์ (Octave Analysis Filter Banks) โดยที่ในแต่ละขั้นตอนจะมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ในอัตราครึ่งละ สอง เท่า ซึ่งสามารถอธิบายการทำงานได้ดังนี้



ภาพที่ 2-18 ลักษณะการแปลงเวฟเล็ตโดยใช้หลักการวิเคราะห์ แบบออกเทฟฟิลเตอร์แบงก์

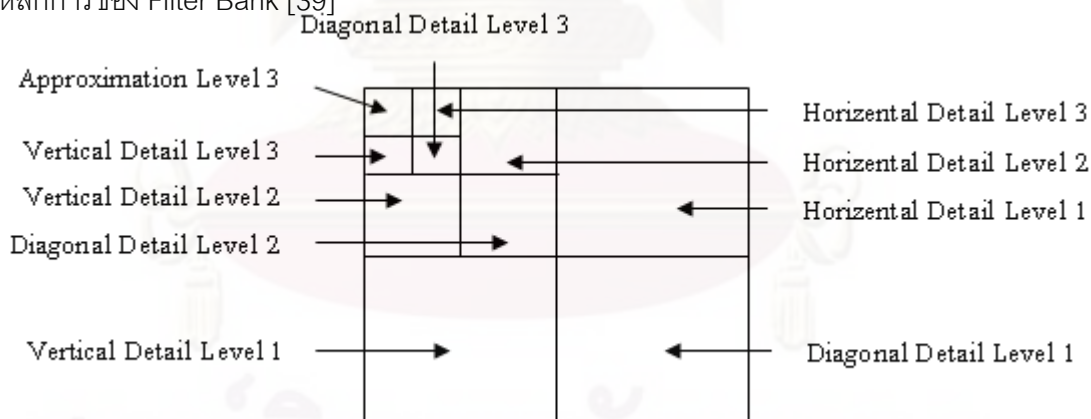
จากภาพที่ 2-18 เป็นการแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่องในลักษณะของ Dyadic Tree Structure โดยมีสัญญาณอินพุตซึ่งเป็นสัญญาณที่ถูกสุ่มด้วยความถี่ของการสุ่มเท่ากับ  $f_s$  (Sampling Rate) จะถูกวิเคราะห์ด้วยฟิลเตอร์ สอง ช่องสัญญาณในสเกลที่หนึ่ง ( $2^1$ ) ซึ่งสัญญาณจะแยกออกเป็น สอง ช่วงความถี่ คือส่วนความถี่สูงหรือ Detail 1 มีความถี่อยู่ในช่วง  $\frac{f_s}{2} - \frac{f_s}{4}$  Hz และส่วนความถี่ต่ำหรือ Approximation 1 มีความถี่ในช่วง  $\frac{f_s}{4} - 0$  Hz และในการวิเคราะห์ ในสเกลที่สอง ( $2^2$ ) ก็ทำได้ โดยการผ่านคู่กรองชุดเดิมมาวิเคราะห์ต่อจาก Approximation หนึ่ง ซึ่งผลการวิเคราะห์จะออกมาเป็นส่วนความถี่สูงที่มีความถี่ในช่วง  $\frac{f_s}{4} - \frac{f_s}{8}$  Hz และส่วนความถี่ต่ำที่มีความถี่อยู่ในช่วง  $\frac{f_s}{8} - 0$  Hz ซึ่งผลการแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่อง แสดงดังภาพที่ 2-19



ภาพที่ 2-19 การแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่อง (DWT) ในสเกลที่ 1-4



ความมุ่งหมายของการแปลงเวฟเล็ตคือการแทนค่าสัญญาณด้วยสัมประสิทธิ์ที่เหมาะสม ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของพลังงาน ซึ่งสัมประสิทธิ์ทั้งหมดนั้นจะเป็นตัวแทนของข้อมูลทั้งหมดที่ได้มาจากการกระจาย ดังนั้นการแปลงเวฟเล็ตกับสัญญาณนั้นจะเป็นการกระจายสัญญาณในทางโดเมนความถี่ที่มีความสัมพันธ์กับโดเมนพื้นที่ โดยสัมประสิทธิ์ที่ได้จะผ่านการกรองจากคู่ของ Dynamic Orthogonal Filter ซึ่งเราเรียกว่า Quadrature Mirror Filter (QMF) โดยคู่ของ QMF เราจะเรียกว่าเวฟเล็ตพ่อ (Father Wavelet) และเวฟเล็ตแม่ (Mother Wavelet) ซึ่งเวฟเล็ตพ่อนั้นจะแทนด้วยค่าสัมประสิทธิ์จากการกระจายสัญญาณซึ่งเราจะเรียกว่า Approximate หรือสัมประสิทธิ์ของความถี่ต่ำ (LL) เวฟเล็ตแม่นั้นจะแทนด้วยค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการกระจายสัญญาณในแต่ละระดับของการกระจายซึ่งเราจะเรียกว่า Detail ถ้าเป็นการแปลงเวฟเล็ตกับสัญญาณสองมิติ คือสัญญาณรูปภาพนั้นค่าของสัมประสิทธิ์ที่ได้คือค่าของสัมประสิทธิ์ทางแนวตั้ง (Vertical Detail) คือ สัมประสิทธิ์ของความถี่สูงในความถี่ต่ำ (LH) และ ค่าสัมประสิทธิ์ทางแนวนอน (Horizontal Detail) คือ สัมประสิทธิ์ของความถี่ต่ำในความถี่สูง (HL) และค่าของสัมประสิทธิ์ทางแนวทแยงมุม (Diagonal Detail) คือ สัมประสิทธิ์ของความถี่สูง (HH) แสดงรายละเอียดของการกระจายได้ ดังภาพที่ 2-20 ซึ่งแสดงถึงการแปลงเวฟเล็ตแบบพื้นฐานโดยใช้หลักการของ Filter Bank [39]



ภาพที่ 2-20 ลักษณะการกระจายสัมประสิทธิ์โดยใช้การแปลงเวฟเล็ต 3 ระดับ

#### 2.5.4 ตระกูล Wavelet [40]

เวฟเล็ตได้ถูกแบ่งออกเป็นตระกูลต่าง ๆ มากมายและมีสมาชิกที่แตกต่างกันในแต่ละตระกูล ดังจะยกตัวอย่างเวฟเล็ตในตระกูลต่าง ๆ ดังนี้

2.5.4.1 Haar wavelet คือเวฟเล็ตหลายชนิดถูกพัฒนาขึ้นโดยอาศัยพื้นฐานของเวฟเล็ตแบบ Haar ซึ่งเป็นเวฟเล็ตที่มีความไม่ต่อเนื่อง ดูคล้ายกับฟังก์ชันขั้นบันได เวฟเล็ตแบบ Haar นี้เป็นตัวเดียวกับเวฟเล็ตแบบ Daubechies, db1

2.5.4.2 Biorthogonal wavelet เป็นเวฟเล็ตที่มีคุณสมบัติแบบ linear phase ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญในการสร้าง เวฟเล็ตตระกูลนี้แบ่งออกเป็นสองเวฟเล็ตย่อย สำหรับการแตกกระจายเวฟเล็ต (ฝั่งซ้าย) และการสร้างสัญญาณขึ้นใหม่ (ฝั่งขวา) แทนที่จะใช้เวฟเล็ตตัวเดียวอย่างเช่นตระกูลอื่น ๆ

2.5.4.3 Coiflets wavelet เวฟเล็ตตระกูลนี้ถูกพัฒนาโดย I. Daubechies โดยความต้องการของ R.Coifman

2.5.4.4 Daubechies wavelet เวฟเล็ตตระกูลนี้กำเนิดโดย Ingrid Daubechies เป็นเวฟเล็ตแบบ orthonormal wavelet สมาชิกในเวฟเล็ตตระกูลนี้เขียนแทนด้วย dbN, โดยที่ N คือลำดับของเวฟเล็ตและนำหน้าด้วย db

2.5.4.5 Mexican Hat wavelet เวฟเล็ตชนิดนี้ได้มาจากการหาอนุพันธ์อันดับสองของ Gaussian probability density function เวฟเล็ตชนิดนี้มีแค่ตัวเดียวและไม่มีสเกลลิงฟังก์ชัน

2.5.4.6 Meyer wavelet เวฟเล็ตชนิดนี้ถูกสร้างขึ้นในโดเมนความถี่ มีแค่ตัวเดียวและไม่มีสเกลลิงฟังก์ชัน

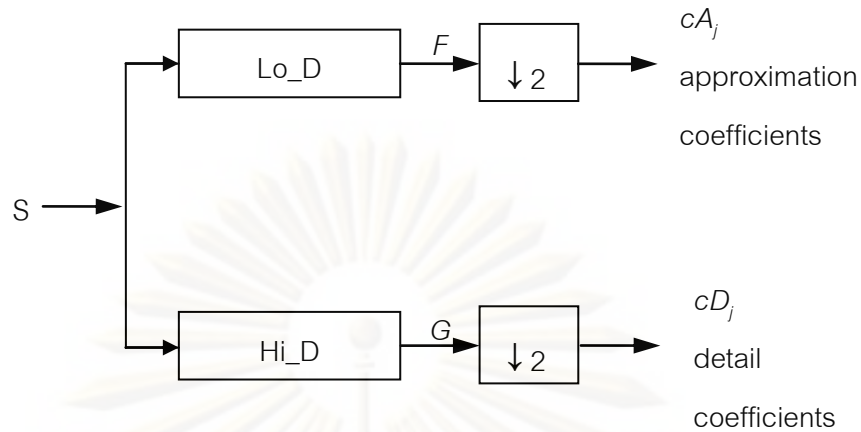
2.5.4.7 Morlet wavelet เวฟเล็ตชนิดนี้มีแค่ตัวเดียวและไม่มีสเกลลิงฟังก์ชัน

2.5.4.8 Symlets wavelet เวฟเล็ตตระกูล symlets เป็นเวฟเล็ตแบบเกือบสมมาตร ถูกพัฒนามาจากเวฟเล็ตตระกูล db โดย Ingrid Daubechies ซึ่งทำให้เวฟเล็ตทั้งสองตระกูลมีทฤษฎีพื้นฐานที่คล้ายกัน

2.5.5 อัลกอริทึมการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยหนึ่งมิติ

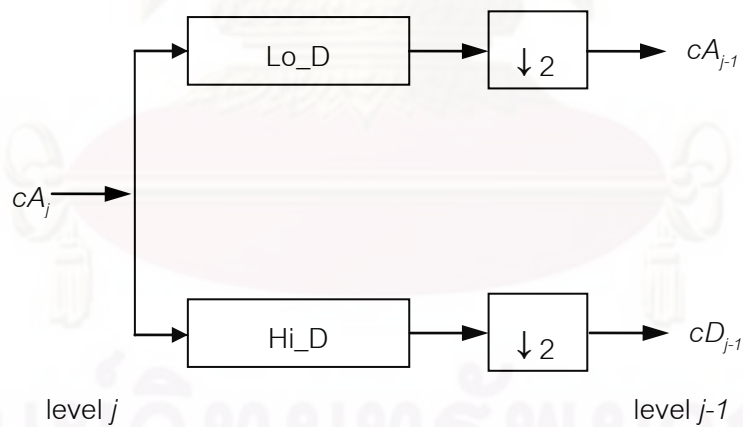
ในการวิเคราะห์แบบหลายระดับความละเอียดกับเวฟเล็ตแบบออร์ทोगัล เริ่มจากการหา  $cA_j$  และ  $cD_j$  จากสัญญาณ S โดยจำเป็นต้องรู้สเกลลิงฟิลเตอร์แทนด้วย W ที่ได้จากสเกลลิงฟังก์ชันที่มีคุณสมบัติเป็น FIR, มีความยาว  $2N$  โดย  $N$  คือลำดับของเวฟเล็ต มีคุณสมบัติของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านเช่นตัวอย่างของ dbN โดย  $N = 3$  มีค่าสัมประสิทธิ์  $2N = 6$  ตัว ดังนี้ 0.2352 0.5706 0.3252 -0.0955 -0.0604 0.0249 สามารถสร้างฟิลเตอร์สำหรับการแตกกระจายและการรวมกลับได้ดังภาพที่ 2-21





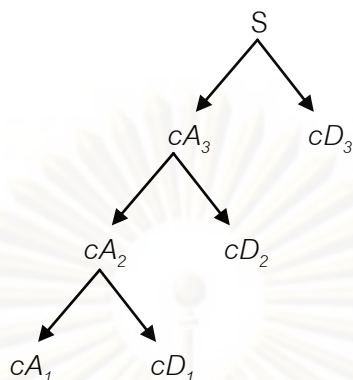
ภาพที่ 2-23 การคำนวณ  $cA_j$  และ  $cD_j$

สัญญาณ  $F$  และ  $G$  จะมีขนาด  $N$  ส่วน  $cA_j$  และ  $cD_j$  จะได้จากการลดอัตราสุ่ม  $F$  และ  $G$  ลงสองเท่าตามลำดับ ในการเพิ่มระดับความละเอียดของการวิเคราะห์สัญญาณทำได้โดยการซ้ำขั้นตอนเดิมที่กล่าวมาแล้วโดยแทน  $S = cA_j$  ดังภาพที่ 2-24 กระบวนการนี้จะซ้ำขั้นตอนจนกว่าจะได้ระดับความละเอียดที่ต้องการ



ภาพที่ 2-24 การคำนวณ  $cA_{j-1}$  และ  $cD_{j-1}$

ดังนั้นที่  $j = 3$  สามารถเขียนโครงสร้างแบบต้นไม้ได้ดังภาพที่ 2-25 โดยที่โครงสร้างของสัมประสิทธิ์คือ  $[cA_1, cD_1, cD_2, cD_3]$



ภาพที่ 2-25 โครงสร้างแบบต้นไม้ที่  $j = 3$

สำหรับกระบวนการ IDWT สามารถทำได้โดยการย้อนกลับกระบวนการ DWT ตามที่กล่าวมาข้างต้น โดยเพิ่มศูนย์เข้าในขั้นตอนการเพิ่มอัตราสุ่มแบบสองเท่า แล้วทำเซอร์คิวลาคอนโวลูชันกับ Lo\_R และ Hi\_R จากนั้นทำการรวมสัญญาณได้ความยาวเท่าเดิม

## 2.6 ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithms)

ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม เป็นการเลียนแบบการวิวัฒนาการทางพันธุกรรม กับการคำนวณ โดยการใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์ ได้แก่การหาค่าสูงสุด หรือ ต่ำสุดที่เหมาะสม ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม เกิดจากแนวคิด ด้านการวิวัฒนาการ ทางพันธุกรรม

### 2.6.1 การวิวัฒนาการทางพันธุกรรม [41]

เป็นวิชาการด้านพันธุศาสตร์ มนุษย์ได้มีการศึกษามาแล้วตั้งแต่ก่อน คริสตกาลประมาณ ห้าร้อยปี จนถึงอริสโตเติล (ก่อนคริสตกาล 384-322 ปี) ได้เสนอว่า ในน้ำอสุจิของฝ่ายชายนั้นมีคนขนาดเล็กสำเร็จรูปอยู่แล้ว และเป็นตัวเริ่มต้นของมนุษย์ในครรภ์ และจากนั้นก็มีการศึกษามาเรื่อย ๆ จนถึง ค.ศ. 1859 Darwin (1859) ได้ตีพิมพ์ ผลงานเรื่อง On the Origin of Species โดยเสนอแนวความคิดว่า สภาพแวดล้อมมีอิทธิพลต่อการคัดเลือกสิ่งมีชีวิต โดยจะต่อต้านสิ่งมีชีวิตที่ไม่สามารถปรับตัวได้ แต่จะยอมรับสิ่งมีชีวิตที่ปรับตัวได้ ซึ่ง Darwin เรียกว่า การคัดเลือกโดยธรรมชาติ (Natural Selection) การคัดเลือกโดยธรรมชาติจะค่อย ๆ ทำให้สิ่งมีชีวิตในแต่ละรุ่นมีความแตกต่างกัน แต่จะไม่ทำให้เห็นอย่างชัดเจน และความแตกต่างกันนี้จะค่อย ๆ เกิดขึ้นในแต่ละรุ่นจะถูกสะสมส่งผ่านทางพันธุกรรมไปยังรุ่นต่อ ๆ ไปอย่างเป็นระบบ ความแตกต่างนี้จะมีผลต่อสิ่งมีชีวิตแต่ละประเภท ทำให้มีรูปร่างแตกต่างไปจากรูปแบบเดิม (Freeman, 1977) ค.ศ.



1822-1884 Gregor Johann Mendel (Bateson, 1902) ได้อธิบายและสรุปผลการทดลองของเขา ในปี ค.ศ. 1865 ว่า ลักษณะต่าง ๆ ของสิ่งมีชีวิตจะถูกควบคุมโดยแฟกเตอร์ (Factors) (ซึ่งต่อมาเรียกว่า ยีน) โดยมีอยู่เป็นคู่และถ่ายทอดลักษณะต่าง ๆ ที่เป็นลักษณะเด่น และลักษณะด้อย เหล่านั้น ไปยังรุ่นต่อไปโดยผ่านทางเซลล์สืบพันธุ์ ค.ศ. 1844-1895 Johann Friedrich Miescher (Dahm, 2005) ได้ทำการแยกนิวเคลียสออกจากไซโทพลาซึม (Cytoplasm) ของเซลล์ที่เกิดหนอง (Pus Cell) เรียกว่านิวคลีอิน(Nuclein) และได้ศึกษาพบว่านิวคลีอินนี้มีคุณสมบัติเป็นกรด จึงตั้งชื่อใหม่ว่า กรดนิวคลีอิก(Nucleic Acid) และก็คือดีเอ็นเอต่อมาจึงถือว่า Miescher เป็นบุคคลแรกที่พบดีเอ็นเอค.ศ. 1848-1935 De Vries Hugo (Ridley and Matt, 2003) เป็นผู้ค้นพบการกลายพันธุ์ ของสิ่งมีชีวิต และได้เสนอทฤษฎีการกลายพันธุ์ของสิ่งมีชีวิต (Mutation Theory) ได้ทำการ ทดลอง และค้นพบกฎการถ่ายทอดลักษณะพันธุกรรมตรงตามที่เมนเดลรายงานไว้ และได้ยกย่องให้เกียรติแก่เมนเดล เป็นบิดาแห่งวิชาพันธุศาสตร์ ค.ศ. 1861-1926 William Bateson (Carroll, 2005) เป็นผู้ค้นพบลักษณะพันธุกรรมที่เกี่ยวข้องกับโครโมโซม และเป็นผู้ตั้งชื่อวิทยาศาสตร์สาขาวิชาว่า พันธุศาสตร์ ในวิชาพันธุศาสตร์ กล่าวว่า ในเซลล์ของสิ่งมีชีวิต ประกอบด้วยนิวเคลียส ภายใน นิวเคลียส ประกอบด้วยโครงสร้างยาว ๆ เล็ก ๆ ขดไปมาเต็มไปหมด เรียกโครงสร้างนี้ว่าโครโมโซมมนุษย์มีโครโมโซม 23 คู่ (46แท่ง) ลิงชิมแปนซีมี 24 คู่ สุนัข 39 คู่ แมว 19 คู่ เป็นต้น ภายในโครโมโซมประกอบด้วย ดีเอ็นเอ (DNA) ส่วนของดีเอ็นเอ ที่ควบคุมลักษณะทางพันธุกรรมเรียกว่า ยีน (Gene) แต่ละยีนจะอยู่กันเป็นคู่ ๆ เรียกว่า อัลลีล (Allene) โครโมโซมที่มีลักษณะเป็นคู่นี้ จะได้รับจากพ่อ และแม่ อย่างละ หนึ่งเส้น ดังนั้น ลักษณะสำคัญของพ่อและแม่ จึงปรากฏอยู่ในรุ่นลูก ในขณะที่มีการจับคู่กันของโครโมโซม จะเกิดการไขว้ข้าม ระหว่างโครโมโซมของพ่อ และโครโมโซมของแม่ ทำให้เกิดโครโมโซมใหม่ขึ้นมา และขณะที่เซลล์เกิดการแบ่งตัว จะเกิดการคัดลอกโครโมโซม (chromosome copying) และบางครั้งเซลล์ที่เกิดขึ้นมาใหม่ ก็เป็นการเปลี่ยนแปลงที่ไม่เหมือนกับพ่อและแม่มาก่อน ซึ่งเกิดจากการกลายพันธุ์(mutation)

## 2.6.2 การเลียนแบบการวิวัฒนาการทางพันธุกรรม

การคำนวณเชิงวิวัฒนาการโดยคอมพิวเตอร์ ได้มีการนำมาใช้ในช่วงปี ค.ศ. 1950 โดยนักชีววิทยา ซึ่งนำมาจำลองระบบการวิวัฒนาการทางพันธุกรรม และต่อมาในต้นปี ค.ศ. 1954 Nils Aall Barricelli ได้ใช้คอมพิวเตอร์จากสถาบันการศึกษาชั้นสูงแห่งหนึ่งในบริซตัน มลรัฐนิวเจอร์ซีย์ สหรัฐอเมริกา แต่ผลงานของเขา ก็ยังไม่เป็นที่แพร่หลายมากนัก ต่อมาในปี 1957 Alex Fraser ได้เผยแพร่ผลงานของเขาใน Simulation of Artificial Selection หลายฉบับต่อมา แนวความคิดของการคำนวณเชิงวิวัฒนาการ ได้ถูกนำเสนออย่างเป็นทางการครั้งแรกโดย Rechenberg (1960) นับ

จากนั้นเป็นต้นมาการใช้คอมพิวเตอร์ในการจำลองการวิวัฒนาการทางชีววิทยาก็เริ่มเป็นที่แพร่หลาย และในช่วงนั้นเองในปี ค.ศ. 1959 Holland [42] ได้นำเสนอ การคำนวณเชิงวิวัฒนาการโดยการเลียนแบบการวิวัฒนาการทางพันธุกรรม (Holland, 1959) โดยมีการตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานเป็นจำนวนมากในปีต่อ ๆ มา โดยในช่วงปีแรก ๆ ของผลงาน จะเป็น ผลงานด้านการคำนวณเชิงวิวัฒนาการแล้วค่อย ๆ พัฒนามาเป็น ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมอย่างเต็มรูปแบบในปี 1975 ซึ่งถือได้ว่าเป็นต้นแบบของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม จากนั้นได้มี นักวิจัยที่ได้ทำการวิจัย ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมซึ่งต่อยอดจากฮอลแลนด์ เป็นจำนวนมากได้แก่ Goldberg (1980) และ De Jong (1975) เป็นต้น

**ตารางที่ 2-1** ชื่อและความหมายของคำที่ใช้ร่วมกัน ในวิชาพันธุศาสตร์ และขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

ชื่อ	พันธุศาสตร์	ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม
โครโมโซม	ประกอบด้วยยีนหลาย ๆ คู่เรียงกัน เป็นสาย	สายอักขระ
ยีน (gene)	หน่วยพันธุกรรมที่เล็กที่สุดที่สามารถถ่ายทอดไปยังรุ่นต่อไป	ลักษณะของข้อมูลในสายอักขระ เช่น ตัวอักษร
อัลลีล (allele)	รหัสพันธุกรรมที่อยู่ในยีน	ค่าของตัวอักษร
โลคัส (locus)	ตำแหน่งของอัลลีล	ตำแหน่งของอักขระ
จีโนไทป์ (genotype)	โครโมโซม ที่เป็นลักษณะที่ถ่ายทอดทางพันธุกรรม	โครงสร้างของสายอักขระ
ฟีโนไทป์ (phenotype)	เป็นลักษณะที่ถูกถ่ายทอดมาจากจีโนไทป์ที่ให้เห็นทางฟิสิกส์ เช่นรูปร่าง	เป็นเซตของพารามิเตอร์ หรือเซตของคำตอบ

ในขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมโครโมโซม หมายถึงสายอักขระ ซึ่งถูกเข้ารหัส (Encode) สายอักขระนี้จะบรรจุด้วยข้อมูลที่เป็นอักขระที่เรียกว่า ยีนภายในข้อมูลนั้น มีค่าและตำแหน่ง ค่าที่ปรากฏในตำแหน่งนั้นเรียกว่า อัลลีล ส่วนตัวตำแหน่งเองเรียกว่า โลคัส โครงสร้างของสาย อักขระเปรียบเหมือนจีโนไทป์ ซึ่งเป็นลักษณะที่ถูกถ่ายทอดทางพันธุกรรม ได้แก่ลักษณะทาง กายภาพ ซึ่งเรียกว่า ฟีโนไทป์ ซึ่งในขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม จะหมายถึง เซตของพารามิเตอร์ หรือเซตของคำตอบ ในแง่ของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมเป็นการแก้ปัญหา หรือการหาจุดเหมาะสม จะเป็นค่าสูงสุดหรือต่ำสุดก็ตาม เมื่อเริ่มต้นจะกำหนดปัญหาเป็นโครโมโซม มีการสุ่มเพื่อสร้าง โครโมโซมรุ่นแรก (เปรียบเสมือนการเริ่มต้นกระบวนการวิวัฒนาการทางชีววิทยา โดยมีโครโมโซมรุ่นแรก เป็น

โครโมโซมตั้งต้น) จากนั้นสุ่มให้มีการจับคู่เพื่อถ่ายทอดหรือแลกเปลี่ยน ยีน (เปรียบเทียบเหมือนเป็นการผสมพันธุ์ โดยมีการแลกเปลี่ยนยีนไปสู่รุ่นลูก ) มีการสุ่มเปลี่ยนค่า (เปรียบเทียบเหมือนการผ่าเหล่า ) จากนั้นก็เป็นการคัดเลือก (สายพันธุ์) และเข้าสู่กระบวนการวิวัฒนาการต่อไป จนกว่าได้ค่าที่เหมาะสมตามความต้องการ

### 2.6.3 ทฤษฎีจีเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm)

จีเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm : GA) ถูกคิดค้นโดยจอห์น ฮอลแลนด์ (John Holland) ในปี 1975 [42] เป็นหนึ่งในวิธีปัญญาประดิษฐ์ที่จำลองกระบวนการทำงานทางชีววิทยา หรือวิวัฒนาการทางธรรมชาติในการให้กำเนิดประชากรรุ่นใหม่ โดยอาศัยพื้นฐานการวิวัฒนาการทางพันธุกรรมในการถ่ายทอดลักษณะต่าง ๆ ไปยังรุ่นลูกหลาน ซึ่งสามารถนำมาพัฒนา และประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาเพื่อหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด การทำงานของจีเนติกอัลกอริทึมนี้ เป็นไปในลักษณะของการหาคำตอบแบบคู่ขนาน (Parallel Search) โดยคำตอบที่ได้จากการหาคำตอบในแต่ละรุ่น (Generation) จะผ่านการ เปลี่ยนรูป (Transformation) เพื่อจะนำไปสู่การค้นหาคำตอบที่ดีขึ้น ในรุ่นถัดไป การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับคำตอบ (Solution) หรือสมาชิก (Individual) ในกลุ่มประชากร (Population) นั้นเพื่อการสำรวจพื้นที่ในการค้นหา (Search Space) และส่งเสริมให้มีการ ถ่ายทอดคุณลักษณะที่ดีของคำตอบที่ค้นพบไปยังรุ่นถัดไป สมาชิกของประชากรที่มีคุณลักษณะ ที่ดี หรือคำตอบที่มีคุณลักษณะที่เหมาะสมจะมีอยู่หลายคำตอบด้วยกัน ซึ่งจะนำไปสู่คำตอบที่มี ค่าเหมาะสมที่สุด (Optimum Solution) นั่นคือสมาชิกของประชากรที่มีลักษณะที่ดีที่สุด (Fittest Individual)

2.6.3.1 จีเนติกอัลกอริทึมเพื่อเลือกลักษณะ (Feature) ที่เหมาะสม จีเนติกอัลกอริทึม ค้นหาคำตอบจากกลุ่มของคำตอบในพื้นที่การค้นหาของตัวแปรที่มีส่วนในการตัดสินใจ (Decision Variable) ของปัญหาที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งตัวแปรตัดสินใจจะถูกเข้ารหัสเป็น สายรหัส โดยการแปลงค่าตัวแปรตัดสินใจหรือพารามิเตอร์ (Parameter) ของปัญหาให้อยู่ในรูป โครงสร้างของโครโมโซม (Chromosome) องค์ประกอบที่สำคัญของจีเนติกอัลกอริทึม คือ

- 1.การเข้ารหัสโครโมโซม คือ การนำเสนอทางเลือกที่สามารถเป็นได้ของแต่ละปัญหา
- 2.การสร้างประชากรต้นกำเนิดของทางเลือกที่เป็นไปได้ เพื่อนำไปดำเนินการตามกระบวนการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรม
- 3.การประเมินค่าความเหมาะสม เพื่อประเมินหาคำตอบที่เหมาะสมในแต่ละทางเลือก

4.ตัวดำเนินการของจีเนติกอัลกอริทึม ซึ่งใช้ในการปรับเปลี่ยนองค์ประกอบของข้อมูลตลอดกระบวนการได้แก่ การคัดเลือกสายพันธุ์ (Selection) สลับสายพันธุ์ (Crossover) และกลายพันธุ์ (Mutation)

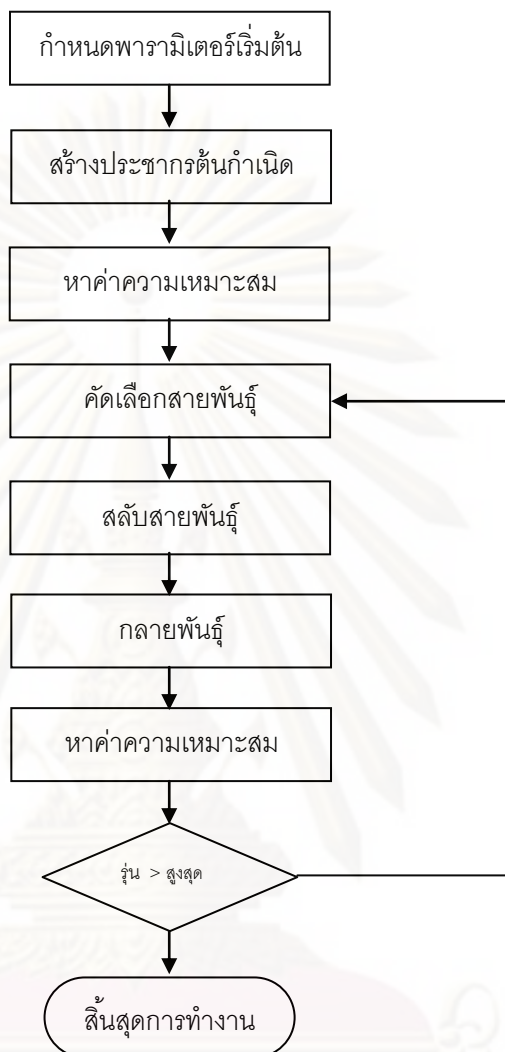
5.ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในจีเนติกอัลกอริทึม เช่น ขนาดของประชากร (Population Size) ความน่าจะเป็น (Probability) ของการใช้ตัวดำเนินการจีเนติกอัลกอริทึม และจำนวนรุ่น (Generation) เป็นต้น

ขั้นตอนการทำงานของจีเนติกอัลกอริทึม (ภาพที่ 2-26) เริ่มจากการ กำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น เช่น กำหนดฟังก์ชันจุดประสงค์ ฟังก์ชันความเหมาะสมรวมทั้งกำหนดรูปแบบโครโมโซม จากนั้นจึงเริ่มเข้าสู่กระบวนการทำงาน โดยสร้างประชากรต้นกำเนิดตามรูปแบบโครโมโซมที่กำหนดไว้ เมื่อได้ค่าสมาชิกของโครโมโซมครบทุกตัวแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือ การถอดรหัสสมาชิกของโครโมโซมซึ่งจะได้เป็นค่าของตัวแปรตัดสินใจ (Decision Value) จากนั้นจึงทำการหาค่าจุดประสงค์ (Objective Value) ของสมาชิกของโครโมโซม โดยการแทน ค่าตัวแปรตัดสินใจของสมาชิกโครโมโซมในฟังก์ชันจุดประสงค์ เพื่อหาค่าความเหมาะสมจาก ฟังก์ชันจุดประสงค์ (Fitness Function) จากนั้นจึงเริ่มเข้าสู่กระบวนการของตัวดำเนินการทั้ง สาม คือ การคัดเลือกสายพันธุ์ (Selection) การสลับสายพันธุ์ (Crossover) และการกลายพันธุ์ (Mutation) โดยการคัดเลือกสายพันธุ์จะนำเอาเฉพาะโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมที่เป็นที่น่าพอใจชุดหนึ่งเก็บไว้ โครโมโซมที่ถูกคัดเลือกไว้จะนำมาสลับสายพันธุ์และกลายพันธุ์จนได้เป็น โครโมโซมชุดใหม่ แล้วนำโครโมโซมชุดใหม่นี้มาหาค่าความเหมาะสมอีกครั้ง และดำเนินการ ตามขั้นตอนเดิมต่อไปจนกระทั่งถึงรุ่นสุดท้าย (Max Generation) ตามที่กำหนดไว้ หรือได้ โครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมเป็นที่น่าพอใจ ซึ่งก็คือได้คำตอบของปัญหาที่ต้องการนั่นเอง

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





ภาพที่ 2-26 ขั้นตอนการทำงานของจีเนติกอัลกอริทึม

2.6.3.2 การเข้ารหัสโครโมโซม (Chromosome Encoding) การเข้ารหัสโครโมโซมนั้นจะขึ้นอยู่กับปัญหา ซึ่งรูปแบบของปัญหาที่ต่างกันทำให้รูปแบบของโครโมโซมนั้นแตกต่างกัน

ก) การเข้ารหัสแบบไบนารี (Binary Encoding) หรือเลขฐานสอง ซึ่งแต่ละ ตำแหน่งของยีนในโครโมโซมจะแทนด้วยค่า 1 หรือ 0 เท่านั้น ดังตัวอย่างในภาพที่ 2-27 โดย 1 แทนการเลือก และ 0 แทนไม่เลือก ซึ่งปัญหาที่ใช้รูปแบบโครโมโซมแบบนี้ในการแก้ไข้ปัญหา เช่น ปัญหาของ Knapsack [41]



โครโมโซม A : 

0	1	0	1	0
---	---	---	---	---

โครโมโซม B : 

1	1	1	0	0
---	---	---	---	---

ภาพที่ 2-27 การเข้ารหัสแบบ Binary Encoding

ข) การเข้ารหัสแบบค่าต่าง ๆ (Value Encoding) แต่ละตำแหน่งของยีนใน โครโมโซม จะแทนด้วยค่าต่าง ๆ โดยมีรูปแบบ เช่น ตัวอักษร จำนวนจริง และคำสั่งต่าง ๆ เป็นต้น ซึ่งรูปแบบของโครโมโซมนี้เหมาะสมกับปัญหาที่ค่อนข้างซับซ้อน ดังตัวอย่างใน ภาพที่ 2-28

โครโมโซม A : 

b	m	e	o	e
---	---	---	---	---

โครโมโซม B : 

1.29	0.28	3.25	1.97	2.46
------	------	------	------	------

โครโมโซม C : 

back	left	left	right	back
------	------	------	-------	------

ภาพที่ 2-28 การเข้ารหัสแบบ Value Encoding

ค) การเข้ารหัสแบบเพอมิวเตชัน (Permutation Encoding) ทุกตำแหน่งของ ยีนใน โครโมโซมจะเป็นค่าของจำนวนนับของตำแหน่งในแต่ละลำดับ ซึ่งเหมาะที่จะใช้ในการ ลำดับ ตำแหน่งของปัญหา เช่น ปัญหาของ Traveling Salesman Problem ภาพที่ 2-29

โครโมโซม A : 

1	2	3	4	5
---	---	---	---	---

โครโมโซม B : 

9	8	7	6	5
---	---	---	---	---

ภาพที่ 2-29 การเข้ารหัสแบบ Permutation Encoding

ง) การเข้ารหัสแบบต้นไม้ (Tree Encoding) เหมาะกับปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาโปรแกรมโดยที่ทุกตำแหน่งของยีนในโครโมโซมจะเป็นกิ่งของต้นไม้ ภาพที่ 2-30



ภาพที่ 2-30 การเข้ารหัสแบบ Tree Encoding

2.6.3.3 การสร้างประชากรต้นกำเนิด (Initial Population) เป็นการสร้างประชากรรุ่นแรก ตามรูปแบบโครโมโซมตามที่ได้กำหนดไว้โดยการสุ่ม (Random) เลือกตัวแทนประชากรขึ้นมาจำนวนหนึ่งจากประชากร ทั้งหมด โดยจำนวนที่สุ่มขึ้นมาจะต้องมีจำนวนตามขนาดประชากร (Population Size) ที่กำหนดไว้

2.6.3.4 ฟังก์ชันจุดประสงค์ (Objective Function) เป็นการกำหนดฟังก์ชันที่เกี่ยวข้องเงื่อนไขต่าง ๆ ที่ต้องการขึ้นมาเพื่อใช้ในการหาค่าความเหมาะสม

ก) ฟังก์ชันแบบจุดประสงค์เดียว (Single Objective Function) เป็นการกำหนดฟังก์ชันขึ้นมาหนึ่งฟังก์ชันที่ต้องการเพียงคำตอบเดียว ซึ่งเหมาะสำหรับปัญหาที่มีความซับซ้อนน้อย และไม่มีความขัดแย้งกันเอง

ข) ฟังก์ชันแบบหลายจุดประสงค์ (Multi Objectives Function) เป็นการกำหนดหลาย ๆ ฟังก์ชัน ที่ต้องการคำตอบหลาย ๆ คำตอบ แต่ละคำตอบจะเป็นคำตอบที่เป็นคู่แข่งกัน ซึ่งเหมาะสำหรับปัญหาที่มีความซับซ้อนมาก และอาจมีความขัดแย้งกันเอง

2.6.3.5 การวัดค่าความเหมาะสม (Fitness Function) หรือฟังก์ชันวัดความเหมาะสม คือ ฟังก์ชันที่ใช้ในการประเมินว่าแต่ละเส้นทางคำตอบนั้น มีความเหมาะสมในการแก้ปัญหาเพียงใด

ก) การวัดค่าความเหมาะสมแบบจุดประสงค์เดียว (Single Objective Fitness Function) การวัดค่าความเหมาะสมที่แสดงเพียงคำตอบเดียวตามวัตถุประสงค์ที่ได้กำหนดไว้

ข) การวัดค่าความเหมาะสมแบบหลายจุดประสงค์ (Multi Objectives Fitness Function) ฟังก์ชันที่วัดค่าความเหมาะสมตามวัตถุประสงค์ (Objectives) ต่าง ๆ ที่ได้กำหนดไว้

2.6.3.6 ตัวดำเนินการของจีเนติกอัลกอริทึม (Genetic Operator) จีเนติกอัลกอริทึมใช้กระบวนการหลัก สามกระบวนการในการหาคำตอบ (ใกล้เคียง) ที่ดีที่สุดของปัญหา คือ การคัดเลือกสายพันธุ์ (Selection), การสลับสายพันธุ์ หรือเปลี่ยนค่าโครโมโซม (Crossover) และการกลายพันธุ์ (Mutation)

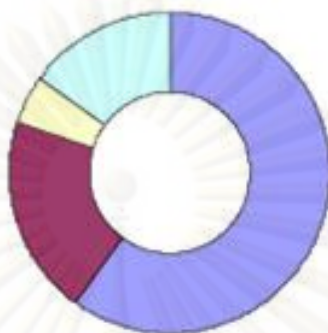
ก) การคัดเลือกสายพันธุ์ (Selection) หลังจากได้ค่าความเหมาะสมของแต่ละโครโมโซมแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการผสมพันธุ์หรือคัดเลือกสายพันธุ์ ซึ่งจะนำไปตามหลักการอยู่รอดของสิ่งมีชีวิตที่เหมาะสมที่สุด โดยโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมเป็นที่น่าพอใจจะได้รับการคัดเลือกไว้ ส่วนโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมต่ำกว่าจะมีโอกาสถูกเลือกน้อยกว่าหรือไม่ได้รับการคัดเลือกเลย วิธีการคัดเลือกโครโมโซมที่ดี เช่น การคัดเลือกแบบวงล้อรูเล็ต (Roulette Wheel), การคัดเลือกสุ่มตัวอย่างแบบฟันสุ่มสากล (Stochastic Universal Sampling Selection), การคัดเลือกแบบจัดอันดับ (Ranking), การคัดเลือกแบบการแข่งขัน (Tournament Selection) และการคัดเลือกแบบ Elitist เป็นต้น

- การคัดเลือกแบบวงล้อรูเล็ต (Roulette Wheel) คือ โครโมโซมที่มี ค่าความเหมาะสมที่ดีกว่ามีโอกาสถูกเลือกมากกว่า (ภาพที่ 2-31) แสดงถึงวงล้อเสี่ยงโชคที่ โครโมโซมทั้งหมดอาศัยอยู่ขนาดพื้นที่ของวงล้อเสี่ยงโชคหรือความกว้างของช่องแต่ละช่องของวงล้อรูเล็ตจากค่าความแข็งแรงของสมาชิกแต่ละตัว จากนั้นกำหนดตัวชี้ตำแหน่งตายตัว (Fixed Point) และทำการหมุนวงล้อรูเล็ต เมื่อวงล้อหยุดหมุนจะเลือกสมาชิกของกลุ่มประชากรที่มีตัวชี้ ตำแหน่งชี้อยู่ ทำเช่นนี้ซ้ำจนได้สมาชิกของกลุ่มประชากรครบตามจำนวนในหนึ่งรุ่น ซึ่งวิธีนี้จะมีความลำเอียง (Bias) ในการเลือกค่อนข้างมากเนื่องจากถ้าโครโมโซม (สมาชิกของกลุ่ม ประชากรตัวใด) ที่มีค่าความเหมาะสมที่ดีกว่าจะมีโอกาสถูกเลือกซ้ำหลายครั้ง

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Roulette Wheel



ภาพที่ 2-31 Roulette Wheel

- การเลือกสุ่มตัวอย่างแบบเฟ้นสุ่มสากล (Stochastic Universal Sampling Selection) จะมีหลักการคัดเลือกเหมือนกับการคัดเลือกแบบวงล้อรูเล็ต ต่างกันที่หลังจากกำหนดจุดชี้ตำแหน่งโดยการสุ่มในครั้งแรกแล้ว ทำการเลือกสมาชิกของกลุ่มประชากรที่มีตัวชี้ตำแหน่งที่อยู่เป็นตัวแรก ต่อจากนั้นทำการเลื่อนตัวชี้ตำแหน่งจากจุดเดิมทีละขั้น โดยที่แต่ละขั้นนั้นจะเท่ากับ 360 องศา ต่อจำนวนสมาชิกของกลุ่มประชากร แล้วทำการเลือกสมาชิกของกลุ่มประชากรที่มีตัวชี้ตำแหน่งที่อยู่จนครบตามจำนวนสมาชิกของกลุ่มประชากรในหนึ่งรุ่น ดังนั้นการคัดเลือกพันธุแบบการสุ่มเลือกตัวอย่างแบบเฟ้นสุ่มสากลนี้สามารถลดความลำเอียงในการคัดเลือกได้ เนื่องจากโอกาสที่สมาชิกของกลุ่มประชากรตัวใดจะถูกเลือกซ้ำหลาย ๆ ครั้ง จะเกิดขึ้นต่อเมื่อสมาชิกของกลุ่มประชากรตัวนั้น ๆ มีความแข็งแรงสูงมาก ๆ
- การคัดเลือกแบบจัดอันดับ (Ranking) คือ เลือกประชากรที่มีค่า ความเหมาะสมที่ดีที่สุดโดยที่ไม่สนใจประชากรตัวอื่นเลย
- การคัดเลือกแบบการแข่งขัน (Tournament Selection) ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ในการคัดเลือกโครโมโซมพ่อแม่พันธุ์ที่ดีที่สุดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ เป็นวิธีการที่เหมือนกับการแข่งขันโดยทั่วไปโดยจะแบ่งกลุ่มประชากรออกเป็น สองกลุ่มแบบสุ่ม แล้วทำการแข่งขันกันโดยคัดเลือกโครโมโซมที่มีความเหมาะสมสูงที่สุดในกลุ่มโครโมโซมที่สุ่มขึ้นมา ซึ่งวิธีนี้ทำให้ช่วยลดปัญหาในเรื่องของความลำเอียง (Bias) ออกไป

- การคัดเลือกแบบ Elitist เป็นแนวคิดที่ป้องกันการหาของเส้นทางที่ดีที่สุด หมายความว่ามีการคัดลอกโครโมโซมที่ดีที่สุดไว้ก่อน ส่วนประชากรส่วนที่เหลือจะที่จะต้องคัดเลือกจะใช้วิธีการเลือกแบบอื่น ๆ

ข) การสลับสายพันธุ (Crossover) เป็นการเปลี่ยนถ่ายยีนจากโครโมโซมพ่อแม่ไปสู่ลูก ซึ่งอัลกอริทึมพยายามสร้างทางเลือกที่ดีขึ้นโดยการรวมลักษณะที่ดีของแต่ละโครโมโซมเข้าด้วยกัน โครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมสูงกว่ามักจะถูกลูกเลือกมาสลับสายพันธุบ่อยครั้งกว่าส่งผลให้มีโอกาสในการรอดไปยังรุ่นต่อ ๆ ไปมากขึ้นวิธีการในการสลับสายพันธุ คือ ทำการสุ่มตำแหน่งที่ต้องการสลับสายพันธุขึ้นมา จากนั้น คัดลอกโครโมโซมที่อยู่หน้าตำแหน่งที่สุ่มได้จากโครโมโซมของพ่อ และคัดลอกโครโมโซมที่อยู่หลังตำแหน่งที่สุ่มได้จากโครโมโซมของแม่ แล้วนำโครโมโซมที่ได้ทั้งสองมารวมกันเป็น โครโมโซมลูกตัวที่หนึ่ง ส่วนลูกตัวที่สองก็ให้ทำในลักษณะเดียวกันแต่สลับตำแหน่งระหว่างพ่อและแม่ ซึ่งเทคนิคที่ใช้ในการสลับสายพันธุมีหลายวิธี เช่น แบบ Single Point, Two Point หรือ Arithmetic เป็นต้น

การสลับสายพันธุแบบ Single Point คือ การสุ่มตำแหน่งของการสลับสายพันธุเพียง หนึ่งตำแหน่ง ดังตารางที่ 2-2

**ตารางที่ 2-2** การสลับสายพันธุแบบ Single Point

พ่อ	แม่	ลูก (1)	ลูก (2)
11 00 1100	10 10 1010	11 10 1010	10 00 1100

การสลับสายพันธุแบบ Two Point คือ การสุ่มตำแหน่งของการสลับสายพันธุ สองตำแหน่ง (ตารางที่ 2-3)

**ตารางที่ 2-3** การสลับสายพันธุแบบ Two Points

พ่อ	แม่	ลูก (1)	ลูก (2)
11 00 11 00	10 10 10 10	11 10 10 00	10 00 11 10

การสลับสายพันธุแบบ Arithmetic คือ การสุ่มตำแหน่งของการสลับสายพันธุโดยใช้ตัวดำเนินการ (Operator) เช่น AND หรือ OR (ตารางที่ 2-4)



## ตารางที่ 2-4 การสลับสายพันธุแบบ Arithmetic

พ่อ	แม่	ลูก (1) AND	ลูก (2) OR
1100 1100	1010 1010	1000 1000	1110 1110

ค) การกลายพันธุ์ (Mutation) เป็นการนำโครโมโซมมาสุ่มแก้ไขหรือ ดัดแปลง บางส่วนของโครโมโซมให้เป็นบิดตรงข้ามทำให้สายพันธุใหม่เปลี่ยน ไปจากเดิม ซึ่งมี โอกาสที่จะ เป็นโครโมโซมที่ดีหรือเลวกว่าเดิมก็ได้ หากโครโมโซมที่ได้ใหม่นั้นเป็นโครโมโซมที่ เลวลง โครโมโซมที่ได้นี้จะถูกคัดออกไปในขั้นตอนการถูกคัดเลือกเอง วัตถุประสงค์ของการ กลายพันธุ์ คือ เพื่อป้องกันการสูญหายของข้อมูล และสร้างความหลากหลายของข้อมูล ขั้นตอนในการกลายพันธุ์ โดยทั่วไป คือ ทำการสุ่มตำแหน่งที่ต้องการการกลายพันธุ์ขึ้นมา ภายใต้ความน่าจะเป็นในการ กลายพันธุ์ (Probability of Mutation) และเทคนิคในการกลายพันธุ์ส่วนมากจะขึ้นกับการเข้ารหัส โครโมโซม ซึ่งในงานวิจัยนี้ทำการเข้ารหัสโครโมโซมแบบไบนารีดังนั้นเทคนิคการกลายพันธุ์ในกรณี นี้ คือ การกลับบิตเป็นตรงกันข้ามจาก 1 เป็น 0 หรือจาก 0 เป็น 1 (ภาพที่ 2-32)



ตำแหน่งในการกลายพันธุ์ คือ ตำแหน่งที่สี่

ภาพที่ 2-32 การกลายพันธุ์

กระบวนการทำงานของ GA เป็นวัฏจักรหมุนเวียนอยู่เช่นนี้จนกระทั่งถึง จุดหนึ่งตาม เงื่อนไขโดยอาจสิ้นสุดเมื่อถึงรุ่นตามที่กำหนดหรือพบคำตอบที่ดีที่สุดตามที่กำหนดไว้ จาก แนวคิด นี้จะเห็นว่า GA เป็นเทคนิคที่เหมาะสมในการหาคำตอบที่ดีที่สุด ดังนั้นจึงนำ GA มาใช้ ในการ คัดเลือกหาลักษณะที่เหมาะสมในการทำนาย ตำแหน่งในการฝังรายน่า เพื่อช่วยให้ผลการทำนาย เป็นไปอย่างมีคุณภาพตรงตามเงื่อนไข

## 2.7 การใช้ประโยชน์จากภาพ

2.7.1 คุณค่าของภาพ ภาพเป็นข้อมูลพื้นฐานที่ช่วยให้การสื่อความหมายที่มีประสิทธิภาพ มีความเข้าใจในเนื้อหาสาระได้ชัดเจนยิ่งขึ้นและเมื่อเปรียบเทียบกับคำพูดทั่ว ๆ ไปการใช้ภาพช่วยให้เกิดมโนทัศน์ได้ดีกว่าคำพูด ดังคำพังเพยของไทยที่ระบุไว้ชัดเจนว่า “สิบปากว่าไม่เท่าตาเห็น”

จึงได้มีความพยายามที่จะนำภาพมาใช้ประกอบในการสื่อความหมาย อย่างเช่น การใช้ภาพประกอบเนื้อหาในสื่อการเรียนการสอน เป็นต้น ซึ่งเมื่อได้เผยแพร่สื่อการเรียนการสอนเหล่านี้ ออกสู่สาธารณชนแล้วพบว่ามีผลกระทบต่อการละเมิดลิขสิทธิ์ด้วยการทำซ้ำ หรือดัดแปลงแล้วนำไปจำหน่าย หน่วยงานที่เกี่ยวข้องจึงพยายามคิดค้นวิธีป้องกันไม่ให้เกิดปัญหาดังกล่าวขึ้น วิธีการหนึ่งก็คือการใช้ตัวบทกฎหมายโดยให้ผู้ที่คิดค้นสร้างสรรค์ผลงานขึ้นมาทำการจดลิขสิทธิ์ เพื่อให้ผลงานของตนได้รับความคุ้มครองทางกฎหมาย

## 2.7.2 วิวัฒนาการของกฎหมายลิขสิทธิ์ในประเทศไทย

ประเทศไทยได้ออกกฎหมายที่ให้การคุ้มครองสิทธิที่มีลักษณะเดียวกับลิขสิทธิ์เป็นฉบับแรก คือพระราชบัญญัติกรรมสิทธิ์ผู้แต่งหนังสือ พ.ศ. 2444 เพื่อป้องกันการละเมิดลิขสิทธิ์งานทางด้านวรรณกรรม (Literary works) หลังจากนั้นได้ไม่นานพระราชบัญญัติฉบับแรกก็ถูกยกเลิกไป แล้วได้มีการประกาศใช้พระราชบัญญัติคุ้มครองวรรณกรรมและศิลปกรรม พ.ศ. 2474 ซึ่งเป็นการให้ความคุ้มครองเพิ่มในงานศิลปกรรมด้วยและต่อมาได้มีการประกาศใช้พระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2521 ขึ้นใช้แทน ซึ่งเป็นการให้ความคุ้มครองเพิ่มในงานโสตทัศน์วัสดุ การแพร่ภาพ การแพร่เสียง และงานในด้านวิทยาศาสตร์ จนกระทั่งมีการพัฒนามาเป็นพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 ซึ่งเป็นการขยายความครอบคลุมงานด้านวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์และซอฟต์แวร์ การนำไปเผยแพร่และการให้เช่างานทางด้านสื่อภาพ-เสียง (Visual-Sound-Video) พระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ฉบับนี้ถูกใช้มาจนถึงปัจจุบัน โดยเริ่มบังคับใช้ตั้งแต่วันที่ 21 มีนาคม 2538 ภายใต้ความรับผิดชอบดูแลของกรมลิขสิทธิ์ทางปัญญา (Department of Intellectual Property, DIP) กระทรวงพาณิชย์ [43]

### 2.7.2.1 ลิขสิทธิ์

ลิขสิทธิ์เป็นทรัพย์สินทางปัญญาอย่างหนึ่งที่กฎหมายให้ความคุ้มครองโดยให้เจ้าของลิขสิทธิ์มีสิทธิแต่เพียงผู้เดียวที่จะกระทำการใด ๆ เกี่ยวกับงานที่ผู้สร้างสรรค์ได้ทำขึ้น ซึ่งงานสร้างสรรค์ที่พระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ได้ให้การคุ้มครองต้องเป็นงานประเภทวรรณกรรม นาฏกรรม ศิลปกรรม ดนตรีกรรม โสตทัศน์วัสดุ ภาพยนตร์ สิ่งบันทึกเสียง งานแพร่เสียงแพร่ภาพ หรืองานอื่นใดในแผนกวรรณคดี แผนกวิทยาศาสตร์ หรือแผนกศิลปะ ของผู้สร้างสรรค์ไม่ว่างานดังกล่าวจะแสดงออก โดยวิธี หรือรูปแบบอย่างไร ส่วนงานที่พระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ไม่ให้การคุ้มครองคือ ความคิดขั้นตอน กรรมวิธี ระบบวิธีใช้หรือทำงาน แนวความคิด หลักการ การค้นพบทฤษฎีทางวิทยาศาสตร์ หรือคณิตศาสตร์ ข่าวประจำวัน และข้อเท็จจริงต่าง ๆ ที่มีลักษณะเป็นเพียงข่าวสารที่ไม่ใช่งานวรรณกรรม งานวิทยาศาสตร์หรือศิลปะ และงานลิขสิทธิ์ที่หมดอายุการคุ้มครอง ฯลฯ

พระราชบัญญัติลิขสิทธิ์จะให้ความคุ้มครองโดยอัตโนมัติแก่งานที่ทำเสร็จแล้วทุกงานโดยไม่จำเป็นต้องแสดงการสงวนสิทธิ์หรือดำเนินการจดทะเบียนลิขสิทธิ์งานนั้น การได้มาซึ่งลิขสิทธิ์ ก็คือผู้สร้างสรรค์เป็นผู้มีลิขสิทธิ์ในงานที่ตนได้สร้างสรรค์ขึ้น โดยอยู่ภายใต้เงื่อนไขดังนี้ หากงานใดที่มีลักษณะเป็นงานดัดแปลงมาจากงานอันมีลิขสิทธิ์ โดยได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ ให้ผู้ที่ได้ดัดแปลงนั้นมีสิทธิ์ในงานที่ได้ดัดแปลง ในกรณีที่มีการรวบรวมงาน ที่มีลิขสิทธิ์หลาย ๆ งานเข้าด้วยกันโดยได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ หรือเป็นการนำเอาข้อมูลหรือสิ่งอื่นใดซึ่งสามารถอ่าน หรือถ่ายถอดได้โดยอาศัยเครื่องกล หรืออุปกรณ์อื่นใดมารวบรวมหรือประกอบเข้ากัน โดยวิธีการลำดับในการนำเสนออันนั้นไม่ได้ลอกเลียนงานของคนอื่นผู้ ที่ทำนั้นย่อมมีลิขสิทธิ์ในงานที่รวบรวมนั้น แต่ทั้งนี้ไม่กระทบกระเทือนสิทธิของเจ้าของลิขสิทธิ์ที่มีอยู่ในงานหรือข้อมูล หรือสิ่งอื่นใด ของผู้สร้างสรรค์เดิมที่ถูกนำมารวบรวมหรือประกอบเข้ากัน

#### 2.7.2.2 การคุ้มครองลิขสิทธิ์

เจ้าของลิขสิทธิ์ถือสิทธิแต่เพียงผู้เดียวที่จะทำการใด ๆ แก่งานอันมีลิขสิทธิ์ดังต่อไปนี้ ทำซ้ำ หรือดัดแปลง เผยแพร่ต่อสาธารณชน และให้เช่าต้นฉบับ หรือสำเนางานโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โสตทัศนวัสดุ ภาพยนตร์และสิ่งบันทึกเสียง ให้ประโยชน์อันเกิดจากลิขสิทธิ์แก่ผู้อื่น และอนุญาตให้ผู้อื่นใช้สิทธิในการทำซ้ำหรือดัดแปลง เผยแพร่ต่อสาธารณชน ให้เช่าต้นฉบับ หรือสำเนางานโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โสตทัศนวัสดุ ภาพยนตร์และสิ่งบันทึกเสียง เจ้าของลิขสิทธิ์สามารถที่จะโอนลิขสิทธิ์ของตนทั้งหมด หรือแต่บางส่วนให้แก่บุคคลอื่นได้ โดยการโอนจะมีกำหนดเวลาหรือตลอดอายุแห่งการคุ้มครองสิทธิ์ก็ได้ โดยจะต้องทำเป็นหนังสือลงลายมือชื่อผู้โอนและผู้รับโอน ถ้าไม่ได้กำหนดระยะเวลาไว้ในสัญญาโอนให้ถือว่าเป็นการโอนมีกำหนดระยะเวลา 10 ปี เว้นแต่เป็นการโอนกันทางมรดก อายุของการคุ้มครองลิขสิทธิ์จะมีอยู่ตลอดอายุของผู้สร้างสรรค์ และจะมีอยู่ต่อไปอีก 50 ปี นับแต่ผู้สร้างสรรค์ร่วมคนสุดท้ายถึงแก่ความตาย แต่ถ้าถึงแก่ความตายหมด ก่อนที่งานนั้นจะได้มีการโฆษณา ก็ให้ลิขสิทธิ์นั้นมียุอายุห้าสิบปี นับตั้งแต่ได้มีการโฆษณากครั้งแรก

#### 2.7.2.3 การละเมิดลิขสิทธิ์

การละเมิดลิขสิทธิ์มีอยู่สองประเภท ดังนี้

ก) การละเมิดลิขสิทธิ์ทางตรง คือการทำซ้ำ หรือดัดแปลง เผยแพร่ต่อสาธารณชน รวมทั้งการให้เช่าต้นฉบับหรือสำเนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยที่ไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์

ข) การละเมิดลิขสิทธิ์ทางอ้อม คือการกระทำทางการค้าหรือการกระทำที่มีส่วนสนับสนุนให้เกิดการละเมิดลิขสิทธิ์ดังกล่าวข้างต้น โดยผู้กระทำรู้อยู่แล้วว่างานที่มีอยู่ได้ทำขึ้น

โดยการละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่น แต่ก็ยังกระทำเพื่อหากำไรจากงานนั้น ได้แก่ การขาย มีไว้เพื่อขาย ให้เช่า เสนอให้เช่า ให้เช่าซื้อ เสนอให้เช่า ซื้อ เผยแพร่ต่อสาธารณชน แจกจ่ายในลักษณะที่อาจก่อให้เกิดความเสียหายแก่เจ้าของลิขสิทธิ์และนำหรือส่งเข้ามาในราชอาณาจักร

#### 2.7.2.4 ข้อยกเว้นการละเมิดลิขสิทธิ์

ข้อยกเว้นการละเมิดลิขสิทธิ์สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

##### ก) ข้อยกเว้นการละเมิดลิขสิทธิ์สำหรับงานทั่ว ๆ ไป

การกระทำใด ๆ แก่งานอันมีลิขสิทธิ์ของบุคคลอื่นตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ หากไม่ขัดต่อการแสวงหาผลประโยชน์จากงานอันมีลิขสิทธิ์นั้นและต้องไม่กระทบกระเทือนถึงสิทธิอันชอบด้วยกฎหมายของเจ้าของลิขสิทธิ์นั้นเกินสมควร มิให้ถือว่าเป็นการละเมิดลิขสิทธิ์ ถ้าได้กระทำในกรณีต่อไปนี้

วิจัยหรือศึกษางานนั้นอันมิใช่การกระทำเพื่อหากำไร หรือใช้เพื่อประโยชน์ของตนเอง ตีพิมพ์ วิจารณ์ หรือแนะนำผลงาน โดยมีการรับรู้ถึงความเป็นเจ้าของลิขสิทธิ์ในงานนั้นเสนอรายงานข่าวทางสื่อมวลชน โดยมีการรับรู้ถึงความเป็นเจ้าของลิขสิทธิ์ในงานนั้น ทำซ้ำ ดัดแปลง นำออกแสดง หรือทำให้ปรากฏเพื่อประโยชน์ในการพิจารณาของศาล ทำซ้ำ ดัดแปลง นำออกแสดงหรือทำให้ปรากฏโดยผู้สอนเพื่อประโยชน์ในการสอนของตนอันมิใช่การกระทำเพื่อหากำไร ทำซ้ำ ดัดแปลง บางส่วนของงาน หรือทำบทสรุปโดยผู้สอน หรือสถาบันศึกษาเพื่อแจกจ่าย หรือจำหน่ายแก่ผู้เรียน ในชั้นเรียน หรือสถานศึกษา ทั้งนี้ต้องไม่เป็นการกระทำเพื่อหากำไรและนำงานนั้นมาใช้เป็นส่วนหนึ่งในการถามและตอบในการสอบ

##### ข) ข้อยกเว้นการละเมิดลิขสิทธิ์สำหรับโปรแกรมคอมพิวเตอร์

การกระทำใด ๆ แก่โปรแกรมคอมพิวเตอร์อันมีลิขสิทธิ์ของบุคคลอื่น ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์มิให้ถือว่าเป็นการละเมิดลิขสิทธิ์หากไม่มีวัตถุประสงค์เพื่อหากำไร และได้ปฏิบัติตามกรณีดังต่อไปนี้ วิจัยหรือศึกษาโปรแกรมคอมพิวเตอร์นั้น ใช้เพื่อประโยชน์ของเจ้าของสำเนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์นั้น ตีพิมพ์ วิจารณ์ หรือแนะนำผลงาน โดยมีการรับรู้ถึงความเป็นเจ้าของลิขสิทธิ์ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์นั้น เสนอรายงานข่าวทางสื่อมวลชน โดยมีการรับรู้ถึงความเป็นเจ้าของลิขสิทธิ์ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์นั้น หรือทำสำเนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในจำนวนที่สมควร โดยบุคคลผู้ซึ่งได้ซื้อ หรือได้รับโปรแกรมนั้นมาจากบุคคลอื่นอย่างถูกต้องตามกฎหมายเพื่อเก็บไว้ใช้ประโยชน์ในการบำรุงรักษา หรือป้องกันการสูญหาย ทำซ้ำ ดัดแปลง นำออกแสดง หรือทำให้ปรากฏเพื่อประโยชน์ในการพิจารณาของศาล นำโปรแกรมคอมพิวเตอร์นี้ นมาใช้เป็นส่วนหนึ่งในการถามและตอบในการสอบ ดัดแปลงโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ในกรณีที่จำเป็นแก่การใช้จัดทำ



สำเนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์นั้นเพื่อเก็บรักษาไว้สำหรับการอ้างอิง หรือค้นคว้าเพื่อประโยชน์ของ  
สาธารณชน

### 2.7.2.5 บทกำหนดโทษการละเมิดลิขสิทธิ์

กฎหมายลิขสิทธิ์ได้กำหนดรายละเอียดเกี่ยวกับบทกำหนดโทษการละเมิดลิขสิทธิ์ไว้ ดังนี้

ก) การละเมิดลิขสิทธิ์ทางตรง ต้องระวางโทษปรับตั้งแต่ 20,000 บาท ถึง 200,000 บาท ถ้าการกระทำความผิดเป็นการกระทำเพื่อการค้ามีโทษจำคุกตั้งแต่ 6 เดือน ถึง 4 ปี หรือปรับตั้งแต่ 100,000 บาท ถึง 800,000 บาท หรือทั้งจำทั้งปรับ

ข) การละเมิดลิขสิทธิ์ทางอ้อม ต้องระวางโทษปรับตั้งแต่ 10,000 บาท ถึง 100,000 บาท ถ้าการกระทำความผิดเป็นการกระทำเพื่อการค้ามีโทษจำคุกตั้งแต่ 3 เดือนถึง 2 ปี หรือปรับตั้งแต่ 50,000 บาท ถึง 400,000 บาท หรือทั้งจำทั้งปรับ เมื่อพ้นโทษแล้วยังไม่ครบกำหนด 5 ปี กระทำความผิดต่อพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์อีก มีโทษเป็นสองเท่าของโทษที่กำหนดไว้สำหรับความผิดนั้น ค่าปรับที่ได้มีการชำระตามคำพิพากษาต้องจ่ายแก่เจ้าของลิขสิทธิ์ เป็นจำนวนครั้งหนึ่ง แต่ทั้งนี้ไม่เป็นการกระทบกระเทือนถึงสิทธิของเจ้าของลิขสิทธิ์ที่จะฟ้องเรียกค่าเสียหายในทางแพ่ง สำหรับส่วนที่เกินจำนวนเงินค่าปรับที่เจ้าของลิขสิทธิ์ได้รับไว้แล้วนั้น

การออกกฎหมายเพื่อให้ความคุ้มครองในผลงานต่าง ๆ นั้น สามารถใช้แก้ปัญหา หากการละเมิดลิขสิทธิ์ทางปัญญาได้ในระดับหนึ่งเท่านั้น เนื่องจากยังมีช่องโหว่ที่สำคัญอีกหลายประการที่เอื้อต่อการกระทำผิดกฎหมายอย่างมาก จึงมีความจำเป็นที่จะต้องพัฒนาวិธีการอื่น ๆ เพื่อใช้ในการป้องกันและแก้ปัญหาเหล่านี้ วิธีกรหนึ่งที่มีการยอมรับว่ามีประสิทธิภาพมากก็คือการฝังลายน้ำดิจิทัลลงในภาพในสื่อการสนเสริมคอมพิวเตอร์เพื่อแสดงความเป็นเจ้าของ ทำให้ผู้ที่ต้องการจะทำซ้ำไม่ยอมดำเนินการเนื่องจากไม่แน่ใจว่าสื่อนั้นมีลายน้ำดิจิทัลฝังอยู่หรือไม่ เพราะถ้าสื่อนั้นมีลายน้ำดิจิทัลฝังอยู่ การจะนำสื่อไปใช้ประโยชน์ก็จำเป็นที่จะต้องลบลายน้ำดิจิทัลออกก่อน ซึ่งต้องใช้เวลาและวิธีการที่ค่อนข้างยุ่งยาก

## 2.8 รูปแบบสัญญาณเสียงดิจิทัล

### 2.8.1 ประวัติความเป็นมา [40]

ในสมัยก่อนที่คอมพิวเตอร์จะเข้ามามีบทบาทสำคัญอย่างในปัจจุบัน สัญญาณเสียงจะถูกทึกลงบนซีดีเพื่อทำการเล่นกับเครื่องเล่นซีดี เพียงอย่างเดียวเท่านั้น เรียกรูปแบบในลักษณะนี้ว่า Compact Disk - Digital Audio (CD-DA) ซึ่งจะจัดเก็บเป็นรูปแบบมาตรฐานชื่อว่า red book คิดค้นโดยบริษัท Sony และ Philips ซึ่งเป็นผู้คิดค้นต้นแบบเทคโนโลยีของซีดีขึ้น รูปแบบดังกล่าว



ถูกนำออกมาเผยแพร่ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1980 ซึ่ง red book ไม่เป็นแค่เพียงการจัดเก็บสัญญาณ เสียงเท่านั้น แต่ยังคำนึงถึงความสัมพันธ์ต่อลักษณะของแผ่นซีดี ขนาดที่เป็นไปได้ของข้อมูลที่ทำกรจัดเก็บ ระยะห่างระหว่างแทร็ค เหล่านี้เป็นต้น ซึ่งจำเป็นอย่างยิ่งในการระบุว่าข้อมูลเหล่านี้จะถูกอ่านให้ถูกต้องได้อย่างไร สำหรับซีดีในช่วงต่อมาก็ได้อาศัยหลักการพื้นฐานของ red book นี้เองเพื่อจัดเก็บสื่อข้อมูล

การจัดเก็บข้อมูลในรูปแบบของ CD-DA เริ่มจากการชักตัวอย่างจากแหล่งกำเนิดเสียง จากนั้นจะถูกเข้ารหัสดิจิทัลเพื่อแปลงเป็น CD-DA โดยใช้อัตราการชักตัวอย่างที่ 44.1 kHz ซึ่งสูงว่าความถี่ที่มนุษย์สามารถได้ยินถึงสองเท่า ซึ่งแต่ละแซมเปิลจะมีความละเอียด 16 บิต แบบสเตอริโอ ซึ่งใช้พื้นที่ในการจัดเก็บประมาณ 176 kbps

ข้อมูลที่เป็นสัญญาณเสียงจะถูกจัดเก็บบนดิสก์ในลักษณะเป็นบล็อกหรือบางที่เรียกว่า เซกเตอร์ซึ่งแต่ละบล็อกจะบรรจุข้อมูลได้ 2,352 ไบท์ในจำนวนนี้ประกอบด้วยไบท์ที่ใช้เพื่อการทำรหัสแก้ไขความผิดพลาด และโครงสร้างควบคุม ดังนั้นเสียงที่นาน 1 วินาทีต้องใช้ 75 บล็อกในการจัดเก็บหรือ ซีดีมาตรฐาน 74 นาทีจะมีจำนวนข้อมูลประมาณ 747 MB หรือสัญญาณเสียงที่ไม่มีการบีบอัดนาน 1 นาที เมื่อจัดเก็บในรูปแบบ CD (44.1 kHz, 16 บิต, สเตอริโอ) จะใช้พื้นที่ในการจัดเก็บประมาณ 10 MB (Pcguide, 2005)

### 2.8.2 รูปแบบไฟล์ WAV

เราสามารถใช้อุปกรณ์ที่ออกแบบมาเป็นพิเศษให้สามารถอ่านข้อมูลจาก CD-DA แล้วจัดเก็บลงบนคอมพิวเตอร์ในรูปแบบไฟล์เสียงแบบต่างๆได้ โดยผ่านกระบวนการสกัดสัญญาณซึ่งข้อมูลดิจิทัลเหล่านี้จะถูกจัดเก็บเป็นลำดับตามลักษณะของรูปคลื่น แล้วถูกนำมาบีบอัดโดยวิธีบีบอัดข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับลักษณะสมบัติของรูปคลื่นสัญญาณเสียงรวมไปถึงรูปแบบของการจัดเก็บ เช่น อัตราการสุ่มของสัญญาณเสียง bit-depth ชนิดของการบีบอัด ข้อมูล ความยาวของรูปคลื่น และ อัตราการอ่านข้อมูลต่อวินาที เป็นต้น โดยปราศจากการบีบอัดข้อมูล ทำให้สัญญาณเสียงที่ได้จาก WAV สามารถนำไปใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางในการประมวลผลสัญญาณแบบต่างๆได้อย่างดี ซึ่งจากคุณสมบัติดังกล่าวทำให้ไม่ต้องสงสัยเลยว่าทำไม WAV จึงเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลาย ต่างๆกันแล้วแต่ความต้องการในการลดขนาดข้อมูลของการจัดเก็บแต่ละชนิด ซึ่ง WAV ก็เป็นรูปแบบหนึ่งของรูปแบบไฟล์เสียงที่ใช้ในการจัดเก็บแบบดิจิทัล ไฟล์นามสกุล WAV นี้ถูกคิดขึ้นโดย บริษัท Microsoft ร่วมมือกับ IBM สำหรับระบบปฏิบัติการ Windows รูปแบบไฟล์เสียงชนิดนี้จะ

### 2.8.3 รูปแบบไฟล์ MP3

ในปัจจุบันโลกแห่งการสื่อสารแบบดิจิทัลขยายตัวมากขึ้น ไฟล์เพลงต่าง ๆ ถูกลดขนาดลงเพื่อให้ส่งผ่านถึงกันได้รวดเร็วขึ้น ไฟล์แบบ MP3 จึงถือกำเนิดขึ้น โดยอาศัยการเข้ารหัสไฟล์ WAV เพื่อลดขนาดข้อมูลลง ซึ่งปกติความยาวของเพลงหนึ่งเพลงที่จัดเก็บแบบ WAV จะมีขนาดประมาณ 50 MB ทำให้มีขนาดใหญ่มากเกินไปที่จะจัดส่งบนอินเทอร์เน็ตได้ ทำให้ไฟล์แบบ MP3 เข้ามามีบทบาทสำคัญในการลดขนาดข้อมูลเหล่านี้ลงถึง 10-12 เท่า หรือขนาดแค่ 4-5 MB กระบวนการเหล่านี้เป็นการลดคุณภาพของสัญญาณเสียงลง ถึง แม้ว่าจะทำการถอดรหัสข้อมูลกลับมาสู่ WAV แล้วก็ตามแต่ไม่ทำให้คุณภาพเสียงที่ลดลงไปกลับดีขึ้นมาได้ จึงจัดว่าเป็นการบีบอัดแบบสูญเสีย และเนื่องจากไฟล์แบบ MP3 ผ่านการเข้ารหัสมาแล้วทำให้ไม่สามารถประมวลผลสัญญาณได้โดยตรงหากแต่ต้องแปลงเป็น WAV ก่อนเสมอ

ในปลายปี ค.ศ. 1980 MP3 ถูกคิดค้นและพัฒนาโดย Fraunhofer-Gesellschaft และ Thomson Multimedia และตั้งแต่ปี ค.ศ. 1997 เป็นต้นมาก็เป็นที่นิยมอย่างรวดเร็วบนอินเทอร์เน็ต MP3 เป็นย่อของ MPEG (Moving Pictures Experts Group) Layer – 1 ซึ่งเป็นกลุ่มที่สนับสนุนให้ MP3 มีมาตรฐานระดับนานาชาติ ในขั้นตอนการแปลง MP3 สามารถกำหนดขนาดของไฟล์ที่สอดคล้องกับคุณภาพของเสียงได้โดยการกำหนดอัตราบิต (Bit rate) หมายถึงจำนวนบิตที่สามารถ ส่งได้ต่อวินาที (Bit per second) ความหมายของ อัตราบิต คล้ายกับจำนวนเฟรมของฟิล์มหนังที่ยิ่งมีมากยิ่งให้คุณภาพที่ดี สำหรับสัญญาณเสียง อัตราบิต ยิ่งมากสัญญาณเสียงที่ได้ยิ่งมีคุณภาพดีแต่ไฟล์ย่อมมีขนาดใหญ่ตามไปด้วย สำหรับ MP3 จะเขียน อัตราบิต อยู่ในรูปของ kbps ส่วนมากมักตั้งค่านีไว้ที่ 128 kbps เนื่องจากให้ไฟล์ขนาดไม่ใหญ่มากนักในขณะที่มีคุณภาพเสียงที่ใช้ได้ นอกจากนี้การกำหนด bit rate สามารถกำหนดได้หลายแบบ เช่น constant bit rate (CBR), average bit rate (ABR), variable bit rate (VBR) เป็นต้น

เป็นที่วิพากษ์วิจารณ์กันเป็นอย่างมากในผลกระทบของ MP3 ต่อลิขสิทธิ์ของเพลงที่ทำการบีบอัด ความจริงแล้ว MP3 เป็นไฟล์ที่ทำการจัดเก็บสัญญาณเสียงประเภทหนึ่งเท่านั้น จึงจัดได้ว่าเป็นรูปแบบ ที่ถูกกฎหมาย แต่การใช้ MP3 จะเป็นการผิดกฎหมายก็ต่อเมื่อมีการทำซ้ำ เผยแพร่ หรือการกระทำอื่นใด ซึ่งขัดต่อ กฎหมาย ลิขสิทธิ์ของแต่ละประเทศโดยไม่ได้รับการอนุญาตที่ถูกต้องจากเจ้าของลิขสิทธิ์เสียก่อน

## 2.9 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันการส่งข้อมูลเสียงผ่านระบบเครือข่ายมีกันอย่างแพร่หลาย และมีความง่ายต่อการปลอมแปลงและแก้ไข ดังนั้นจึงต้องหาข้อมูลเพื่อเป็นตัวอ้างอิงในข้อมูลเสียงนั้น จากเหตุนี้จึงต้องมี

การทำลายน้ำสัญญาณเสียงเพื่อใช้ในการยืนยันลิขสิทธิ์ ในการทำลายน้ำ สัญญาณเสียง งานวิจัยในอดีตที่ผ่านมาในการทำลายน้ำสัญญาณเสียงแบ่งออกเป็น สอง ประเภทคือ ลายน้ำที่เป็นสัญญาณเสียงและลายน้ำที่เป็นรูปภาพ การแสดงลิขสิทธิ์ที่ดีคือการใช้ภาพเป็นลายน้ำเนื่องจากการรับรู้ทางสายตาเป็นสิ่งที่มนุษย์เชื่อถือได้ดี และเมื่อถอดลายน้ำแล้วสามารถ เห็นได้ทันที งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการ ผังลายน้ำที่มีอยู่ก่อนหน้านี้จะแตกต่างกันตามขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการ ผังลายน้ำ ลักษณะของข้อมูล ตำแหน่งของข้อมูลที่ทำกร ผัง รวมถึงการประยุกต์ใช้งาน ซึ่งมีดังต่อไปนี้

ใน [17] นำเสนอลักษณะของลายน้ำเป็นลำดับของบิตโดยใช้ pseudo random sequence เป็นตัวเข้ารหัส ลักษณะการผังใช้การแปลง FFT ร่วมกับคุณสมบัติการได้ยินของมนุษย์ (Human Auditory System) เป็นตัวค้นหาตำแหน่งในการผังโดยเลือกตำแหน่งที่อยู่ภายใต้ Threshold ของการได้ยินของมนุษย์ และมีค่า Scale factor เป็นตัวปรับระดับของระดับการได้ยิน ข้อดีของวิธีการนี้คือไม่สามารถ แยกความแตกต่างของสัญญาณต้นฉบับกับสัญญาณที่ถูกทำลายน้ำ ข้อเสียของวิธีการนี้คือไม่ทนต่อการกรอง และการบีบอัด เนื่องจากทำการผังในทุกความถี่ เพราะวิธีการบีบอัดข้อมูลมีการตัดข้อมูลที่อยู่ในช่วงความถี่สูงทิ้งไป

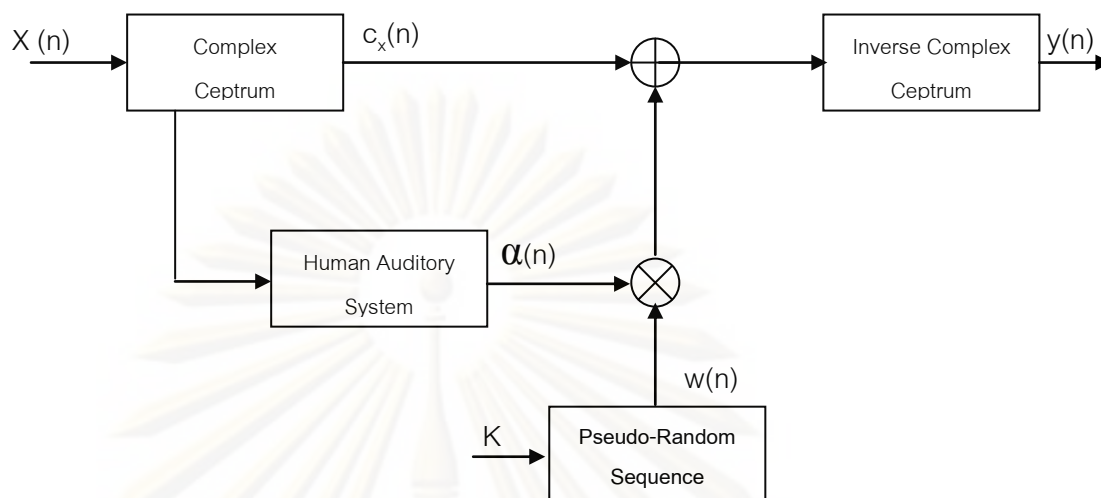
ใน [18] เสนอวิธีการสร้างลายน้ำดิจิทัลสำหรับสื่อประเศเสียง โดยผังลงไปในแต่ละแชนเนลของเสียงในโดเมนเวลา เสียงต้นฉบับจะถูกแบ่งเป็นช่วง ๆ โดยผังลายน้ำที่เป็นสัญญาณรบกวนที่สร้างมาจากกฏูญแจลงในแต่ละช่วงเสียงด้วยลายน้ำตัวเดียวกัน และนำคุณสมบัติการได้ยินเสียงของมนุษย์ (Human Auditory System) ในโดเมนเวลาที่เรียกว่า temporal perceptual masking และในโดเมนความถี่ที่เรียกว่า frequency perceptual masking มาใช้ ทำให้ลายน้ำที่ผังไม่สามารถได้ยินได้ การค้นหา ลายน้ำแบบใช้การทดสอบสมมติฐานทางสถิติในงานวิจัยนี้ ต้องการเสียงต้นฉบับในการค้นหาว่ามีลายน้ำอยู่ในแต่ละช่วงเสียงหรือไม่ และลายน้ำที่ผังยังทนต่อการใส่ Additive colored noise การกรอง การบีบอัดแบบ MPEG และการเปลี่ยนความถี่สูง

ใน [19] เสนอวิธีการสร้างลายน้ำดิจิทัลลงในสื่อประเศเสียงเพื่อนำไปใช้ในการป้องกันสิทธิ์ โดยผังลงในบิตที่มีนัยสำคัญ น้อยสุดของแต่ละแชนเนลของเสียงในโดเมนเวลา ลายน้ำที่ผังเป็นแบบสัญญาณรบกวนซึ่งสร้างมาจากกฏูญแจที่เจ้าของรู้เพียงคนเดียว ขนาดของลายน้ำที่ผังลงไปเสียงต้องไม่ทำให้เสียงที่ผังลายน้ำได้ยินเสียงแตกต่างจากสัญญาณต้นฉบับ ดังนั้นจึงนำคุณสมบัติการได้ยินเสียงของมนุษย์ที่ เรียกว่า perceptual masking มาใช้ ทำให้ไม่ได้ยินเสียงสัญญาณรบกวนจากลายน้ำที่ผังลงไป การค้นหาลายน้ำแบบใช้การทดสอบสมมติฐานทางสถิติในงานวิจัยนี้แตกต่างจากงานวิจัยของ Mitchell Swanson, Bin Zhu, Ahmed Tewfik และ

Laurence Boney ตรงที่ไม่ต้องการเสียงต้นฉบับในการค้นหาลายน้ำ นอกจากนั้นลายน้ำที่ฝังยังทนต่อการบีบอัดแบบ MPEG การกรองแบบ moving average การกรองแบบ low pass การเปลี่ยนความถี่สุ่ม และการรีควอนไทเซชัน และพัฒนาวิธีการสร้างลายน้ำดิจิทัลลงในสื่อประเภทเสียง จากงานวิจัยที่เคยเสนอในปี 1998 โดยเพิ่มความทนทานของลายน้ำ จากการแบ่งเสียงเป็นช่วง ๆ แล้วฝังลายน้ำลงไปในแต่ละช่วง เพื่อที่ว่าเมื่อผ่านกระบวนการทางสัญญาณต่าง ๆ แล้ว จะมีลายน้ำเหลือรอดนำมาแสดงสิทธิ์ความเป็นเจ้าของได้ ลายน้ำที่ฝังเป็นสัญญาณรบกวนแบบ chaotic sequence ซึ่งสร้างมาจากกฎแจ แต่ช่วงของเสียงจะฝังด้วยลายน้ำแบบ chaotic sequence ตัวเดียวกัน และนำคุณสมบัติการได้ยินเสียงของมนุษย์ที่เรียกว่า perceptual masking มาใช้ ทำให้เสียงที่ฝังลายน้ำได้ยินเสียงเหมือนเสียงต้นฉบับมากที่สุด การค้นหาลายน้ำแบบใช้การทดสอบสมมติฐานทางสถิติในงานวิจัยนี้ ไม่ต้องการเสียงต้นฉบับในการ ค้นหาลายน้ำ การทำลายน้ำในวิธีการนี้ก็คือ ทนทานต่อการประมวลผล เช่น การบีบอัด การกรอง การสุ่มใหม่ และการแบ่งระดับสัญญาณใหม่ ข้อยเสียไม่ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงทางแกนเวลา

งานวิจัยที่ [20] กล่าวถึงการฝังลายน้ำใน cepstrum domain โดยการฝังส่วนประกอบ cepstral ของสัญญาณโดยมีวิธีการเหมือนกับการแยกสเปกตรัมสัญญาณในการสื่อสาร โดยมีลักษณะเป็นการซ่อนสัญญาณที่มีแบนด์แคบ (Narrow Band) ไว้ในช่องสัญญาณที่มีแบนด์กว้าง (Wide Band) วิธีนี้ใช้ Pseudo random sequence สำหรับการทำลายน้ำ ดังนั้นลายน้ำจะเป็นตัวกำหนดน้ำหนักใน cepstrum domain สอดคล้องกับการกระจายสัมประสิทธิ์ cepstral และลักษณะคุณสมบัติของ frequency domain ของระบบการได้ยินของมนุษย์ (Human Auditory System) ลักษณะของวิธีการเป็นดังภาพที่ 2-33





ภาพที่ 2-33 กระบวนการในการฝังลายน้ำใช้การแปลง Cepstrum

ข้อดีของวิธีการนี้คือไม่สามารถแยกความแตกต่างของสัญญาณทั้งสองได้ ข้อเสียคือไม่ทนต่อการบีบอัดเนื่องจากไม่ได้เลือกตำแหน่งที่ผ่านการบีบอัด

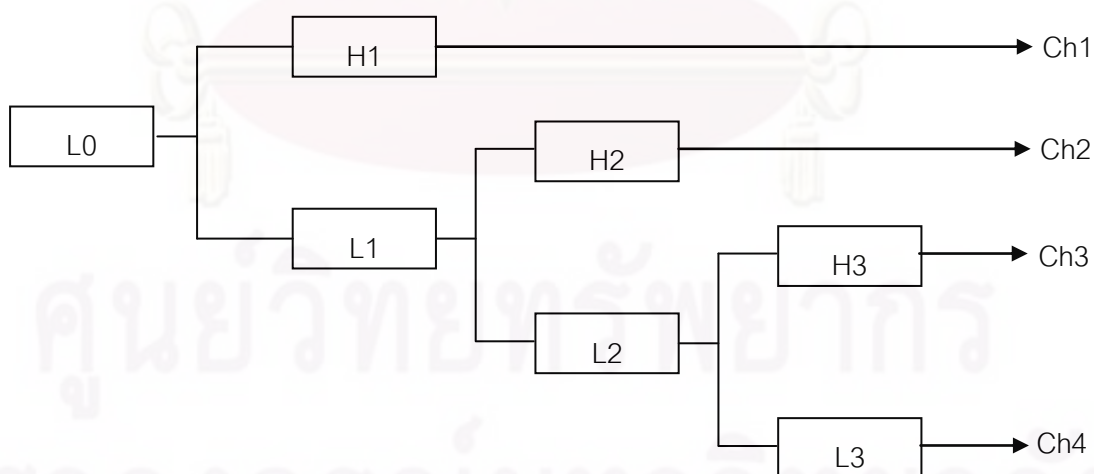
ใน [21] ได้พัฒนาลายน้ำที่เป็นสัญญาณเสียงโดยเสนอวิธีการ direct sequence spread spectrum และผลของระบบการได้ยินของมนุษย์ (Human Auditory System) เป็นตัวอ้างในการฝังใช้ FFT ในการทรานส์ฟอร์ม วิธีการนี้มีข้อดี คือไม่สามารถแยกความแตกต่างของสัญญาณต้นฉบับกับสัญญาณที่ถูกทำลายน้ำ ข้อเสียคือ ไม่ทนต่อการบีบอัดเนื่องจากไม่ได้เลือกตำแหน่งที่ผ่านการบีบอัด

ใน [22] เสนอวิธีการสร้างลายน้ำดิจิทัลลงในเสียง โดยใช้วิธีการฝังและดึงลายน้ำเฉพาะในโดเมนเวลา ไม่มีขั้นตอนในการแปลงให้เป็นโดเมนความถี่ ทำให้วิธีการสร้างลายน้ำที่ใช้ในงานวิจัยมีกระบวนการไม่สลับซับซ้อนใช้เวลาในการคำนวณน้อย ทำให้สามารถนำไปใช้กับแอปพลิเคชันแบบเวลาจริงได้ ลายน้ำที่ใช้เป็นสัญญาณรบกวนแบบ m-sequence และใช้คุณสมบัติการได้ยินเสียงของมนุษย์เฉพาะในโดเมนเวลาที่เรียกว่า temporal masking มาใช้ เพื่อให้ลายน้ำที่ฝังมีขนาดมากที่สุดและไม่สามารถได้ยินเสียงลายน้ำได้ การค้นหาลายน้ำที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นแบบ correlation และไม่ต้องการเสียงต้นฉบับช่วยในการค้นหาลายน้ำ นอกจากนี้ลายน้ำที่ฝังยังทนต่อการบีบอัดแบบ MPEG การกรองแบบ all-pass การเปลี่ยนความถี่สูง การใส่สัญญาณสะท้อน การบีบอัดแอมพลิจูด การใส่สัญญาณรบกวน และการจัดแบ่งแถบคลื่นให้เท่ากัน



งานวิจัยที่ [5] ได้พัฒนาวิธีการฝังข้อมูลลงในบิตที่มีนัยสำคัญน้อยสุดของแต่ละแชนเนลของเสียงที่มีขนาดข้อมูล 16 บิต ต่อ แชนเนลเสียง จากเดิมที่สามารถฝังได้แค่ 3 บิต ต่อแชนเนลเสียง ให้สามารถฝังข้อมูลได้ 4 บิต ต่อ แชนเนลเสียง และไม่มีสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงบิตที่มีนัยสำคัญน้อยสุดของแต่ละแชนเนลของเสียง วิธีที่ใช้เพิ่มจำนวนข้อมูลที่ฝังลงไป ในบิตที่มีนัยสำคัญน้อยสุดของแต่ละแชนเนลเสียงของเสียงจาก 3 บิต เป็น 4 บิต ได้แก่ วิธี Minimum Error Diffusion (MER) ในการทำให้เกิดความผิดพลาดในการฝังข้อมูลน้อยที่สุด และวิธี Error Diffusion ในการกระจายความผิดพลาดไปยังแชนเนลถัด ๆ ไปของเสียง จากการทดลอง โดยการวัดปริมาณความบิดเบือนเมื่อฝังลายน้ำลงไป ในสื่อ ค่า SNR ของเสียงที่ฝังข้อมูลลงไป ในบิตที่มีนัยสำคัญน้อยสุดของแต่ละแชนเนลของเสียง 4 บิต โดยใช้วิธีที่เสนอในงานวิจัย มีค่าใกล้เคียงกับ ค่า SNR ของเสียงที่ฝังข้อมูลลงไป ในบิตที่มีนัยสำคัญน้อยสุดของแต่ละแชนเนลของเสียง 3 บิต โดยใช้วิธีมาตรฐาน ทำให้สามารถฝังข้อมูลได้เพิ่มขึ้น 33 % นอกจากนี้ยังทดสอบคุณภาพของสื่อที่ถูกฝังลายน้ำ โดยการฟังเสียงที่ฝังข้อมูลลงไป ในบิตที่มีนัยสำคัญน้อยสุดของแต่ละแชนเนลของเสียง 4 บิต โดยใช้วิธีที่เสนอในงานวิจัย ผล แสดงว่าข้อมูลที่ฝังลงไปไม่สามารถรับรู้ได้โดยการฟัง

ในงานวิจัยที่ [23] ได้นำเสนอการทำลายน้ำที่ใช้ลำดับของบิต (Bit sequences) โดยที่ใช้ลำดับของบิตที่มีขนาด 100 บิต เสนอวิธีการฝังโดยใช้ Octave band pass filter เนื่องจากเลือกใช้ความถี่ต่ำลักษณะของ Octave band pass filter เป็นดังภาพที่ 2-34



ภาพที่ 2-34 ลักษณะของ Octave band pass filter

งานวิจัยนี้ใช้ MDCT transform ในการแปลงเป็นโดเมนความถี่ ข้อดีของวิธีนี้คือมี SNR สูง ข้อเสีย คือสามารถแยกความแตกต่างของสัญญาณต้นฉบับกับสัญญาณที่ถูกทำลายน้ำและไม่ทนต่อการบีบอัดข้อมูล

ในการทำลายน้ำที่ใช้ภาพเป็นลายน้ำ ใน [24] ได้นำเสนอลายน้ำเป็นรูปภาพไบนารีจำนวน 256 บิต จากบทความนี้ได้นำเสนอการฝังลายน้ำ โดยอาศัยความแตกต่างของพลังงานโดยลักษณะการฝังในแต่ละบิต จะแบ่งสัญญาณออกเป็นสามส่วนและหาค่าความแตกต่างของพลังงานในแต่ละส่วน มาเปรียบเทียบกัน ข้อดีของวิธีการนี้ไม่ต้องใช้สัญญาณต้นฉบับในการถอดลายน้ำแต่วิธีดังกล่าวมีข้อเสีย คือ สามารถแยกความแตกต่างของสัญญาณต้นฉบับและสัญญาณที่ถูกทำลายน้ำได้ และไม่ทนทานต่อการบีบอัดข้อมูล

ในงานวิจัยที่ [44] ได้นำเสนอวิธีการฝังลายน้ำลงบนสัญญาณโดยใช้ขั้นตอนวิธีในการฝังตัวบนเทอมของความถี่ โดยใช้เทคนิคการปรับเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์ฟูเรียร์ มีการเพิ่ม Scale Parameter และ Gain Function ลงไป เพื่อให้ลายน้ำกลมกลืนกับข้อมูลพาห้และมองดูโปร่งใสจากภายนอก ในการถอดรหัสใช้หลักการเฟสสมมาตร แบบ POMF (Symmetrical Phase Match Filtering Cross – Correlation Approach) ซึ่งวิธีการดังกล่าวจะได้การ ฝังลายน้ำที่แข็งแกร่งมาก โครงสร้างของการ ฝังลายน้ำแสดงได้ดังภาพที่ 3 ลำดับของบิตข้อมูลจุดศูนย์กลางของ ลายน้ำ  $W(k)$  จะวางตัวตามลำดับของรูปแบบทั่วไปของข้อมูล จากนั้นจะถูกนำมาขยายจำนวน บิต ข้อมูลโดยการเลื่อนและสลับตำแหน่งเพื่อเพิ่มจำนวนบิตข้อมูลเป็นหลาย ๆ บิตตามความเหมาะสม ได้เป็น  $W_s(k)$  โดย วิธีการจะนำข้อมูลสัญลักษณ์ (Payload) มาทำการคูณกับลำดับบิตข้อมูลแบบสุ่ม  $W(k)$  จนได้  $W_s(k)$  ออกมาส่วนที่สำคัญของลายน้ำที่พบได้ (Perceptually Weighted Watermark)  $W(n)$  จะถูกแสดงในเทอมของ Fourier Domain โดยการใส่ประโยชน์จากแถบความถี่ที่ซ่อนไว้ บนข้อมูลสัญญาณเสียง  $x(n)$  ซึ่งถูกแบ่งเป็นส่วนๆ และถูกแปลงไปในเทอมของความถี่ได้เป็น  $X_f(k)$  เมื่อฝังบิตข้อมูลลงไปแล้วขนาดของสัมประสิทธิ์ฟูเรียร์จะถูกขยายออกเล็กน้อย ตามการฝังตัวของลำดับลายน้ำ  $W_s(k)$  จะได้เป็น  $W(k)$

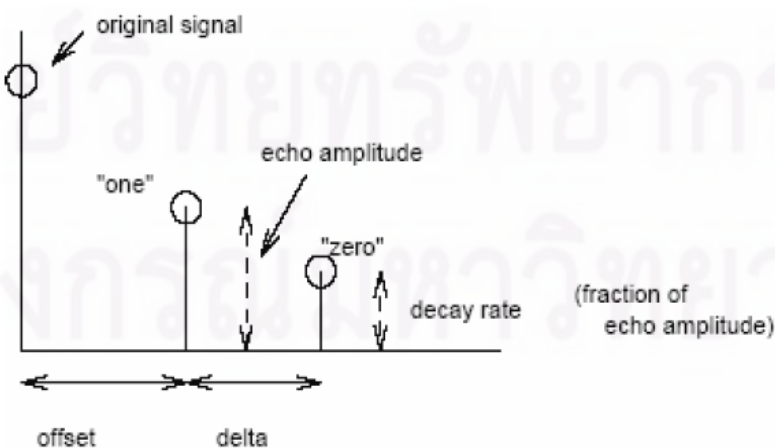
ในงานวิจัยที่ [45] ได้เสนอหลักการที่ว่าสัญญาณเสียงตามธรรมชาติจะมีช่วงของเสียงที่แรงกว่าระดับปกติเกิดขึ้นเป็นช่วง ๆ จึงอาศัยคุณสมบัติข้อนี้พิจารณาปรับเปลี่ยนช่วงเวลาของการเกิดระดับเสียงที่ต่างจากระดับปกตินี้ แล้วปรับช่วงดังกล่าวเพื่อ ฝังลายน้ำ (การฝังลายน้ำโดยการปรับเปลี่ยน Time-Scale) มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

การฝังลายน้ำ

หลักการพื้นฐานของการฝังลายน้ำโดยจัดระดับของช่วงห่างระหว่าง Wavelet Extrema ที่เลือกไว้และทำให้ดัชนีการจัดระดับระยะห่างเป็นคู่หรือเป็นคี่ตามข้อมูลที่เข้ามา หลักการทั่วไปโดยมีขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

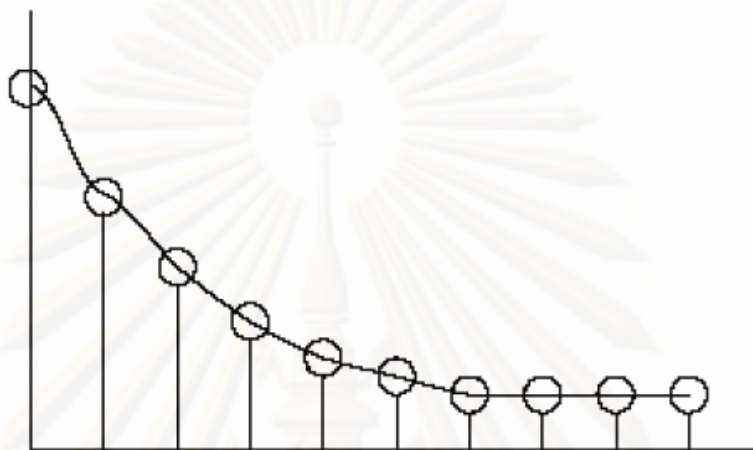
- คำนวณขอบของสัญญาณโดยใช้วงจรของความถี่ต่ำร่วมกับวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น (Full Wave Rectifier) เพื่อจัดขอบสัญญาณ
- แยกส่วนประกอบของ Non-Orthogonal Dyadic Wavelet ที่ไม่มีรูปทรงและคำนวณหาขอบจากตัวแปรของ Cubic Spline Wavelet Basis
- สัมประสิทธิ์ของสเกลที่หยาบที่สุดจะใช้สำหรับการปฏิบัติการย่อย ๆ โดยกำหนดให้สัมประสิทธิ์เป็น  $C(t)$
- ค่ากำลังของ  $C(t)$  จะถูก Normalized ต้องได้ค่าที่กำหนดก่อนจึงจะทำการขยายและเก็บค่า Extrema ไว้
- ค่ากำลังของ  $C(t)$  สามารถใช้งานได้เฉพาะค่าที่มีความแรงในระดับที่ใช้งานได้จริง
- ช่วงขนาดของระยะห่างระหว่าง จุดที่สัญญาณมีความแรงกว่าปกติจะถูกตัดแปลงสำหรับการฝังลายน้ำโดย จะฝังตัว 1 บิตต่อ 1 ช่วง ในขั้นต้นจะหาลำดับของการจัดระดับ  $\Delta$  ของแต่ละช่วงซึ่งได้จัดระดับด้วยขั้นตอนนี้และทำดัชนีการจัดระดับให้เป็น  $n$  คู่หรือคี่ เพื่อจะฝังบิต 0 หรือบิต 1
- ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 1-5 จนหมดข้อมูล

งานวิจัยที่ [46] ได้นำเสนอวิธีการการฝังลายน้ำโดยใช้เทคนิคการซ่อนเสียงสะท้อน (Echo Hiding) โดยอาศัยคุณสมบัติของสัญญาณเสียงที่จะเกิดมีเสียงสะท้อนเนื่องจากระบบต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น ระบบการสื่อสาร โดยพิจารณาจากองค์ประกอบต่าง ๆ ของเสียงสะท้อนเช่นค่าความแรงของสัญญาณเริ่มต้น (Initial Amplitude) อัตราการเสื่อมสลาย (Decay Rate) ระยะห่างสำหรับค่า "1" (One Offset) และระยะห่างสำหรับค่า "0" (Zero Offset) องค์ประกอบทั้งหมดของเสียงสะท้อน (Offset + Delta) แสดงตามภาพที่ 2-35



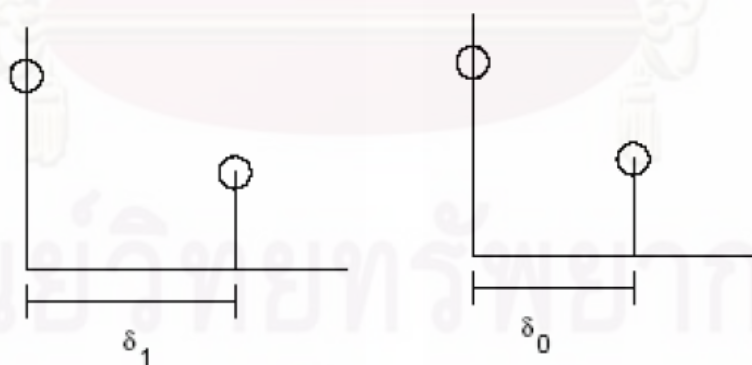
ภาพที่ 2-35 องค์ประกอบของเสียงสะท้อน

คุณสมบัติของการเกิดเสียงสะท้อนโดยปกติจะมีระยะห่างของสัญญาณระหว่างเสียงเริ่มต้นและเสียงสะท้อนคงที่ตามอัตราการเสื่อมสภาพดังภาพที่ 2-36



ภาพที่ 2-36 แสดงการเกิดเสียงสะท้อนและอัตราการเสื่อมสลาย

ในการฟังข้อมูลจะมีการจัดที่ระยะห่างระหว่างสัญญาณเริ่มต้นและเสียงสะท้อนสำหรับการฟังบิตข้อมูล 0 และ 1 ที่แตกต่างกันดังภาพที่ 2-37 จากนั้นทำการฟังข้อมูลลงโดยการปรับที่ระยะห่างของเสียงสะท้อนตามที่กำหนดโดยในการฟังข้อมูลจะต้องมีการกำหนดช่วงของสัญญาณเริ่มต้นและระยะห่างที่แน่นอน

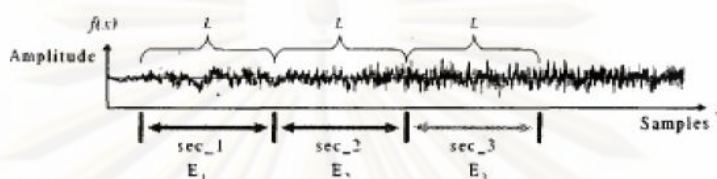


ภาพที่ 2-37 แสดงการจัดระยะห่างของเสียงสะท้อนสำหรับฟังข้อมูล

สำหรับการแยกข้อมูลออกจะอาศัยการพิจารณาของระยะห่างของเสียงสะท้อนตามเงื่อนไขที่กำหนดเพื่อทำการแยกบิตข้อมูลออก เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของระยะห่างของเสียงสะท้อนของมนุษย์ไม่สามารถแยกความแตกต่างออกมาได้



งานวิจัยที่ [47] ได้นำเสนอวิธีการ ฝังลายน้ำที่แข็งแกร่งและคุณภาพสูงบนเทอมของเวลา หลักการคือฝังลายน้ำลงบนเทอมของเวลา กระบวนการของการกำหนดค่าสำหรับการ ฝังลายน้ำ จะปรับเปลี่ยนที่พลังงานของข้อมูลในแต่ละช่วงของสัญญาณชั้นตอนมีดังต่อไปนี้ในขั้น แรกแบ่ง จำนวนการสุ่มตัวอย่างของสัญญาณเสียง (Sample) ออกเป็น 3 ส่วนให้มีขนาดช่วง  $L$  เป็น  $Sec\_1$ ,  $Sec\_2$  และ  $Sec\_3$  ดังภาพที่ 2-38



ภาพที่ 2-38 แสดงการแบ่งสัญญาณเสียงออกเป็น 3 ส่วน

คำนวณค่าพลังงานของแต่ละช่วง  $E_1$ ,  $E_2$  และ  $E_3$  ทำการเรียงค่า  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$  ตามความแรงเรียกใหม่เป็น  $E_{max}$ ,  $E_{mid}$  และ  $E_{min}$  เมื่อ  $E_{max}$  แทนค่าที่มีความแรงสูงสุด  $E_{min}$  แทนค่าความแรงต่ำสุด และ  $E_{mid}$  แทนค่าความแรงระหว่างค่าสูงสุดและค่าต่ำสุด คำนวณผลต่างของพลังงานตามสมการระหว่าง  $E_{max} - E_{mid}$  กำหนดเป็น  $A$  และ  $E_{mid} - E_{min}$  กำหนดให้เป็น  $B$  ในการฝัง *Bit Stream* ของลายน้ำจะทำให้การปรับเปลี่ยนความสัมพันธ์ระหว่าง  $A$  และ  $B$  ดังต่อไปนี้

- สำหรับการฝังบิต “1”

ถ้า  $(A - B \geq (E_{max} + 2E_{mid} + E_{min})d')$  ไม่ต้องทำอะไรฉะนั้นให้เพิ่มค่า  $E_{max}$  หรือลดค่า  $E_{mid}$   
จนกระทั่ง  $(A - B \geq (E_{max} + 2E_{mid} + E_{min})d')$

- สำหรับการฝังบิต “0”

ถ้า  $(B - A \geq (E_{max} + 2E_{mid} + E_{min})d')$  ไม่ต้องทำอะไรฉะนั้นให้เพิ่มค่า  $E_{mid}$  หรือลด  $E_{min}$  ค่า  
จนกระทั่ง  $(B - A \geq (E_{max} + 2E_{mid} + E_{min})d')$

เมื่อ  $d'$  เป็นค่า ที่จำกัดขอบเขตของการเพิ่มหรือลดพลังงาน เพื่อควบคุมคุณภาพของสัญญาณ การปรับค่าพลังงาน  $E_{max}$ ,  $E_{mid}$  และ  $E_{min}$  นั้นทำโดยการปรับ Scale Amplitude โดยทำที่จุดสุ่มตัวอย่างของสัญญาณในแต่ละช่วง

จากวิธีที่กล่าวเมื่อนำข้อมูลที่ฝังลายน้ำไปทำการทดสอบตามกระบวนการต่าง ๆ เช่น การบีบอัดสัญญาณ MP3, การกรองสัญญาณ, การตัดต่อสัญญาณจะไม่พบปัญหาอะไรมากนัก แต่การเปลี่ยนรูปแบบสัญญาณจากอนาลอกเป็นดิจิทัล และเปลี่ยนจากดิจิทัลมาเป็นอนาลอก จากผลการทดลองพบว่าจะเกิดการเลื่อนของตำแหน่งข้อมูลทำให้ไม่สามารถแยกลายน้ำออกมาได้ แต่เมื่อมีการใช้เทคนิคการ Synchronization แล้วพบว่าสามารถถอดลายน้ำได้ 100 %

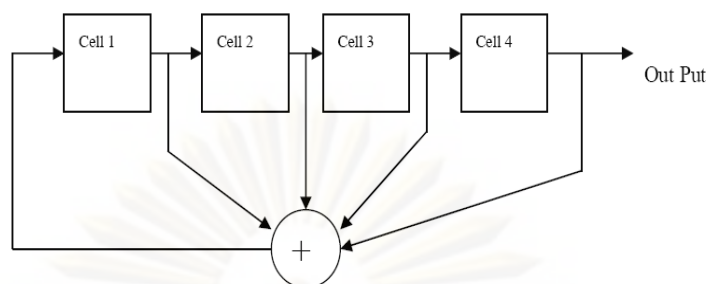


งานวิจัยที่ [48] ได้นำเสนอวิธีการ ผังลายน้ำโดยใช้เทคนิคการกระจายแถบ ความถี่ วิธีการนี้เป็นที่นิยมมากสำหรับการ ผังลายน้ำลงบนสัญญาณเสียง โดยปกติวิธีการนี้ เป็นเทคนิคที่ใช้ในระบบการสื่อสารในระบบ (Code Division Multiple Access - CDMA) (Prasad, 1996) วิธีการคือจะนำข้อมูลมาทำการกระจายแถบพลังงาน โดยการนำมาคูณกับรหัสซึ่งจะมีความกว้างของแถบสัญญาณสูงกว่าข้อมูลเริ่มต้น หรือที่เรียกว่ารหัสสัญญาณรบกวนเสมือนหรือ PN - Code แล้วทำการส่งผ่านระบบส่งผ่านข้อมูล ที่ภาครับจะทำการถอดรหัสข้อมูลโดย PNCode ชุดเดิมมาทำการถอดรหัสจะได้ข้อมูลออกมา นอกจากนี้ยังสามารถใช้กับข้อมูลหลาย ๆ ชุดให้สามารถส่งผ่านช่องสัญญาณเดียวกันในเวลาเดียวกันโดยการนำข้อมูลแต่ละชุดทำการคูณกับ PN - Code ที่แตกต่างกัน ให้มีอัตราการเคลื่อนที่สูงขึ้น แล้วนำมารวมกันแล้วส่งผ่านช่องสัญญาณ

ในภาครับจะนำ PN - Code แต่ละชุดมาทำการคูณกลับทำให้ได้ข้อมูลเดิมออกมาซึ่ง PN - Code แต่ละชุดจะสามารถแยกได้เฉพาะข้อมูลของตัวเองเท่านั้น การสร้าง PN - Code จึงเป็นส่วนสำคัญในระบบนี้สัญญาณรบกวนเสมือนเป็นลำดับของรหัสซึ่งมีลักษณะคล้ายสัญญาณรบกวน (แต่สามารถกำหนดรูปแบบและองค์ประกอบได้) ใช้สำหรับการกระจายแถบความถี่ของพลังงานของข้อมูลลำดับของรหัส ประกอบไปด้วยข้อมูล "0" หรือ "1" เรียงกันแบบสุ่ม แต่มีรูปแบบที่แน่นอนอยู่เนื่องจากจะมีช่วงเป็นคาบที่แน่นอน ทำให้สามารถทราบรูปแบบตำแหน่งข้อมูลที่วนซ้ำได้ และมีลักษณะสำคัญ คือ

- ลักษณะของบิตข้อมูลจะวางตัวในลักษณะที่มีรูปแบบแน่นอนแต่สำหรับผู้ที่ไม่ทราบรหัสแล้วจะเห็นว่าเหมือนวางตัวแบบสุ่ม
- การกำหนดคาบสัญญาณจะทราบกันดีระหว่างภาครับและภาคส่ง ความกว้างของคาบสำหรับการกระจายรหัสข้อมูลที่กว้างกว่ากำหนดจะจับด้วยสัญญาณที่ส่งแบบคลื่นของเลขฐานสองแบบสุ่ม และจะยากต่อการถอดรหัสออก

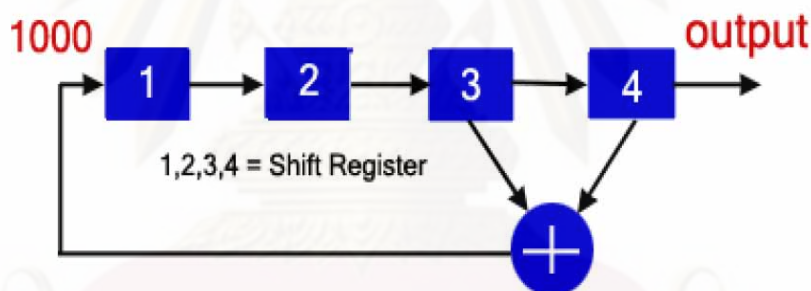
การสร้างรหัสสัญญาณรบกวนเสมือนโดยทั่วไปนิยมใช้ Shift Register เป็นอุปกรณ์หลัก และจะทำการป้อนกลับในบางตำแหน่งเพื่อนำข้อมูลกลับมารวมกัน (จะเรียกว่า Linear เมื่อใช้การรวมกันแบบ Modulo 2) วงจรแสดงตามภาพที่ 2-39



ภาพที่ 2-39 วงจร Linear Feedback Shift Register

จากวงจรสามารถสร้าง Code ได้มีความยาวเท่ากับ  $2^m - 1$  และจะได้ชุด Code ทั้งหมด  $2^m - 1$  ชุดที่ไม่ซ้ำกันเรียกว่า Maximum – Length Sequence หรือเรียกง่าย ๆ ว่า M-Sequence เมื่อ  $M$  คือจำนวนรีจิสเตอร์ที่ใช้ตามภาพที่ 2-40 แสดงตัวอย่างวงจร (Linear Feedback Shift Register - LFSR) และชุดของรหัสที่ได้

Input sequence begin with 0 and follow by 0,0,1



ภาพที่ 2-40 แสดงตัวอย่างวงจร LFSR

ในการประยุกต์ใช้งานกับการฝังลายน้ำจะใช้ในขั้นตอนของการสร้างลำดับของข้อมูลของลายน้ำโดยจะทำกันใน 2 ลักษณะคือ สร้างสัญญาณรบกวนเสมือนแล้วนำไปคูณกับลายน้ำ เพื่อเพิ่มอัตราชีพและทำหน้าที่ในการเข้ารหัสสัญญาณโดยจะนำข้อมูลลายน้ำมาเป็นค่าเริ่มต้นของวงจร LFSR เพื่อสร้างลำดับบิตข้อมูลลายน้ำที่มีการเข้ารหัสออกมา

งานวิจัยที่ [49] นำเสนอวิธีการฝังลายน้ำลงบนสัญญาณเสียง จะอาศัยคุณสมบัติของสัญญาณเสียงที่มีผลน้อยต่อระบบการฟังของมนุษย์ โดยให้จุดดังกล่าวเป็นจุดสำหรับ ฝังข้อมูล ส่วนการถอดรหัสจะอาศัยความสัมพันธ์นี้ทำการแยกลายน้ำออก กมาหลักการพื้นฐานของการ ฝังลายน้ำ แสดงดังสมการต่อไปนี้

$$Y(n) = x(n) + w(n) \quad (2-15)$$

เมื่อ  $Y(n)$  เป็นสัญญาณเสียงที่มีการฝังลายน้ำ

$x(n)$  เป็นสัญญาณเสียงเริ่มต้น

$w(n)$  แทนสัญญาณลายน้ำ

$n$  เป็นตำแหน่งของสัญญาณที่จะทำการฝังลายน้ำ

### การฝังลายน้ำ

ขั้นตอนในการฝังลายน้ำเป็นไปตามขั้นตอนต่อไปนี้

- คำนวณระดับของการซ่อนสัญญาณของสัญญาณเสียงโดยใช้ Psychoacoustic Model โดยการวิเคราะห์สัญญาณเสียงจำนวน 1024 จุดสุ่มตัวอย่างและ 1024 จุดของ Fast Fourier Transform
- สร้างลำดับของสัญญาณรบกวนแบบสุ่ม (PN- Code) ขนาดช่วงของ 1024
- ทำ Fast Fourier Transform ไปยังสัญญาณเสียงที่จะฝังลายน้ำซึ่งคูณด้วยลำดับของ PN -Code
- ใช้ระดับของการซ่อนสัญญาณจัดขนาดของสัญญาณในเทอมของความถี่
- แปลงสัญญาณกลับมามีด้วย Inverse Fast Fourier Transform
- รวมสัญญาณลายน้ำเข้ากับสัญญาณเริ่มต้นบนเทอมของเวลา

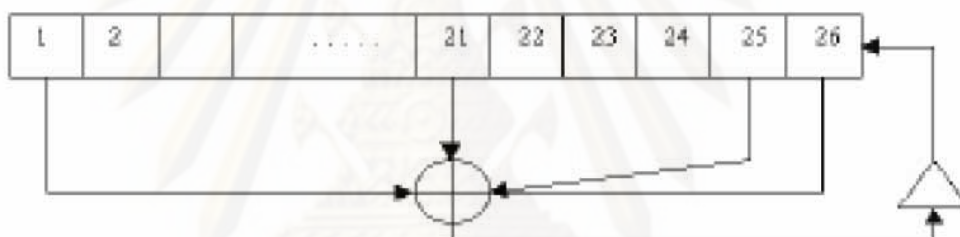
### การถอดรหัสลายน้ำ

การถอดรหัสลายน้ำจะเน้นที่การไม่ต้องใช้สัญญาณเริ่มต้น ในการค้นหาลายน้ำใช้วิธีการทำนายแบบเชิงเส้น (Linear Prediction) โดยจะประมาณสัญญาณเริ่มต้น  $x(n)$  เหมือนกับการรวมกันแบบเชิงเส้นของจุดเริ่มสัญญาณของเสียง P

งานวิจัยที่ [50] การฝังลายน้ำตามช่วงเวลาจริงสำหรับ บสัญญาณเสียงบน Perceptual Masking กล่าวไว้ว่าวิธีการนี้จะนำข้อมูลลายน้ำมาทำการเข้ารหัส แล้วนำมาเป็นค่าเริ่มต้นในวงจร Linear Feedback Shift Register เพื่อทำการสุ่มข้อมูลและสร้างรหัสลายน้ำ จากนั้นนำไปฝังลงบนข้อมูลพาห้ตามขั้นตอนวิธีโดย ฝังลงบน Frequency Masking การฝังลายน้ำในวิธีนี้จะสามารถทำได้ตามช่วงเวลาจริง (Real-Time) โดยอาศัยเทคนิคของการฝังลายน้ำลงบนส่วนของสัญญาณที่ซ่อนการได้ยินของมนุษย์บนเทอมของความถี่ (Frequency Domain) และการสร้างลายน้ำใช้ Linear Feedback Shift Register เป็นตัวกำหนดการ เข้ารหัสสร้างรหัส สัญญาณรบกวนแบบสุ่ม สำหรับกระจายข้อมูลลายน้ำ มีหลักการดังต่อไปนี้

### การฝังลายน้ำ

- แบ่งสัญญาณเสียงเป็นส่วน ๆ และคำนวณลายน้ำไว้สำหรับแต่ละส่วนของสัญญาณเสียงโดยเฉพาะ
- สำหรับแต่ละส่วนของสัญญาณเสียง กุญแจรหัสพื้นที่ (Local Key) จะคำนวณโดยใช้ Hashing Function บนผลรวมของการสุ่มตัวอย่างสัญญาณในแต่ละช่วงของสัญญาณเสียงที่แบ่งไว้กุญแจรหัสนี้จะมีเพียง 1 เท่านั้นในแต่ละพื้นที่และจะมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงสัญญาณสูง
- กุญแจรหัสพื้นที่จะถูกรวมกับกุญแจรหัสความเป็นเจ้าของ (Owner's Key) ซึ่งจะเป็นเลขประจำตัวในการสร้างรหัสรวมโดยการนำ มาเป็นค่าเริ่มต้นของการสร้างรหัสสัญญาณรบกวนแบบเสมือน หรือเรียกว่า PN - Code สำหรับช่วงของสัญญาณเสียงที่แบ่งไว้ตามภาพที่ 2-41 เป็นการสร้าง PN 26



ภาพที่ 2-41 แสดงการสร้าง PN Code โดยใช้ Linear Feedback Shift Register

- คำนวณระดับของการซ่อนสัญญาณบนเทอมของความถี่โดยใช้ Psychoacoustic Model ตามวิธีการต่อไปนี้
  - คำนวณแถบความถี่ของสัญญาณโดยใช้ Fast Fourier Transform
  - ใช้ระดับสัญญาณในระดับที่ไม่ได้ยินเป็นจุดที่ฝังลายน้ำ
  - คำนวณหาค่าประกอบของระดับเสียงและที่ไม่ใช่ระดับเสียงในแต่ละช่วง
  - คำนวณแต่ละองค์ประกอบเฉพาะช่วงของระดับสัญญาณสำหรับการฝังลายน้ำ
  - รวมระดับของสัญญาณเฉพาะจุดกับระดับที่เสียบบเพื่อสร้างระดับสัญญาณสำหรับการซ่อนข้อมูล
- ใช้ระดับสัญญาณสำหรับการซ่อนข้อมูลในการเลือกลำดับของ PN- Code ที่ฝังตัวจะได้ระดับสัญญาณที่ไม่อยู่ในระดับเสียงที่ได้ยินหลังจากฝังลายน้ำแล้ว



- ในกรณีที่ จะหลีกเลี่ยงจากผลของเสียงสะท้อนชั่วคราว ต้องใช้จุดเด่นของการซ่อนเสียงชั่วคราว เปรียบเทียบสัญญาณรบกวนกับระดับของการซ่อนในเทอมของเวลา และ จักรระดับของลายน้ำให้ต่ำกว่าระดับสัญญาณทั้งสอง
  - รวมลายน้ำเข้าไปกับสัญญาณเสียงเพื่อสร้างสัญญาณเสียงที่มีการฝังลายน้ำ
- การแยกลายน้ำ
- คำนวณสัญญาณเสียงก่อนที่จะมีการฝังลายน้ำกับกฎแฉกหัสแสดงความเป็นเจ้าของ เพื่อแยกสัญญาณลักษณะ
  - ใช้สัญญาณเสียงก่อน ฝังลายน้ำและสัญญาณทดสอบเข้ากระบวนการเพื่อจัดพลังงานของสัญญาณให้ตรงกับสัญญาณเริ่มต้นในการจัดการขยายการปรับเปลี่ยนของสัญญาณ
  - หักล้าง สัญญาณเริ่มต้นด้วยสัญญาณทดสอบเพื่อสร้างลายน้ำทดสอบ
  - คำนวณความสัมพันธ์ระหว่างลายน้ำทดสอบกับลายน้ำที่คำนวณได้ใหม่เปรียบเทียบกับระดับเพื่อตัดสินใจว่ามีการ ฝังลายน้ำหรือไม่ในการ ฝังลายน้ำสามารถทำได้ตามเวลาเกิดขึ้นจริงจะใช้ อุปกรณ์ประมวลผลสัญญาณแบบดิจิทัล เป็นตัวทำงาน

งานวิจัยที่ [51] ได้นำเสนอวิธีการฝังลายน้ำลงบนสัมประสิทธิ์ของการแปลงโคไซน์แบบเต็มหน่วย (DCT) โดยประยุกต์ใช้ synchronization code กับข้อมูลลายน้ำก่อน โดยเลือกสัมประสิทธิ์ของ DCT ที่ระดับความถี่ต่ำเพื่อความทนทานต่อการโจมตี ข้อดีของวิธีนี้คือ เมื่อรวมกับข้อมูลลายน้ำ คือสามารถตรวจจับตำแหน่งลายน้ำจากสัญญาณเสียงได้ กระบวนการนี้เลือกใช้การแปลง DCT ทำให้ลดเวลาในการตรวจจับลายน้ำเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่น ๆ กระบวนการเริ่มต้นด้วยการนำสัญญาณเสียงต้นฉบับแบ่งออกเป็นช่วง ๆ ให้เท่ากับจำนวนข้อมูลลายน้ำ แล้วทำการแปลง DCT ในแต่ละช่วง ดังกล่าว โดยการเลือกขนาดช่วงในการแบ่งสัญญาณเสียงให้สอดคล้องกับจำนวนชุดของข้อมูลลายน้ำที่ต้องการฝังและจำนวนสัมประสิทธิ์ของ DCT ในขั้นตอนการตรวจจับข้อมูลลายน้ำ สัญญาณเสียงที่ต้องการตรวจจับจะถูกแบ่งออกเป็นช่วง ๆ จากนั้นจะทำการแปลง DCT เพื่อตรวจจับข้อมูลลายน้ำ ซึ่งการรู้ค่าที่ถูกต้องของขนาดความยาวช่วงที่เหมาะสมจะได้มาซึ่งข้อมูลลายน้ำที่ถูกต้องต้องรู้ความยาวของข้อมูลลายน้ำกับ synchronization code ที่ใส่ลงไปเป็นสำคัญ สัญญาณเสียงที่ได้จากกระบวนการนี้มีความทนทานต่อการโจมตี ในงานนี้มีจุดเด่นคือ การเลือกความหนาแน่น ที่แตกต่างกันเพื่อความเหมาะสมกับการฝังลายน้ำในแต่ละเพลง แต่ค่าที่เลือกนี้ยังขึ้นกับประสบการณ์ที่ได้จากการทดลองหลายครั้ง



งานวิจัยที่ [52] ใช้ลายน้ำเป็นภาพขาวดำ ผังลงบนสัญญาณเสียงโดยใช้การแปลงเวฟเล็ตแบบดีสครีต (DWT) ข้อดีของการใช้ลายน้ำที่เป็นภาพคือสามารถระบุความเป็นเจ้าของได้อย่างเด่นชัดโดยมนุษย์ อีกทั้งยังสามารถนำเครื่องหมายการค้า ตราบริษัท มาใช้เป็นลายน้ำได้ ในอัลกอริทึมที่ใช้ SNR เป็นตัวกำหนดค่าความเข้มในการฝังลายน้ำลงบนสัญญาณเสียง ซึ่งตั้งสมมุติฐานไว้ว่าผลที่ได้ต้องดีกว่าการใช้ผลการทดลองหลาย ๆ ครั้งมาเป็น ตัวกำหนดค่าความเข้มในการฝังลายน้ำ ซึ่งมีข้อเสียคือต้องใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองจำนวนมากและค่าความเข้มดังกล่าวนี้ ต้องมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามคุณลักษณะที่ไม่เหมือนกันของสัญญาณเสียงแต่ละตัวอย่าง กระบวนการฝังลายน้ำเริ่มจากนำสัญญาณเสียงมาแบ่งออกเป็นช่วงทั้งหมด  $k$  ช่วง ให้เท่ากับจำนวนข้อมูลภาพลายน้ำ ซึ่งแต่ละช่วงจะถูกนำมาแยกองค์ประกอบเวฟเล็ต 3 ระดับ ในงานวิจัยนี้ได้เลือกสัมประสิทธิ์เวฟเล็ตใน detail subband จากการแปลงเวฟเล็ตลำดับที่สาม แทนด้วย  $cD_k^3$  สัมประสิทธิ์เหล่านี้จะถูกฝังลายน้ำที่ผ่านการเพิ่มความปลอดภัยในการเข้าถึงข้อมูล โดยการเข้ารหัสการฝังลายน้ำจะฝังข้อมูลเพียงหนึ่งค่า (0 หรือ 1) ลงในสัมประสิทธิ์เวฟเล็ตที่มีค่าสูงที่สุดในช่วง  $cD_k^3$  นั้น ๆ แต่การฝังข้อมูลลายน้ำลงบนสัมประสิทธิ์เวฟเล็ตโดยตรงจะทำให้สัญญาณเสียงที่ได้เพี้ยนไปจากเดิมจนสามารถรับฟังได้ ดังนั้นการฝังจึงต้องอิงคุณค่าความเข้มในการฝังเข้ากับข้อมูลลายน้ำก่อน เพื่อทำการสเกลขนาดของข้อมูลลายน้ำก่อนฝัง ข้อดีของวิธีคือ ทนทานต่อการโจมตีโดยประมวลผลสัญญาณแบบต่าง ๆ แต่ก็มีข้อเสียคือ ต้องใช้สัญญาณเสียงต้นฉบับในการถอดซึ่งมีความเสี่ยงในการเปิดเผยสัญญาณเสียงต้นฉบับอย่างมากทำให้อาจสูญเสียข้อมูลให้กับผู้ละเมิดได้

ในงานวิจัยที่ [53] เสนอวิธีการฝังลายน้ำข้อมูลภาพขาวดำลงบนสัญญาณเสียงโดยอาศัยหลักการของ Human Auditory System (HAS) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์สเปกตรัมของสัญญาณเสียงในความถี่ย่านต่างๆ เทียบกับสเปกตรัมของสัญญาณเสียงที่หูมนุษย์สามารถรับฟังได้ในช่วงความถี่ 20Hz ถึง 20kHz ลายน้ำจะถูกฝังลงบนย่านความถี่ที่มีค่า sound pressure level (SPL) ต่ำกว่าระดับการได้ยิน ของมนุษย์ โดยใช้แฟคเตอร์ควบคุมค่าหนึ่งในกระบวนการฝังลายน้ำจะใช้วิธีการวิเคราะห์ cepstrum ซึ่งมักนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์และจัดจำเสียงพูดเป็นอย่างมาก กระบวนการเริ่มต้นโดยนำสัญญาณเสียง  $x(n)$  มาแปลงฟูริเยร์แล้วทำล็อกการิทึม จากนั้นจึงทำการแปลงกลับฟูริเยร์อีกครั้ง ซึ่งการทำล็อกการิทึมในขั้นตอนที่สองเป็นล็อกการิทึมเชิงซ้อน เราเรียก  $X(n)$  ว่า complex cepstrum ขั้นตอนการเตรียมลายน้ำเริ่มจากการนำสัญญาณเสียงมาแบ่งเป็นช่วง แล้วแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว (FFT) สเปกตรัมที่ได้จะถูกนำไปเทียบกับสเปกตรัมการได้ยินของมนุษย์ ช่วงสเปกตรัมที่ต่ำกว่าระดับการได้ยินของมนุษย์มากที่สุดจะถูกเลือก เพื่อป้องกันความผิดเพี้ยนของสัญญาณเสียงหลังฝังลายน้ำ แล้วจึงแปลงกลับฟูริเยร์แบบเร็ว ผลลัพธ์จะได้

แพคเตอร์ควบคุมซึ่งต้องทำการสเกลให้มีค่าเหมาะสมก่อน ด้วยค่าที่ได้จากประสบการณ์จากการทดลองหลาย ๆ ครั้ง ก่อนนำไปมอดูเลทกับสัญญาณลายน้ำก็จะได้สัญญาณลายน้ำที่พร้อมจะทำการฝัง ในขั้นตอนการฝังลายน้ำ สัญญาณเสียงต้นฉบับจะถูกแบ่งเป็นช่วง ๆ ให้พอดีกับจำนวนข้อมูลของลายน้ำ แล้ว นำสัญญาณแต่ละช่วงมาวิเคราะห์ cepstrum จากนั้นคิดค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์ cepstrum ในแต่ละช่วง นำค่าเฉลี่ยดังกล่าวมาลบออกจากสัมประสิทธิ์ทุกตัวเพื่อปรับให้สัมประสิทธิ์ cepstrum ช่วงนั้นมีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ จากนั้นทำการรวม ลายน้ำที่เตรียมไว้เข้ากับสัมประสิทธิ์เหล่านี้ แล้วทำการแปลงกลับ cepstrum ก็จะได้สัญญาณเสียงที่ฝังลายน้ำเรียบร้อยแล้ว ในขั้นตอนการตรวจจับลายน้ำจะทำการคำนวณค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์ cepstrum ในแต่ละช่วงเทียบกับระดับที่กำหนด เพื่อระบุว่าลายน้ำที่ตรวจจับได้มีค่า 0 หรือ 1 กระบวนการดังกล่าวเป็นการฝังลายน้ำแบบปิด (Blind watermarking) ยังคงอาศัยการเลือกค่าแพคเตอร์ควบคุมที่ได้จากประสบการณ์ทดลองหลายครั้งและไม่ได้แสดงผลการทวนทานต่อการโจมตีด้วย low pass filter เนื่องจากอัลกอริทึมมีโอกาสฝังลายน้ำลงบนช่วงความถี่ต่ำได้

ในงานวิจัยที่ [54] ทำการฝังลายน้ำแบบปิดที่ไม่ต้องใช้สัญญาณเสียงต้นฉบับร่วมกับการใช้ รหัสแก้ไขความผิดพลาด ซึ่งข้อดีของการทำรหัสแก้ไขความผิดพลาด คือสามารถกู้คืนข้อมูลที่เสียหายให้กลับมาสมบูรณ์ดังเดิมได้ภายใต้เงื่อนไขของรหัสที่ใช้ เมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับลายน้ำ ทำให้ลายน้ำที่เสียหายจากการโจมตีมีโอกาสคืนสู่สภาพเดิมได้ซึ่งในขั้นตอนการฝัง สัญญาณเสียงจะถูกแบ่งออกเป็นช่วง ๆ จากนั้นทำการแปลงเวฟเล็ตกับสัญญาณเสียงแต่ละช่วง โดยเลือกสัมประสิทธิ์เวฟเล็ตใน approximation subband จากการแปลงเวฟเล็ตลำดับที่ห้า แทนด้วย  $cA_5$  ที่ระดับสัญญาณนี้ทำการคำนวณค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์ทั้งหมดในช่วง แล้วทำการลบค่าเฉลี่ยดังกล่าวออกจากสัมประสิทธิ์ทั้งหมด ในช่วงตอนนี้จะได้ช่วงสัมประสิทธิ์ที่มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ จากนั้นนำข้อมูลลายน้ำที่ผ่านการเข้ารหัส รหัสแก้ไขความผิดพลาดแล้วมาทำการฝังลายน้ำเพียงหนึ่งค่าต่อหนึ่งช่วง โดยถ้าลายน้ำมีค่า '-1' จะทำการลบ สัมประสิทธิ์ทุกตัวในช่วงนั้นๆ ออกด้วย  $\Delta$  หรือถ้าลายน้ำมีค่า '1' จะทำการบวก  $\Delta$  เข้ากับสัมประสิทธิ์ทุกตัวในช่วงนั้นๆ ค่าแพคเตอร์  $\Delta$  ที่ใช้ในการฝังลายน้ำหาได้จาก การสเกลค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์ที่คำนวณได้ในช่วงนั้นๆ ก่อนหน้านี้ ด้วยค่าที่ได้จากประสบการณ์การทดลอง ในขั้นตอนการตรวจจับลายน้ำทำได้ง่ายเพียงแปลงเวฟเล็ตที่ระดับ  $cA_5$  จากนั้นทำการคำนวณหาค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์เวฟเล็ตในช่วงดังกล่าว ซึ่งค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์ที่ได้หากมากกว่าศูนย์แสดงว่าช่วงดังกล่าวฝังลายน้ำที่มีค่า '1' หากน้อยกว่าศูนย์แสดงว่าช่วงดังกล่าวฝังลายน้ำที่มีค่า '-1' ผลการทดลองแสดงข้อดีของการประยุกต์ใช้รหัสแก้ไขความผิดพลาด ทำให้ข้อมูลลายน้ำที่ได้รับความเสียหายจากการโจมตีสามารถกู้คืนให้ใกล้เคียงกับ

ของเดิมได้ แต่เวลาที่ใช้ในอัลกอริทึมนี้ค่อนข้างมาก และยังคงใช้ค่าแฟคเตอร์  $\Delta$  ในการควบคุม น้ำหนักของการฝังลายน้ำจากประสบการณ์การทดลองหลาย ๆ ครั้ง

ในงานวิจัย [55] ฝังข้อมูลลายน้ำเป็นลำดับตัวเลข 0 และ 1 ภายใต้หลักการบีบอัด สัญญาณเสียง ที่เปลี่ยนแปลงข้อมูลเพียงบางส่วนของสัญญาณเสียงโดยไม่ทำให้คุณภาพเสียงต่ำกว่ากำหนด ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้คุณภาพเสียงหลังจากการฝังลายน้ำมีความแตกต่างระหว่าง ค่าต่ำสุดของ hearing threshold กับค่าสูงสุดของ error power spectrum ไม่เกิน 1 เดซิเบล ซึ่งโดยปกติการรับรู้ของประสาทหูมนุษย์จะตอบสนองต่อสัญญาณเสียงที่ความถี่ต่ำได้ดีกว่า สัญญาณเสียงที่ความถี่สูงส่งผลให้ระดับของการได้ยินจะอยู่ในช่วงความถี่สูง การวิเคราะห์ดังกล่าวจึงจำเป็นในการเลือกความถี่จากการแปลงเวฟเล็ต ที่มีความสำคัญต่อสัญญาณเสียงน้อย การฝังลายน้ำเริ่มจากสัญญาณเสียงถูกแยกองค์ประกอบ 4 ระดับด้วยเวฟเล็ต แล้วเลือกสัมประสิทธิ์เวฟเล็ตใน detail subbands ที่ระดับ 1 ถึง 3 แทนด้วย  $cD_1, cD_2, cD_3$  ตามลำดับ กระบวนการเลือกเฟ้นสัมประสิทธิ์เวฟเล็ตที่จะฝังลายน้ำ เริ่มจากตั้งค่าเริ่มต้นเป็นครึ่งหนึ่งของค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดในระดับนั้นๆ จากนั้นนำค่าเริ่มต้นดังกล่าวมาเปรียบเทียบกับสัมประสิทธิ์ทุกตัวในระดับนั้นๆ หากค่าสัมประสิทธิ์ตัวใดมีค่ามากกว่าค่าเริ่มต้นนี้ จะถูกเลือกเก็บเอาไว้จนได้จำนวนเท่ากับข้อมูลลายน้ำหากได้ไม่ครบจำนวนข้อมูลลายน้ำ จะลดค่าเริ่มต้นนี้ลงอีกครั้งหนึ่งแล้วทำการค้นหาซ้ำจนกว่าจะได้จำนวนครบตามต้องการ สัมประสิทธิ์ที่ได้เหล่านี้จะถูกฝังลายน้ำโดยคูณกับค่าแฟคเตอร์ควบคุมที่ได้จากประสบการณ์การทดลองหลายๆ ครั้งอีกทีหนึ่ง กระบวนการนี้หลีกเลี่ยงการฝังลายน้ำบนสัมประสิทธิ์เวฟเล็ตใน detail subband ที่ระดับความถี่สูงสุด หรือ  $cD_0$  และที่ความถี่ต่ำสุดใน approximation subband หรือ  $cA_4$  โดยให้ความเห็นว่า ความถี่ดังกล่าวสามารถถูกโจมตีโดย การประมวลผลสัญญาณและการบีบอัดได้ง่าย ผลของการฝังลายน้ำด้วยวิธีนี้สามารถทนต่อการโจมตีแบบต่างๆ ได้ดีแต่ต้องใช้สัญญาณเสียงต้นฉบับในการตรวจจับลายน้ำ ผลทดลองได้ทดสอบกับเวฟเล็ตตระกูล Daubechies (db) หลายแบบและได้ผลดีที่สุดกับ db8

ในงานวิจัยที่ [56] ทำการฝังลายน้ำแบบ semi-fragile กล่าวคือลายน้ำประเภทนี้สามารถทนทานต่อการโจมตีทางการประมวลผลสัญญาณเฉพาะแบบตามที่กำหนดไว้เท่านั้น โดยการควบคุมผ่านพารามิเตอร์ที่กำหนด กระบวนการเริ่มต้นโดยสัญญาณเสียงจะถูกแยกองค์ประกอบเวฟเล็ตออก L ระดับ ซึ่งจะทำการฝังลายน้ำบนสัมประสิทธิ์เวฟเล็ตในทุก L ระดับ ในแต่ละระดับ จะทำการแบ่งสัมประสิทธิ์เวฟเล็ตออกเป็นช่วงๆ ให้พอดีกับข้อมูลลายน้ำ และจะฝังข้อมูลลายน้ำที่เหมือนกันเพียงหนึ่งค่าต่อหนึ่งช่วงสัมประสิทธิ์ โดยเลือกสัมประสิทธิ์เวฟเล็ตที่มีค่ามากที่สุด จำนวน 50 ค่าในแต่ละช่วงมาผ่านกระบวนการควอนไทเซชันเพื่อระบุว่าสัมประสิทธิ์ตัวใดจะถูก



คัดลอกให้ผ้งลายน้ำ ในการผ้งลายน้ำ ข้อมูลลายน้ำจะถูกคูณเข้ากับควอนไตเซชันพารามิเตอร์ ก่อนเพื่อทำการสเกลขนาด ซึ่งในทางปฏิบัติค่าควอนไตเซชันพารามิเตอร์ จะมีค่าต่างกันในแต่ละ L ระดับ ซึ่งจะมีค่าเท่าใดนั้นยังขึ้นอยู่กับการใช้ประสบการณ์การจากทดลองหลายๆครั้ง โดยขนาดของควอนไตเซชันพารามิเตอร์ที่เล็กเกินไปจะทำให้ลายน้ำไม่คงทนต่อการโจมตี แต่ถ้ามีขนาดใหญ่เกินไปจะทำให้สัญญาณเสียงที่ได้เกิดความผิดเพี้ยน การเลือกย่านความถี่ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ต ก็เป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากการใช้เทคนิคควอนไตเซชันนี้จะให้ความทนทานของข้อมูลลายน้ำ บนสัมประสิทธิ์เวฟเล็ตในระดับความถี่ระดับกลางได้ดีกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับสัมประสิทธิ์เวฟเล็ต ที่ระดับความถี่อื่นเนื่องจากระดับความถี่ต่ำเป็นข้อมูลสำคัญของสัญญาณเสียง การเปลี่ยนแปลงค่า สัมประสิทธิ์ในส่วนนี้จะส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพของเสียง ทำให้สัญญาณเสียงเพี้ยนได้ง่ายใน ขณะเดียวกันสัมประสิทธิ์ที่ความถี่สูงจะถูกโจมตีได้ง่ายโดยการประมวลผลสัญญาณแบบต่าง ๆ ในการตรวจจับลายน้ำจากสัญญาณเสียงจะถูกแบ่งออกเป็น ช่วง ๆ และในแต่ละช่วงทำการ เลือกสัมประสิทธิ์เวฟเล็ตที่มีค่ามากที่สุดมาจำนวน 50 ค่า ซึ่งสัมประสิทธิ์กลุ่มดังกล่าว จะต้องให้ ลายน้ำที่เหมือนกับต้นฉบับไม่เช่นนั้นจะแสดงว่ามีการละเมิดกับสัญญาณเสียงเกิดขึ้น เนื่องจากการ ผ้งลายน้ำ 1 บิตต้องใช้สัมประสิทธิ์ที่มากถึง 50 ตัว ทำให้สัญญาณเสียงที่ใช้มีความยาวมาก ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าการเลือกใช้ควอนไตเซชันพารามิเตอร์เพียงค่าเดียว ให้ผลใน สัญญาณเสียงแต่ละแบบไม่ดีนัก ซึ่งต้องใช้ผลการทดลองจำนวนมากเพื่อให้ได้ค่าควอนไตเซชัน พารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่อไป

ในปัจจุบันเทคนิคการทำลายน้ำดิจิทัลแบบใหม่ในการพิสูจน์สิทธิ์ได้ประยุกต์ใช้หลักการ ของ Singular Value Decomposition transforms (SVD) [59] ในการซ่อนข้อมูลข่าวสาร ซึ่งมีผู้ที่ สนใจใช้คุณสมบัติของ SVD คือ ความไม่แปรเปลี่ยนของ SVs ต่อการประมวลผล ของภาพ ตัวอย่างเช่น การเพิ่มสัญญาณรบกวนลงบนภาพ และการคำนวณทางเลขาคณิต [60] โดยใช้ผสม กับเทคนิคอื่น โดยสามารถจำแนกวิธีการต่าง ๆ ดังนี้

การทำลายน้ำดิจิทัลโดยการผ้งลงบน ซิงกิวเลอะ แพลยู ของสัญญาณภาพต้นฉบับ โดย เทคนิคนี้ได้นำภาพต้นฉบับมาทำการแปลงสัญญาณแบบ SVD จากนั้นจึงทำการผ้งลายน้ำ ดิจิทัล ซึ่งใน [61] ได้ประยุกต์ใช้วิธีการ SVD ทรานสฟอร์มและ ผ้งลายน้ำดิจิทัลลงบน SVs ของ ภาพต้นฉบับโดยวิธีการถอดสัญญาณเสียงไม่ต้องใช้ สัญญาณต้นฉบับในการถอด

การผ้งลายน้ำดิจิทัลอัลกอริทึม อยู่บนพื้นฐานของ ซิงกิวเลอะเวกเตอร์ ซึ่งใน [62] ได้ใช้ การผ้งบิตลายน้ำลงบน ซ้าย หรือ ขวา ของซิงกิว เลอะ เวกเตอร์ (เมตริกซ์  $U$  และ  $V$ ) ลงบนบิตล็อก



ขนาด  $8 \times 8$  ใน เมตริกซ์  $U$  วิธีการนี้ให้ความทนทานต่อการประมวลผลทางสัญญาณ และ ไม่ต้องใช้ ภาพต้นฉบับในการถอดลายน้ำ

ในงานวิจัยที่ [63] ได้นำเสนอวิธีการฝังลายน้ำดิจิทัลลงบน ซิงกิวเลอะ แพลยู และ ซิงกิวเลอะ เวกเตอร์ โดยในวิธี การนี้ได้ทำการปรับปรุงความปลอดภัยโดยใช้การเปลี่ยนลำดับก่อนกระบวนการฝังลายน้ำในส่วนบนซ้าย และ ล่างขวา

งานวิจัยที่ [64] ได้นำวิธีการฝังแบบ DCT ผสมกับ SVD ซึ่งทำการแปลงสัญญาณภาพต้นฉบับโดยใช้ DCT ก่อนหลังจากนั้นเอาสัญญาณที่ทำการแปลงแล้วมาแปลง SVD อีกครั้งแล้วจึงทำการฝังลายน้ำดิจิทัล

งานวิจัยที่ [59] ได้นำเสนอเทคนิคการฝังลายน้ำดิจิทัลโดยใช้หลักการ SVD ลงบนภาพ โดยในใช้ การสุ่มรหัสเทียมแบบ gaussian คือ ใช้การปรับเปลี่ยนค่าใน ไรท์ ซิงกิวเลอะ เวกเตอร์ของแต่ละ บล็อกในภาพต้นฉบับ ซึ่งผลการทดลองให้ความทนทานและมีประสิทธิภาพอย่างมาก

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

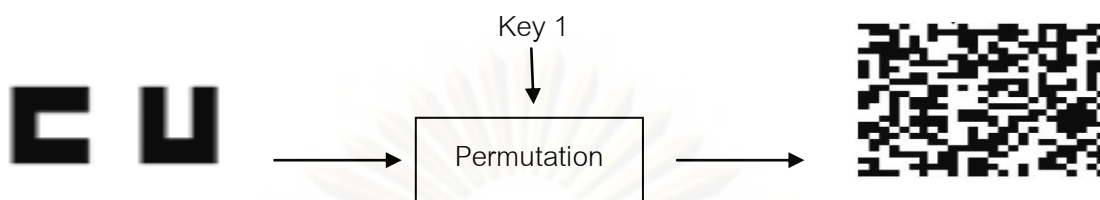
ในบทนี้กล่าวถึงวิธีการทำลายน้ำบนโดเมนความถี่สำหรับเสียง วิธีการที่ใช้ในการฝังลายน้ำจะให้คุณภาพของเสียงต้นแบบที่ดี ทำให้ไม่สามารถรับรู้ได้ถึงการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเสียงต้นฉบับได้ และวิธีการที่นำเสนอ มีความคงทนของลายน้ำสูงมาก และมีระเบียบวิธีการดำเนินงานวิจัยในบทนี้แบ่งออกเป็น สามขั้นตอน คือกระบวนการ ฝังลายน้ำดิจิทัล กระบวนการถอดลายน้ำดิจิทัลและกระบวนการทดสอบประสิทธิภาพลายน้ำดิจิทัล

#### 3.1 วิธีการฝังลายน้ำดิจิทัล

ในส่วนนี้จะนำเสนอวิธีการฝังลายน้ำดิจิทัล ซึ่งนำเทคนิคการกระทำในโดเมนความถี่โดยใช้วิธีการแปลงเวฟเล็ต และใช้ ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมมาประยุกต์ ใช้ในการระบุตำแหน่งของการฝังสัญญาณลายน้ำดิจิทัลลง บนเสียงต้นฉบับ ซึ่งจากคุณสมบัติของวิธีขั้นตอนเชิงพันธุกรรมและเวฟเล็ต ดังกล่าวนี้จะเป็นผลทำให้ลายน้ำดิจิทัล ทนต่อการโจมตีชนิดต่าง ๆ และไม่จำเป็นต้องใช้สัญญาณต้นฉบับในการตรวจหาลายน้ำดิจิทัล โดยอาศัยหลักการของระบบการได้ยินของมนุษย์ การได้ยินของมนุษย์ขึ้นอยู่กับความถี่และกำลังของสัญญาณ หูมนุษย์ไม่สามารถแยกความแตกต่าง ถ้าพลังงานของสัญญาณเสียงที่เหนือ Psychoacoustic Model [57] จากการพิจารณาคุณสมบัติของสัญญาณเสียงมีค่าความถี่ของสัญญาณเสียงอยู่ที่ช่วงประมาณ 20 Hz - 20 kHz และช่วงที่มนุษย์ไวต่อการรับรู้ได้ที่สุดอยู่ในช่วงประมาณ 2 Hz -4 kHz และช่วงตั้งแต่ 15 kHz เป็นต้นไปแต่ในช่วงความถี่ที่มนุษย์ไม่ได้ยินจะถูกตัดด้วย การบีบอัดทำให้งานวิจัยนี้เลือกช่วงในการฝังซึ่งอยู่ในช่วงประมาณ 4 kHz - 15 kHz ซึ่งมนุษย์ได้ยินแต่ไม่สามารถแยกแยะความถี่ได้

##### 3.1.1 การเตรียมสัญญาณเสียงและลายน้ำ

สัญญาณเสียงที่ใช้ในงานวิจัยเป็นสัญญาณเพลงบันทึกแบบดิจิทัลในรูปแบบเวฟ (WAVE Format) แบบโมโน มีอัตราการซีกสัญญาณที่ 44100 kHz มีความยาวตลอดทั้งเพลงถูกเข้ารหัส 16 บิต ส่วนข้อมูลรูปภาพขนาด 60 บิต ซึ่งลายน้ำดังกล่าวจะนำมาทำการ Permutation ดังภาพที่ 3-1 ก่อนเพื่อให้สอดคล้องกับเงื่อนไขความปลอดภัย

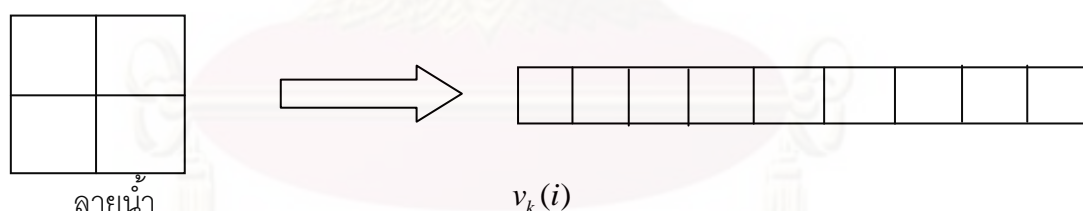


ภาพที่ 3-1 การเปลี่ยนรูปภาพลายน้ำดิจิทัลโดยวิธีการ Permutation

ภาพลายน้ำที่ต้องการฝังลงในสัญญาณเสียงต้นฉบับจะถูกสลับด้วยการสุ่มภาพข้อมูลลายน้ำก่อนการฝังสัญญาณลายน้ำลงในเสียงเพื่อเป็นการป้องกันการเข้าถึงข้อมูลลายน้ำจากการเข้าถึงที่ไม่ได้รับอนุญาตจากผู้ไม่มีสิทธิ์ การสลับที่ของข้อมูลรูปภาพลายน้ำที่เป็นไบนารีจะเป็นการสลับที่ของข้อมูลก่อนที่จะทำการใส่ข้อมูลลายน้ำเข้าไปในสัญญาณเสียงต้นฉบับ

### 3.1.2 กระบวนการฝังสัญญาณลายน้ำลงในเสียง

ก่อนที่จะนำลายน้ำฝังลงในสื่อต้นฉบับ ต้องทำให้ลายน้ำที่ฝังมีมิติเดียวกับสื่อต้นฉบับก่อน ดังนั้นลายน้ำรูปภาพที่มีสองมิติจะสามารถฝังลงไปในแซมเปิลของเสียงที่มี มิติเดียวได้ ต้องนำมาเรียงต่อกันทีละแถวได้เป็นสายลำดับบิตของลายน้ำโดยมีขั้นตอนดังนี้



ภาพที่ 3-2 การนำลายน้ำรูปภาพมาเรียงต่อกันให้เป็นสายลำดับบิต

3.1.2.1 สัญญาณลายน้ำ  $W(x,y)$  เป็นภาพขาวดำผ่านการ Permutation แล้วขนาด  $M_1 \times M_2$  พิกเซล โดยที่  $0 \leq x \leq M_1$ ,  $0 \leq y \leq M_2$  แล้วทำการเปลี่ยนให้อยู่ในรูปเวกเตอร์แบบสุ่ม หรือ  $v_k(i)$  โดยที่  $i = 1, 2, \dots, M_1 M_2$

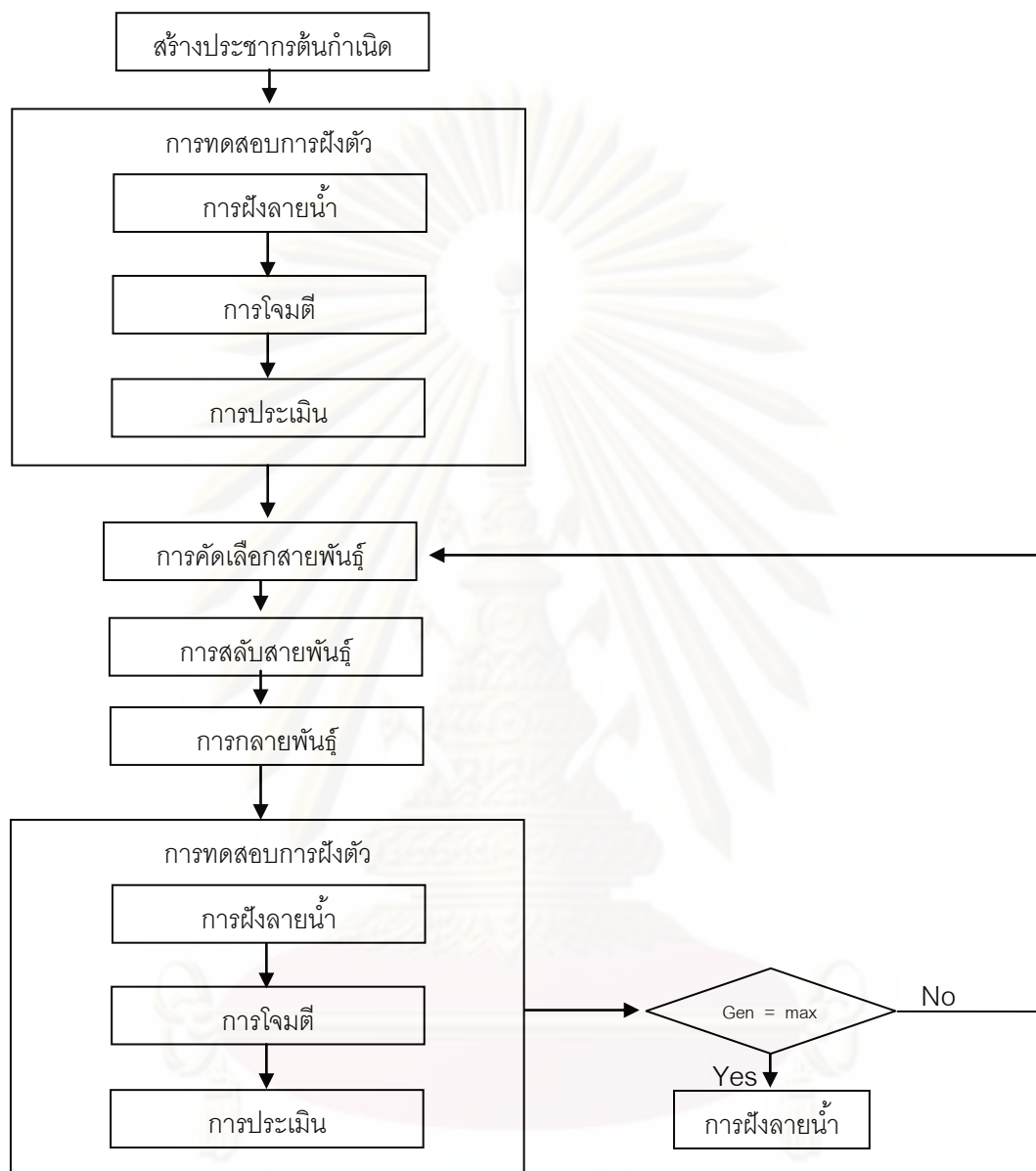
3.1.2.2 สัญญาณเสียงจะถูกแยกองค์ประกอบเวฟเล็ตแบบ 5 ระดับ ( $L=5$ ) ในที่นี้เลือกใช้เวฟเล็ตตระกูล Daubechies 4 หรือ db4 เพราะต้องการช่วงความถี่ที่ประมาณ 4kHz – 15kHz เพราะช่วงความถี่นี้ระดับหูคนไม่สามารถแยกความแตกต่างได้ เป็น  $cA^5$  มาแบ่งออกเป็น  $k$  ส่วน จากขั้นตอนนี้จะได้สัมประสิทธิ์เวฟเล็ตที่แบ่งส่วนแล้ว  $C_k(i)$  คำนวณค่าเฉลี่ยของ

$C_k(i)$  ในแต่ละ  $k$  ส่วน แทนด้วย  $m_k(i)$  แล้วนำมาลบออกจาก  $C_k(i)$  ดังสมการเพื่อความสะดวกในกระบวนการฝัง

$$C'_k(i) = C_k(i) - m_k(i) \quad (3-1)$$

3.1.2.3 นำ  $C'_k(i)$  มาทำการหาตำแหน่งที่ดีที่สุดโดยขบวนการ GA มีหลายระเบียบวิธีดังนี้ ในการศึกษาเรื่องการคำนวณเชิงพันธุกรรม (Evolutionary Computation) นั้น เทคนิคการทำให้เหมาะสมที่สุด (Optimization) จัดเป็นสิ่งที่สำคัญ [58] ในงานนี้ได้ประยุกต์ใช้เทคนิคที่จะหาความเหมาะสมของสมรรถภาพตรงตาม แบบแผน (scheme) ที่ต้องการ ในกระบวนการทำ optimization โดยอาศัยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) นั้น ขั้นตอนการทำงานของ จีเนติกอัลกอริทึม (ภาพที่ 3-3) เริ่มจากการกำหนด ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น จากนั้นจึงเริ่มเข้าสู่กระบวนการทำงาน โดยสร้างประชากรต้น กำเนิดตาม รูปแบบโครโมโซมที่กำหนดไว้ เมื่อได้ค่าสมาชิกของโครโมโซมครบทุกตัวแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือ การถอดรหัสสมาชิกของโครโมโซมซึ่งจะได้เป็นค่าของตัวแปรตัดสินใจ (Decision Value) จากนั้นจึงทำการหาค่าจุดประสงค์ (Objective Value) ของสมาชิกของโครโมโซม โดยการแทน ค่าตัวแปรตัดสินใจของสมาชิกโครโมโซมใน ฟังก์ชันจุดประสงค์ เพื่อหาค่าความเหมาะสมจาก ฟังก์ชันจุดประสงค์ (Fitness Function) จากนั้นจึงเริ่มเข้าสู่กระบวนการของตัวดำเนินการทั้ง สาม คือ การคัดเลือกสายพันธุ์ (Selection) การสลับสายพันธุ์ (Crossover) และการกลายพันธุ์ (Mutation) โดยการคัดเลือกสายพันธุ์จะนำเอาเฉพาะโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมที่เป็นที่น่าพอใจชุดหนึ่งเก็บไว้ โครโมโซมที่ถูกคัดเลือกไว้จะนำมาสลับสายพันธุ์และกลายพันธุ์จนได้เป็น โครโมโซมชุดใหม่ แล้วนำโครโมโซมชุดใหม่นี้มาหาค่าความเหมาะสมอีกครั้ง และดำเนินการ ตามขั้นตอนเดิมต่อไปจนกระทั่งถึงรุ่นสุดท้าย (Max Generation) ตามที่กำหนด





ภาพที่ 3-3 ขั้นตอนการทำงานของจีเนติกอัลกอริทึม

ก) สร้างประชากรต้นกำเนิด: จะมีโครโมโซม 100 ตัวที่ถูกใช้ในงานนี้ โครโมโซมจะถูกนำไปเข้ารหัสแบบสายอักขระทวิภาค (binary string) ขนาด 1000 หลัก แต่ละโครโมโซมจะถูกแทนโดยตำแหน่งของการฝังตัว (Embedding) โดยทั้งสี่จะมีค่าหนึ่ง (1) ถึง 625 ตัว และค่าศูนย์ (0) 375 ตัว โดยที่ตำแหน่งของค่าหนึ่ง (1) จะเป็นตำแหน่งของการฝังลายน้ำ (watermark) ด้วย ภาพที่ 3-4 แสดงให้เห็นถึงตัวอย่างโครโมโซมที่แทนตำแหน่งของลายน้ำที่ถูกฝังตัว

1	2	3	4	5	...	996	997	998	999	1000
1	0	1	1	0	...	1	0	1	0	0

### ภาพที่ 3-4 การฝังตัวโครโมโซม

ข) การทดสอบการฝังตัว : การทดสอบนี้จะรวมถึงการฝังตัว , การโจมตีอันหลากหลาย, และการประเมิน

- การฝังลายน้ำตามสมการที่ 3-5
- การโจมตี ประกอบด้วย
  - (การคัดกรอง): เพื่อทำการทดสอบความคงทนต่อการคัดกรองตัวคัดกรองชนิดช่วงความถี่ (Band pass) ถูกนำไปใช้กับสัญญาณลายน้ำโดยจะทำการขยายสัญญาณ - 9 dB ในช่วงย่านความถี่ต่ำและสูง จุดตัดค่าความถี่ (cut-off frequency) สำหรับการผ่านช่วงความถี่ต่ำคือ 441 kHz และ 4410 kHz สำหรับการผ่านช่วงความถี่สูง
  - (ความคงทนต่อการตัด): การฝังตัวลายน้ำในทุก ๆ ช่วงเวลาประมาณ 1.2 วินาทีจะอำนวยความสะดวกลายน้ำกระทำได้ในกรณีที่มีการตัด
  - (สัญญาณรบกวนแบบสุ่ม): การเพิ่มตัวเลขแบบสุ่มในตัวอย่างซึ่งถูกจำกัดโดยพารามิเตอร์ที่ให้ค่าสูงถึง 0.91% เมื่อเทียบกับสัญญาณเดิมนั้น จะสามารถกลายเป็นการเพิ่มสัญญาณรบกวนที่ไม่ลดคุณภาพที่รับได้
- การประเมินลายน้ำ: เพื่อที่จะแสดงให้เห็นถึงสมรรถภาพของวิธีการนี้ เราใช้รูปลายน้ำทดสอบที่เป็นรูปแบบทวิภาคที่มีขนาด 60 บิต สามารถดูได้ในภาพที่ 3-5 ใช้ค่า SNR ในการประเมินคุณภาพของรูปที่ผ่านการลงลายน้ำ ค่าความคล้ายคลึงกัน (SIM) ที่ใช้ประเมินความคงทน เป็นค่าความคล้ายคลึงกันที่ตรวจวัดได้ระหว่างรูปลายน้ำที่ผ่านการโจมตี และรูปลายน้ำดั้งเดิม



ภาพที่ 3-5 ภาพลายน้ำที่ใช้ในการทดลอง

$$SNR = 10 \log_{10} \left( \frac{\sum_i (Y_i^2)}{\sum_i (Y_i - y_i)^2} \right) \quad (3-2)$$

โดยที่ค่า  $Y$  และ  $y$  เป็นสัญญาณเสียงดั้งเดิมและสัญญาณเสียงที่ถูกฝังตัวแล้วตามลำดับ

$$Sim = \frac{\sum_{i=1}^{M_1} \sum_{j=1}^{M_2} w(i, j) w^*(i, j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{M_1} \sum_{j=1}^{M_2} W(i, j)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{M_1} \sum_{j=1}^{M_2} W^*(i, j)^2}} \quad (3-3)$$

โดยที่  $W$  และ  $W^*$  คือลายน้ำที่ตรวจจับได้  $i = 1, 2, \dots, M_1$  และ  $j = 1, 2, \dots, M_2$  โดยค่าสหสัมพันธ์ที่ได้ถ้าเท่ากับหนึ่ง แสดงว่าลายน้ำที่ตรวจจับได้เหมือนกับลายน้ำต้นฉบับทุกประการ

หน้าที่ตามวัตถุประสงค์ของ GA ประกอบด้วยค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal-to-Noise Ratio หรือ SNR) ของสัญญาณที่ถูกกระทำลายน้ำเทียบกับสัญญาณหลัก (host signal) ที่ถูกใช้เป็นมาตรฐานวัดคุณภาพและความคล้ายคลึงกัน (SIM) ระหว่างลายน้ำที่ถูกสกัดและลายน้ำดั้งเดิม ค่าตามวัตถุประสงค์  $f_i$  สามารถคำนวณได้โดยสมการดังต่อไปนี้

$$f_i = SNR_i + \frac{1}{p} \sum_{n=1}^p (Sim_{n,i}) \quad (3-4)$$

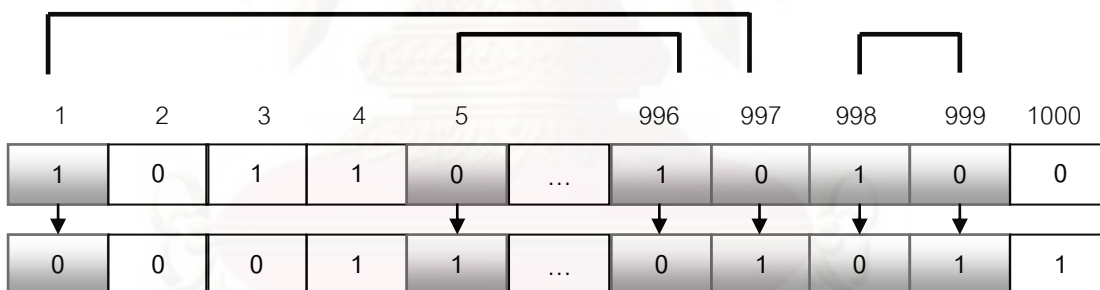
โดยที่  $p$  คือจำนวนของแผนการโจมตี

ค) การคัดเลือกสายพันธุ์: วิธีการคัดเลือกที่ใช้ที่นี่ เรียกว่าการเลือกแบบจับคู่แข่ง (tournament selection) โดยมีขนาดการจัดแข่งและความน่าจะเป็นของการจัดแข่ง เป็นค่าพารามิเตอร์ที่ต้องถูกหาค่าให้ดีที่สุด โครโมซอมที่ดีที่สุดในการแข่งขัน จะถูกกำหนดโดยค่าความเหมาะสมดังที่ได้อธิบายไว้แล้ว

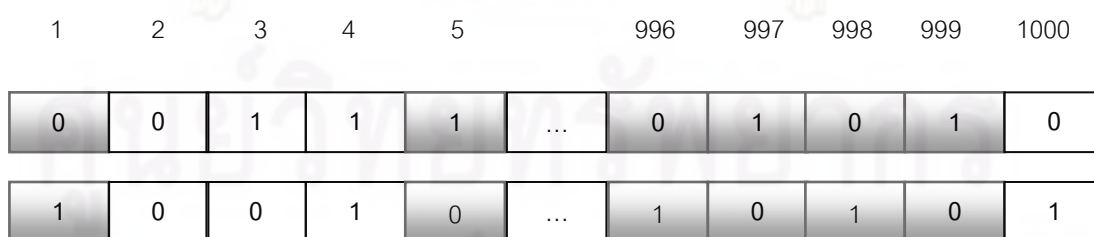
ง) การสลับสายพันธุ์: การสลับสายพันธุ์จำเป็นต้องได้รับการออกแบบใหม่ ซึ่งจะต้องเก็บค่า 1 บิต (ในแต่ละโครโมโซม) ให้เสถียรที่ 625 บิต และเท่ากับค่าของลายน้ำด้วย และอัตราการการสลับสายพันธุ์มีค่าเป็น 0.9 กระบวนการการการสลับสายพันธุ์มีดังต่อไปนี้ (ดังภาพที่ 3-5)

- ขั้นที่ 1: เลือกโครโมโซม มาสองตัวแบบสุ่ม
- ขั้นที่ 2: หาดำแหน่งที่โครโมโซมสองตัวที่แตกต่างกัน (ตั้งเป็นค่า P)
- ขั้นที่ 3: เลือกสองตำแหน่งจาก P แบบสุ่ม
- ขั้นที่ 4: ตัดสินเลือกแต่ละโครโมโซม ถ้าสอง ตำแหน่งที่ถูกเลือกในขั้นที่ 3 นั้นต่างไป สลับยีนในตำแหน่งเหล่านั้น

พ่อ (Parent)



ลูก (Child)

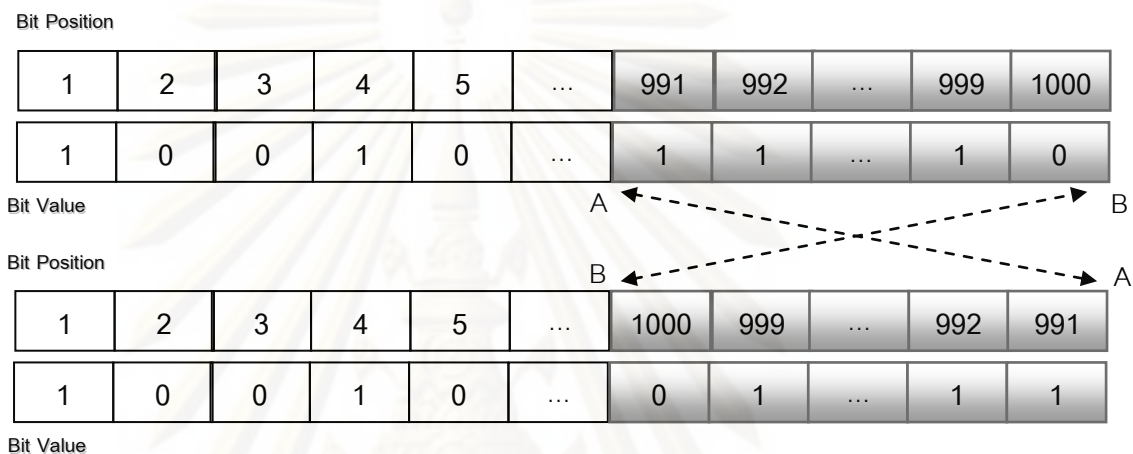


ภาพที่ 3-6 ตัวอย่างกระบวนการการสลับสายพันธุ์

จ) การกลายพันธุ์: ตัวปฏิบัติการผกผันถูกแสดงไว้ใน ภาพที่ 3-7 อันดับแรก จำนวนบิตที่อยู่ใกล้ชิดกันจำนวนมากจะถูกเลือกแบบสุ่ม จากนั้น ทั้งก่อนจะถูกผกผันในลักษณะ



การพลิกซ้ายไปขวา ตัวบิตจะถูกย้ายไปมาในสายอักขระ แต่ความหมาย (ค่าความเหมาะสม) ของคำตอบจะไม่เปลี่ยนแปลง เพียงแต่ลำดับของโครงสร้างเท่านั้นที่จะได้รับผลกระทบ ยกตัวอย่างเช่น บิตในตำแหน่งที่ 991 และ 1000 ถูกส่งผ่านกันด้วยความน่าจะเป็นที่สูง ตัวปฏิบัติการผกผันจะเปลี่ยนโครงสร้างของคำตอบอย่างสลับ โครงสร้างที่แน่น (บิตที่ต้องฟังฟังอยู่ใกล้ๆ กัน) จะปรากฏในรุ่นสุดท้าย



ภาพที่ 3-7 ปฏิบัติการผกผัน

3.1.2.4 แทนสัมประสิทธิ์ที่ผ่านการตัดแปลงจากขั้นตอนที่ 3.1.2.3 แต่ละบิตของลายน้ำจะฝังลงบน  $C_k'(i)$  เงื่อนไขในการฝังแสดงตามขั้นตอนดังนี้ ถ้า  $v_k(i) = 1$  สัมประสิทธิ์ทุกตัวในส่วนที่เลือกจะถูกเพิ่มด้วย  $\beta$  แต่ถ้า  $v_k(i) = -1$  สัมประสิทธิ์ทุกตัวในส่วนที่เลือกจะถูกลบด้วย  $\beta$  โดยที่  $\beta$  เป็นค่าที่มีขนาดเท่ากับ  $m_k(i)$  สัมประสิทธิ์เวฟเล็ตที่ฝังลายน้ำ  $Y_k(i)$  แล้วสามารถหาได้จากสมการ

$$y_k(i) = C_k'(i) + \beta w(i) \quad (3-5)$$

3.1.2.5 ซ้ำกระบวนการในขั้นตอนที่ 3.1.2.4 จนลายน้ำถูกฝังครบทุกบิต จากนั้นนำสัมประสิทธิ์เวฟเล็ต  $Y_k(i)$  ที่ฝังลายน้ำเรียบร้อยแล้วมาแปลงกลับ IDWT ให้อยู่ในรูปของสัญญาณเสียงเดิมในโดเมนเวลา

### 3.2 วิธีการถอดลายน้ำดิจิทัล

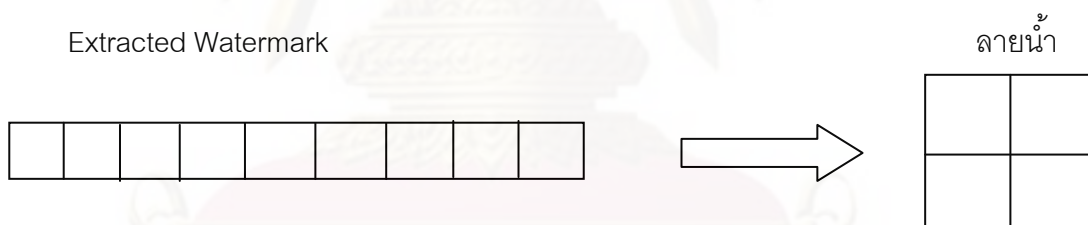
การถอดลายน้ำดิจิทัลจากสัญญาณเสียงที่ต้องการทดสอบ ใช้กระบวนการเดียวกับการฝังลายน้ำดิจิทัล และไม่ต้องใช้สัญญาณเสียงต้นฉบับหรือลายน้ำต้นฉบับในการตรวจสอบ ซึ่งอธิบายลำดับขั้นตอนได้ดังนี้

3.2.1 นำสัญญาณเสียงที่มีลายน้ำดิจิทัลมาทำการแยกองค์ประกอบสัญญาณเสียงที่ต้องการด้วยการแปลงเวฟเล็ต

3.2.2 นำ  $cA^5$  มาแบ่งออกเป็นส่วนย่อย  $k$  ส่วน ให้เท่ากับจำนวนบิตของลายน้ำ

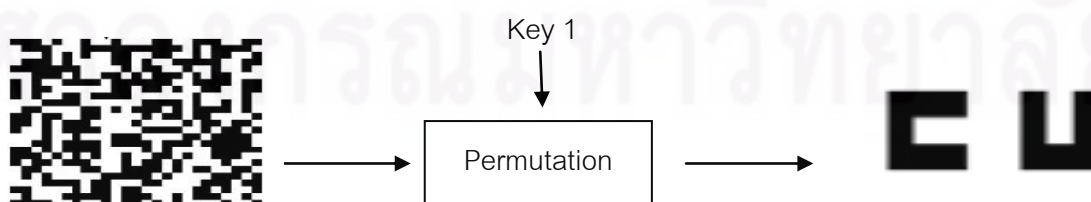
3.2.3 จากนั้นคิดค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์ดีสครีตเวฟเล็ตทรานฟอร์มในแต่ละส่วน ถ้าค่าเฉลี่ยมีขนาดมากกว่าศูนย์จะตรวจจับได้ลายน้ำบิต '1' ในขณะที่ถ้าค่าเฉลี่ยต่ำกว่าศูนย์แสดงว่าลายน้ำบิต '0'

3.2.3 นำรูปภาพลายน้ำที่ได้จากขั้นตอนที่ 3.2.3 ที่มีลักษณะเป็นสายลำดับบิตมาทำการให้อยู่ในรูปแบบสอง มิติ แล้วขนาด  $M1 \times M2$  พิกเซล



ภาพที่ 3-8 การจัดเรียงสายลำดับบิตของลายน้ำให้เป็นรูปภาพ

3.2.4 การสลับตำแหน่งของจุดลายน้ำ นำจุดภาพของลายน้ำดิจิทัลที่ยังคงสลับตำแหน่งอยู่ มาทำการสลับตำแหน่งจุดภาพของลายน้ำดิจิทัลแบบสุ่มเทียมกลับโดยใช้รหัสลับเดียวกันที่ใช้ในขั้นตอนการฝังลายน้ำดิจิทัล เพื่อทำการสลับตำแหน่งจุดภาพของลายน้ำดิจิทัลคืนสู่ตำแหน่งเดิม ซึ่งจะได้ลายน้ำดิจิทัลที่ ถอดออกมาได้จากภาพที่ต้องการทดสอบ ดังภาพที่ 3-9



ภาพที่ 3-9 ลายน้ำดิจิทัลที่ถอดมาได้จากสัญญาณเสียง

### 3.3 การทดสอบความคงทนของลายน้ำดิจิทัล

วิธีการทดสอบความคงทนของลายน้ำดิจิทัลที่นำเสนอนี้ กระทำโดยนำภาพที่ผ่านการฝังลายน้ำดิจิทัลแล้วมาทำการทดสอบโจมตีแต่ละวิธีดังนี้

- 3.3.1 Down-sampling, 44 kHz – 22 kHz – 44 kHz
- 3.3.2 Low pass filter, cutoff frequency 6 kHz, 6<sup>th</sup> order
- 3.3.3 Random noise กำลังงาน 1 % ของสัญญาณเสียง
- 3.3.4 White Gaussian noise กำลังงาน 1 % ของสัญญาณเสียง
- 3.3.5 กำจัดสัญญาณรบกวนด้วยการแปลงเวฟเล็ต (MATLAB)
- 3.3.6 บีบอัดข้อมูลแบบมีความสูญเสีย, MP3 ที่ 56 kbps
- 3.3.7 Jittering ลบ 1 แซมเปิล จากทุก ๆ 100 แซมเปิล
- 3.3.8 Crop (5 x 100) ลบ 500 แซมเปิล จากตำแหน่งที่ได้จากการสุ่ม 5 ตำแหน่ง

### 3.4 การวัดค่าประสิทธิภาพ

การทดสอบประสิทธิภาพจะแยกพิจารณาออกเป็น 2 ส่วนคือส่วนของคุณภาพของสัญญาณเสียงที่ผ่านการฝังลายน้ำ ซึ่งจะพิจารณาในรูปแบบของ อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to Noise Ratio – SNR) ไม่ต่ำกว่า 20 เดซิเบลตามที่ International Federation of Phonographic Industry (IFPI) กำหนด ส่วนของข้อมูลภาพสัญญาณลักษณะจะพิจารณาจากค่าความคล้ายคลึงกัน (Similarity – SIM)

3.4.1 การวัดประสิทธิภาพการ ฝังลายน้ำดิจิทัล คือการทดสอบค่าความเหมือนของสัญญาณเสียงต้นฉบับกับสัญญาณเสียงที่มีลายน้ำดิจิทัลฝังอยู่ โดยใช้เกณฑ์เชิงปริมาณนั้นคือ ถ้า SNR มีค่าสูงแสดงว่าเสียงที่ฝังลายน้ำดิจิทัลแล้วกับสัญญาณเสียงต้นฉบับมี ความเหมือนกันมากจนไม่สามารถแยกแยะความผิดเพี้ยนจากการฝังลายน้ำดิจิทัลได้ดังสมการที่ (3-2)

3.4.2 การวัดประสิทธิภาพการถอดลายน้ำดิจิทัล คือการทดสอบค่าความเหมือนของลายน้ำดิจิทัลระหว่างลายน้ำดิจิทัลต้นฉบับกับลายน้ำดิจิทัลที่ถอดออกมาได้ หลังผ่านการโจมตี ซึ่งถ้า SIM ที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียง 1 มากเท่าใดหมายถึงลายน้ำดิจิทัลที่ถอดออกมาได้จะมีความเหมือนกับลายน้ำดิจิทัลต้นฉบับมากขึ้นด้วยเช่นกัน ดังสมการที่ (3-3)

## บทที่ 4

### ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ในบทนี้จะกล่าวถึงเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง ผลการทดลองของวิธีการ ฟังและการถอดลายน้ำดิจิตอล การทดสอบความคงทนของลายน้ำดิจิ ตอลต่อการโจมตีทางการประมวลผลสัญญาณแบบต่าง ๆ ทั้งหมดแปดการโจมตี แบ่งออกตามชนิดเพลงต่าง ๆ หกชนิด ชนิดละห้า เพลง ผลการทดสอบแบ่งออกเป็นสามส่วนคือ การทดสอบคุณภาพเสียง การทดสอบความคงทนของลายน้ำดิจิตอล และ การทดสอบประสิทธิภาพของอัลกอริทึม

#### 4.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

4.1.1 ซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ คือ MATLAB เวอร์ชัน 7

4.1.2 ฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในการทดสอบคือ ซีพียู Intel® Core™2 Duo CPU T7250 @ 2.00 GHz หน่วยความจำ 4 GB ฮาร์ดดิสก์ 150 GB บนระบบปฏิบัติการ Microsoft Window Vista

4.1.3 รูปภาพที่ใช้ในการทดสอบ คือ รูปภาพขาวดำขนาด 60 บิต จำนวน 1 ภาพ มีไฟล์ภาพนามสกุล .jpg ใช้แทนลายน้ำดิจิตอล

#### 4.2 ผลการทดลอง

4.2.1 การทดสอบคุณภาพเสียง

การทดลองนี้ผู้วิจัยได้ใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นในการ ฟังและการถอดลายน้ำดิจิตอล โดยลายน้ำดิจิตอลที่ใช้ในการ ฟังลงบนภาพต้นฉบับนั้นจะใช้ภาพขาวดำขนาด 60บิต โดยจะฝังอยู่ในลักษณะที่ไม่สามารถรับรู้ได้บนสัญญาณเสียงต้นฉบับซึ่งเป็นสัญญาณเสียง เพลงบันทึกแบบดิจิตอลในรูปแบบเวฟ (WAVE Format) แบบโมโน มีอัตราการซีกสัญญาณที่ 44100 kHz มีความยาวตลอดทั้งเพลงถูกเข้ารหัส 16 บิต จากนั้นจะทำการวัดค่า SNR ระหว่างสัญญาณเสียงต้นฉบับกับสัญญาณเสียงที่ผ่านการ ฟังลายน้ำดิจิตอลและค่า SIM ระหว่างลายน้ำดิจิตอลต้นฉบับกับลายน้ำดิจิตอลที่ถอดได้ โดยภาพต้นฉบับ ลายน้ำดิจิตอลต้นฉบับ และลายน้ำดิจิตอลที่ถอดออก มาได้ แสดงให้เห็นในตารางที่ 4-1 ส่วนค่า SNR และค่า SIM แสดงไว้ในตารางที่ 4-2





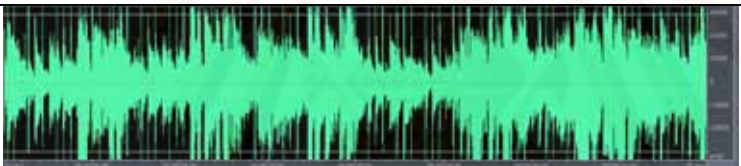
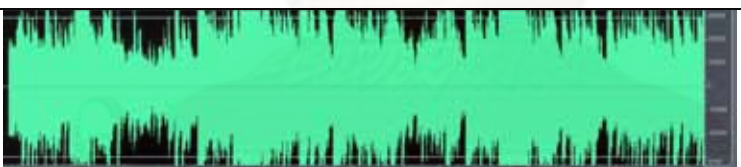

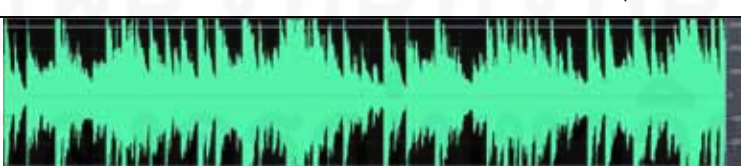
ตารางที่ 4-1 สัญญาณเสียงต้นฉบับ ไลยนำดิจิทัลต้นฉบับ และไลยนำดิจิทัลที่ถอดออกมาได้

	เสียงต้นฉบับ	ไลยนำ ดิจิทัล ต้นฉบับ	ไลยนำ ดิจิทัลที่ ถอดได้
1	<p>เพลง Fat bottomed girls</p>	CU	CU
2	<p>เพลง Good old Fashioned lover boy</p>	CU	CU
3	<p>เพลง Killer queen</p>	CU	CU
4	<p>เพลง Now I'm here</p>	CU	CU
5	<p>เพลง You're my best friend</p>	CU	CU
6	<p>เพลง Against All Odds (Take A Look At Me Now)</p>	CU	CU

ตารางที่ 4-1 (ต่อ)

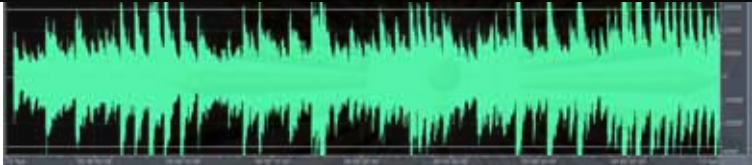


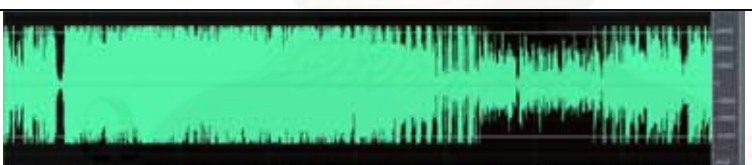


	เสียงต้นฉบับ	ลายน้ำ ดิจิทัล ต้นฉบับ	ลายน้ำ ดิจิทัลที่ ถอดได้
7	<p>เพลง I'll Get Back To You</p>	CU	CU
8	<p>เพลง In Love with you</p>	CU	CU
9	<p>เพลง It's too late</p>	CU	CU
10	<p>เพลง Make It Together</p>	CU	CU
11	<p>เพลง American pie</p>	CU	CU
12	<p>เพลง Castles in The Air</p>	CU	CU

ตารางที่ 4-1 (ต่อ)

	เสียงต้นฉบับ	ลายน้ำ ดิจิทัล ต้นฉบับ	ลายน้ำ ดิจิทัลที่ ถอดได้
13	 <p>เพลง Dreidel</p>	<b>CU CU</b>	<b>CU CU</b>
14	 <p>เพลง Everyday</p>	<b>CU CU</b>	<b>CU CU</b>
15	 <p>เพลง Winter wood</p>	<b>CU CU</b>	<b>CU CU</b>
16	 <p>เพลง CONSOLATION - Liszt</p>	<b>CU CU</b>	<b>CU CU</b>
17	 <p>เพลง WALTZ IN C - SHARP MINOR - Chopin</p>	<b>CU CU</b>	<b>CU CU</b>
18	 <p>เพลง INTREMEZZO IN A MAJOR Op. 118, No. 2 - Brahms</p>	<b>CU CU</b>	<b>CU CU</b>



ตารางที่ 4-1 (ต่อ)

	เสียงต้นฉบับ	ลายน้ำ ดิจิทัล ต้นฉบับ	ลายน้ำ ดิจิทัลที่ ถอดได้
19	 <p>เพลง Adagio Beethoven</p>	CU	CU
20	 <p>เพลง Arioso Bach</p>	CU	CU
21	 <p>เพลง Announcement service public</p>	CU	CU
22	 <p>เพลง Qwerty (studio version)</p>	CU	CU
23	 <p>เพลง Linkin park-And One</p>	CU	CU
24	 <p>เพลง Linkin park-sold my soul to your mama</p>	CU	CU



ตารางที่ 4-1 (ต่อ)

	เสียงต้นฉบับ	ลายน้ำ ดิจิทัล ต้นฉบับ	ลายน้ำ ดิจิทัลที่ ถอดได้
25	 เพลง Linkin park-dedicated (demo_1999)	<b>CU</b>	<b>CU</b>
26	 เพลง DAYS	<b>CU</b>	<b>CU</b>
27	 เพลง Dreams	<b>CU</b>	<b>CU</b>
28	 เพลง Morning Smile	<b>CU</b>	<b>CU</b>
29	 เพลง Pastel Dori	<b>CU</b>	<b>CU</b>
30	 เพลง Sanpomichi	<b>CU</b>	<b>CU</b>

ตารางที่ 4-2 ค่า SNR ระหว่างสัญญาณเสียงต้นฉบับกับสัญญาณที่ผ่านการฝังลายน้ำดิจิทัล  
แล้วและค่า SIM และ BER ระหว่างลายน้ำดิจิทัลต้นฉบับกับลายน้ำดิจิทัลที่ถอดได้

เสียงต้นฉบับ	ลายน้ำดิจิทัล ต้นฉบับ	SNR(dB)	SIM	BER
เพลง Fat bottomed girls	Logo_CU	43.303	1	0
เพลง Good old Fashioned lover boy	Logo_CU	41.18	1	0
เพลง Killer queen	Logo_CU	43.145	1	0
เพลง Now I'm here	Logo_CU	41.72	1	0
เพลง You're my best friend	Logo_CU	43.924	1	0
เพลง Against All Odds (Take A Look At Me Now)	Logo_CU	39.146	1	0
เพลง I'll Get Back To You	Logo_CU	40.786	1	0
เพลง In Love with you	Logo_CU	37.585	1	0
เพลง It's too late	Logo_CU	40.727	1	0
เพลง Make It Together	Logo_CU	39.168	1	0
เพลง American pie	Logo_CU	44.833	1	0
เพลง Castles in The Air	Logo_CU	41.19	1	0
เพลง Dreidel	Logo_CU	44.204	1	0
เพลง Everyday	Logo_CU	41.566	1	0
เพลง Winter wood	Logo_CU	41.724	1	0
เพลง CONSOLATION - Liszt	Logo_CU	45.223	1	0
เพลง WALTZ IN C - SHARP MINOR - Chopin	Logo_CU	44.403	1	0
เพลง INTREMEZZO IN A MAJOR Op. 118, No. 2 – Brahms	Logo_CU	45.779	1	0
เพลง Adagio Beethoven	Logo_CU	46.477	1	0
เพลง Arioso Bach	Logo_CU	52.152	1	0
เพลง Announcement service public	Logo_CU	41.493	1	0

ตารางที่ 4-2 (ต่อ)

เสียงต้นฉบับ	ลายน้ำดิจิทัล ต้นฉบับ	SNR(dB)	SIM	BER
เพลง Qwerty (studio version)	Logo_CU	38.592	1	0
เพลง Linkin park-And One	Logo_CU	43.022	1	0
เพลง Linkin park-sold my soul to your mama	Logo_CU	38.417	1	0
เพลง Linkin park-dedicated (demo_1999)	Logo_CU	42.464	1	0
เพลง DAYS	Logo_CU	43.421	1	0
เพลง Dreams	Logo_CU	47.086	1	0
เพลง Morning Smile	Logo_CU	46.082	1	0
เพลง Pastel Dori	Logo_CU	43.315	1	0
เพลง Sanpomichi	Logo_CU	40.173	1	0

#### 4.2.2 การทดสอบความคงทนของลายน้ำดิจิทัล

##### 4.2.2.1 การโจมตีแบบต่อเนื่องที่ใช้ในการทดสอบมีทั้งหมด 8 รูปแบบ ดังนี้

- ก) Down-sampling, 44 kHz – 22 kHz – 44 kHz
- ข) Low pass filter, cut off frequency 6 kHz, 6<sup>th</sup> order
- ค) Random noise กำลังงาน 1 % ของสัญญาณเสียง
- ง) White Gaussian noise กำลังงาน 1 % ของสัญญาณเสียง
- จ) กำจัดสัญญาณรบกวนด้วยการแปลงเวฟเล็ต (MATLAB)
- ฉ) บีบอัดข้อมูลแบบมีความสูญเสีย, MP3 ที่ 56 kbps
- ช) Jittering ลบ 1 แซมเปิล จากทุก ๆ 100 แซมเปิล
- ซ) Crop (5 x 100) ลบ 500 แซมเปิล จากตำแหน่งที่ได้จากการสุ่ม 5

ตำแหน่ง

ผลการทดสอบความคงทนของลายน้ำต่อการโจมตีแบบต่าง ๆ ที่ทั้งหมดแปด การโจมตีแสดงในตารางที่ 4-3 ถึง ตารางที่ 4-8 จากสัญญาณเสียงเพลงสากล หกชนิดจำนวน สามสิบเพลง

ตารางที่ 4-3 ลายน้ำดิจิตอลที่ถอดได้จากภาพผลลัพธ์ที่ผ่านการโจมตี และ ความแตกต่างระหว่างลายน้ำดิจิตอลต้นฉบับกับลายน้ำดิจิตอลที่ถอดได้ จากแนวเพลง Rock

การโจมตี	ลายน้ำที่ถอดได้	SIM	BER
เพลง Fat bottomed girls			
1.Down-sampling, 44 kHz – 22 kHz – 44 kHz		0.97802	0.03333
2.Low pass filter, cut off frequency 6 kHz, 6 <sup>th</sup> order		0.97826	0.03333
3.Random noise กำลังงาน 1 % ของสัญญาณเสียง		0.97826	0.03333
4.White Gaussian noise กำลังงาน 1 % ของสัญญาณเสียง		0.95579	0.66667
5.กำจัดสัญญาณรบกวนด้วยการแปลงเวฟเล็ต		1	0
6.บีบอัดข้อมูลแบบมีความสูญเสีย, MP3 ที่ 56 kbps		1	0
7. Jittering ลบ 1 แซมเปิล จากทุก ๆ 100 แซมเปิล		0.97826	0.03333
8. Crop (5 x 100)		1	0



## ตารางที่ 4-3 (ต่อ)

การโจมตี	ลายน้ำที่ถอดได้	SIM	BER
เพลง Good old Fashioned lover boy			
1.Down-sampling, 44 kHz – 22 kHz – 44 kHz		0.97802	0.03333
2.Low pass filter, cut off frequency 6 kHz, 6 <sup>th</sup> order		0.98907	0.01667
3.Random noise กำลังงาน 1 % ของสัญญาณเสียง		0.94972	0.08333
4.White Gaussian noise กำลังงาน 1 % ของสัญญาณเสียง		0.98907	0.01667
5.กำจัดสัญญาณรบกวนด้วยการแปลงเวฟเล็ต		1	0
6.บีบอัดข้อมูลแบบมีความสูญเสีย, MP3 ที่ 56 kbps		1	0
7. Jittering ลบ 1 แซมเปิล จากทุก ๆ 100 แซมเปิล		1	0
8. Crop (5 x 100)		1	0

## ตารางที่ 4-3 (ต่อ)

การโจมตี	ลายน้ำที่ถอดได้	SIM	BER
เพลง Killer queen			
1.Down-sampling, 44 kHz – 22 kHz – 44 kHz		0.97826	0.03333
2.Low pass filter, cut off frequency 6 kHz, 6 <sup>th</sup> order		0.96709	0.05
3.Random noise กำลังงาน 1 % ของสัญญาณเสียง		0.98907	0.01667
4.White Gaussian noise กำลังงาน 1 %ของสัญญาณเสียง		0.95579	0.06667
5.กำจัดสัญญาณรบกวนด้วยการแปลงเวฟเล็ต		1	0
6.บีบอัดข้อมูลแบบมีความสูญเสีย, MP3 ที่ 56 kbps		1	0
7. Jittering ลบ 1 แซมเปิล จากทุก ๆ 100 แซมเปิล		0.9678	0.05
8. Crop (5 x 100)		0.98907	0.01667

## ตารางที่ 4-3 (ต่อ)

การโจมตี	ลายน้ำที่ถอดได้	SIM	BER
เพลง Now I'm here			
1.Down-sampling, 44 kHz – 22 kHz – 44 kHz		0.96684	0.05
2.Low pass filter, cut off frequency 6 kHz, 6 <sup>th</sup> order		0.9893	0.01667
3.Random noise กำลังงาน 1 % ของสัญญาณเสียง		0.9893	0.01667
4.White Gaussian noise กำลังงาน 1 %ของสัญญาณเสียง		0.98907	0.01667
5.กำจัดสัญญาณรบกวนด้วยการแปลงเวฟเล็ต		1	0
6.บีบอัดข้อมูลแบบมีความสูญเสีย, MP3 ที่ 56 kbps		1	0
7. Jittering ลบ 1 แซมเปิล จากทุก ๆ 100 แซมเปิล		1	0
8. Crop (5 x 100)		0.98907	0.01667

## ตารางที่ 4-3 (ต่อ)

การโจมตี	ลายน้ำที่ถอดได้	SIM	BER
เพลง You're my best friend			
1.Down-sampling, 44 kHz – 22 kHz – 44 kHz		0.96684	0.05
2.Low pass filter, cut off frequency 6 kHz, 6 <sup>th</sup> order		0.98907	0.01667
3.Random noise กำลังงาน 1 % ของสัญญาณเสียง		0.98907	0.01667
4.White Gaussian noise กำลังงาน 1 %ของสัญญาณเสียง		0.97802	0.03333
5.กำจัดสัญญาณรบกวนรอบๆด้วยการแปลงเวฟเล็ต		1	0
6.บีบอัดข้อมูลแบบมีความสูญเสีย, MP3 ที่ 56 kbps		1	0
7. Jittering ลบ 1 แซมเปิล จากทุก ๆ 100 แซมเปิล		0.98907	0.01667
8. Crop (5 x 100)		1	0



ตารางที่ 4-4 ลายน้ำดิจิตอลที่ถอดได้จากภาพผลลัพธ์ที่ผ่านการโจมตี และความแตกต่างระหว่างลายน้ำดิจิตอลต้นฉบับกับลายน้ำดิจิตอลที่ถอดได้ จากแนวเพลง Dance

การโจมตี	ลายน้ำที่ถอดได้	SIM	BER
เพลง Against All Odds (Take A Look At Me Now)			
1.Down-sampling, 44 kHz – 22 kHz – 44 kHz		0.98907	0.016667
2.Low pass filter, cut off frequency 6 kHz, 6 <sup>th</sup> order		0.98907	0.016667
3.Random noise กำลังงาน 1 % ของสัญญาณเสียง		0.98907	0.016667
4.White Gaussian noise กำลังงาน 1 % ของสัญญาณเสียง		0.98907	0.016667
5.กำจัดสัญญาณรบกวนด้วยการแปลงเวฟเล็ต		1	0
6.บีบอัดข้อมูลแบบมีความสูญเสีย, MP3 ที่ 56 kbps		1	0
7. Jittering ลบ 1 แซมเปิล จากทุก ๆ 100 แซมเปิล		1	0
8. Crop (5 x 100)		1	0

## ตารางที่ 4-4 (ต่อ)

การโจมตี	ลายน้ำที่ถอดได้	SIM	BER
เพลง I'll Get Back To You			
1.Down-sampling, 44 kHz – 22 kHz – 44 kHz		0.98907	0.01667
2.Low pass filter, cut off frequency 6 kHz, 6 <sup>th</sup> order		1	0
3.Random noise กำลังงาน 1 % ของสัญญาณเสียง		1	0
4.White Gaussian noise กำลังงาน 1 %ของสัญญาณเสียง		0.98907	0.01667
5.กำจัดสัญญาณรบกวนด้วยการแปลงเวฟเล็ต		1	0
6.บีบอัดข้อมูลแบบมีความสูญเสีย, MP3 ที่ 56 kbps		1	0
7. Jittering ลบ 1 แซมเปิล จากทุก ๆ 100 แซมเปิล		0.97826	0.03333
8. Crop (5 x 100)		1	0

## ตารางที่ 4-4 (ต่อ)

การโจมตี	ลายน้ำที่ถอดได้	SIM	BER
เพลง In Love with you			
1.Down-sampling, 44 kHz – 22 kHz – 44 kHz		0.96709	0.05
2.Low pass filter, cut off frequency 6 kHz, 6 <sup>th</sup> order		1	0
3.Random noise กำลังงาน 1 % ของสัญญาณเสียง		1	0
4.White Gaussian noise กำลังงาน 1 % ของสัญญาณเสียง		1	0
5.กำจัดสัญญาณรบกวนรอบกวนด้วยการแปลงเวฟเล็ต		1	0
6.บีบอัดข้อมูลแบบมีความสูญเสีย, MP3 ที่ 56 kbps		1	0
7. Jittering ลบ 1 แซมเปิล จากทุก ๆ 100 แซมเปิล		1	0
8. Crop (5 x 100)		1	0

## ตารางที่ 4-4 (ต่อ)

การโจมตี	ลายน้ำที่ถอดได้	SIM	BER
เพลง It's too late			
1.Down-sampling, 44 kHz – 22 kHz – 44 kHz		0.97826	0.03333
2.Low pass filter, cut off frequency 6 kHz, 6 <sup>th</sup> order		1	0
3.Random noise กำลังงาน 1 % ของสัญญาณเสียง		0.97802	0.03333
4.White Gaussian noise กำลังงาน 1 %ของสัญญาณเสียง		0.96709	0.05
5.กำจัดสัญญาณรบกวนด้วยการแปลงเวฟเล็ต		1	0
6.บีบอัดข้อมูลแบบมีความสูญเสีย, MP3 ที่ 56 kbps		1	0
7. Jittering ลบ 1 แซมเปิล จากทุก ๆ 100 แซมเปิล		0.97802	0.03333
8. Crop (5 x 100)		1	0



## ตารางที่ 4-4 (ต่อ)

การโจมตี	ลายน้ำที่ถอดได้	SIM	BER
เพลง Make It Together			
1.Down-sampling, 44 kHz – 22 kHz – 44 kHz		1	0
2.Low pass filter, cut off frequency 6 kHz, 6 <sup>th</sup> order		1	0
3.Random noise กำลังงาน 1 % ของสัญญาณเสียง		0.98907	0.01667
4.White Gaussian noise กำลังงาน 1 %ของสัญญาณเสียง		0.98907	0.01667
5.กำจัดสัญญาณรบกวนด้วยการแปลงเวฟเล็ต		1	0
6.บีบอัดข้อมูลแบบมีความสูญเสีย, MP3 ที่ 56 kbps		1	0
7. Jittering ลบ 1 แซมเปิล จากทุก ๆ 100 แซมเปิล		1	0
8. Crop (5 x 100)		1	0

ตารางที่ 4-5 ลายน้ำดิจิตอลที่ถอดได้จากภาพผลลัพธ์ที่ผ่านการโจมตี และความแตกต่างระหว่างลายน้ำดิจิตอลต้นฉบับกับลายน้ำดิจิตอลที่ถอดได้ จากแนวเพลง Country

การโจมตี	ลายน้ำที่ถอดได้	SIM	BER
เพลง American pie			
1.Down-sampling, 44 kHz – 22 kHz – 44 kHz		1	0
2.Low pass filter, cut off frequency 6 kHz, 6 <sup>th</sup> order		0.94436	0.08333
3.Random noise กำลังงาน 1 % ของสัญญาณเสียง		0.9893	0.01667
4.White Gaussian noise กำลังงาน 1 % ของสัญญาณเสียง		0.96684	0.05
5.กำจัดสัญญาณรบกวนด้วยการแปลงเวฟเล็ต		1	0
6.บีบอัดข้อมูลแบบมีความสูญเสีย, MP3 ที่ 56 kbps		1	0
7. Jittering ลบ 1 แซมเปิล จากทุก ๆ 100 แซมเปิล		0.98907	0.16667
8. Crop (5 x 100)		1	0

## ตารางที่ 4-5 (ต่อ)

การโจมตี	ลายน้ำที่ถอดได้	SIM	BER
เพลง Castles in The Air			
1.Down-sampling, 44 kHz – 22 kHz – 44 kHz		0.98907	0.01667
2.Low pass filter, cut off frequency 6 kHz, 6 <sup>th</sup> order		0.97826	0.03333
3.Random noise กำลังงาน 1 % ของสัญญาณเสียง		0.97826	0.03333
4.White Gaussian noise กำลังงาน 1 %ของสัญญาณเสียง		1	0
5.กำจัดสัญญาณรบกวนด้วยการแปลงเวฟเล็ต		1	0
6.บีบอัดข้อมูลแบบมีความสูญเสีย, MP3 ที่ 56 kbps		1	0
7. Jittering ลบ 1 แซมเปิล จากทุก ๆ 100 แซมเปิล		1	0
8. Crop (5 x 100)		1	0

## ตารางที่ 4-5 (ต่อ)

การโจมตี	ลายน้ำที่ถอดได้	SIM	BER
เพลง Dreidel			
1.Down-sampling, 44 kHz – 22 kHz – 44 kHz		0.92106	0.11667
2.Low pass filter, cut off frequency 6 kHz, 6 <sup>th</sup> order		0.97826	0.03333
3.Random noise กำลังงาน 1 % ของสัญญาณเสียง		1	0
4.White Gaussian noise กำลังงาน 1 % ของสัญญาณเสียง		0.96684	0.05
5.กำจัดสัญญาณรบกวนด้วยการแปลงเวฟเล็ต		1	0
6.บีบอัดข้อมูลแบบมีความสูญเสีย, MP3 ที่ 56 kbps		1	0
7. Jittering ลบ 1 แซมเปิล จากทุก ๆ 100 แซมเปิล		0.96709	0.05
8. Crop (5 x 100)		1	0



## ตารางที่ 4-5 (ต่อ)

การโจมตี	ลายน้ำที่ถอดได้	SIM	BER
เพลง Everyday			
1.Down-sampling, 44 kHz – 22 kHz – 44 kHz		0.93356	0.1
2.Low pass filter, cut off frequency 6 kHz, 6 <sup>th</sup> order		0.95553	0.06667
3.Random noise กำลังงาน 1 % ของสัญญาณเสียง		0.97895	0.03333
4.White Gaussian noise กำลังงาน 1 %ของสัญญาณเสียง		0.97826	0.03333
5.กำจัดสัญญาณรบกวนรอบการแปลงเวฟเล็ท		1	0
6.บีบอัดข้อมูลแบบมีความสูญเสีย, MP3 ที่ 56 kbps		1	0
7. Jittering ลบ 1 แซมเปิล จากทุก ๆ 100 แซมเปิล		0.9893	0.01667
8. Crop (5 x 100)		1	0

## ตารางที่ 4-5 (ต่อ)

การโจมตี	ลายน้ำที่ถอดได้	SIM	BER
เพลง Winter wood			
1.Down-sampling, 44 kHz – 22 kHz – 44 kHz		0.9893	0.01667
2.Low pass filter, cut off frequency 6 kHz, 6 <sup>th</sup> order		0.90889	0.13333
3.Random noise กำลังงาน 1 % ของสัญญาณเสียง		0.89685	0.15
4.White Gaussian noise กำลังงาน 1 %ของสัญญาณเสียง		0.94409	0.03333
5.กำจัดสัญญาณรบกวนด้วยการแปลงเวฟเล็ต		1	0
6.บีบอัดข้อมูลแบบมีความสูญเสีย, MP3 ที่ 56 kbps		1	0
7. Jittering ลบ 1 แซมเปิล จากทุก ๆ 100 แซมเปิล		0.97802	0.03333
8. Crop (5 x 100)		0.98907	0.16667

ตารางที่ 4-6 ลายน้ำดิจิตอลที่ถอดได้จากภาพผลลัพธ์ที่ผ่านการโจมตี และความแตกต่างระหว่างลายน้ำดิจิตอลต้นฉบับกับลายน้ำดิจิตอลที่ถอดได้จากแนวเพลง Classic

การโจมตี	ลายน้ำที่ถอดได้	SIM	BER
เพลง CONSOLATION - Liszt			
1.Down-sampling, 44 kHz – 22 kHz – 44 kHz		0.95553	0.06667
2.Low pass filter, cut off frequency 6 kHz, 6 <sup>th</sup> order		0.97802	0.03333
3.Random noise กำลังงาน 1 % ของสัญญาณเสียง		0.9325	0.1
4.White Gaussian noise กำลังงาน 1 %ของสัญญาณเสียง		0.97802	0.03333
5.กำจัดสัญญาณรบกวนด้วยการแปลงเวฟเล็ต		1	0
6.บีบอัดข้อมูลแบบมีความสูญเสีย, MP3 ที่ 56 kbps		1	0
7. Jittering ลบ 1 แซมเปิล จากทุก ๆ 100 แซมเปิล		0.97802	0.03333
8. Crop (5 x 100)		1	0

## ตารางที่ 4-6 (ต่อ)

การโจมตี	ลายน้ำที่ถอดได้	SIM	BER
เพลง WALTZ IN C - SHARP MINOR - Chopin			
1.Down-sampling, 44 kHz – 22 kHz – 44 kHz		0.96684	0.05
2.Low pass filter, cut off frequency 6 kHz, 6 <sup>th</sup> order		0.94436	0.08333
3.Random noise กำลังงาน 1 % ของสัญญาณเสียง		0.9893	0.016667
4.White Gaussian noise กำลังงาน 1 %ของสัญญาณเสียง		0.96684	0.05
5.กำจัดสัญญาณรบกวนรอบกวนด้วยการแปลงเวฟเล็ต		1	0
6.บีบอัดข้อมูลแบบมีความสูญเสีย, MP3 ที่ 56 kbps		1	0
7. Jittering ลบ 1 แซมเปิล จากทุก ๆ 100 แซมเปิล		0.95553	0.066667
8. Crop (5 x 100)		0.98907	0.016667

## ตารางที่ 4-6 (ต่อ)

การโจมตี	ลายน้ำที่ถอดได้	SIM	BER
เพลง INTREMEZZO IN A MAJOR Op. 118, No. 2 – Brahms			
1.Down-sampling, 44 kHz – 22 kHz – 44 kHz		0.97802	0.03333
2.Low pass filter, cut off frequency 6 kHz, 6 <sup>th</sup> order		0.91134	0.13333
3.Random noise กำลังงาน 1 % ของสัญญาณเสียง		0.97802	0.03333
4.White Gaussian noise กำลังงาน 1 %ของสัญญาณเสียง		0.94409	0.08333
5.กำจัดสัญญาณรบกวนรอบวงด้วยการแปลงเวฟเล็ต		1	0
6.บีบอัดข้อมูลแบบมีความสูญเสีย, MP3 ที่ 56 kbps		1	0
7. Jittering ลบ 1 แซมเปิล จากทุก ๆ 100 แซมเปิล		0.97802	0.033333
8. Crop (5 x 100)		1	0



## ตารางที่ 4-6 (ต่อ)

การโจมตี	ลายน้ำที่ถอดได้	SIM	BER
เพลง Adagio Beethoven			
1.Down-sampling, 44 kHz – 22 kHz – 44 kHz		0.9678	0.05
2.Low pass filter, cut off frequency 6 kHz, 6 <sup>th</sup> order		0.97826	0.033333
3.Random noise กำลังงาน 1 % ของสัญญาณเสียง		0.9893	0.16667
4.White Gaussian noise กำลังงาน 1 %ของสัญญาณเสียง		0.97895	0.033333
5.กำจัดสัญญาณรบกวนด้วยการแปลงเวฟเล็ต		1	0
6.บีบอัดข้อมูลแบบมีความสูญเสีย, MP3 ที่ 56 kbps		1	0
7. Jittering ลบ 1 แซมเปิล จากทุก ๆ 100 แซมเปิล		0.96709	0.05
8. Crop (5 x 100)		1	0

## ตารางที่ 4-6 (ต่อ)

การโจมตี	ลายน้ำที่ถอดได้	SIM	BER
เพลง Arioso Bach			
1.Down-sampling, 44 kHz – 22 kHz – 44 kHz		0.93278	0.1
2.Low pass filter, cut off frequency 6 kHz, 6 <sup>th</sup> order		0.96684	0.05
3.Random noise กำลังงาน 1 % ของสัญญาณเสียง		0.97802	0.03333
4.White Gaussian noise กำลังงาน 1 %ของสัญญาณเสียง		0.932278	0.1
5.กำจัดสัญญาณรบกวนด้วยการแปลงเวฟเล็ต		1	0
6.บีบอัดข้อมูลแบบมีความสูญเสีย, MP3 ที่ 56 kbps		1	0
7. Jittering ลบ 1 แซมเปิล จากทุก ๆ 100 แซมเปิล		1	0
8. Crop (5 x 100)		1	0

ตารางที่ 4-7 ไลยน้ำดิจิตอลที่ถอดได้จากภาพผลลัพธ์ที่ผ่านการโจมตี และความแตกต่างระหว่างไลยน้ำดิจิตอลต้นฉบับกับไลยน้ำดิจิตอลที่ถอดได้จากแนวเพลง Alternative

การโจมตี	ไลยน้ำที่ถอดได้	SIM	BER
เพลง Announcement service public			
1.Down-sampling, 44 kHz – 22 kHz – 44 kHz		0.94511	0.08333
2.Low pass filter, cut off frequency 6 kHz, 6 <sup>th</sup> order		0.98907	0.016667
3.Random noise กำลังงาน 1 % ของสัญญาณเสียง		0.97802	0.033333
4.White Gaussian noise กำลังงาน 1 % ของสัญญาณเสียง		0.937826	0.033333
5.กำจัดสัญญาณรบกวนด้วยการแปลงเวฟเล็ต		1	0
6.บีบอัดข้อมูลแบบมีความสูญเสีย, MP3 ที่ 56 kbps		1	0
7. Jittering ลบ 1 แซมเปิล จากทุก ๆ 100 แซมเปิล		0.9893	0.016667
8. Crop (5 x 100)		1	0

## ตารางที่ 4-7 (ต่อ)

การโจมตี	ลายน้ำที่ถอดได้	SIM	BER
เพลง Qwerty (studio version)			
1.Down-sampling, 44 kHz – 22 kHz – 44 kHz		0.97826	0.03333
2.Low pass filter, cut off frequency 6 kHz, 6 <sup>th</sup> order		0.96684	0.05
3.Random noise กำลังงาน 1 % ของสัญญาณเสียง		0.97826	0.033333
4.White Gaussian noise กำลังงาน 1 %ของสัญญาณเสียง		0.97802	0.033333
5.กำจัดสัญญาณรบกวนรอบกวนด้วยการแปลงเวฟเล็ต		1	0
6.บีบอัดข้อมูลแบบมีความสูญเสีย, MP3 ที่ 56 kbps		1	0
7. Jittering ลบ 1 แซมเปิล จากทุก ๆ 100 แซมเปิล		0.97802	0.033333
8. Crop (5 x 100)		1	0

## ตารางที่ 4-7 (ต่อ)

การโจมตี	ลายน้ำที่ถอดได้	SIM	BER
เพลง Linkin park-And One			
1.Down-sampling, 44 kHz – 22 kHz – 44 kHz		1	0
2.Low pass filter, cut off frequency 6 kHz, 6 <sup>th</sup> order		1	0
3.Random noise กำลังงาน 1 % ของสัญญาณเสียง		0.53161	0.55
4.White Gaussian noise กำลังงาน 1 %ของสัญญาณเสียง		1	0
5.กำจัดสัญญาณรบกวนด้วยการแปลงเวฟเล็ต		1	0
6.บีบอัดข้อมูลแบบมีความสูญเสีย, MP3 ที่ 56 kbps		1	0
7. Jittering ลบ 1 แซมเปิล จากทุก ๆ 100 แซมเปิล		0.9893	0.016667
8. Crop (5 x 100)		1	0











## ตารางที่ 4-7 (ต่อ)

การโจมตี	ลายน้ำที่ถอดได้	SIM	BER
เพลง Linkin park-sold my soul to your mama			
1.Down-sampling, 44 kHz – 22 kHz – 44 kHz	CU	0.98907	0.016667
2.Low pass filter, cut off frequency 6 kHz, 6 <sup>th</sup> order	CU	0.98907	0.016667
3.Random noise กำลังงาน 1 % ของสัญญาณเสียง	CU	0.98907	0.016667
4.White Gaussian noise กำลังงาน 1 %ของสัญญาณเสียง	CU	1	0
5.กำจัดสัญญาณรบกวนรอบกวนด้วยการแปลงเวฟเล็ต	CU	1	0
6.บีบอัดข้อมูลแบบมีความสูญเสีย, MP3 ที่ 56 kbps	CU	1	0
7. Jittering ลบ 1 แซมเปิล จากทุก ๆ 100 แซมเปิล	CU	1	0
8. Crop (5 x 100)	CU	1	0

## ตารางที่ 4-7 (ต่อ)

การโจมตี	ลายน้ำที่ถอดได้	SIM	BER
เพลง Linkin park-dedicated (demo_1999)			
1.Down-sampling, 44 kHz – 22 kHz – 44 kHz		0.96684	0.05
2.Low pass filter, cut off frequency 6 kHz, 6 <sup>th</sup> order		0.96709	0.05
3.Random noise กำลังงาน 1 % ของสัญญาณเสียง		0.90889	0.133333
4.White Gaussian noise กำลังงาน 1 %ของสัญญาณเสียง		0.97802	0.033333
5.กำจัดสัญญาณรบกวนรอบกวนด้วยการแปลงเวฟเล็ต		1	0
6.บีบอัดข้อมูลแบบมีความสูญเสีย, MP3 ที่ 56 kbps		1	0
7. Jittering ลบ 1 แซมเปิล จากทุก ๆ 100 แซมเปิล		0.98907	0.016667
8. Crop (5 x 100)		1	0

ตารางที่ 4-8 ลายน้ำดิจิตอลที่ถอดได้จากภาพผลลัพธ์ที่ผ่านการโจมตี และความแตกต่างระหว่างลายน้ำดิจิตอลต้นฉบับกับลายน้ำดิจิตอลที่ถอดได้ จากแนวเพลง Acoustic

การโจมตี	ลายน้ำที่ถอดได้	SIM	BER
เพลง DAYS			
1.Down-sampling, 44 kHz – 22 kHz – 44 kHz		0.97802	0.033333
2.Low pass filter, cut off frequency 6 kHz, 6 <sup>th</sup> order		0.98907	0.016667
3.Random noise กำลังงาน 1 % ของสัญญาณเสียง		1	0
4.White Gaussian noise กำลังงาน 1 %ของสัญญาณเสียง		0.97802	0.033333
5.กำจัดสัญญาณรบกวนด้วยการแปลงเวฟเล็ต		1	0
6.บีบอัดข้อมูลแบบมีความสูญเสีย, MP3 ที่ 56 kbps		1	0
7. Jittering ลบ 1 แซมเปิล จากทุก ๆ 100 แซมเปิล		1	0
8. Crop (5 x 100)		1	0

## ตารางที่ 4-8 (ต่อ)

การโจมตี	ลายน้ำที่ถอดได้	SIM	BER
เพลง Dreams			
1.Down-sampling, 44 kHz – 22 kHz – 44 kHz		0.94436	0.083333
2.Low pass filter, cut off frequency 6 kHz, 6 <sup>th</sup> order		0.97826	0.033333
3.Random noise กำลังงาน 1 % ของสัญญาณเสียง		0.98907	0.016667
4.White Gaussian noise กำลังงาน 1 %ของสัญญาณเสียง		0.97802	0.033333
5.กำจัดสัญญาณรบกวนด้วยการแปลงเวฟเล็ต		0.98907	0.016667
6.บีบอัดข้อมูลแบบมีความสูญเสีย, MP3 ที่ 56 kbps		0.98907	0.016667
7. Jittering ลบ 1 แซมเปิล จากทุก ๆ 100 แซมเปิล		0.98907	0.016667
8. Crop (5 x 100)		0.98907	0.016667

ตารางที่ 4-8 (ต่อ)

การโจมตี	ลายน้ำที่ถอดได้	SIM	BER
เพลง Morning Smile			
1.Down-sampling, 44 kHz – 22 kHz – 44 kHz		0.96684	0.05
2.Low pass filter, cut off frequency 6 kHz, 6 <sup>th</sup> order		0.97826	0.033333
3.Random noise กำลังงาน 1 % ของสัญญาณเสียง		0.97802	0.033333
4.White Gaussian noise กำลังงาน 1 % ของสัญญาณเสียง		0.97802	0.033333
5.กำจัดสัญญาณรบกวนด้วยการแปลงเวฟเล็ต		1	0
6.บีบอัดข้อมูลแบบมีความสูญเสีย, MP3 ที่ 56 kbps		1	0
7. Jittering ลบ 1 แซมเปิล จากทุก ๆ 100 แซมเปิล		0.9893	0.016667
8. Crop (5 x 100)		1	0



ตารางที่ 4-8 (ต่อ)

การโจมตี	ลายน้ำที่ถอดได้	SIM	BER
เพลง Pastel Dori			
1.Down-sampling, 44 kHz – 22 kHz – 44 kHz		0.96684	0.05
2.Low pass filter, cut off frequency 6 kHz, 6 <sup>th</sup> order		0.96684	0.05
3.Random noise กำลังงาน 1 % ของสัญญาณเสียง		0.9325	0.1
4.White Gaussian noise กำลังงาน 1 % ของสัญญาณเสียง		0.97802	0.033333
5.กำจัดสัญญาณรบกวนด้วยการแปลงเวฟเล็ต		1	0
6.บีบอัดข้อมูลแบบมีความสูญเสีย, MP3 ที่ 56 kbps		1	0
7. Jittering ลบ 1 แซมเปิล จากทุก ๆ 100 แซมเปิล		0.95553	0.066667
8. Crop (5 x 100)		1	0

## ตารางที่ 4-8 (ต่อ)

การโจมตี	ลายน้ำที่ถอดได้	SIM	BER
เพลง Sanpomichi			
1.Down-sampling, 44 kHz – 22 kHz – 44 kHz		0.98907	0.016667
2.Low pass filter, cut off frequency 6 kHz, 6 <sup>th</sup> order		0.96684	0.05
3.Random noise กำลังงาน 1 % ของสัญญาณเสียง		0.9325	0.1
4.White Gaussian noise กำลังงาน 1 % ของสัญญาณเสียง		1	0
5.กำจัดสัญญาณรบกวนด้วยการแปลงเวฟเล็ต		1	0
6.บีบอัดข้อมูลแบบมีความสูญเสีย, MP3 ที่ 56 kbps		1	0
7. Jittering ลบ 1 แซมเปิล จากทุก ๆ 100 แซมเปิล		0.98907	0.016667
8. Crop (5 x 100)		0.98907	0.016667

#### 4.2.3 การทดสอบประสิทธิภาพของอัลกอริทึม

ในหัวข้อนี้ได้แบ่งการทดสอบประสิทธิภาพ อัลกอริทึม เป็นสามขั้นตอนคือ การทดสอบประสิทธิภาพโดยการเปรียบเทียบกับงานวิจัยหลาย อัลกอริทึมที่ผ่านมา การทดสอบประสิทธิภาพโดยใช้สถิติ ในการทดสอบสมมติฐาน และ การทดสอบประสิทธิภาพกับ อัลกอริทึม ATS และ อัลกอริทึมที่เข้ารหัสแก้ไขความผิดพลาด ECC

4.2.3.1 การทดสอบประสิทธิภาพโดยการเปรียบเทียบกับงานวิจัยหลาย อัลกอริทึมที่ผ่านมา โดยใช้การชักสัญญาณที่ 44100 KHz มีความยาวตลอดทั้งเพลงถูกเข้ารหัส 16 บิต ขนาด 20 วินาที เพลง Danube.wav ซึ่งมีการใส่ความจุของข้อมูลที่ 60 บิต และกำหนดการทดลองให้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Shijun Xiang, et. al. (2007) ซึ่งมีค่า SNR สูงที่สุด ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 4-9

ตารางที่ 4-9 ผลการเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น

Algorithms	Imperceptibility	Capacity	Robust (SIM)
R. Tachibana, et. al. (2001)	SNR คือ 35	64 bits/30s	-
W. Li and X. Xue (2003)	SNR คือ 32.4	64 bits/15s	0.975
Wei Li and Xiangyang Xue(2004)	SNR คือ 34.2	12.8bits/1s	0.9798
Xianghong Tang, et. al.(2005)	SNR คือ 39.0716	4096 bits/5.93s	0.83672
W. Li and X. Xue (2006)	SNR คือ 29.50	64 bits/15s	0.9832
N. Sriyingyong, et. al.(2006)	SNR คือ 23	20.183 bits/1s	1
Shijun Xiang, et. al. (2007)	SNR คือ 45.28	60 bits/20s	1
Shijun Xiang, et. al. (2008)	SNR คือ 43.84	40 bits/20s	1
Our result	SNR คือ 49.10733	60 bits/20s	0.959721

จากตารางที่ 4-9 จะเห็นได้ว่าค่า SNR ของอัลกอริทึมที่เสนอมีค่ามากที่สุดคือ 49.10733 รองลงมาคือ Shijun Xiang มีค่า 45.28 โดยค่าที่ไขว้ในตารางคือค่าเฉลี่ยของการทดลอง 30 ครั้ง ได้ค่าเฉลี่ย 49.10733 และค่ามากที่สุดคือ 54.551 และค่าน้อยที่สุดคือ 46.495

จากการสังเคราะห์งานวิจัยที่ผ่านมาประสิทธิภาพ ใน ด้าน ไม่สังเกต ู้ได้ (Imperceptibility) ในการฝังลายน้ำอยู่ในช่วง 23-45.28 DB เนื่องจากงานวิจัยที่ผ่านมาทำการตรวจสอบคุณภาพของลายน้ำโดยใช้เพลงที่ทำการทดลองจำนวน 1-3 เพลง รวมทั้งงานวิจัยบางงานไม่ได้ทำการรายงานเพลงที่ทำการทดลองเพราะฉะนั้นผู้วิจัยจึงตั้งเกณฑ์การทดสอบ

ประสิทธิภาพของลายน้ำโดยใช้ประสิทธิภาพของลายน้ำที่สูงสุดมาใช้เป็นเกณฑ์ในการทดสอบทางสถิติ

จากงานวิจัยของ Shijun Xiang (2007) เป็นงานวิจัยที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดรวมทั้งมีการรายงานเพลงที่ใช้ในการทดลองผู้วิจัยจึงทำการทดสอบประสิทธิภาพของลายน้ำโดยใช้เพลง Danube.wav เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของอัลกอริทึม

4.2.3.2 การทดสอบประสิทธิภาพกับ อัลกอริทึม GA กับ อัลกอริทึม ATS [9] และ อัลกอริทึมที่ใช้รหัสแก้ไขความผิดพลาด ECC [54] โดยแบ่งเป็นแนวเพลงทั้งหมด หกแนวได้แก่แนวเพลง Rock, Dance, Country, Classic, Alternative และ Acoustic แนวเพลงละห้าเพลงมาทำการทดสอบการโจมตีและวัดคุณภาพของสัญญาณเสียง

**ตารางที่ 4-10** ผลการทดลองเปรียบเทียบระหว่างขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม GA, ATS และ ECC แนวเพลง Rock

เพลง Fat bottomed girls		GA	ECC	ATS
SNR		43.303	37.33	29.641
SIM		1	1	1
	LPF	0.97826	1	1
	Random noise	0.97826	0.8756	0.82092
	Crop	1	1	1
	Resampling	0.97802	1	1
	Gaussian white noise	0.95579	1	1
	DWT	1	1	1
	MP3	1	1	1
	Jitter	0.97826	1	1
BER		0	0	0
	LPF	0.033333	0.016667	0
	Random noise	0.033333	0.23333	0.25
	Crop	0	0.005556	0
	Resampling	0.033333	0.011111	0
	Gaussian white noise	0.066667	0.016667	0
	DWT	0	0	0
	MP3	0	0	0
	Jitter	0.033333	0.027778	0

จากตารางที่ 4-10 แสดงค่า SNR ค่า SIM และค่า BER ของเพลง Fat bottomed girls แนวเพลง Rock โดยเปรียบเทียบระหว่าง อัลกอริทึม สามแบบคือ อัลกอริทึมที่ใช้ GA อัลกอริทึม ATS และอัลกอริทึมที่ใช้แก้ไขรหัสความผิดพลาด ECC โดยอัลกอริทึมที่ใช้ GA มีค่า SNR มากที่สุดคือ 43.303 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ECC มีค่า 37.33 และ อัลกอริทึม ATS มีค่า SNR น้อยที่สุดคือ 29.641 ค่า SIM อัลกอริทึม ECC มีค่าเฉลี่ยมากที่สุดคือ 0.98445 รองลงมาคือ อัลกอริทึม GA มีค่าเฉลี่ย 0.98357 และอัลกอริทึม ATS มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุดคือ 0.977615 ค่า BER อัลกอริทึม GA มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุดคือ 0.025 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ATS มีค่าเฉลี่ยคือ 0.3125 และอัลกอริทึม ECC มีค่าเฉลี่ยมากที่สุดคือ 0.38889

#### ตารางที่ 4-10 (แนวเพลง Rock ต่อ)

เพลง Good old Fashioned lover boy		GA	ECC	ATS
SNR		41.18	28.999	29.812
SIM		1	1	1
	LPF	0.98907	1	1
	Random noise	0.94972	0.8756	1
	Crop	1	1	1
	Resampling	0.97802	1	1
	Gaussian white noise	0.98907	1	1
	DWT	1	1	1
	MP3	1	1	1
	Jitter	1	1	1
BER		0	0	0
	LPF	0.016667	0.005556	0
	Random noise	0.083333	0.23333	0
	Crop	0	0.005556	0
	Resampling	0.03333	0.005556	0
	Gaussian white noise	0.01667	0.005556	0
	DWT	0	0.005556	0
	MP3	0	0	0
	Jitter	0	0	0



จากตารางที่ 4-10 แสดงค่า SNR ค่า SIM และค่า BER ของเพลง Good old Fashioned lover boy แนวเพลง Rock โดยเปรียบเทียบระหว่าง อัลกอริทึม สามแบบคือ อัลกอริทึมที่ใช้ GA อัลกอริทึม ATS และอัลกอริทึมที่ใช้แก้ไขรหัสความผิดพลาด ECC โดยอัลกอริทึมที่ใช้ GA มีค่า SNR มากที่สุดคือ 41.18 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ATS มีค่า SNR คือ 29.812 และ อัลกอริทึม ECC มีค่า SNR น้อยที่สุดคือ 28.999 ค่า SIM อัลกอริทึม ATS มีค่าเฉลี่ยมากที่สุดคือ 1 รองลงมาคือ อัลกอริทึม GA มีค่าเฉลี่ย 0.988235 และอัลกอริทึม ECC มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุดคือ 0.98445 ค่า BER อัลกอริทึม ATS มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุด คือ 0 รองลงมาคือ อัลกอริทึม GA มีค่าเฉลี่ยคือ 0.01875 และอัลกอริทึม ECC มีค่าเฉลี่ยมากที่สุดคือ 0.32639

#### ตารางที่ 4-10 (แนวเพลง Rock ต่อ)

เพลง Killer queen		GA	ECC	ATS
SNR		43.145	37.998	27.583
SIM		1	1	1
	LPF	0.96709	0.98907	1
	Random noise	0.98907	0.8756	0.80757
	Crop	0.98907	1	1
	Resampling	0.97826	0.98907	1
	Gaussian white noise	0.95579	0.98907	1
	DWT	1	1	1
	MP3	1	1	1
	Jitter	0.9678	0.98907	1
BER		0	0	0
	LPF	0.05	0.022222	0
	Random noise	0.016667	0.23333	0.26667
	Crop	0.016667	0.005556	0
	Resampling	0.033333	0.027778	0
	Gaussian white noise	0.066667	0.044444	0
	DWT	0	0	0
	MP3	0	0	0
	Jitter	0.05	0.044444	0

จากตารางที่ 4-10 แสดงค่า SNR ค่า SIM และค่า BER ของเพลง Killer queen แนวเพลง Rock โดยเปรียบเทียบระหว่าง อัลกอริทึม สามแบบคือ อัลกอริทึมที่ใช้ GA อัลกอริทึม ATS และอัลกอริทึมที่ใช้แก้ไขรหัสความผิดพลาด ECC โดยอัลกอริทึมที่ใช้ GA มีค่า SNR มากที่สุดคือ 43.145 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ECC มีค่า SNR คือ 37.998 และ อัลกอริทึม ATS มีค่า SNR น้อยที่สุดคือ 27.583 ค่า SIM อัลกอริทึม GA มีค่าเฉลี่ยมากที่สุดคือ 0.980885 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ECC มีค่าเฉลี่ย 0.97895 และอัลกอริทึม ATS มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุดคือ 0.975946 ค่า BER อัลกอริทึม GA มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุด คือ 0.021967 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ATS มีค่าเฉลี่ยคือ 0.033334 และอัลกอริทึม ECC มีค่าเฉลี่ยมากที่สุดคือ 0.047222

#### ตารางที่ 4-10 (แนวเพลง Rock ต่อ)

เพลง Now I'm here		GA	ECC	ATS
SNR		41.72	36.322	27.8
SIM		1	1	1
	LPF	0.9893	1	0.98907
	Random noise	0.9893	0.8756	0.65938
	Crop	0.98907	1	1
	Resampling	0.96684	1	1
	Gaussian white noise	0.98907	1	1
	DWT	1	1	1
	MP3	1	1	1
	Jitter	1	1	1
BER		0	0	0
	LPF	0.016667	0.016667	0.016667
	Random noise	0.016667	0.23333	0.43333
	Crop	0.016667	0.005556	0
	Resampling	0.05	0.011111	0
	Gaussian white noise	0.016667	0.027778	0
	DWT	0	0	0
	MP3	0	0	0
	Jitter	0	0.016667	0

จากตารางที่ 4-10 แสดงค่า SNR ค่า SIM และค่า BER ของเพลง Now I'm here แนวเพลง Rock โดยเปรียบเทียบระหว่าง อัลกอริทึม สามแบบคือ อัลกอริทึมที่ใช้ GA อัลกอริทึม ATS และอัลกอริทึมที่ใช้แก้ไขรหัสความผิดพลาด ECC โดยอัลกอริทึมที่ใช้ GA มีค่า SNR มากที่สุดคือ 41.72 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ECC มีค่า SNR คือ 36.322 และ อัลกอริทึม ATS มีค่า SNR น้อยที่สุดคือ 27.8 ค่า SIM อัลกอริทึม GA มีค่าเฉลี่ยมากที่สุดคือ 0.9904475 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ECC มีค่าเฉลี่ย 0.98445 และอัลกอริทึม ATS มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุดคือ 0.956056 ค่า BER อัลกอริทึม GA มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุด คือ 0.014584 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ECC มีค่าเฉลี่ยคือ 0.038889 และอัลกอริทึม ATS มีค่าเฉลี่ยมากที่สุดคือ 0.05625

#### ตารางที่ 4-10 (แนวเพลง Rock ต่อ)

เพลง You're my best friend		GA	ECC	ATS
SNR		43.924	38.279	27.727
SIM		1	1	1
	LPF	0.98907	1	1
	Random noise	0.98907	0.8756	0.87228
	Crop	1	1	1
	Resampling	0.96684	1	1
	Gaussian white noise	0.97802	1	1
	DWT	1	1	1
	MP3	1	1	1
	Jitter	0.98907	1	1
BER		0	0	0
	LPF	0.016667	0.027778	0
	Random noise	0.016667	0.23333	0.18333
	Crop	0	0.005556	0
	Resampling	0.05	0.05	0
	Gaussian white noise	0.033333	0.038889	0
	DWT	0	0	0
	MP3	0	0	0
	Jitter	0.016667	0.05	0

จากตารางที่ 4-10 แสดงค่า SNR ค่า SIM และค่า BER ของเพลง You' re my best friend แนวเพลง Rock โดยเปรียบเทียบระหว่าง อัลกอริทึม สามแบบคือ อัลกอริทึม ที่ใช้ GA อัลกอริทึม ATS และอัลกอริทึมที่ใช้แก้ไขรหัสความผิดพลาด ECC โดยอัลกอริทึมที่ใช้ GA มีค่า SNR มากที่สุดคือ 43.924 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ECC มีค่า SNR คือ 38.279 และ อัลกอริทึม ATS มีค่า SNR น้อยที่สุดคือ 27.727 ค่า SIM อัลกอริทึม GA มีค่าเฉลี่ยมากที่สุดคือ 0.9890 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ECC มีค่าเฉลี่ย 0.98445 และอัลกอริทึม ATS มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุดคือ 0.984035 ค่า BER อัลกอริทึม GA มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุด คือ 0.016667 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ATS มีค่าเฉลี่ยคือ 0.022916 และอัลกอริทึม ECC มีค่าเฉลี่ยมากที่สุดคือ 0.050694

ตารางที่ 4-11 ผลการทดลองเปรียบเทียบระหว่างขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม GA, ATS และ ECC แนวเพลง Dance

เพลง Take A Look At Me Now		GA	ECC	ATS
SNR		39.146	33.196	32.775
SIM		1	1	1
	LPF	0.98907	1	1
	Random noise	0.98907	0.8756	0.73721
	Crop	1	1	1
	Resampling	0.98907	1	1
	Gaussian white noise	0.98907	1	1
	DWT	1	1	1
	MP3	1	1	1
	Jitter	1	1	1
BER		0	0	0
	LPF	0.016667	0.016667	0
	Random noise	0.016667	0.23333	0.35
	Crop	0	0.022222	0
	Resampling	0.016667	0.48333	0
	Gaussian white noise	0.016667	0.47778	0
	DWT	0	0	0
	MP3	0	0.46667	0
	Jitter	0	0.47222	0

จากตารางที่ 4-11 แสดงค่า SNR ค่า SIM และค่า BER ของเพลง Take a look at me now แนวเพลง Dance โดยเปรียบเทียบระหว่าง อัลกอริทึม สามแบบคือ อัลกอริทึม ที่ใช้ GA อัลกอริทึม ATS และอัลกอริทึมที่ใช้แก้ไขรหัสความผิดพลาด ECC โดยอัลกอริทึมที่ใช้ GA มีค่า SNR มากที่สุดคือ 39.146 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ECC มีค่า SNR คือ 33.196 และ อัลกอริทึม ATS มีค่า SNR น้อยที่สุดคือ 32.775 ค่า SIM อัลกอริทึม GA มีค่าเฉลี่ยมากที่สุดคือ 0.994535 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ECC มีค่าเฉลี่ย 0.98445 และอัลกอริทึม ATS มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุดคือ 0.967151 ค่า BER อัลกอริทึม GA มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุด คือ 0.00834 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ATS มีค่าเฉลี่ยคือ 0.04375 และอัลกอริทึม ECC มีค่าเฉลี่ยมากที่สุดคือ 0.271527

#### ตารางที่ 4-11 (แนวเพลง Dance ต่อ)

เพลง I'll Get Back To You		GA	ECC	ATS
SNR		40.786	32.791	30.188
SIM		1	1	1
	LPF	1	1	1
	Random noise	1	0.8756	0.73721
	Crop	1	1	1
	Resampling	0.98907	1	1
	Gaussian white noise	0.98907	1	1
	DWT	1	1	1
	MP3	1	1	1
	Jitter	0.97826	1	1
BER		0	0	0
	LPF	0	0.016667	0
	Random noise	0	0.23333	0.35
	Crop	0	0.005556	0
	Resampling	0.016667	0.027778	0
	Gaussian white noise	0.016667	0.016667	0
	DWT	0	0	0
	MP3	0	0	0
	Jitter	0.033333	0.016667	0



จากตารางที่ 4-11 แสดงค่า SNR ค่า SIM และค่า BER ของเพลง I'll get back to you แนวเพลง Dance โดยเปรียบเทียบระหว่าง อัลกอริทึมสามแบบคือ อัลกอริทึมที่ใช้ GA อัลกอริทึม ATS และอัลกอริทึมที่ใช้แก้ไขรหัสความผิดพลาด ECC โดยอัลกอริทึมที่ใช้ GA มีค่า SNR มากที่สุดคือ 40.786 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ECC มีค่า SNR คือ 32.791 และ อัลกอริทึม ATS มีค่า SNR น้อยที่สุดคือ 30.188 ค่า SIM อัลกอริทึม GA มีค่าเฉลี่ยมากที่สุดคือ 0.99495 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ECC มีค่าเฉลี่ย 0.98445 และอัลกอริทึม ATS มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุดคือ 0.967151 ค่า BER อัลกอริทึม GA มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุด คือ 0.008333 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ECC มีค่าเฉลี่ยคือ 0.0395835 และอัลกอริทึม ATS มีค่าเฉลี่ยมากที่สุดคือ 0.04375

#### ตารางที่ 4-11 (แนวเพลง Dance ต่อ)

เพลง In Love with you		GA	ECC	ATS
SNR		37.585	33.507	30.154
SIM		1	1	1
	LPF	1	1	1
	Random noise	1	0.8756	0.794
	Crop	1	1	1
	Resampling	0.96709	1	1
	Gaussian white noise	1	0.98907	1
	DWT	1	1	1
	MP3	1	1	1
	Jitter	1	1	1
BER		0	0	0
	LPF	0	0.022222	0
	Random noise	0	0.23333	0.28333
	Crop	0	0.011111	0
	Resampling	0.05	0.033333	0
	Gaussian white noise	0	0.022222	0
	DWT	0	0	0
	MP3	0	0	0
	Jitter	0	0.027778	0

จากตารางที่ 4-11 แสดงค่า SNR ค่า SIM และค่า BER ของเพลง In love with you แนวเพลง Dance โดยเปรียบเทียบระหว่าง อัลกอริทึมสามแบบคือ อัลกอริทึมที่ใช้ GA อัลกอริทึม ATS และอัลกอริทึมที่ใช้แก้ไขรหัสความผิดพลาด ECC โดยอัลกอริทึมที่ใช้ GA มีค่า SNR มากที่สุดคือ 37.585 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ECC มีค่า SNR คือ 33.507 และ อัลกอริทึม ATS มีค่า SNR น้อยที่สุดคือ 30.154 ค่า SIM อัลกอริทึม GA มีค่าเฉลี่ยมากที่สุดคือ 0.9958 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ECC มีค่าเฉลี่ย 0.983084 และอัลกอริทึม ATS มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุดคือ 0.97425 ค่า BER อัลกอริทึม GA มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุด คือ 0.00625 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ATS มีค่าเฉลี่ยคือ 0.035416 และอัลกอริทึม ECC มีค่าเฉลี่ยมากที่สุดคือ 0.04375

#### ตารางที่ 4-11 (แนวเพลง Dance ต่อ)

เพลง It' too late		GA	ECC	ATS
SNR		40.727	36.75	26.853
SIM		1	1	1
	LPF	1	1	1
	Random noise	0.97802	0.8756	0.89685
	Crop	1	1	1
	Resampling	0.97826	1	1
	Gaussian white noise	0.96709	1	1
	DWT	1	1	1
	MP3	1	1	1
	Jitter	0.97802	1	1
BER		0	0	0
	LPF	0	0.022222	0
	Random noise	0.033333	0.23333	0.15
	Crop	0	0.022222	0
	Resampling	0.033333	0.027778	0
	Gaussian white noise	0.05	0.022222	0
	DWT	0	0	0
	MP3	0	0	0
	Jitter	0.033333	0.011111	0

จากตารางที่ 4-11 แสดงค่า SNR ค่า SIM และค่า BER ของเพลง It' too late แนวเพลง Dance โดยเปรียบเทียบระหว่าง อัลกอริทึมสามแบบคือ อัลกอริทึมที่ใช้ GA อัลกอริทึม ATS และ อัลกอริทึมที่ใช้แก้ไขรหัสความผิดพลาด ECC โดยอัลกอริทึมที่ใช้ GA มีค่า SNR มากที่สุดคือ 40.727 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ECC มีค่า SNR คือ 36.75 และ อัลกอริทึม ATS มีค่า SNR น้อยที่สุดคือ 26.853 ค่า SIM อัลกอริทึม GA มีค่าเฉลี่ยมากที่สุดคือ 0.98767 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ATS มีค่าเฉลี่ย 0.987106 และอัลกอริทึม ECC มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุดคือ 0.984455 ค่า BER อัลกอริทึม GA และ อัลกอริทึม ATS มีค่าเฉลี่ยเท่ากัน คือ 0.01875 และอัลกอริทึม ECC มีค่าเฉลี่ยมากที่สุดคือ 0.042361

ตารางที่ 4-11 (แนวเพลง Dance ต่อ)

เพลง Make It Together		GA	ECC	ATS
SNR		39.168	37.682	28.898
SIM		1	1	1
	LPF	1	1	1
	Random noise	0.98907	0.8756	0.83406
	Crop	1	1	1
	Resampling	1	0.98907	1
	Gaussian white noise	0.98907	1	1
	DWT	1	1	1
	MP3	1	1	1
	Jitter	1	1	1
BER		0	0.005556	0
	LPF	0	0.016667	0
	Random noise	0.016667	0.23333	0.23333
	Crop	0	0.005556	0
	Resampling	0	0.033333	0
	Gaussian white noise	0.016667	0.027778	0
	DWT	0	0.005556	0
	MP3	0	0.005556	0
	Jitter	0	0.011111	0

จากตารางที่ 4-11 แสดงค่า SNR ค่า SIM และค่า BER ของเพลง Make it together แนวเพลง Dance โดยเปรียบเทียบระหว่าง อัลกอริทึมสามแบบคือ อัลกอริทึมที่ใช้ GA อัลกอริทึม ATS และอัลกอริทึมที่ใช้แก้ไขรหัสความผิดพลาด ECC โดยอัลกอริทึมที่ใช้ GA มีค่า SNR มากที่สุดคือ 39.168 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ECC มีค่า SNR คือ 37.682 และ อัลกอริทึม ATS มีค่า SNR น้อยที่สุดคือ 28.898 ค่า SIM อัลกอริทึม GA มีค่าเฉลี่ยมากที่สุดคือ 0.99726 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ECC มีค่าเฉลี่ย 0.983084 และอัลกอริทึม ATS มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุดคือ 0.979258 ค่า BER อัลกอริทึม GA มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุด คือ 0.003704 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ATS มีค่าเฉลี่ย คือ 0.025926 และอัลกอริทึม ECC มีค่าเฉลี่ยมากที่สุดคือ 0.038271

ตารางที่ 4-12 ผลการทดลองเปรียบเทียบระหว่างขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม GA, ATS และ ECC แนวเพลง Country

เพลง American pie		GA	ECC	ATS
SNR		44.8363	40.579	24.822
SIM		1	1	1
	LPF	0.94436	1	1
	Random noise	0.9893	0.8756	0.87228
	Crop	1	1	1
	Resampling	1	1	1
	Gaussian white noise	0.96684	1	1
	DWT	1	1	1
	MP3	1	1	1
	Jitter	0.98907	0.9893	1
BER		0	0	0
	LPF	0.083333	0.033333	0
	Random noise	0.016667	0.23333	0.18333
	Crop	0	0.011111	0
	Resampling	0	0.011111	0
	Gaussian white noise	0.05	0.027778	0
	DWT	0	0	0
	MP3	0	0	0
	Jitter	0.016667	0.038889	0

จากตารางที่ 4-12 แสดงค่า SNR ค่า SIM และค่า BER ของเพลง American pie แนวเพลง Country โดยเปรียบเทียบระหว่างอัลกอริทึมสามแบบคือ อัลกอริทึมที่ใช้ GA อัลกอริทึม ATS และอัลกอริทึมที่ใช้แก้ไขรหัสความผิดพลาด ECC โดยอัลกอริทึมที่ใช้ GA มีค่า SNR มากที่สุดคือ 44.8363 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ECC มีค่า SNR คือ 40.579 และ อัลกอริทึม ATS มีค่า SNR น้อยที่สุดคือ 24.822 ค่า SIM อัลกอริทึม GA มีค่าเฉลี่ยมากที่สุดคือ 0.9861 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ATS มีค่าเฉลี่ย 0.9840 และอัลกอริทึม ECC มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุดคือ 0.9831 ค่า BER อัลกอริทึม GA มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุด คือ 0.0208 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ATS มีค่าเฉลี่ยคือ 0.0229 และอัลกอริทึม ECC มีค่าเฉลี่ยมากที่สุดคือ 0.04444

#### ตารางที่ 4-12 (แนวเพลง Country ต่อ)

เพลง Castles in The Air		GA	ECC	ATS
SNR		41.49	38.599	24.611
SIM		1	1	1
	LPF	0.97826	1	1
	Random noise	0.97826	0.8756	0.87228
	Crop	1	1	1
	Resampling	0.98907	1	1
	Gaussian white noise	1	1	1
	DWT	1	1	1
	MP3	1	1	1
	Jitter	1	1	1
BER		0	0	0
	LPF	0.033333	0.011111	0
	Random noise	0.033333	0.23333	0.18333
	Crop	0	0.011111	0
	Resampling	0.016667	0.027778	0
	Gaussian white noise	0	0.038889	0
	DWT	0	0	0
	MP3	0	0	0
	Jitter	0	0.033333	0



จากตารางที่ 4-12 แสดงค่า SNR ค่า SIM และค่า BER ของเพลง Castles in the air แนวเพลง Country โดยเปรียบเทียบระหว่างอัลกอริทึมสามแบบคือ อัลกอริทึมที่ใช้ GA อัลกอริทึม ATS และอัลกอริทึมที่ใช้แก้ไขรหัสความผิดพลาด ECC โดยอัลกอริทึมที่ใช้ GA มีค่า SNR มากที่สุดคือ 41.49 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ECC มีค่า SNR คือ 38.599 และ อัลกอริทึม ATS มีค่า SNR น้อยที่สุดคือ 24.611 ค่า SIM อัลกอริทึม GA มีค่าเฉลี่ยมากที่สุดคือ 0.9931 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ECC มีค่าเฉลี่ย 0.98445 และอัลกอริทึม ATS มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุดคือ 0.984035 ค่า BER อัลกอริทึม GA มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุด คือ 0.010417 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ATS มีค่าเฉลี่ยคือ 0.022916 และอัลกอริทึม ECC มีค่าเฉลี่ยมากที่สุดคือ 0.04444

ตารางที่ 4-12 (แนวเพลง Country ต่อ)

เพลง Dreidel		GA	ECC	ATS
SNR		44.204	39.775	26.65
SIM		1	1	0.9893
	LPF	0.97826	1	0.9893
	Random noise	1	0.8756	0.87228
	Crop	1	1	0.9893
	Resampling	0.92106	1	1
	Gaussian white noise	0.96684	1	0.9893
	DWT	1	1	0.9893
	MP3	1	1	0.9893
	Jitter	0.96709	1	1
BER		0	0	0.016667
	LPF	0.033333	0.005556	0.016667
	Random noise	0	0.23333	0.18333
	Crop	0	0.005556	0.016667
	Resampling	0.11667	0.061111	0
	Gaussian white noise	0.05	0.033333	0.016667
	DWT	0	0	0.016667
	MP3	0	0	0.016667
	Jitter	0.05	0.033333	0

จากตารางที่ 4-12 แสดงค่า SNR ค่า SIM และค่า BER ของเพลง Dreidel แนวเพลง Country โดยเปรียบเทียบระหว่าง อัลกอริทึมสามแบบคือ อัลกอริทึมที่ใช้ GA อัลกอริทึม ATS และ อัลกอริทึมที่ใช้แก้ไขรหัสความผิดพลาด ECC โดยอัลกอริทึมที่ใช้ GA มีค่า SNR มากที่สุดคือ 44.204 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ECC มีค่า SNR คือ 39.775 และ อัลกอริทึม ATS มีค่า SNR น้อยที่สุดคือ 26.65 ค่า SIM อัลกอริทึม ECC มีค่าเฉลี่ยมากที่สุดคือ 0.986178 รองลงมาคือ อัลกอริทึม GA มีค่าเฉลี่ย 0.981472 และอัลกอริทึม ATS มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุดคือ 0.978676 ค่า BER อัลกอริทึม GA มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุด คือ 0.027778 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ATS มีค่าเฉลี่ย คือ 0.031481 และอัลกอริทึม ECC มีค่าเฉลี่ยมากที่สุดคือ 0.041358

ตารางที่ 4-12 (แนวเพลง Country ต่อ)

เพลง Everyday		GA	ECC	ATS
SNR		41.566	34.329	32.204
SIM		1	1	1
	LPF	0.95553	1	1
	Random noise	0.97895	0.8756	0.70711
	Crop	1	1	1
	Resampling	0.93356	1	1
	Gaussian white noise	0.97826	1	1
	DWT	1	1	1
	MP3	1	1	1
	Jitter	0.9893	1	1
BER		0	0	0
	LPF	0.066667	0.022222	0
	Random noise	0.033333	0.23333	0.38333
	Crop	0	0	0
	Resampling	0.1	0.016667	0
	Gaussian white noise	0.033333	0.022222	0
	DWT	0	0	0
	MP3	0	0	0
	Jitter	0.016667	0.022222	0

จากตารางที่ 4-12 แสดงค่า SNR ค่า SIM และค่า BER ของเพลง Everyday แนวเพลง Country โดยเปรียบเทียบระหว่างอัลกอริทึมสามแบบคือ อัลกอริทึมที่ใช้ GA อัลกอริทึม ATS และอัลกอริทึมที่ใช้แก้ไขรหัสความผิดพลาด ECC โดยอัลกอริทึมที่ใช้ GA มีค่า SNR มากที่สุดคือ 41.566 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ECC มีค่า SNR คือ 34.329 และ อัลกอริทึม ATS มีค่า SNR น้อยที่สุดคือ 32.204 ค่า SIM อัลกอริทึม ECC มีค่าเฉลี่ยมากที่สุดคือ 0.98445 รองลงมาคือ อัลกอริทึม GA มีค่าเฉลี่ย 0.97945 และอัลกอริทึม ATS มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุดคือ 0.963389 ค่า BER อัลกอริทึม GA มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุด คือ 0.03125 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ECC มีค่าเฉลี่ยคือ 0.039583 และอัลกอริทึม ATS มีค่าเฉลี่ยมากที่สุดคือ 0.049176

#### ตารางที่ 4-12 (แนวเพลง Country ต่อ)

เพลง Winter wood		GA	ECC	ATS
SNR		41.724	38.262	27.015
SIM		1	1	1
	LPF	0.90889	1	1
	Random noise	0.89685	0.8756	0.794
	Crop	0.98907	1	1
	Resampling	0.9893	1	1
	Gaussian white noise	0.94409	0.98907	1
	DWT	1	1	1
	MP3	1	1	1
	Jitter	0.97802	0.98907	1
BER		0	0	0
	LPF	0.13333	0.016667	0
	Random noise	0.15	0.23333	0.28333
	Crop	0.016667	0.005556	0
	Resampling	0.016667	0.027778	0
	Gaussian white noise	0.083333	0.055556	0
	DWT	0	0	0
	MP3	0	0	0
	Jitter	0.033333	0.033333	0

จากตารางที่ 4-12 แสดงค่า SNR ค่า SIM และค่า BER ของเพลง Winter wood แนวเพลง Country โดยเปรียบเทียบระหว่างอัลกอริทึมสามแบบคือ อัลกอริทึมที่ใช้ GA อัลกอริทึม ATS และอัลกอริทึมที่ใช้แก้ไขรหัสความผิดพลาด ECC โดยอัลกอริทึมที่ใช้ GA มีค่า SNR มากที่สุดคือ 41.724 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ECC มีค่า SNR คือ 38.262 และ อัลกอริทึม ATS มีค่า SNR น้อยที่สุดคือ 27.015 ค่า SIM อัลกอริทึม ECC มีค่าเฉลี่ยมากที่สุดคือ 0.981718 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ATS มีค่าเฉลี่ย 0.97425 และอัลกอริทึม GA มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุดคือ 0.9632745 ค่า BER อัลกอริทึม ATS มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุด คือ 0.035416 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ECC มีค่าเฉลี่ยคือ 0.046528 และอัลกอริทึม GA มีค่าเฉลี่ยมากที่สุดคือ 0.054166

ตารางที่ 4-13 ผลการทดลองเปรียบเทียบระหว่างขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม GA, ATS และ ECC แนวเพลง Classic

เพลง Liszt		GA	ECC	ATS
SNR		45.223	42.07	28.617
SIM		1	1	1
	LPF	0.97802	1	1
	Random noise	0.9325	0.8756	0.80757
	Crop	1	1	1
	Resampling	0.95553	0.98907	1
	Gaussian white noise	0.97802	0.98907	1
	DWT	1	1	1
	MP3	1	1	1
	Jitter	0.97802	1	1
BER		0	0	0
	LPF	0.033333	0.027778	0
	Random noise	0.1	0.23333	0.26667
	Crop	0	0	0
	Resampling	0.066667	0.044444	0
	Gaussian white noise	0.033333	0.044444	0
	DWT	0	0	0
	MP3	0	0	0
	Jitter	0.033333	0.072222	0

จากตารางที่ 4-13 แสดงค่า SNR ค่า SIM และค่า BER ของเพลง Liszt แนวเพลง Classic โดยเปรียบเทียบระหว่าง อัลกอริทึมสามแบบคือ อัลกอริทึมที่ใช้ GA อัลกอริทึม ATS และ อัลกอริทึมที่ใช้แก้ไขรหัสความผิดพลาด ECC โดยอัลกอริทึมที่ใช้ GA มีค่า SNR มากที่สุดคือ 45.223 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ECC มีค่า SNR คือ 42.07 และ อัลกอริทึม ATS มีค่า SNR น้อยที่สุดคือ 28.617 ค่า SIM อัลกอริทึม ECC มีค่าเฉลี่ยมากที่สุดคือ 0.981718 รองลงมาคือ อัลกอริทึม GA มีค่าเฉลี่ย 0.97776 และอัลกอริทึม ATS มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุดคือ 0.975946 ค่า BER อัลกอริทึม GA มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุด คือ 0.033333 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ATS มีค่าเฉลี่ย คือ 0.033334 และอัลกอริทึม ECC มีค่าเฉลี่ยมากที่สุดคือ 0.052777

ตารางที่ 4-13 (แนวเพลง Classic ต่อ)

เพลง Chopin		GA	ECC	ATS
SNR		44.403	32.222	32.012
SIM		1	1	1
	LPF	0.94436	0.98907	1
	Random noise	0.9893	0.8756	0.85973
	Crop	0.98907	1	1
	Resampling	0.96684	1	1
	Gaussian white noise	0.96684	1	1
	DWT	1	1	1
	MP3	1	1	1
	Jitter	0.95553	1	1
BER		0	0	0
	LPF	0.083333	0.022222	0
	Random noise	0.016667	0.23333	0.2
	Crop	0.016667	0.005556	0
	Resampling	0.05	0.033333	0
	Gaussian white noise	0.05	0.022222	0
	DWT	0	0	0
	MP3	0	0	0
	Jitter	0.066667	0.027778	0



จากตารางที่ 4-13 แสดงค่า SNR ค่า SIM และค่า BER ของเพลง Chopin แนวเพลง Classic โดยเปรียบเทียบระหว่าง อัลกอริทึมสามแบบคือ อัลกอริทึมที่ใช้ GA อัลกอริทึม ATS และ อัลกอริทึมที่ใช้แก้ไขรหัสความผิดพลาด ECC โดยอัลกอริทึมที่ใช้ GA มีค่า SNR มากที่สุดคือ 44.403 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ECC มีค่า SNR คือ 32.222 และ อัลกอริทึม ATS มีค่า SNR น้อยที่สุดคือ 32.012 ค่า SIM อัลกอริทึม ECC มีค่าเฉลี่ยมากที่สุดคือ 0.983084 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ATS มีค่าเฉลี่ย 0.982466 และอัลกอริทึม GA มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุดคือ 0.9764925 ค่า BER อัลกอริทึม ATS มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุด คือ 0.025 รองลงมาคือ อัลกอริทึม GA มีค่าเฉลี่ยคือ 0.03125 และอัลกอริทึม ECC มีค่าเฉลี่ยมากที่สุดคือ 0.048611

ตารางที่ 4-13 (แนวเพลง Classic ต่อ)

เพลง Brahms		GA	ECC	ATS
SNR		45.779	44.086	26.508
SIM		1	1	1
	LPF	0.91134	1	1
	Random noise	0.97802	0.8756	0.87228
	Crop	1	1	1
	Resampling	0.97802	0.9893	1
	Gaussian white noise	0.94409	0.97826	1
	DWT	1	1	1
	MP3	1	1	1
	Jitter	0.97802	1	1
BER		0	0	0
	LPF	0.13333	0.061111	0
	Random noise	0.033333	0.23333	0.18333
	Crop	0	0.005556	0
	Resampling	0.033333	0.077778	0
	Gaussian white noise	0.083333	0.13889	0
	DWT	0	0	0
	MP3	0	0	0
	Jitter	0.033333	0.077778	0

จากตารางที่ 4-13 แสดงค่า SNR ค่า SIM และค่า BER ของเพลง Brahms แนวเพลง Classic โดยเปรียบเทียบระหว่างอัลกอริทึมสามแบบคือ อัลกอริทึมที่ใช้ GA อัลกอริทึม ATS และอัลกอริทึมที่ใช้แก้ไขรหัสความผิดพลาด ECC โดยอัลกอริทึมที่ใช้ GA มีค่า SNR มากที่สุดคือ 45.779 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ECC มีค่า SNR คือ 44.086 และ อัลกอริทึม ATS มีค่า SNR น้อยที่สุดคือ 26.508 ค่า SIM อัลกอริทึม ECC มีค่าเฉลี่ยมากที่สุดคือ 0.984035 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ATS มีค่าเฉลี่ย 0.980395 และอัลกอริทึม GA มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุดคือ 0.97368625 ค่า BER อัลกอริทึม ATS มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุด คือ 0.022916 รองลงมาคือ อัลกอริทึม GA มีค่าเฉลี่ย คือ 0.039583 และอัลกอริทึม ECC มีค่าเฉลี่ยมากที่สุดคือ 0.74305

ตารางที่ 4-13 (แนวเพลง Classic ต่อ)

เพลง Adagio Beethoven		GA	ECC	ATS
SNR		46.477	43.984	25.766
SIM		1	1	1
	LPF	0.97826	0.98907	1
	Random noise	0.9893	0.8756	0.87228
	Crop	1	1	1
	Resampling	0.9678	1	1
	Gaussian white noise	0.97895	0.98907	1
	DWT	1	1	1
	MP3	1	1	1
	Jitter	0.96709	0.97826	1
BER		0	0.005556	0
	LPF	0.033333	0.033333	0
	Random noise	0.016667	0.23333	0.18333
	Crop	0	0.011111	0
	Resampling	0.05	0.072222	0
	Gaussian white noise	0.033333	0.11111	0
	DWT	0	0	0
	MP3	0	0.005556	0
	Jitter	0.05	0.077778	0

จากตารางที่ 4-13 แสดงค่า SNR ค่า SIM และค่า BER ของเพลง Adagio Beethoven แนวเพลง Classic โดยเปรียบเทียบระหว่างอัลกอริทึมสามแบบคือ อัลกอริทึมที่ใช้ GA อัลกอริทึม ATS และอัลกอริทึมที่ใช้แก้ไขรบกวนความผิดพลาด ECC โดยอัลกอริทึมที่ใช้ GA มีค่า SNR มากที่สุดคือ 46.477 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ECC มีค่า SNR คือ 43.984 และ อัลกอริทึม ATS มีค่า SNR น้อยที่สุดคือ 25.766 ค่า SIM อัลกอริทึม GA มีค่าเฉลี่ยมากที่สุดคือ 0.985175 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ATS มีค่าเฉลี่ย 0.984035 และอัลกอริทึม ECC มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุดคือ 0.979 ค่า BER อัลกอริทึม ATS มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ อัลกอริทึม GA คือ 0.0237 และอัลกอริทึม ECC มีค่าเฉลี่ยมากที่สุดคือ 0.061111

ตารางที่ 4-13 (แนวเพลง Classic ต่อ)

เพลง Arioso Bach		GA	ECC	ATS
SNR		52.152	44.204	24.87
SIM		1	1	1
	LPF	0.96684	1	1
	Random noise	0.97802	0.8756	0.84699
	Crop	1	1	1
	Resampling	0.93278	1	1
	Gaussian white noise	0.93278	0.98907	1
	DWT	1	1	1
	MP3	1	1	1
	Jitter	1	0.96709	1
BER		0	0.005556	0
	LPF	0.05	0.055556	0
	Random noise	0.033333	0.23333	0.21667
	Crop	0	0.005556	0
	Resampling	0.1	0.038889	0
	Gaussian white noise	0.1	0.077778	0
	DWT	0	0	0
	MP3	0	0.005556	0
	Jitter	0	0.1	0

จากตารางที่ 4-13 แสดงค่า SNR ค่า SIM และค่า BER ของเพลง Arioso Bach แนวเพลง Classic โดยเปรียบเทียบระหว่าง อัลกอริทึมสามแบบคือ อัลกอริทึมที่ใช้ GA อัลกอริทึม ATS และ อัลกอริทึมที่ใช้แก้ไขรหัสความผิดพลาด ECC โดยอัลกอริทึมที่ใช้ GA มีค่า SNR มากที่สุดคือ 52.152 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ECC มีค่า SNR คือ 44.204 และ อัลกอริทึม ATS มีค่า SNR น้อยที่สุดคือ 24.87 ค่า SIM อัลกอริทึม ATS มีค่าเฉลี่ยมากที่สุดคือ 0.980874 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ECC มีค่าเฉลี่ย 0.97897 และอัลกอริทึม GA มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุดคือ 0.9763025 ค่า BER อัลกอริทึม ATS มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุด คือ 0.024074 รองลงมาคือ อัลกอริทึม GA มีค่าเฉลี่ยคือ 0.031481 และอัลกอริทึม ECC มีค่าเฉลี่ยมากที่สุดคือ 0.058025

ตารางที่ 4-14 ผลการทดลองเปรียบเทียบระหว่างขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม GA, ATS และ ECC แนวเพลง Alternative

เพลง Announcement service public		GA	ECC	ATS
SNR		41.493	36.493	28.083
SIM		1	1	1
	LPF	0.98907	1	1
	Random noise	0.97802	0.8756	0.82092
	Crop	1	1	1
	Resampling	0.94511	0.9893	1
	Gaussian white noise	0.97826	1	1
	DWT	1	1	1
	MP3	1	1	1
	Jitter	0.9893	0.98907	1
BER		0	0	0
	LPF	0.016667	0.027778	0
	Random noise	0.033333	0.23333	0.25
	Crop	0	0.005556	0
	Resampling	0.083333	0.044444	0
	Gaussian white noise	0.033333	0.038889	0
	DWT	0	0	0
	MP3	0	0	0
	Jitter	0.016667	0.033333	0

จากตารางที่ 4-14 แสดงค่า SNR ค่า SIM และค่า BER ของเพลง Announcement service public แนวเพลง Alternative โดยเปรียบเทียบระหว่างอัลกอริทึมสามแบบคือ อัลกอริทึมที่ใช้ GA อัลกอริทึม ATS และอัลกอริทึมที่ใช้แก้ไขรหัสความผิดพลาด ECC โดยอัลกอริทึมที่ใช้ GA มีค่า SNR มากที่สุดคือ 41.493 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ECC มีค่า SNR คือ 36.493 และอัลกอริทึม ATS มีค่า SNR น้อยที่สุดคือ 28.083 ค่า SIM อัลกอริทึม GA มีค่าเฉลี่ยมากที่สุดคือ 0.98497 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ECC มีค่าเฉลี่ย 0.981746 และอัลกอริทึม ATS มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุดคือ 0.977615 ค่า BER อัลกอริทึม GA มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุด คือ 0.022917 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ATS มีค่าเฉลี่ยคือ 0.03125 และอัลกอริทึม ECC มีค่าเฉลี่ยมากที่สุดคือ 0.047916

ตารางที่ 4-14 (แนวเพลง Alternative ต่อ)

เพลง Qwerty (studio version)		GA	ECC	ATS
SNR		38.592	33.954	28.052
SIM		1	1	1
	LPF	0.96684	1	1
	Random noise	0.97826	0.8756	0.794
	Crop	1	1	1
	Resampling	0.97826	1	1
	Gaussian white noise	0.97802	0.97826	1
	DWT	1	1	1
	MP3	1	1	1
	Jitter	0.97802	1	1
BER		0	0	0
	LPF	0.05	0.022222	0
	Random noise	0.033333	0.23333	0.28333
	Crop	0	0	0
	Resampling	0.033333	0.022222	0
	Gaussian white noise	0.033333	0.05	0
	DWT	0	0	0
	MP3	0	0	0
	Jitter	0.033333	0.016667	0



จากตารางที่ 4-14 แสดงค่า SNR ค่า SIM และค่า BER ของเพลง Qwerty (studio version) แนวเพลง Alternative โดยเปรียบเทียบระหว่างอัลกอริทึมสามแบบคือ อัลกอริทึมที่ใช้ GA อัลกอริทึม ATS และอัลกอริทึมที่ใช้แก้ไขรหัสความผิดพลาด ECC โดยอัลกอริทึมที่ใช้ GA มีค่า SNR มากที่สุดคือ 38.592 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ECC มีค่า SNR คือ 33.594 และอัลกอริทึม ATS มีค่า SNR น้อยที่สุดคือ 28.052 ค่า SIM อัลกอริทึม GA มีค่าเฉลี่ยมากที่สุดคือ 0.984925 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ECC มีค่าเฉลี่ย 0.981733 และอัลกอริทึม ATS มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุดคือ 0.97425 ค่า BER อัลกอริทึม GA มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุด คือ 0.022917 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ATS มีค่าเฉลี่ย คือ 0.035416 และอัลกอริทึม ECC มีค่าเฉลี่ยมากที่สุดคือ 0.043055

ตารางที่ 4-14 (แนวเพลง Alternative ต่อ)

เพลง And One		GA	ECC	ATS
SNR		43.022	24.227	26.311
SIM		1	1	1
	LPF	1	1	1
	Random noise	0.53161	0.89056	0.84699
	Crop	1	1	1
	Resampling	1	0.8756	1
	Gaussian white noise	1	0.8756	1
	DWT	1	1	1
	MP3	1	0.8756	1
	Jitter	0.9893	0.8756	1
BER		0	0	0
	LPF	0	0	0
	Random noise	0.55	0.18889	0.21667
	Crop	0	0	0
	Resampling	0	0.23333	0
	Gaussian white noise	0	0.23333	0
	DWT	0	0	0
	MP3	0	0.23333	0
	Jitter	0.016667	0.23333	0

จากตารางที่ 4-14 แสดงค่า SNR ค่า SIM และค่า BER ของเพลง And one แนวเพลง Alternative โดยเปรียบเทียบระหว่างอัลกอริทึมสามแบบคือ อัลกอริทึมที่ใช้ GA อัลกอริทึม ATS และอัลกอริทึมที่ใช้แก้ไขรหัสความผิดพลาด ECC โดยอัลกอริทึมที่ใช้ GA มีค่า SNR มากที่สุดคือ 43.022 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ATS มีค่า SNR คือ 26.311 และ อัลกอริทึม ECC มีค่า SNR น้อยที่สุดคือ 26.311 ค่า SIM อัลกอริทึม ATS มีค่าเฉลี่ยมากที่สุดคือ 0.980874 รองลงมาคือ อัลกอริทึม GA มีค่าเฉลี่ย 0.94013375 และอัลกอริทึม ECC มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุดคือ 0.924125 ค่า BER อัลกอริทึม ATS มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุด คือ 0.02784 รองลงมาคือ อัลกอริทึม GA มีค่าเฉลี่ย คือ 0.070833 และอัลกอริทึม ECC มีค่าเฉลี่ยมากที่สุดคือ 0.140276

ตารางที่ 4-14 (แนวเพลง Alternative ต่อ)

เพลง Sold my soul to your mama		GA	ECC	ATS
SNR		38.417	30.754	29.124
SIM		1	1	1
	LPF	0.98907	1	1
	Random noise	0.98907	0.8756	0.794
	Crop	1	1	1
	Resampling	0.98907	1	1
	Gaussian white noise	1	1	1
	DWT	1	1	1
	MP3	1	1	1
	Jitter	1	1	1
BER		0	0	0
	LPF	0.016667	0.011111	0
	Random noise	0.016667	0.23333	0.28333
	Crop	0	0.011111	0
	Resampling	0.016667	0.005556	0
	Gaussian white noise	0	0.022222	0
	DWT	0	0	0
	MP3	0	0	0
	Jitter	0	0.022222	0

จากตารางที่ 4-14 แสดงค่า SNR ค่า SIM และค่า BER ของเพลง Sold my soul to your mama แนวเพลง Alternative โดยเปรียบเทียบระหว่างอัลกอริทึมสามแบบคือ อัลกอริทึมที่ใช้ GA อัลกอริทึม ATS และอัลกอริทึมที่ใช้แก้ไขรหัสความผิดพลาด ECC โดยอัลกอริทึมที่ใช้ GA มีค่า SNR มากที่สุดคือ 38.417 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ECC มีค่า SNR คือ 30.754 และ อัลกอริทึม ATS มีค่า SNR น้อยที่สุดคือ 29.124 ค่า SIM อัลกอริทึม GA มีค่าเฉลี่ยมากที่สุดคือ 0.99590125 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ECC มีค่าเฉลี่ย 0.98445 และอัลกอริทึม ATS มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุดคือ 0.97425 ค่า BER อัลกอริทึม GA มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุด คือ 0.00625 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ATS มีค่าเฉลี่ย คือ 0.035416 และอัลกอริทึม ECC มีค่าเฉลี่ยมากที่สุดคือ 0.038194

ตารางที่ 4-14 (แนวเพลง Alternative ต่อ)

เพลง Dedicated (demo_1999)		GA	ECC	ATS
SNR		42.464	35.509	33.22
SIM		1	1	1
	LPF	0.96709	0.98907	1
	Random noise	0.90889	0.8756	0.73721
	Crop	1	1	1
	Resampling	0.96684	0.98907	1
	Gaussian white noise	0.97802	0.98907	1
	DWT	1	1	1
	MP3	1	1	1
	Jitter	0.98907	0.98907	1
BER		0	0	0
	LPF	0.05	0.027778	0
	Random noise	0.13333	0.23333	0.35
	Crop	0	0	0
	Resampling	0.05	0.038889	0
	Gaussian white noise	0.033333	0.044444	0
	DWT	0	0	0
	MP3	0	0	0
	Jitter	0.016667	0.055556	0

จากตารางที่ 4-14 แสดงค่า SNR ค่า SIM และค่า BER ของเพลง Sold my soul to your mama แนวเพลง Alternative โดยเปรียบเทียบระหว่างอัลกอริทึมสามแบบคือ อัลกอริทึมที่ใช้ GA อัลกอริทึม ATS และอัลกอริทึมที่ใช้แก้ไขรหัสความผิดพลาด ECC โดยอัลกอริทึมที่ใช้ GA มีค่า SNR มากที่สุดคือ 42.464 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ECC มีค่า SNR คือ 35.509 และ อัลกอริทึม ATS มีค่า SNR น้อยที่สุดคือ 33.22 ค่า SIM อัลกอริทึม ECC มีค่าเฉลี่ยมากที่สุดคือ 0.978985 รองลงมาคือ อัลกอริทึม GA มีค่าเฉลี่ย 0.97623875 และอัลกอริทึม ATS มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุดคือ 0.967151 ค่า BER อัลกอริทึม GA มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุดคือ 0.035416 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ATS มีค่าเฉลี่ย คือ 0.04375 และอัลกอริทึม ECC มีค่าเฉลี่ยมากที่สุดคือ 0.05

ตารางที่ 4-15 ผลการทดลองเปรียบเทียบระหว่างขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม GA, ATS และ ECC แนวเพลง Acoustic

เพลง Day		GA	ECC	ATS
SNR		43.421	37.14	30.17
SIM		1	1	1
	LPF	0.98907	1	1
	Random noise	1	0.8756	0.78019
	Crop	1	1	1
	Resampling	0.97802	1	1
	Gaussian white noise	0.97802	1	1
	DWT	1	1	1
	MP3	1	1	1
	Jitter	1	1	1
BER		0	0	0
	LPF	0.016667	0.033333	0
	Random noise	0	0.23333	0.3
	Crop	0	0.005556	0
	Resampling	0.033333	0.033333	0
	Gaussian white noise	0.033333	0.022222	0
	DWT	0	0	0
	MP3	0	0	0
	Jitter	0	0.033333	0

จากตารางที่ 4-15 แสดงค่า SNR ค่า SIM และค่า BER ของเพลง Day แนวเพลง Acoustic โดยเปรียบเทียบระหว่างอัลกอริทึมสามแบบคือ อัลกอริทึมที่ใช้ GA อัลกอริทึม ATS และอัลกอริทึมที่ใช้แก้ไขรหัสความผิดพลาด ECC โดยอัลกอริทึมที่ใช้ GA มีค่า SNR มากที่สุดคือ 43.421 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ECC มีค่า SNR คือ 37.14 และ อัลกอริทึม ATS มีค่า SNR น้อยที่สุดคือ 30.17 ค่า SIM อัลกอริทึม GA มีค่าเฉลี่ยมากที่สุดคือ 0.99313875 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ECC มีค่าเฉลี่ย 0.98445 และอัลกอริทึม ATS มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุดคือ 0.972524 ค่า BER อัลกอริทึม GA มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุด คือ 0.01417 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ATS มีค่าเฉลี่ย คือ 0.0375 และอัลกอริทึม ECC มีค่าเฉลี่ยมากที่สุดคือ 0.045138

ตารางที่ 4-15 (แนวเพลง Alternative ต่อ)

เพลง Dreams		GA	ECC	ATS
SNR		47.086	44.129	24.379
SIM		0.98907	1	0.98907
	LPF	0.97826	1	1
	Random noise	0.98907	0.8756	0.75181
	Crop	0.98907	1	0.97802
	Resampling	0.94436	1	0.98907
	Gaussian white noise	0.97802	0.97826	1
	DWT	0.98907	1	0.98907
	MP3	0.98907	1	0.98907
	Jitter	0.97802	1	0.96709
BER		0.016667	0.011111	0.016667
	LPF	0.033333	0.066667	0
	Random noise	0.016667	0.23333	0.33333
	Crop	0.016667	0.022222	0.033333
	Resampling	0.083333	0.055556	0.016667
	Gaussian white noise	0.033333	0.055556	0
	DWT	0.016667	0	0.016667
	MP3	0.016667	0.011111	0.016667
	Jitter	0.033333	0.077778	0.05



จากตารางที่ 4-15 แสดงค่า SNR ค่า SIM และค่า BER ของเพลง Dreams แนวเพลง Acoustic โดยเปรียบเทียบระหว่างอัลกอริทึมสามแบบคือ อัลกอริทึมที่ใช้ GA อัลกอริทึม ATS และอัลกอริทึมที่ใช้แก้ไขรหัสความผิดพลาด ECC โดยอัลกอริทึมที่ใช้ GA มีค่า SNR มากที่สุดคือ 47.086 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ECC มีค่า SNR คือ 44.129 และ อัลกอริทึม ATS มีค่า SNR น้อยที่สุดคือ 24.379 ค่า SIM อัลกอริทึม ECC มีค่าเฉลี่ยมากที่สุดคือ 0.987362 รองลงมาคือ อัลกอริทึม GA มีค่าเฉลี่ย 0.980446 และอัลกอริทึม ATS มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุดคือ 0.961467 ค่า BER อัลกอริทึม GA มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุด คือ 0.02963 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ATS มีค่าเฉลี่ย คือ 0.053703 และอัลกอริทึม ECC มีค่าเฉลี่ยมากที่สุดคือ 0.059259

ตารางที่ 4-15 (แนวเพลง Alternative ต่อ)

เพลง Morning Smile		GA	ECC	ATS
SNR		46.082	42.858	27.774
SIM		1	1	1
	LPF	0.97826	0.9893	1
	Random noise	0.97802	0.8756	0.88465
	Crop	1	1	1
	Resampling	0.96684	1	1
	Gaussian white noise	0.97802	0.98907	0.98907
	DWT	1	1	1
	MP3	1	1	1
	Jitter	0.9893	1	1
BER		0	0.005556	0
	LPF	0.033333	0.038889	0
	Random noise	0.033333	0.23333	0.16667
	Crop	0	0.005556	0
	Resampling	0.05	0.027778	0
	Gaussian white noise	0.033333	0.077778	0.016667
	DWT	0	0	0
	MP3	0	0.005556	0
	Jitter	0.016667	0.077778	0

จากตารางที่ 4-15 แสดงค่า SNR ค่า SIM และค่า BER ของเพลง Smile แนวเพลง Acoustic โดยเปรียบเทียบระหว่างอัลกอริทึมสามแบบคือ อัลกอริทึมที่ใช้ GA อัลกอริทึม ATS และอัลกอริทึมที่ใช้แก้ไขรหัสความผิดพลาด ECC โดยอัลกอริทึมที่ใช้ GA มีค่า SNR มากที่สุดคือ 46.082 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ECC มีค่า SNR คือ 42.858 และ อัลกอริทึม ATS มีค่า SNR น้อยที่สุดคือ 27.774 ค่า SIM อัลกอริทึม GA มีค่าเฉลี่ยมากที่สุดคือ 0.987827 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ATS มีค่าเฉลี่ยคือ 0.985969 และอัลกอริทึม ECC มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุดคือ 0.983774 ค่า BER อัลกอริทึม GA มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุด คือ 0.018518 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ATS มีค่าเฉลี่ย คือ 0.020371 และอัลกอริทึม ECC มีค่าเฉลี่ยมากที่สุดคือ 0.052469

#### ตารางที่ 4-15 (แนวเพลง Alternative ต่อ)

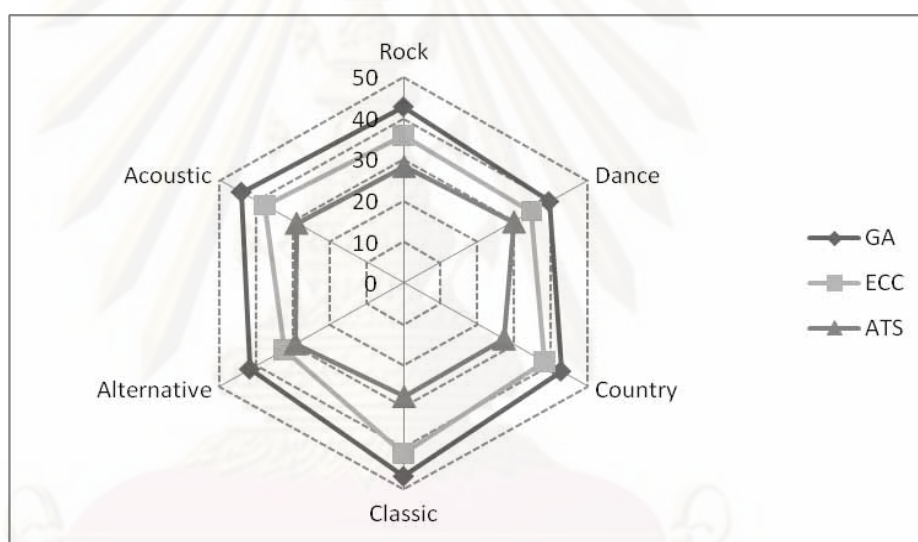
เพลง Patel Dori		GA	ECC	ATS
SNR		43.315	32.167	31.737
SIM		1	1	1
	LPF	0.96684	0.98907	1
	Random noise	0.9325	0.8756	0.83406
	Crop	1	1	1
	Resampling	0.96684	1	1
	Gaussian white noise	0.97802	0.98907	1
	DWT	1	1	1
	MP3	1	1	1
	Jitter	0.95553	1	1
BER		0	0	0
	LPF	0.05	0.044444	0
	Random noise	0.1	0.23333	0.23333
	Crop	0	0.022222	0
	Resampling	0.05	0.027778	0
	Gaussian white noise	0.033333	0.044444	0
	DWT	0	0	0
	MP3	0	0	0
	Jitter	0.066667	0.027778	0

จากตารางที่ 4-15 แสดงค่า SNR ค่า SIM และค่า BER ของเพลง Patel Dori แนวเพลง Acoustic โดยเปรียบเทียบระหว่างอัลกอริทึมสามแบบคือ อัลกอริทึมที่ใช้ GA อัลกอริทึม ATS และอัลกอริทึมที่ใช้แก้ไขรหัสความผิดพลาด ECC โดยอัลกอริทึมที่ใช้ GA มีค่า SNR มากที่สุดคือ 43.315 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ECC มีค่า SNR คือ 32.167 และ อัลกอริทึม ATS มีค่า SNR น้อยที่สุดคือ 31.737 ค่า SIM อัลกอริทึม ECC มีค่าเฉลี่ยมากที่สุดคือ 0.983749 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ATS มีค่าเฉลี่ยคือ 0.985162 และอัลกอริทึม GA มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุดคือ 0.977748 ค่า BER อัลกอริทึม ATS มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุด คือ 0.025926 รองลงมาคือ อัลกอริทึม GA มีค่าเฉลี่ยคือ 0.033333 และอัลกอริทึม ECC มีค่าเฉลี่ยมากที่สุดคือ 0.044444

ตารางที่ 4-15 (แนวเพลง Alternative ต่อ)

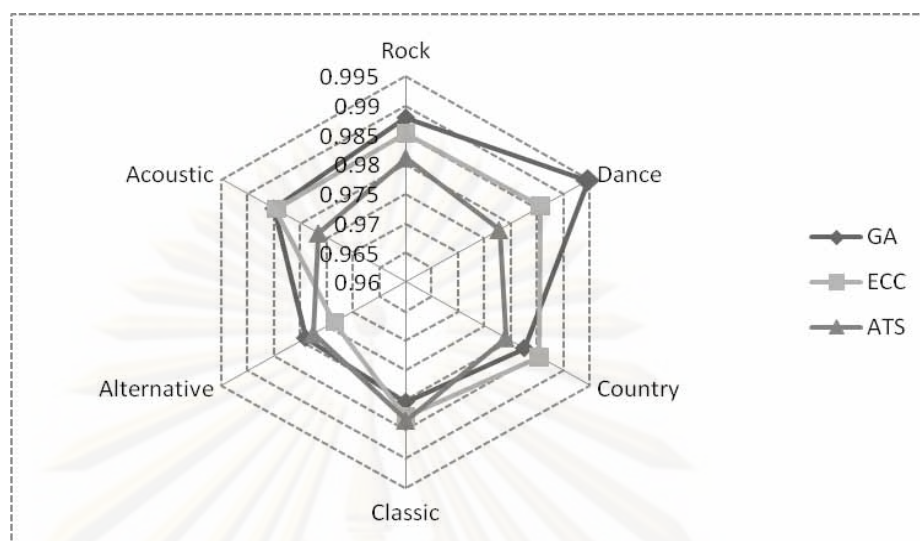
เพลง Sanpomichi		GA	ECC	ATS
SNR		40.173	32.599	31.663
SIM		1	1	1
	LPF	0.96684	1	1
	Random noise	0.9325	0.8756	0.80757
	Crop	0.98907	1	1
	Resampling	0.98907	1	1
	Gaussian white noise	1	1	1
	DWT	1	1	1
	MP3	1	1	1
	Jitter	0.98907	1	1
BER		0	0	0
	LPF	0.05	0.016667	0
	Random noise	0.1	0.23333	0.26667
	Crop	0.016667	0.005556	0
	Resampling	0.016667	0.011111	0
	Gaussian white noise	0	0.033333	0
	DWT	0	0	0
	MP3	0	0	0
	Jitter	0.016667	0.033333	0

จากตารางที่ 4-15 แสดงค่า SNR ค่า SIM และค่า BER ของเพลง Sanpomichi แนวเพลง Acoustic โดยเปรียบเทียบระหว่างอัลกอริทึมสามแบบคือ อัลกอริทึมที่ใช้ GA อัลกอริทึม ATS และอัลกอริทึมที่ใช้แก้ไขรหัสความผิดพลาด ECC โดยอัลกอริทึมที่ใช้ GA มีค่า SNR มากที่สุดคือ 40.173 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ECC มีค่า SNR คือ 32.599 และ อัลกอริทึม ATS มีค่า SNR น้อยที่สุดคือ 31.663 ค่า SIM อัลกอริทึม ECC มีค่าเฉลี่ยมากที่สุดคือ 0.98445 รองลงมาคือ อัลกอริทึม GA มีค่าเฉลี่ยคือ 0.983319 และอัลกอริทึม ATS มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุดคือ 0.975946 ค่า BER อัลกอริทึม GA มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุด คือ 0.025 รองลงมาคือ อัลกอริทึม ATS มีค่าเฉลี่ย คือ 0.033334 และอัลกอริทึม ECC มีค่าเฉลี่ยมากที่สุดคือ 0.041666



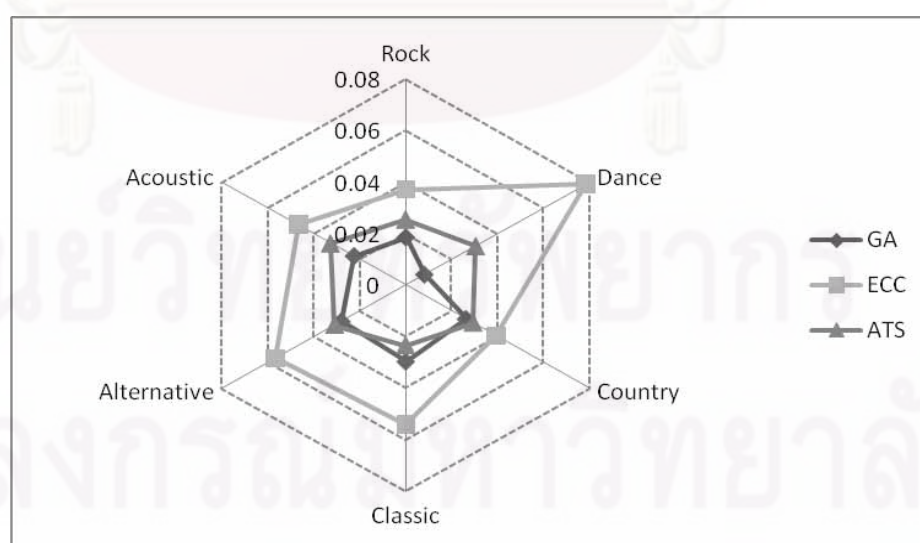
ภาพที่ 4-1 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของ SNR ของอัลกอริทึมที่ใช้ GA อัลกอริทึม ECC และ อัลกอริทึม ATS

จากภาพที่ 4-1 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย SNR ของอัลกอริทึมที่ใช้ GA มีค่าเฉลี่ยของ SNR สูงที่สุดทุกแนวเพลง รองลงมาคือ อัลกอริทึม ECC และอัลกอริทึม ATS มีค่าเฉลี่ยของ SNR น้อยที่สุดในทุกแนวเพลง ค่า SNR มีค่าสูงแสดงว่าคุณภาพของเสียงเพลงที่ผ่านการฟังฉายน้ำแล้วไม่มีความแตกต่างกันหรือไม่สามารถแยกแยะความแตกต่างได้



ภาพที่ 4-2 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของ SIM ของอัลกอริทึมที่ใช้ GA อัลกอริทึม ECC และ อัลกอริทึม ATS

จากภาพที่ 4-2 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย SIM อัลกอริทึม GA มีค่าเฉลี่ยของ SIM สูงที่สุด ที่แนวเพลง Dance, Rock และ Alternative และ อัลกอริทึม ECC มีค่าเฉลี่ย SIM สูงที่สุดในแนวเพลง Country และอัลกอริทึม ATS มีค่าเฉลี่ย SIM สูงที่สุดในแนวเพลง Classic ส่วนแนวเพลง Acoustic มีค่าเฉลี่ย SIM สูงที่สุดสองอัลกอริทึม คือ อัลกอริทึม GA และ อัลกอริทึม ECC



ภาพที่ 4-3 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของ BER ของอัลกอริทึมที่ใช้ GA อัลกอริทึม ECC และ อัลกอริทึม ATS



จากภาพที่ 4-3 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของ BER อัลกอริทึม GA มีค่าเฉลี่ย BER น้อยที่สุดคือ แนวเพลง Dance, Rock, Acoustic, Alternative และ Country และ อัลกอริทึม ATS มีค่าเฉลี่ย BER น้อยที่สุดคือ แนวเพลง Classic และ อัลกอริทึม ECC มีค่าเฉลี่ย BER มากที่สุดในทุกแนวเพลง

#### 4.2.3.3 การทดสอบประสิทธิภาพโดยใช้สถิติในการทดสอบสมมติฐาน

จากผลการทดลองตารางที่ 4-9 เกณฑ์ที่นำมาใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการรับรู้ (SNR) จะใช้ค่าของ Shijun Xiang (2007) เป็นงานวิจัยที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดมาตั้งเป็นเกณฑ์เพื่อใช้ในการทดสอบทางสถิติ ซึ่งผลการทดลองในการวิจัยดังกล่าวได้ค่า SNR เท่ากับ 45.28 DB และใช้เพลง Danube.wav เพื่อเปรียบเทียบจำนวน 30 ครั้งเพื่อดูว่าผลการทดสอบในเพลงเดียวกันมีประสิทธิภาพเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนดหรือไม่โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

กำหนดสมมติฐาน

$$H_0 : \mu_{\text{SNR}} \leq 45.28$$

$$H_1 : \mu_{\text{SNR}} > 45.28$$

การทดสอบสมมติฐาน โดยมีค่าระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.01$  โดยมี  $df = n-1 = 30-1=29$  จากการเปิดตารางพบว่าค่า  $t$  เท่ากับ 2.326 [62]

คำนวณสถิติที่ใช้ทดสอบสำหรับทดสอบค่าเฉลี่ยเลขคณิต โดยใช้  $t$ -test จากข้อมูล SNR ของเพลง Danube.wav จำนวน 30 ครั้ง พบว่าค่า  $\bar{x} = 49.00213$ ,  $SD = 1.498402$  ดังนั้นจะได้

$$t = \frac{\bar{X} - \mu}{\frac{s}{\sqrt{n}}} = 13.60579$$

จากค่า  $t$  ที่คำนวณได้พบว่ามีความสูงกว่าค่า  $t$  จากตาราง จึงปฏิเสธ  $H_0$  ยอมรับ  $H_1$  เมื่อกำหนดค่าความเชื่อมั่นที่ 99.9% แสดงว่าค่า SNR ของอัลกอริทึม ในงานวิทยานิพนธ์ มีประสิทธิภาพสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนดอย่างมีระดับนัยสำคัญทางสถิติ

ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบวิธีการฝังลายน้ำทั้ง 3 อัลกอริทึม คือ อัลกอริทึมที่ใช้ GA อัลกอริทึม ECC และ อัลกอริทึม ATS มีความแตกต่างกันหรือไม่โดยมีวิธีการดังนี้

$$H_0 : \mu_{\text{GA}} = \mu_{\text{ECC}} = \mu_{\text{ATS}}$$

$$H_1 : \mu_{\text{GA}} \neq \mu_{\text{ECC}} \neq \mu_{\text{ATS}}$$

การทดสอบสมมติฐาน โดยมีค่าระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.01$  โดยมี  $df = 87$  คำนวณสถิติที่ใช้ทดสอบสำหรับทดสอบค่าเฉลี่ยเลขคณิต โดยใช้ ANOVA จากข้อมูล SNR ของเพลงจำนวน 30 เพลง ตามตารางที่ 4-16

**ตารางที่ 4-16** ตารางการคำนวณค่าสถิติการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว

SUMMARY						
<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>		
GA	30	1282.6	42.75333	9.370056		
ECC	30	1100.794	36.69313	23.52843		
ATS	30	854.389	28.47963	6.344725		
ANOVA						
<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between						
Groups	3079.261	2	1539.631	117.6991	0.000	4.85777
Within Groups						
	1138.053	87	13.08107			
Total						
	4217.314	89				

\* มีระดับนัยสำคัญทางสถิติ

จากตารางที่ 4-16 สามารถสรุปได้ว่าค่า  $F$  ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าค่า  $F$  ในตาราง แสดงว่าอัลกอริทึม ทั้งสามมีความแตกต่างกันอย่างมีระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 99.9% หรือปฏิเสธ  $H_0$  และยอมรับ  $H_1$

เมื่อพิจารณาค่า SNR ระหว่างกลุ่มจำแนกตาม อัลกอริทึม พบว่าค่าเฉลี่ยของ อัลกอริทึม GA มีค่าสูงที่สุด ( $\bar{x} = 42.7533$ ,  $SD = 9.370056$ ) รองลงมาคืออัลกอริทึม ECC ( $\bar{x} = 36.69313$ ,  $SD = 23.5284$ ) และอัลกอริทึม ATS มีค่าเฉลี่ย SNR ต่ำที่สุด ( $\bar{x} = 28.47963$ ,  $SD = 6.344725$ ) และ ถ้านำมาทดสอบระหว่างกลุ่มจะได้  $GA > ECC^*$ ,  $GA > ATS^*$  และ  $ECC > ATS^*$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ นี้ได้นำเสนอเทคนิคการทำลายน้ำดิจิทัลอล ลงบนสัญญาณเสียง ที่มีประสิทธิภาพในการรับรู้ และทนทานต่อการโจมตีแบบต่าง ๆ สำหรับสัญญาณเสียง ใช้การแยกองค์ประกอบของสัญญาณเสียงด้วยการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย วิธีการฝังลายน้ำจะเลือกฝังข้อมูลลายน้ำลง บน ตำแหน่งที่ดีที่สุด ของเวฟเล็ตเพื่อความทนทานและคุณภาพเสียงที่ดี ซึ่งในขั้นตอนการฝังลายน้ำจะฝังข้อมูลลายน้ำ ด้วยวิธีการเชิงพันธุกรรมเป็นตัวหาดำแหน่งที่จะฝังลายน้ำโดยดูจากคุณภาพของเสียงและมีความทนทาน ทำให้ต้องคัดเลือกฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้งสองนี้ ก่อนเพื่อหาดำแหน่งที่ดีที่สุดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของวิธีการเชิงพันธุกรรมในวิทยานิพนธ์นี้ใช้ SNR เป็นตัวชี้วัดคุณภาพเสียง และใช้ค่าสหสัมพันธ์ SIM เป็นตัวชี้วัดคุณภาพลายน้ำที่ตรวจจับได้ ซึ่งผลการทดสอบ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้งสองให้ผลเป็นอย่างดี และสอดคล้องกับงานวิจัยใน ตารางที่ 4-9 คุณภาพของสัญญาณเสียงหลังจากการฝังลายน้ำ อัลกอริทึมที่เสนอในวิทยานิพนธ์สามารถสร้างลายน้ำที่มีความทนทานลงบนสัญญาณเสียงโดยไม่ทำให้คุณภาพเสียงลดลงไปจากต้นฉบับ สัญญาณเสียงยังคงมีคุณภาพจากการรับฟังที่ดีสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริงผู้รับฟังไม่สามารถรับรู้ถึงการมีอยู่ของลายน้ำ นอกจากนี้แล้ว เทคนิคที่นำเสนอนี้ยังไม่จำเป็นต้องใช้ เสียงต้นฉบับในการตรวจหาลายน้ำดิจิทัลอลซึ่งทำให้กระบวนการถอดรหัสทำได้ง่ายและสะดวก

จากผลการทดลองในบทที่ 4 แสดงให้เห็นว่าลายน้ำดิจิทัลอลมีความคงทนต่อกระบวนการประมวลผลทางสัญญาณ อันได้แก่ Down-sampling Low pass filter การเพิ่มสัญญาณรบกวน White Gaussian noise กำจัดสัญญาณรบกวนด้วยการแปลงเวฟเล็ต ต Jittering และการตัดคุณภาพของสัญญาณเสียงหลังจากการฝังลายน้ำ อัลกอริทึมที่เสนอในวิทยานิพนธ์มีความทนทาน และไม่ทำให้คุณภาพเสียงเมื่อทำการรับฟังเปลี่ยนไปจากต้นฉบับ และเสียงเพลงที่ใช้ในการทดลองเป็นเพลงสากล หกแนวเพลง ที่อัตราสุ่มที่ 4410 Hz 16 บิต จำนวน 30 เพลงโดยแต่ละตัวอย่างที่ผ่านการฝังลายน้ำและทำการทดสอบความทนทานจากการโจมตี 8 แบบ รวมจำนวนการทดสอบ 240 ผลลัพธ์ ผลการทดสอบสรุปได้ว่า งานวิจัยมีประสิทธิภาพ ในด้านความทนทาน และคุณภาพเสียงที่ดี มีค่าสหสัมพันธ์มากที่สุดเป็น 1 และน้อยที่สุดเป็น 0.53161 และมีค่าเฉลี่ยที่ 0.959721 แสดงให้เห็นว่ามีประสิทธิภาพด้านความทนทานอยู่ในเกณฑ์ที่ดี นอกจากนี้คุณภาพ

ด้านการรับรู้มีค่าเฉลี่ย 49.10733 และค่ามากที่สุดคือ 54.551 และค่าน้อยที่สุดคือ 46.495 แสดงให้เห็นว่าเทคนิคที่นำเสนอมีประสิทธิภาพที่อยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้ และเมื่อนำมาทดสอบทางสถิติพบว่า อัลกอริทึมที่นำเสนอมีประสิทธิภาพดีกว่าอัลกอริทึมที่นำมาเปรียบเทียบ

## 5.2 ปัญหาที่พบและ ข้อเสนอแนะ

ถึงแม้ว่าเทคนิคการฝังลายน้ำในโดเมนความถี่โดย การใช้วิธีการเชิงพันธุกรรมจะมีความทนทานต่อการประมวลผลทางสัญญาณและคุณภาพของสัญญาณเสียงได้ดีกว่าเทคนิคการฝังลายน้ำอื่นแต่ปัญหาสำคัญที่พบคือใช้เวลานานในการฝังลายน้ำ จากการศึกษาพบว่าวิธีการเชิงพันธุกรรมที่ใช้หาตำแหน่งในการฝังลายน้ำต้องอาศัยเวลาในการค้นหามากในแต่ ละเพลงดังนั้น ควรเพิ่มเทคนิคแบบคู่ขนานลงไปในการเชิงพันธุกรรมเพื่อให้การค้นหาผลลัพธ์มีความเร็วมากยิ่งขึ้นหรือ ใช้เทคนิคการแปลงในโดเมนความถี่แบบอื่นเช่น SVD เป็นต้นในการฝังลายน้ำ

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

- [1] Lee, S.J. and S.H. Jung. A Survey of Watermarking Techniques Applied to Multimedia. IEEE International Symposium on Industrial Electronics Proceedings 1, Pusan, Korea (2001): 272-277.
- [2] I. J. Cox, J. Kilian and et al. Secure spread spectrum watermarking for multimedia. IEEE Trans. Image Proc 6, 12(1997): 1673-1687.
- [3] Bassia, P. and I. Pitas. Robust Audio Watermarking in the Time Domain. European Signal Processing Conference 9, Rhodes, Greece (1998): 25-28.
- [4] Swanson, M. D., Kobayashi, M. and Tewfik, A. H. Multimedia Data-Embedding and Watermarking Technologies. Proceeding of the IEEE Special issue on Multimedia Signal Processing 86, (June 1998): 1064-1087.
- [5] Cvejic, N. and T. Seppanen. Increasing the Capacity of LSB-Based Audio Steganography. IEEE 2002 International Workshop on Multimedia Signal Processing Marriott Beach Resort, St. Thomas, Us Virgin Islands, (2002): 336-338.
- [6] Hung-Hsu Tsai, Ji-shiung Cheng and Pao-Ta Yu. Audio Watermarking Based on HAS and Neural Networks in DCT Domain. EURASIP Journal on Applied Signal Processing 3 (2003): 252-263.
- [7] Syed Fahad Tahir, Asifullah Khan, Abdul Majid and Anwar M. Mirza. Support Vector Machine based Intelligent Watermark Decoding for Anticipated Attack. International Journal of Applied Mathematics and Computer Sciences 1, 1 (2005): 7-12.
- [8] Yonggang Fu, Ruimin Shen and Hongtao Lu. Optimal Watermark Detection Based on Support Vector Machines. LNCS 3173 (2004): 552-557.
- [9] N. Sriyingyong and K. Attakitmongcol. Wavelet-Based Audio Watermarking Using Adaptive Tabu Search. Proc. IEEE Int. Symp. Wireless Pervasive Computing 1 (Jan 2006): 1-5



- [10] Prayoth Kumsawat and Kittit Attakitmongkol. A New Approach for Optimization in Image Watermarking by Using Genetic Algorithms. IEEE Transactions on Signal Processing 53, 12(December 2005): 4707-4719.
- [11] D.Sal and M. Graña. Introducing a Watermarking with Multi-Objective Genetic Algorithm. Genetic and Evolutionary Computation Conference Washington, DC, USA. (June 2005): 2219-2220.
- [12] Saeed Sedghi, Habib Rajabi Mashhadi and Morteza Khasimi. Detecting Hidden Information from a Spread Spectrum Watermarked Signal by Genetic Algorithm. IEEE Congress on Evolutionary Computation Vancouver, BC, Canada (July 2006): 173-178.
- [13] Hung-H. Tsai, Kuo-C. Wang and Chi-C. Liu. Robust Watermarking in Wavelet Domain Using Rank Order and Genetic Algorithm for Image Authorization. IEEE International Joint Conference on Neural Networks Vancouver, BC, Canada (July 2006): 2031-2038.
- [14] N. Moghadm and H. Sadeghi. Genetic Content-Based MP3 Audio Watermarking in MDCT Domain. Transactions on Engineering, Computing and Technology 7 (August 2005):113-116.
- [15] Yi-Ta Wu and Frank Y. Shih. Genetic Algorithm Based Methodology for Breaking the Steganalytic Systems. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B: Cybernetics 36, 1 (February 2006): 24-31.
- [16] Ying-Lan Chang, Koun-Tem Sun and Yueh-Hong Chen. ART2-Based Genetic Watermarking. Proceedings of the 19<sup>th</sup> International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA'05) (2005):729-734.
- [17] Boney, L., Tewfik, A. H., and Hamdy, K. N. Digital watermarks for audio signal. International Conference on Multimedia Computing and Systems (1996): 473-480.
- [18] Mitchell D. Swanson, Bin Zhu, Ahmed H. Tewfik and Laurence Boney. Robust audio watermarking using perceptual masking. Signal Processing 66 (1998): 337-355.

- [19] Bassia, P. and I. Pitas. Robust Audio Watermarking in the Time Domain. IEEE Transactions on Multimedia 3, 2 (2001): 232-241.
- [20] Lee, S. and Ho, Y., 2000. Digital Audio Watermarking in The Ceptrum Domain. IEEE Transactions on Consumer Electronics 46,3 (August 2000): 744-749.
- [21] Jong, W.S. and Jin, W.H., 2001. Audio Watermarking for Copyright Protection of Digital Audio Data. Electronics Letters 37,1(January 2001): 60-61.
- [22] Nedeljko Cvejic, Anja Keskinarkaus and Tapio Seppanen. Audio watermarking using m-sequences and temporal masking. IEEE Workshops on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics (2001): 227-230.
- [23] Saito, S., Furukawa, T. and Konishi, K. A Digital Watermarking for Audio Data Using Division Based on QMF Bank. Proceeding of IEEE 87, 8 (March 2002): 3473-3476.
- [24] Lie, W.N. and Chang, L.C. Robust and High Quality Time-Domain Audio Watermarking Subject to Psychoacoustic Masking. Proceeding of IEEE 75, 6 (April 2001): 45-48.
- [25] L.Holt and et al. Encoded marking of a recording signal U.K. Patent, 1988.
- [26] N.Komatus and H. Tominaga. Authentication system using concealed images in telemetric. Memoirs of the School of Science and Engineering Waseda University, 52 (1988): 45-60.
- [27] Anderson, R. Information hiding of Lecture Notes in Computer Science 1174 Berlin; New York: Springer-Verlag, 1996.
- [28] P.W. Wong and E. J. Delp, editors. Security and watermarking of multimedia contents. Proceedings of the Society of Photo-optical Instrumentation Engineers 3654 (1999): 156-166.
- [29] P.W. Wong and E. J. Delp. Security and watermarking of multimedia contents II. Proceedings of the Society of Photo-optical Instrumentation Engineers 3971 (2000):417-421.
- [30] Herodotus. The histories. Translated by Aubrey de Selincourt London: Penguin Books, 1996.

- [31] สุพจน์ นิตย์สุวัฒน์. “ลายน้ำดิจิทัล.” วารสารพัฒนาเทคนิคศึกษา สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 15 (ตุลาคม-ธันวาคม 2545): 11-16.
- [32] ฉำรงรัตน์ อมรรักษ์ และบัณฑิต ทิพากร . “ละเมิดลิขสิทธิ์ยุติได้ด้วยลายน้ำดิจิทัล.” ส่งเสริมเทคโนโลยี. 29 (สิงหาคม-กันยายน 2545): 126-129.
- [33] Petiteolas, Fabien A. P., Anderson, Ross J. and Kahn, Marleus G. Information Hiding A Survey. Proceeding of the IEEE issue on protection of multimedia content 87 (July 1990): 1062-1078.
- [34] Katzenbeisser, S. and Petitcolas, F. A. P. Information Hiding Techniques for Steganography and Digital Watermarking Artech House, Boston, London, 1999.
- [35] นริศรา โชคอำนวยชัย. การทำภาพพิมพ์ลายน้ำดิจิทัลในภาพกราฟิกส์โดยใช้วิธีเวฟเลต ฟังก์ชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต , คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2544.
- [36] Driesen, J., Van, C. T., Reekmans, R. and Van, D. D. Analysis time-varying power system harmonics using wavelet transform. Proceeding of the IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, Quality Measurements: The Indispensable Bridge between Theory and Reality 1 (June 1966): 474-479.
- [37] Pham, V.L. and Wong, K.P. Wavelet-transform-based algorithm for harmonic analysis of power system waveforms. Proceeding of the IEEE Generation, Transmission and Distribution 146 (May 1999): 249-254.
- [38] Kim, C. H. and Aggarwal, Raj. Wavelet transform in power systems: Part 1 General introduction to the wavelet transform. Proceeding of the IEEE Power Engineering Journal (2000): 81-87.
- [39] สุระเจตน์ อ่อนฤทธิ . การฝังและถอดลายน้ำดิจิทัลโดยวิธีการแปลงเวฟเลตแพกเกตส์ . วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต , คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2543.

- [40] นพรัตน์ ศรียิ่งยงค์. การสร้างลายน้ำสำหรับสัญญาณเสียงดิจิทัลโดยใช้การแปลงเวฟเล็ตและการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, คณะวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2548.
- [41] สุขแสง คุณนก. วิธีเชิงพันธุกรรมด้วยตัวกระทำแบบปรับตัวได้. วิทยานิพนธ์ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาคอมพิวเตอร์ศึกษา ภาควิชาคอมพิวเตอร์ศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2550.
- [42] Holland, J. Adaptation in Natural and Artificial System, Ann Arbor, Michigan University of Michigan: Press, 1975.
- [43] วิมาน กฤตพลวิมาน. กฎหมายลิขสิทธิ์ ฉบับปฏิบัติการ. กรุงเทพมหานคร: ดวงกลม, 2545.
- [44] Japp, H., M. V. Vennb, T. Kalker and F. Bruekers. Audio Watermarking for Monitor and Copy Protection. International Multimedia Conference ACM Multimedia Workshop (2000): 119-122.
- [45] Mansour, M. and A. Tewfik. Audio Watermarking by Time-Scale Modification. IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing ICASSP, Salt Lake City (2001):1353-1356.
- [46] Gruhl, D., A. Lu and W. Bender. Echo Hiding. Proc. Of information Hiding Workshop, pp295-345, Univ of Cambridge, 1999.
- [47] Wen, N. L. and L.C. Chan. Robust and High-Quality Time Domain Audio Watermarking Subject to Psychoacoustic Masking. IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS) Sydney Australia (2001): 45-48.
- [48] Kedia, D. and S.L. Maskara. Evaluation of Spreading Codes for CDMA Wireless Mobile Communication. Proc. National Conference Communications (NCC-002) IT Bombay, Mumbai, (2002): 48-49.
- [49] Seok, J., J. Hong and J. Kim. A Novel Audio Watermarking Algorithm for Copyright Protection of Digital Audio. ETRI Journal 24, 3 (2002): 81-189.
- [50] Cassuto, Y., M. Lustig, G. Leifman, T. Mizrahi, E. Borenstein, S. Mizrahi and N. Peleg. Real-time Implementation for Digital Watermarking in Audio Signals



- Using Perceptual Masking. paper for the 3<sup>rd</sup> European DSP Education and Research Conference, ESIEE, Noisy Le Grand, Paris, Sep, 2000.
- [51] Jiwu Huang, Young Wang and Yun Q. Shi. A blind audio watermarking algorithm with self-synchronization. IEEE International Symposium on Circuits and Systems (2002): 627-630.
- [52] Xueyao Li, Min Zhang and Shiliang Sun. Adaptive audio watermarking algorithm based on SNR in wavelet domain. Natural Language Processing and Knowledge Engineering (2003): 287-292.
- [53] Lili Cui, Shu-xun Wang and Tanfeng Sun. The application of wavelet analysis and audio compression technology in digital audio watermarking. Neural Networks and Signal Processing (2003): 1533-1537.
- [54] Wei Li, Xiangyang Xue, Xiaoqiang Li and Peizhong Lu. A novel feature-based robust audio watermarking for copyright protection. Information Technology: Coding and Computing [Computers and Communications]. (2003): 554-558.
- [55] Lili Cui, Shu-xun Wang and Tanfeng Sun. The application of binary image in digital audio watermarking. Neural Networks and Signal Processing (2003): 1497-1500.
- [56] Ronghui Tu and Jiying Zhao. A novel semi-fragile audio watermarking scheme. Audio and Visual Environments and Their Application (2003): 89-94.
- [57] Painter, T. and Spanias, A. Perceptual Coding of Digital Audio. Proceedings of The IEEE 88, 4 (April 2000): 145-148.
- [58] C. Huang and J. Wu. A Watermark Optimization Technique based on Genetic Algorithms. In proc. SPIE Electronic Imaging 3971 (Feb. 2000):516-523.
- [59] A. Basso, F. Bergadano, D. Cavagnino, V. Pomponiu and A. Vernone. A Novel Block-based Watermarking Scheme Using the SVD Transform. Algorithms (2009): 46-75.
- [60] Calagn M.; Guo H., Mancini, L.V., Jajodia, S. Robust Watermarking System based on SVD Compression. Proceeding of the 2006 ACM Symposium on Applied Computing Dijon, France (April 2006): 1341-1347.



- [61] Liu, J., Niu, X., Kong, w. Image watermarking scheme based on singular value decomposition. International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Pasadena, California, USA (December 2006): 457-460.
- [62] Mohan, B.C., Srinivaskumar, S. Chatterji, B.N. A Robust Digital Image Watermarking Scheme Using Singular Value Decomposition (SVD), Dither Quantization and Edge Detection. ICGST-GVIP J (2008): 17-23.
- [63] Chung, K., Yang, W.N., Huang, Y. H., Wu, S. T., Hsu, Y. C. On SVD-based watermarking algorithm. Appl. Math, Comput (2007): 54-57.
- [64] Liu, F., Liu Y. A watermarking Algorithm for Digital Image based on DCT and SVD. IEEE Congress on Image and Signal Processing Sanya, Hainan, China (May 2008): 380-383.
- [65] สิริพร ผลสมบุญ. ลายน้ำดิจิทัลสำหรับรูปภาพที่คืนสภาพได้จากการหมุน การปรับขนาด และการเคลื่อนที่ โดยใช้ฟังก์ชันเคิร์ชโพเนนเชียลเชิงซ้อน. วิทยานิพนธ์ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- [66] สุชาดา บวรกิตติวงศ์ สถิติประยุกต์ทางพฤกษศาสตร์. พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายมหศักดิ์ เกตุฉ่ำ เกิดเมื่อวันที่ 12 พฤษภาคม 2521 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาหลักสูตรปริญญา ครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ แขนงเทคโนโลยีมัลติมีเดีย จากคณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ในปีการศึกษา 2547 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิศวกรรมศาสตร ดุษฎีบัณฑิต สาขา วิชาวิศวกรรม คอมพิวเตอร์ ที่ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2547

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย