



รายงานการวิจัย

การบีบอัดสัญญาณภาพและการสร้างสัญญาณลายน้ำโดยใช้ การแปลงมัลติเวฟเล็ต (Image Compression and Image Watermarking Using Multiwavelet Transform)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติ อรรถกิจมงคล

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ร่วมวิจัย

นายทรงพล คำนิล

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2551

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

มิถุนายน 2551

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี งบประมาณ 2551 ผู้วิจัยขอขอบคุณอาคารศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 5 (F5) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่เอื้อเพื่อสถานที่ในการทำวิจัย และขอขอบคุณ USC-SIPI Image Database สำหรับภาพตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

บทคัดย่อ

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา เทคโนโลยีทางด้านคอมพิวเตอร์และเครือข่ายอินเทอร์เน็ตได้มีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว ทำให้มีการนำข้อมูลดิจิทัลมาใช้ในชีวิตประจำวันกันอย่างแพร่หลาย ซึ่งข้อมูลดิจิทัลอย่างหนึ่งที่ได้รับคามนิยมนอย่างมาก คือ ภาพดิจิทัล เพราะมีความง่ายต่อการจัดเก็บ ส่งข้อมูล และแก้ไข แต่ปัญหาอย่างหนึ่งในการนำภาพดิจิทัลที่มีคุณภาพสูงไปใช้งาน คือ ข้อมูลภาพมีขนาดใหญ่ทำให้ต้องการอุปกรณ์ที่มีพื้นที่ในการจัดเก็บจำนวนมากและใช้ในเวลานานในการจัดส่ง ดังนั้น จึงได้มีการคิดค้นและพัฒนาการประมวลผลสัญญาณภาพที่เรียกว่า การบีบอัดสัญญาณภาพ เพื่อช่วยลดขนาดของข้อมูลลงแต่ยังคงรักษาคุณภาพของภาพไว้ นอกจากนี้การที่ภาพดิจิทัลสามารถที่จะคัดลอกได้ง่าย ทำให้เกิดการละเมิดลิขสิทธิ์ วิธีแก้ปัญหอย่างหนึ่ง คือ การฝังลายน้ำดิจิทัล โดยการซ่อนข้อมูลบางอย่างเข้าไปในภาพเพื่อแสดงความเป็นเจ้าของ และเมื่อพิจารณาถึง โครงสร้างของ อัลกอริทึมทั้งสองจะเห็นว่า มีกระบวนการบางอย่างที่เหมือนกัน งานวิจัยนี้จึง ได้ศึกษาและพัฒนา อัลกอริทึมการบีบอัดสัญญาณภาพพร้อมกับการฝังลายน้ำ เพื่อให้ประโยชน์ทั้งในด้านการลดขนาดของข้อมูลและการป้องกันการละเมิดลิขสิทธิ์ โดยทำการศึกษาผลของการแปลงสัญญาณภาพต่อ อัลกอริทึมการบีบอัดสัญญาณภาพและการฝังลายน้ำ ซึ่งประกอบด้วย การแปลงเวฟเล็ตและการแปลงมัลติเวฟเล็ต ในการวัดประสิทธิภาพจะใช้ค่า $PSNR$ ในการชี้วัดคุณภาพของภาพและค่า $normalized\ correlation$ หรือค่าอัตราความผิดพลาดบิตในการวัดความทนทานของสัญญาณลายน้ำ จากนั้น ได้นำเสนออัลกอริทึมการบีบอัดสัญญาณภาพพร้อมกับการฝังลายน้ำ โดยใช้การแปลงมัลติเวฟเล็ต เทคนิคการฝังลายน้ำจะถูกรวมเข้ากับการเข้ารหัสแบบ SPIHT โดยในขั้นตอนการคัดแยกลายน้ำไม่ต้องใช้ภาพต้นแบบ ผลการทดสอบพบว่าคุณภาพของภาพหลังการบีบอัดแต่ไม่ฝังลายน้ำแตกต่างจากภาพหลังการบีบอัดพร้อมกับฝังลายน้ำน้อยมากและสัญญาณลายน้ำมีความทนทานต่อการถูกโจมตีด้วยการกรองแบบค่ามัธยฐาน การกรองแบบต่ำผ่าน การเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียนและการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ JPEG นอกจากนี้ยังได้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการแปลงสัญญาณภาพต่ออัลกอริทึมการบีบอัดสัญญาณภาพพร้อมกับการฝังลายน้ำที่นำเสนอ

ABSTRACT

Due to widespread use of Internet and development of computer technology in recent decade, digital multimedia is commonly used in our daily lives. One of the most popular digital contents is digital image which attracts much attention because it can be easily stored, transmitted and modified. Since a high quality digital image needs a high capacity of digital storage device, an image compression algorithm is very essential. A fundamental goal of image compression is to reduce the required bit rate capacity of digital storage requirements while maintaining the necessary fidelity of the data. Another important image processing applications is image watermarking. This algorithm can prevent data piracy and provide copyright protection of digital image. Since both image processing applications have some steps in common. This research develop a way to integrate both algorithm so that compression and watermarking can be performed on an image simultaneously. First, we study the effects of image transformations which are the discrete wavelet transform and the discrete multiwavelet transform to a combining compression and watermarking algorithm. The peak signal to noise ratio and normalized correlation (or bit error rate) are used to evaluate the performance of the algorithm. Second, we propose an algorithm to integrate digital image watermarking to the existing SPIHT image compression using multiwavelet transform. Furthermore, this method does not require the original image in the watermark extraction process. Experimental results show that our method is effective and robust to common image processing operations, such as median and low-pass filters, additive Gaussian noise and JPEG lossy compression. Finally, the performance of proposed algorithm is compared with the one using the discrete wavelet transform in term of image quality and robustness of watermark.

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	3
1.3 ข้อยกเว้นเบื้องต้น.....	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	
2.1 กล่าวนำ.....	5
2.2 การแปลงมัลติเวฟเลต.....	5
2.3 หลักการบีบอัดสัญญาณภาพเบื้องต้น.....	11
2.3.1 การบีบอัดสัญญาณภาพแบบไม่มีการสูญเสีย.....	12
2.3.2 การบีบอัดสัญญาณภาพแบบมีการสูญเสีย.....	14
2.4 การสร้างสัญญาณลายน้ำดิจิทัล.....	16
2.4.1 โครงสร้างของการฝังและการถอดสัญญาณลายน้ำ.....	17
2.4.2 ชนิดของสัญญาณลายน้ำดิจิทัล.....	17
2.4.3 ความต้องการของการฝังลายน้ำดิจิทัล.....	18
2.5 การบีบอัดสัญญาณภาพแบบ Set Partitioning in Hierarchical Tree.....	19
2.5.1 ความสัมพันธ์แบบ Spatial Orientation Trees.....	20
2.5.2 อัลกอริทึมการเข้ารหัส.....	22

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5.3 อัลกอริทึมการถอดรหัส.....	25
2.6 การวัดประสิทธิภาพของการบีบอัดสัญญาณภาพและการฝังลายน้ำดิจิทัล.....	26
2.6.1 การวัดเชิงปริมาณ.....	26
2.6.2 การวัดเชิงคุณภาพ.....	29
2.7 สรุป.....	29
บทที่ 3 ผลของการแปลงสัญญาณภาพต่ออัลกอริทึม การบีบอัดสัญญาณภาพ และการฝังลายน้ำ	
3.1 กล่าวนำ.....	30
3.2 การบีบอัดสัญญาณภาพพร้อมกับการฝังลายน้ำ.....	30
3.2.1 วิธีการแปลงสัญญาณภาพ.....	31
3.2.2 รูปแบบการบีบอัดสัญญาณภาพที่ใช้ในการทดสอบ.....	33
3.2.3 อัลกอริทึมการฝังลายน้ำ.....	33
3.2.4 การคัดแยกลายน้ำ.....	33
3.3 ผลการทดสอบ.....	35
3.4 สรุป.....	41
บทที่ 4 การบีบอัดสัญญาณภาพพร้อมกับการฝังลายน้ำ	
4.1 กล่าวนำ.....	43
4.2 วิธีการที่นำเสนอ.....	43
4.2.1 การเตรียมสัญญาณภาพและสัญญาณลายน้ำ.....	44
4.2.2 ขั้นตอนการบีบอัดสัญญาณภาพพร้อมกับการฝังลายน้ำ.....	44
4.2.3 ขั้นตอนการคัดแยกลายน้ำ.....	48
4.3 สรุป.....	51
บทที่ 5 ผลการทดสอบ	
5.1 กล่าวนำ.....	52
5.2 ผลการทดสอบของอัลกอริทึมที่นำเสนอ.....	52
5.2.1 คุณภาพของภาพหลังการบีบอัดและฝังลายน้ำ.....	52
5.2.2 ความทนทานของสัญญาณลายน้ำ.....	54

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.3 เปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างอัลกอริทึมที่ใช้	
การแปลงมัลติเวฟเล็ดและการแปลงเวฟเล็ด	57
5.3.1 ผลการเปรียบเทียบคุณภาพของภาพหลังการบีบอัดและฝังลายน้ำ.....	57
5.3.2 ผลการเปรียบเทียบความทนทานของสัญญาณลายน้ำ.....	59
5.4 ผลการเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการประมวลผล	64
5.5 สรุป.....	68
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
6.1 สรุปผลการวิจัย	70
6.2 ข้อเสนอแนะ	71
บรรณานุกรม	72
ภาคผนวก	
รายชื่อบทความที่ได้จากโครงการวิจัย.....	73
ประวัติผู้วิจัย.....	74

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1	คุณภาพของภาพวัดโดยใช้ค่า $PSNR$ (dB).....	36
ตารางที่ 3.2	ลายน้ำที่ถูกคัดแยกและค่า BER จากอัลกอริทึมที่ใช้ DWT หลังถูกโจมตีด้วยการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ JPEG.....	38
ตารางที่ 3.3	ลายน้ำที่ถูกคัดแยกและค่า BER จากอัลกอริทึมที่ใช้ DMT หลังถูกโจมตีด้วยการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ JPEG.....	38
ตารางที่ 3.4	ลายน้ำที่ถูกคัดแยกและค่า BER จากอัลกอริทึมที่ใช้ DWT หลังถูกโจมตีด้วยการกรองชนิดต่าง ๆ ขนาด 3×3	39
ตารางที่ 3.5	ลายน้ำที่ถูกคัดแยกและค่า BER จากอัลกอริทึมที่ใช้ DMT หลังถูกโจมตีด้วยการกรองชนิดต่าง ๆ ขนาด 3×3	39
ตารางที่ 3.6	ลายน้ำที่ถูกคัดแยกและค่า BER จากอัลกอริทึมที่ใช้ DWT หลังถูกโจมตีด้วยการเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน.....	41
ตารางที่ 3.7	ลายน้ำที่ถูกคัดแยกและค่า BER จากอัลกอริทึมที่ใช้ DMT หลังถูกโจมตีด้วยการเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน.....	41
ตารางที่ 5.1	คุณภาพของภาพวัดโดยใช้ค่า $PSNR$ (dB) ที่อัตราบิต 0.3 bpp.....	53
ตารางที่ 5.2	ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำที่อัตราบิต 0.3 bpp หลังการถูกโจมตีด้วยการกรองแบบค่ามัธยฐาน	55
ตารางที่ 5.3	ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำที่อัตราบิต 0.3 bpp หลังการถูกโจมตีด้วยการกรองแบบต่ำผ่าน	55
ตารางที่ 5.4	ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำที่อัตราบิต 0.3 bpp หลังการถูกโจมตีด้วยการเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน	56
ตารางที่ 5.5	ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำที่อัตราบิต 0.3 bpp หลังการถูกโจมตีด้วยการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ JPEG.....	56
ตารางที่ 5.6	คุณภาพของภาพวัดโดยใช้ค่า $PSNR$ (dB) ที่อัตราบิต 1.0 bpp.....	58
ตารางที่ 5.7	ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DMT ที่อัตราบิต 1.0 bpp หลังการถูกโจมตีด้วยการกรองแบบค่ามัธยฐาน	60
ตารางที่ 5.8	ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DWT ที่อัตราบิต 1.0 bpp หลังการถูกโจมตีด้วยการกรองแบบค่ามัธยฐาน	60

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 5.9	ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DMT ที่อัตราบิต 1.0 bpp หลังการถูกโจมตีด้วยการกรองแบบต่ำผ่าน	61
ตารางที่ 5.10	ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DWT ที่อัตราบิต 1.0 bpp หลังการถูกโจมตีด้วยการกรองแบบต่ำผ่าน	61
ตารางที่ 5.11	ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DMT ที่อัตราบิต 1.0 bpp หลังการถูกโจมตีด้วยการเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน	62
ตารางที่ 5.12	ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DWT ที่อัตราบิต 1.0 bpp หลังการถูกโจมตีด้วยการเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน	62
ตารางที่ 5.13	ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DMT ที่อัตราบิต 1.0 bpp หลังการถูกโจมตีด้วยการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ JPEG.....	63
ตารางที่ 5.14	ค่า NC ของภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DWT ที่อัตราบิต 1.0 bpp หลังการถูกโจมตีด้วยการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ JPEG.....	63
ตารางที่ 5.15	เปรียบเทียบเวลาการคำนวณที่ใช้ในแต่ละขั้นตอนการบีบอัดสัญญาณภาพ พร้อมกับการฝังลายน้ำของภาพ Lena (หน่วย : วินาที).....	65
ตารางที่ 5.16	เปรียบเทียบเวลาการคำนวณที่ใช้ในแต่ละขั้นตอนการบีบอัดสัญญาณภาพ พร้อมกับการฝังลายน้ำของภาพ Boat (หน่วย : วินาที).....	65
ตารางที่ 5.17	เปรียบเทียบเวลาการคำนวณที่ใช้ในแต่ละขั้นตอนการบีบอัดสัญญาณภาพ พร้อมกับการฝังลายน้ำของภาพ Barbara (หน่วย : วินาที).....	66
ตารางที่ 5.18	เปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการคำนวณทั้งหมดของการบีบอัดสัญญาณภาพ พร้อมกับการฝังลายน้ำของภาพ Lena.....	67
ตารางที่ 5.19	เปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการคำนวณทั้งหมดของการบีบอัดสัญญาณภาพ พร้อมกับการฝังลายน้ำของภาพ Boat.....	67
ตารางที่ 5.20	เปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการคำนวณทั้งหมดของการบีบอัดสัญญาณภาพ พร้อมกับการฝังลายน้ำของภาพ Barbara.....	68

สารบัญญภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1	แผนภาพอัลกอริทึมการบีบอัดสัญญาณและฝังลายน้ำ.....	2
รูปที่ 1.2	ภาพลายน้ำที่ใช้ในการทดสอบ.....	3
รูปที่ 2.1	ฟิลเตอร์เบงค์ของมัลติเวฟเล็ทใน 1 มิติ.....	7
รูปที่ 2.2	การแปลงเวฟเล็ท 1 ระดับ.....	10
รูปที่ 2.3	การแปลงมัลติเวฟเล็ท 1 ระดับและจัดเรียงสัมประสิทธิ์แบบต่าง ๆ.....	10
รูปที่ 2.4	ภาพ Lena หลังการแปลงมัลติเวฟเล็ท 3 ระดับ และจัดเรียงสัมประสิทธิ์ทั้งสองแบบ.....	11
รูปที่ 2.5	รูปแบบการเข้ารหัสและถอดรหัส CODEC.....	12
รูปที่ 2.6	ประเภทของการบีบอัดสัญญาณภาพ (Subramanya, 2001).....	13
รูปที่ 2.7	ขั้นตอนการบีบอัดสัญญาณภาพโดยใช้การแปลงมัลติเวฟเล็ท.....	16
รูปที่ 2.8	การสร้างสัญญาณลายน้ำและการถอดสัญญาณลายน้ำ.....	18
รูปที่ 2.9	ความสัมพันธ์แบบ spatial orientation tree.....	21
รูปที่ 2.10	ตำแหน่งการสืบทอดของ spatial orientation.....	21
รูปที่ 2.11	ขั้นตอนของกระบวนการ Sorting Pass.....	25
รูปที่ 2.12	ขั้นตอนของกระบวนการ Refinement Pass.....	26
รูปที่ 3.1	โดเมนของการฝังลายน้ำ.....	31
รูปที่ 3.2	ภาพแบนด์ย่อยจากการแยกองค์ประกอบเวฟเล็ท 3 ระดับ.....	32
รูปที่ 3.3	ภาพแบนด์ย่อยจากการแยกองค์ประกอบมัลติเวฟเล็ท 3 ระดับ.....	32
รูปที่ 3.4	แผนภาพขั้นตอนการเข้ารหัสและฝังลายน้ำ.....	34
รูปที่ 3.5	แผนภาพขั้นตอนการตรวจจับลายน้ำ.....	34
รูปที่ 3.6	สัญญาณลายน้ำแบบภาพขาวดำ.....	35
รูปที่ 3.7	ภาพ “Lena” หลังการบีบอัดและฝังลายน้ำโดยใช้ (ก) DWT (ข) DMT.....	36
รูปที่ 3.8	ภาพ “Boat” หลังการบีบอัดและฝังลายน้ำโดยใช้ (ก) DWT (ข) DMT.....	37
รูปที่ 3.9	ภาพ “Barbara” หลังการบีบอัดและฝังลายน้ำโดยใช้ (ก) DWT (ข) DMT.....	37
รูปที่ 3.10	ภาพที่ฝังลายน้ำหลังการถูกโจมตีแบบต่าง ๆ.....	40
รูปที่ 4.1	การเตรียมสัญญาณลายน้ำ.....	44
รูปที่ 4.2	แผนภาพกระบวนการฝังลายน้ำ.....	46

สารบัญญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.3	แผนผังกระบวนการเข้ารหัสและฝังลายน้ำของวิธีการที่นำเสนอ	47
รูปที่ 4.4	แผนผังกระบวนการสร้างกลับภาพหลังถูกบีบอัดและฝังลายน้ำ	48
รูปที่ 4.5	แผนภาพกระบวนการคัดแยกลายน้ำ	49
รูปที่ 4.6	แผนผังอัลกอริทึมการคัดแยกลายน้ำ	50
รูปที่ 5.1	(ก) ภาพต้นแบบ (ข) ภาพหลังการบีบอัดและฝังลายน้ำที่อัตราบิต 0.3 bpp	53
รูปที่ 5.2	(ก) ภาพต้นแบบ (ข) ภาพหลังการบีบอัดและฝังลายน้ำที่อัตราบิต 0.3 bpp	54
รูปที่ 5.3	ภาพ “Barbara” หลังการบีบอัดและฝังลายน้ำที่อัตราบิต 1.0 bpp	58
รูปที่ 5.4	ภาพ “Boat” หลังการบีบอัดและฝังลายน้ำที่อัตราบิต 1.0 bpp	59

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

c	สัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดหรือมัลติเวฟเล็ด
c'	สัมประสิทธิ์การแปลงหลังการฝังลายน้ำ
c''	สัมประสิทธิ์การแปลงของภาพต้องสงสัย
c_0	สัมประสิทธิ์หลังผ่านตัวรอกก่อน
c_1	สัมประสิทธิ์ความถี่ต่ำของการแปลงมัลติเวฟเล็ดใน 1 ระดับ
d_1	สัมประสิทธิ์ความถี่สูงของการแปลงมัลติเวฟเล็ดใน 1 ระดับ
$D(i, j)$	เซตของตำแหน่งการสืบทอดทั้งหมด
D_r	ตัวดำเนินการจัดเรียงลำดับสเกลาร์เป็นลำดับแบบกลุ่มที่มีความยาวเวกเตอร์เท่ากับ r
$g(k)$	สัมประสิทธิ์ตัวกรองความถี่สูง
$G(z)$	การแปลงแซคของ $g(k)$
$h(k)$	สัมประสิทธิ์ตัวกรองความถี่ต่ำ
H	เซตของตำแหน่งโนดในแบนด์ย่อยสูงสุด
$H(z)$	การแปลงแซคของ $h(k)$
HH_1	แบนด์ย่อยของสัญญาณที่ผ่านตัวกรองความถี่สูงและตัวกรองความถี่สูง จากการแยกองค์ประกอบ 1 ระดับ
HL_1	แบนด์ย่อยของสัญญาณที่ผ่านตัวกรองความถี่สูงและตัวกรองความถี่ต่ำ จากการแยกองค์ประกอบ 1 ระดับ
I	ภาพต้นแบบ
I_w	ภาพที่ถูกบีบอัดและฝังลายน้ำ
I''	ภาพต้องสงสัย
$L(i, j)$	เซตของตำแหน่งการสืบทอดทั้งหมดยกเว้นการสืบทอด offspring
LH_1	แบนด์ย่อยของสัญญาณที่ผ่านตัวกรองความถี่ต่ำและตัวกรองความถี่สูง จากการแยกองค์ประกอบ 1 ระดับ
LL_1	แบนด์ย่อยของสัญญาณที่ผ่านตัวกรองความถี่ต่ำและตัวกรองความถี่ต่ำ จากการแยกองค์ประกอบ 1 ระดับ
m	ตัวประกอบการขยาย
M	ขนาดความกว้างของภาพ
M_1	ขนาดความกว้างของภาพลายน้ำ

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

n	อันดับของบิต
N	ขนาดความยาวของภาพ
N_1	ขนาดความยาวของภาพลายน้ำ
$O(i, j)$	เซตของตำแหน่งการสืบทอด offspring
p	จำนวนของระดับการแปลงสัญญาณภาพ
$P(z)$	ตัวกรองหลัง
q_j	ตัวประกอบควอนไทเซชัน
$Q(z)$	ตัวกรองก่อน
r	จำนวนของฟังก์ชันย่อ-ขยาย
$S_n(i, j)$	ค่าพิกเซลเดี่ยวของเซตนั้น ๆ ที่ตำแหน่ง (i, j)
T	ค่าขีดเริ่มเปลี่ยนของการเข้ารหัส
T_1	ค่าขีดเริ่มเปลี่ยนขอบเขตล่างของการเลือกสัมประสิทธิ์
T_2	ค่าขีดเริ่มเปลี่ยนขอบเขตบนของการเลือกสัมประสิทธิ์
T_w	ค่าขีดเริ่มเปลี่ยนของการฝังลายน้ำ
T'_w	ค่าขีดเริ่มเปลี่ยนของการคัดแยกลายน้ำ
V	ลำดับเวกเตอร์แบบสุ่ม
v_k	ลายน้ำลำดับเวกเตอร์แบบสุ่มบิตที่ k
w_j	ตัวประกอบการถ่วงน้ำหนักของแต่ละแบนด์ย่อย
W	สัญญาณลายน้ำแบบภาพขาวดำ
W'	สัญญาณลายน้ำที่ได้จากการคัดแยก
x	ลำดับเวกเตอร์
Z	เซตของจำนวนเต็ม
α_1	ค่าความแกร่งของลายน้ำ เมื่อบิตลายน้ำเป็น 1
α_2	ค่าความแกร่งของลายน้ำ เมื่อบิตลายน้ำเป็น 0
$\phi(t)$	ฟังก์ชันย่อ-ขยาย
$\psi(t)$	ฟังก์ชันเวฟเล็ท
$\Phi(t)$	มัลติสเกลลิงฟังก์ชัน
$\Psi(t)$	ฟังก์ชันมัลติเวฟเล็ท
\oplus	ตัวดำเนินการ Exclusive OR

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

ADPCM	Adaptive Differential Pulse Code Modulation
<i>BCR</i>	Bit Correct Ratio
<i>BER</i>	Bit Error Rate
bpp	bit per pixel
CODEC	การเข้ารหัสและถอดรหัส
DCT	Discrete Cosine Transform
DFT	Discrete Fourier Transform
DGHM	Donovan, Geromino, Hardin and Massopust
DMT	Discrete Multiwavelet Transform
DPCM	Differential Pulse Code Modulation
DWT	Discrete Wavelet Transform
EE	Electrical Engineering
EZW	Embedded Zerotree Wavelet
HVS	Human Visual System
JPEG	Joint Photographic Experts Group
LIP	List of Insignificant Pixel
LIS	List of Insignificant Sets
LSB	Least Significant Bit
LSP	List of Significant Pixel
LZW	Lempel Ziv-Welch
MRA	Multiresolution Analysis
<i>MSE</i>	Mean Square Error
<i>NC</i>	Normalized Cross-Correlation
<i>PSNR</i>	Peak Signal to Noise Ratio
Q.F.	JPEG Quality Factor
RLE	Run Length Encoding
SPIHT	Set Partitioning in Hierarchical Trees

บทที่ 1

บทนำ

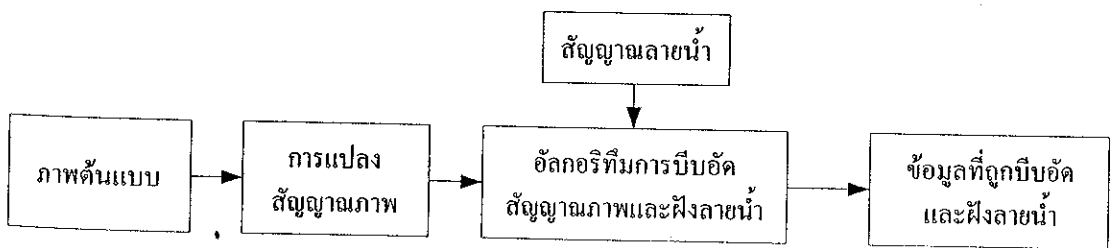
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา ได้มีการนำข้อมูลดิจิทัลเข้ามาใช้กันอย่างแพร่หลายผ่านทางช่องทางต่าง ๆ เช่น ระบบเครือข่ายคอมพิวเตอร์ อินเทอร์เน็ต โทรศัพท์มือถือ กล้องถ่ายรูป เป็นต้น ซึ่งจะเห็นว่าเกือบจะเป็นส่วนหนึ่งของชีวิตประจำวัน ข้อมูลดิจิทัลที่ใช้งานกันก็มีหลายประเภทเช่นกัน ข้อมูลดิจิทัลที่เป็นที่นิยมอย่างหนึ่ง คือ รูปภาพดิจิทัล เนื่องจากปัจจุบันเทคโนโลยีของอุปกรณ์ที่ใช้ถ่ายภาพได้พัฒนาไปอย่างรวดเร็ว ทำให้บุคคลทั่วไปสามารถที่จะถ่ายภาพได้อย่างง่ายดาย นอกจากนี้ยังปรับปรุงให้มีความสะดวกมากยิ่งขึ้นด้วยฟังก์ชันการใช้งานต่าง ๆ และยังสามารถใช้งานร่วมกับอุปกรณ์อื่น ๆ ได้อีกด้วย ไม่ว่าจะเป็นในโทรศัพท์มือถือ คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล คอมพิวเตอร์พกพา ภาพดิจิทัลมีข้อดีคือ สามารถถ่ายโอน จัดเก็บ คัดแปลงและคัดลอกได้ง่ายทำให้ได้รับความนิยมอย่างรวดเร็วและแพร่หลาย เนื่องจากภาพดิจิทัลสามารถที่จะนำไปใช้ผ่านระบบเครือข่ายได้จึงทำให้เกิดปัญหาของการละเมิดลิขสิทธิ์ ไม่สามารถที่จะอ้างสิทธิ์ความเป็นเจ้าของได้ ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญของอุตสาหกรรมทางด้านภาพถ่าย วิธีการหนึ่งที่นิยมใช้ในการป้องกันการละเมิดลิขสิทธิ์ของภาพดิจิทัล คือ การฝังลายน้ำดิจิทัล ซึ่งเป็นการใส่รหัสเฉพาะเข้าไปในภาพ โดยผู้ที่คัดลอกภาพไปจะไม่ทราบว่า มีลายน้ำอยู่ในภาพ และเมื่อต้องการระบุความเป็นเจ้าของก็ต้องทำการคัดแยกลายน้ำนั้นออกมาด้วยรหัสลับที่เจ้าของภาพได้ใช้ในขั้นตอนการฝังลายน้ำ สำหรับสัญญาณลายน้ำที่ทำการฝังเข้าไปนั้นจะต้องไม่ทำให้ภาพที่ถูกฝังลายน้ำเกิดความผิดเพี้ยนไปจาก ภาพต้นแบบมากนัก กล่าวคือ คุณภาพของภาพหลังการฝังลายน้ำจะต้องไม่ลดลงต่ำมากจนเกินไป ซึ่งจะทำให้ภาพที่ได้นั้นไม่เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน นอกจากนี้สัญญาณลายน้ำควรจะสามารถคัดแยกได้ง่ายสำหรับผู้ที่ เป็นเจ้าของ มีความน่าเชื่อถือและมีความทนทานต่อการถูกโจมตีจากการบีบอัดสัญญาณภาพ การประมวลผลภาพ พื้นฐานต่าง ๆ จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การฝังลายน้ำในโดเมนการแปลงจะให้ความทนทานของสัญญาณลายน้ำดีกว่าในโดเมนเวลา ซึ่งการแปลง สัญญาณภาพที่นิยมใช้กัน เช่น การแปลงคิสคริต โทไชน์ การแปลงฟูริเยร์ และการแปลงเวฟเล็ต เป็นต้น

นอกจากนี้ข้อมูลดิจิทัลส่วนใหญ่ที่ใช้งานกันในปัจจุบันจะใช้ผ่านทางระบบเครือข่ายคอมพิวเตอร์และอินเทอร์เน็ตในการรับส่งข้อมูล ถ้าข้อมูลที่น่ามาใช้เป็นข้อมูลที่มีขนาดใหญ่จะทำให้ต้องใช้เวลาในการรับส่งข้อมูลมาก ดังนั้นจึงต้องมีการลดขนาดของข้อมูลก่อนที่จะทำการรับส่งข้อมูล ซึ่งสามารถทำได้โดยใช้อัลกอริทึมการบีบอัดข้อมูลดิจิทัลต่าง ๆ จึงทำให้มีความรวดเร็วมากยิ่งขึ้น และเมื่อการบีบอัดข้อมูลช่วยลดขนาดของข้อมูลลงก็จะทำให้เกิดประโยชน์อีกอย่าง คือ ช่วยประหยัด

พื้นที่ในการจัดเก็บข้อมูล เช่น ข้อมูลภาพสีที่ยังไม่ผ่านการบีบอัด ขนาด 1024×1024 จะต้องใช้พื้นที่ในการจัดเก็บประมาณ 3 MB เป็นต้น ซึ่งทำให้สิ้นเปลืองพื้นที่ในการจัดเก็บมากและสร้างปัญหาให้กับการใช้งานบางประเภท เช่น ภาพถ่ายทางการแพทย์ซึ่งมีผู้ใช้บริการจำนวนมากในแต่ละวัน ภาพถ่ายดาวเทียม เป็นต้น การบีบอัดสัญญาณภาพแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก คือ การบีบอัดสัญญาณภาพแบบไม่มีการสูญเสียและการบีบอัดสัญญาณภาพแบบมีการสูญเสีย ซึ่งก็มีการนำไปใช้งานในด้านต่าง ๆ ที่แตกต่างกัน โดยการบีบอัดสัญญาณภาพแบบไม่มีการสูญเสียนั้นจะส่วนใหญ่จะนำไปใช้งานที่ต้องการความละเอียดของภาพสูง แต่ที่เป็นที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปเป็นการบีบอัดสัญญาณภาพแบบมีการสูญเสีย เนื่องจากสามารถที่จะลดขนาดของข้อมูลภาพได้มากกว่าโดยการยอมให้เกิดการหายไปของข้อมูลได้แต่จะไม่สามารถสังเกตเห็นหรือภาพมีความแตกต่างกับภาพต้นแบบน้อยมาก ซึ่งการบีบอัดสัญญาณภาพแบบนี้ก็สามารถแบ่งย่อยได้หลายประเภทเช่นกัน แต่ที่ให้ผลการทดสอบที่ดีจะต้องมีการแปลงสัญญาณภาพก่อนเพื่อช่วยลดการสูญเสีย โดยการบีบอัดสัญญาณภาพที่ใช้กันเป็นมาตรฐานในปัจจุบัน คือ การบีบอัดสัญญาณภาพมาตรฐานแบบ JPEG ซึ่งจะใช้การแปลงดิสครีตโคไซน์ และได้พัฒนาต่อมาเป็นการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ JPEG2000 ซึ่งใช้การแปลงเวฟเล็ต นอกจากนี้ ในช่วงที่ผ่านมาได้มีการนำเอาการแปลงมัลติเวฟเล็ตมาใช้ในการบีบอัดสัญญาณภาพและยังได้รับความนิยมที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับด้านอื่น ๆ ด้วยเช่นกัน

จากที่กล่าวมาแล้วนั้นจะเห็นว่าการบีบอัดสัญญาณภาพและการสร้างลายน้ำดิจิทัลมีประโยชน์ต่อการนำข้อมูลภาพดิจิทัลไปใช้เป็นอย่างมาก ทั้งในด้านของการลดขนาดของข้อมูล พื้นที่ในการจัดเก็บและป้องกันการละเมิดลิขสิทธิ์อีกด้วย และเนื่องจากอัลกอริทึมทั้งสองมีกระบวนการบางส่วนที่เหมือนกันจึงสามารถรวมสองอัลกอริทึมนี้เข้าด้วยกันได้ ซึ่งจะช่วยลดความซับซ้อนของกระบวนการและลดเวลาในการดำเนินการลง แผนภาพการรวมอัลกอริทึมการบีบอัดสัญญาณภาพและการฝังลายน้ำเข้าด้วยกันแสดงดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 แผนภาพอัลกอริทึมการบีบอัดสัญญาณและฝังลายน้ำ

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาหลักการ ทฤษฎี และการประยุกต์ใช้ของการแปลงมัลติเวฟเล็ต
- 2) เพื่อศึกษาและศึกษาค้นคว้าวิธีการรวมกระบวนการบีบอัดสัญญาณภาพและการสร้างสัญญาณลายน้ำดิจิทัล
- 3) เพื่อศึกษาและพัฒนาอัลกอริทึมการบีบอัดสัญญาณภาพและการสร้างสัญญาณลายน้ำดิจิทัลโดยใช้การแปลงมัลติเวฟเล็ต

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

- 1) ใช้ภาพทดสอบเป็นระดับเทา 8 bpp ขนาด 512×512
- 2) ใช้สัญญาณลายน้ำแบบภาพขาวดำ ขนาด 16×16 ดังรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 ภาพลายน้ำที่ใช้ในการทดสอบ

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) พัฒนาอัลกอริทึมการบีบอัดสัญญาณภาพพร้อมกับการฝังลายน้ำโดยใช้การแปลงมัลติเวฟเล็ต
- 2) พัฒนาโปรแกรมในการบีบอัดสัญญาณภาพและการสร้างสัญญาณลายน้ำดิจิทัลโดยใช้ภาษา C++
- 3) ทดสอบโปรแกรมกับภาพตัวอย่าง วัดคุณภาพของภาพและความคงทนของสัญญาณลายน้ำดิจิทัล
- 4) เปรียบเทียบผลการทดสอบที่ใช้การแปลงมัลติเวฟเล็ตกับการแปลงเวฟเล็ต

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

- 1) ดำเนินการศึกษากการแปลงสัญญาณภาพด้วยวิธีการแปลงดีสครีตเวฟเล็ตและการแปลงดีสครีตมัลติเวฟเล็ต
- 2) ดำเนินการศึกษอัลกอริทึมการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ SPIHT และการฝังลายน้ำดิจิทัล

3) ศึกษาผลของการแปลงสัญญาณภาพต่ออัลกอริทึมการบีบอัดสัญญาณภาพและการฝังลายน้ำดิจิทัล

4) ดำเนินการพัฒนาอัลกอริทึมการบีบอัดสัญญาณภาพพร้อมกับการฝังลายน้ำดิจิทัล

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) ได้อัลกอริทึมการบีบอัดสัญญาณพร้อมกับการฝังลายน้ำโดยใช้การแปลงมัลติเวฟเล็ด เพื่อใช้ในการลดขนาดของข้อมูลภาพและป้องกันการละเมิดลิขสิทธิ์

2) ได้ผลการวิจัยที่นำการแปลงมัลติเวฟเล็ดมาประยุกต์ใช้ เพื่อเป็นแนวทางในการดำเนินการวิจัยต่อไป

3) ได้โปรแกรมต้นแบบที่ได้พัฒนามาจากอัลกอริทึมการบีบอัดสัญญาณภาพพร้อมกับการฝังลายน้ำดิจิทัล

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

กระบวนการบีบอัดสัญญาณภาพพร้อมกับการฝังลายน้ำดิจิทัลอนันต์จะต้องใช้การแปลงสัญญาณภาพก่อนการเข้ารหัสเพื่อความทนทานของสัญญาณลายน้ำ ซึ่งการแปลงที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก คือ การแปลงเวฟเล็ตและการแปลงมัลติเวฟเล็ต ดังนั้น ในหัวข้อที่ 2.2 จึงได้กล่าวถึงขั้นตอนวิธีการแปลงมัลติเวฟเล็ต และเมื่อนำกระบวนการบีบอัดสัญญาณภาพมารวมกับการฝังลายน้ำ ในหัวข้อที่ 2.3 จึงอธิบายถึงหลักการพื้นฐานของการบีบอัดสัญญาณภาพประเภทต่าง ๆ และหัวข้อที่ 2.4 การสร้างสัญญาณลายน้ำดิจิทัลด้วย นอกจากนี้ในหัวข้อที่ 2.5 ได้อธิบายถึงรูปแบบวิธีการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ Set Partitioning in Hierarchical Tree ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ลำดับต่อมาหัวข้อที่ 2.6 เป็นวิธีการวัดประสิทธิภาพของการบีบอัดสัญญาณภาพและการฝังลายน้ำ หัวข้อที่ 2.7 เป็นการสรุปเนื้อหาของบท

2.2 การแปลงมัลติเวฟเล็ต

มัลติเวฟเล็ตเป็นการพัฒนาเพิ่มเติมต่อมาจากเวฟเล็ต โดยมูลฐานของปริภูมิ $L^2(\mathbb{R})$ ถูกสร้างโดยการเลื่อน (translation) และการขยาย (dilates) ของฟังก์ชันเวฟเล็ตตั้งแต่ 2 ฟังก์ชันขึ้นไป ซึ่งเรียกว่า มัลติเวฟเล็ต โดยทั่วไปเวฟเล็ตจะมีฟังก์ชันย่อ-ขยาย (scaling function) $\phi(t)$ และฟังก์ชันเวฟเล็ต (wavelet function) $\psi(t)$ เพียงฟังก์ชันเดียว แต่มัลติเวฟเล็ตมีฟังก์ชันย่อ-ขยายและฟังก์ชันเวฟเล็ตตั้งแต่สองฟังก์ชันขึ้นไป หรือสามารถแสดงได้ในรูปแบบของเวกเตอร์ คือ $\Phi(t) = (\phi_1(t) \ \phi_2(t) \ \dots \ \phi_r(t))^T$ เมื่อ r คือ จำนวนของฟังก์ชันย่อ-ขยาย ซึ่งมีค่าเป็นจำนวนเต็มที่มากกว่า 1 และ $\Phi(t)$ ถูกเรียกว่า มัลติสเกลลิงฟังก์ชัน (multiscaling function)

นอกจากนี้ฟังก์ชันมัลติเวฟเล็ต (multiwavelet function) ถูกนิยามจากเซตของฟังก์ชันเวฟเล็ตคือ $\Psi(t) = (\psi_1(t) \ \psi_2(t) \ \dots \ \psi_r(t))^T$ แต่เมื่อ $r=1$ จะเรียกว่า สเกลาร์เวฟเล็ตหรือเรียกสั้น ๆ ว่าเวฟเล็ต (wavelet) นั่นเอง

สำหรับมัลติเวฟเล็ตจะมีความคล้ายคลึงกันกับสเกลาร์เวฟเล็ต โดยสมการ refinement คือ

$$\Phi(t) = \sqrt{m} \sum_{k=k_0}^{k_1} h(k) \Phi(mt - k), k \in Z \quad (2.1)$$

จำนวนเต็ม m คือ ตัวประกอบการขยาย (dilation factor) มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 2 ซึ่ง $h(k)$ เรียกว่า สัมประสิทธิ์รีเคอร์ชัน (recursion coefficient) เป็นเมตริกซ์ขนาดเท่ากับ $r \times r$ (Keinert, 2004) และจะตั้งฉากกันก็ต่อเมื่อ

$$\langle \phi(t), \phi(t-k) \rangle = \int \phi(t)\phi(t-k) dt = \delta_{0k} I \quad (2.2)$$

กำหนดให้ $m=2$ จะได้สมการการขยายและสมการการเลื่อน คือ

$$\Phi(t) = \sqrt{2} \sum_k h(k) \Phi(2t-k) \quad (2.3)$$

$$\Psi(t) = \sqrt{2} \sum_k g(k) \Phi(2t-k) \quad (2.4)$$

มัลติเวฟเล็ตที่ใช้อย่างแพร่หลายชนิดหนึ่ง ถูกสร้างขึ้นโดย Donovan, Geromino, Hardin และ Massopust หรือที่เรียกว่า DGHM ซึ่งประกอบด้วยฟังก์ชันย่อ-ขยายและฟังก์ชันเวฟเล็ตเท่ากับสอง ($r=2$) ซึ่งเป็นมัลติเวฟเล็ตที่มีคุณสมบัติตั้งจาก คุณสมบัติสมมาตร คุณสมบัติการประมาณอันดับสองและคุณสมบัติ compact support ซึ่งไม่สามารถเกิดขึ้นได้พร้อมกันในการแปลงเวฟเล็ต

สมการการขยายและสมการการเลื่อนของระบบ DGHM มัลติเวฟเล็ต จะมีสัมประสิทธิ์ 4 ค่า

คือ

$$\Phi(t) = \begin{pmatrix} \phi_1(t) \\ \phi_2(t) \end{pmatrix} = \sum_{k=-2}^1 h(k) \begin{pmatrix} \phi_1(2t-k) \\ \phi_2(2t-k) \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

เมื่อ

$$h(-2) = \frac{1}{20} \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} \quad h(-1) = \frac{1}{20} \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 9 & -3\sqrt{2} \end{pmatrix}$$

$$h(0) = \frac{1}{20} \begin{pmatrix} 6\sqrt{2} & 0 \\ 9 & 10\sqrt{2} \end{pmatrix} \quad h(1) = \frac{1}{20} \begin{pmatrix} 6\sqrt{2} & 16 \\ -1 & -3\sqrt{2} \end{pmatrix}$$

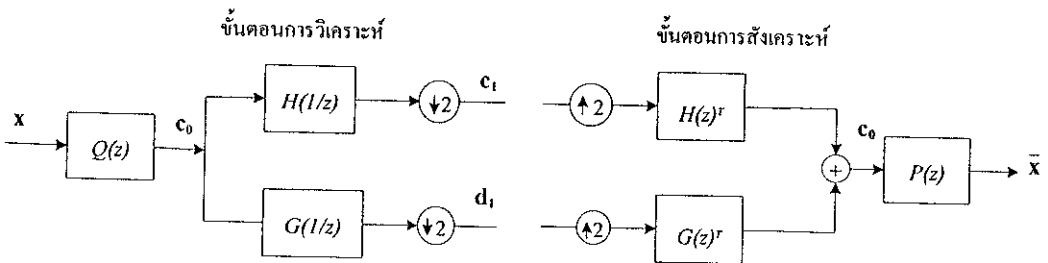
$$\Psi(t) = \begin{pmatrix} \psi_1(t) \\ \psi_2(t) \end{pmatrix} = \sum_{k=-2}^1 g(k) \begin{pmatrix} \phi_1(2t-k) \\ \phi_2(2t-k) \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

เมื่อ

$$g(-2) = \frac{1}{20} \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ -\sqrt{2} & 0 \end{pmatrix} \quad g(-1) = \frac{1}{20} \begin{pmatrix} 9 & -3\sqrt{2} \\ 9\sqrt{2} & -6 \end{pmatrix}$$

$$g(0) = \frac{1}{20} \begin{pmatrix} 9 & -10\sqrt{2} \\ -9\sqrt{2} & 0 \end{pmatrix} \quad g(1) = \frac{1}{20} \begin{pmatrix} -1 & -3\sqrt{2} \\ \sqrt{2} & 6 \end{pmatrix}$$

ทฤษฎีของการแปลงมัลติเวฟเล็ดมีแนวความคิดมาจากการวิเคราะห์หลายระดับความละเอียด (Multiresolution analysis : MRA) เหมือนกับการแปลงเวฟเล็ด แต่จะแตกต่างกันที่การแปลงมัลติเวฟเล็ดจะมีฟังก์ชันย่อ-ขยายและฟังก์ชันเวฟเล็ดมากกว่าหนึ่งฟังก์ชัน การแปลงมัลติเวฟเล็ดกำลังเป็นที่น่าสนใจเนื่องจากคุณสมบัติต่าง ๆ ซึ่งไม่สามารถเกิดขึ้นได้พร้อมกันในการแปลงเวฟเล็ด การแปลงมัลติเวฟเล็ดจะมีหลักการแปลงเหมือนกับการแปลงเวฟเล็ด โดยจะอาศัยหลักการของฟิลเตอร์เบงค์ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งจะประกอบด้วยสองขั้นตอนคือ ขั้นตอนการวิเคราะห์และขั้นตอนการสังเคราะห์ แต่จะแตกต่างกันที่สัมประสิทธิ์ตัวกรองความถี่ต่ำและความถี่สูง สำหรับสัมประสิทธิ์ของการแปลงมัลติเวฟเล็ดนั้นจะเป็นเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ ส่วนการแปลงเวฟเล็ดนั้นจะเป็นสัมประสิทธิ์ที่เป็นสเกลาร์



รูปที่ 2.1 ฟิลเตอร์เบงค์ของมัลติเวฟเล็ดใน 1 มิติ

แผนภาพฟิลเตอร์แบงก์ดังรูปที่ 2.1 สัมประสิทธิ์ c_1 และ d_1 มีความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์ c_0 ตามอัลกอริทึมการแยกองค์ประกอบ (decomposition) และการสร้างกลับ (reconstruction) ดังนี้

$$c_1(k) = \sum_n h(n)c_0(2k+n) \quad (2.7)$$

$$d_1(k) = \sum_n g(n)c_0(2k+n) \quad (2.8)$$

$$c_0(k) = \sum_n h(k-2n)^T c_1(n) + \sum_n g(k-2n)^T d_1(n) \quad (2.9)$$

พิจารณาฟิลเตอร์แบงก์มัลติเวฟเล็สดังรูปที่ 2.1 เมื่อ $Q(z)$ และ $P(z)$ คือ ตัวกรองก่อน (prefilter) และตัวกรองหลัง (postfilter) ตามลำดับ เวกเตอร์ x สามารถหาได้จากตัวดำเนินการดังนี้

$$D_r : R^Z \rightarrow (R^r)^Z \quad (2.10)$$

ซึ่งจะจัดเรียงลำดับแบบสเกลาร์ (scalar sequence) เป็นลำดับที่ถูกจัดกลุ่ม ที่มีเวกเตอร์ความยาว r สมมติให้ลำดับแบบสเกลาร์เป็น $x(n)$ โดยที่ $n \in Z$ ดังนั้น $x = D_r(x)$ หาได้จาก

$$x = D_r(x) = (\downarrow r) \begin{pmatrix} x(n) \\ x(n+1) \\ \vdots \\ x(n+r-1) \end{pmatrix}_{n \in Z}$$

$$x = D_r(x) = \begin{pmatrix} x(rn) \\ x(rn+1) \\ \vdots \\ x(rn+r-1) \end{pmatrix}_{n \in Z} \quad (2.11)$$

เช่น $r=2$ ลำดับเวกเตอร์จะได้เป็น

$$x(0) = \begin{pmatrix} x(0) \\ x(2) \end{pmatrix}, x(1) = \begin{pmatrix} x(1) \\ x(3) \end{pmatrix}$$

จากที่กล่าวมาเป็นการแปลงมัลติเวฟเล็ดในหนึ่งระดับเท่านั้น การแปลงมัลติเวฟเล็ดหลายระดับสามารถทำได้โดยการนำสัมประสิทธิ์การแปลงแบบค้อยความถี่ต่ำมาเป็นอินพุตของขั้นตอนการแปลงแบบเดิมตามจำนวนระดับที่ต้องการ

ในกรณีของการแปลงสัญญาณภาพซึ่งเป็นสัญญาณใน 2 มิติ สามารถทำได้เช่นเดียวกับการแปลงในหนึ่งมิติ โดยการแปลงสัญญาณใน 1 มิติของแต่ละแถวโดยถือว่าในแต่ละแถวเป็นสัญญาณใน 1 มิติ จากนั้นทำการแปลงสัญญาณของแต่ละคอลัมน์จนครบตามขนาดของภาพ อย่างไรก็ตาม การแปลงมัลติเวฟเล็ดจะต้องทำการกรองก่อน (prefiltering) ในแต่ละแถวและในแต่ละคอลัมน์เพื่อให้ได้กลุ่มของเวกเตอร์ c_0

ในการแปลงสัญญาณภาพด้วยการแปลงเวฟเล็ดจำนวน p ระดับ จะได้แบนด์ค้อยทั้งหมดเท่ากับ $(3p+1)$ แบนด์ค้อย แต่การแปลงมัลติเวฟเล็ดจะได้แบนด์ค้อยเท่ากับ $r^2(3p+1)$ แบนด์ค้อย หรือได้แบนด์ค้อยเท่ากับการแปลงเวฟเล็ดขึ้นอยู่กับการรวมกลับสัญญาณ

การรวมกลับสัญญาณของสัมประสิทธิ์การแปลงมีด้วยกันสองวิธี ซึ่งจะทำให้ได้จำนวนแบนด์ค้อยที่แตกต่างกัน เมื่อ c_1 คือ ลำดับเวกเตอร์เอาท์พุตที่ได้จากฟิลเตอร์เบงค์ ดังนี้

$$c_1 = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{r1} & c_{r2} & \dots & c_{rn} \end{pmatrix} \quad (2.12)$$

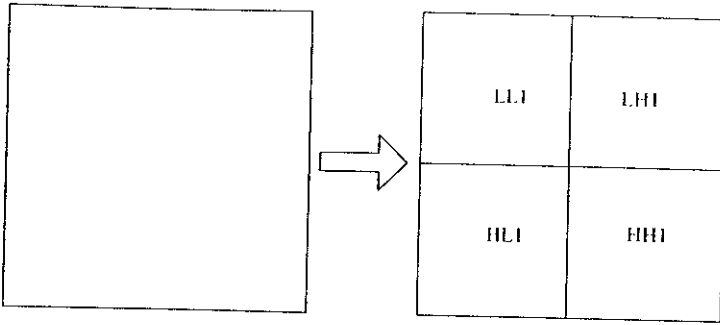
กำหนดให้ c_1 เป็นลำดับแบบสเกลาร์ที่ได้จากการจัดเรียงของลำดับแบบเวกเตอร์ c_1 ดังนั้น วิธีการรวมกลับแบบที่ 1 จะได้ดังสมการที่ (2.13)

$$c_1 = (c_{11}c_{21} \dots c_{r1} c_{12}c_{22} \dots c_{r2} \dots c_{1n}c_{2n} \dots c_{rn}) \quad (2.13)$$

หรือการรวมกลับแบบที่ 2 ดังสมการที่ (2.14)

$$c_1 = (c_{11}c_{12} \dots c_{1n} c_{21}c_{22} \dots c_{2n} \dots c_{r1}c_{r2} \dots c_{rn}) \quad (2.14)$$

เมื่อทำการแปลงเวฟเล็ด 1 ระดับจะได้แบนด์ค้อยทั้งหมด 4 แบนด์ค้อยดังรูปที่ 2.2 ซึ่งแต่ละแบนด์ค้อยแสดงถึงสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการผ่านตัวกรองต่าง ๆ เช่น แบนด์ค้อย LHI แทนสัมประสิทธิ์ที่แถวของสัญญาณภาพผ่านตัวกรองความถี่สูง และคอลัมน์ของสัญญาณภาพผ่านตัวกรองความถี่ต่ำ เป็นต้น



(ก) ภาพต้นแบบ

(ข) ภาพจากการแปลงเวฟเล็ด

รูปที่ 2.2 การแปลงเวฟเล็ด 1 ระดับ

สำหรับการแปลงมัลติเวฟเล็ด 1 ระดับที่มีฟังก์ชันย่อย-ขยายเท่ากับ 2 ($r=2$) โดยการจัดเรียงสัมประสิทธิ์แบบที่ 1 จะได้แบนด์ย่อยสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ เหมือนกับการแปลงเวฟเล็ดดังรูปที่ 2.3 (ก) แต่การจัดเรียงสัมประสิทธิ์แบบที่ 2 จะได้ดังรูปที่ 2.3 (ข)

LLI	LHI
HLI	HHI

(ก) แบบที่ 1

LOLO	L1LO	LOHO	L1HO
LOL1	L1L1	LOH1	L1H1
HOLO	H1LO	HOHO	H1HO
HOL1	H1L1	HOH1	H1H1

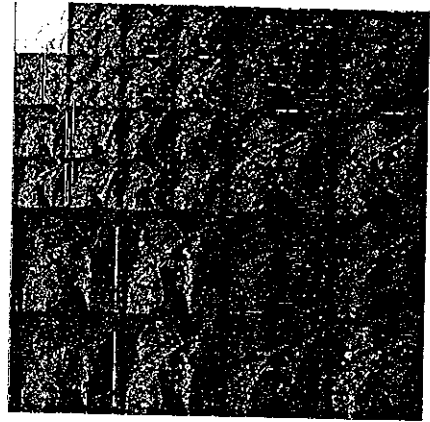
(ข) แบบที่ 2

รูปที่ 2.3 การแปลงมัลติเวฟเล็ด 1 ระดับและจัดเรียงสัมประสิทธิ์แบบต่าง ๆ

การแปลงมัลติเวฟเล็ดหลายระดับสามารถทำได้เช่นเดียวกัน โดยการนำสัมประสิทธิ์การประมาณค่าเป็นอินพุตของฟิลเตอร์แบงก์ตามจำนวนระดับที่ต้องการ ตัวอย่างภาพ Lena ที่ผ่านการแปลงมัลติเวฟเล็ดทั้งหมด 3 ระดับ จัดเรียงสัมประสิทธิ์แบบที่ 1 และแบบที่ 2 แสดงได้ดังรูปที่ 2.4 (ก) และรูปที่ 2.4 (ข) ตามลำดับ สำหรับในงานวิจัยนี้จะใช้การจัดเรียงสัมประสิทธิ์แบบที่ 1



(ก) จัดเรียงสัมประสิทธิ์แบบที่ 1



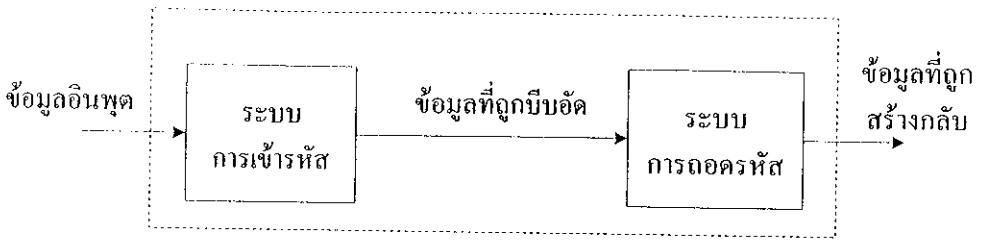
(ข) จัดเรียงสัมประสิทธิ์แบบที่ 2

รูปที่ 2.4 ภาพ Lena หลังการแปลงมัลติเวฟเล็ด 3 ระดับและจัดเรียงสัมประสิทธิ์ทั้งสองแบบ

2.3 หลักการบีบอัดสัญญาณภาพเบื้องต้น

ปัจจุบันปริมาณการใช้สัญญาณภาพดิจิทัลในด้านต่าง ๆ ได้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยเป็นผลมาจากเทคโนโลยีด้านการประมวลผลสัญญาณภาพได้มีการพัฒนาขึ้นหลายด้านและการพัฒนาของเครือข่ายอินเทอร์เน็ตทำให้การกระจายตัวของข้อมูลภาพทำได้ง่ายและเข้าถึงผู้ใช้งานอย่างกว้างขวางโดยทั่วไปแล้วสัญญาณภาพดิจิทัลมีความต้องการพื้นที่ในการจัดเก็บและแบนด์วิธสำหรับการส่งจำนวนมาก เช่น ภาพสีขนาด 640×480 พิกเซล จำนวน 1 ภาพ มีความละเอียด 24 บิตต่อพิกเซล จะต้องใช้พื้นที่ในการจัดเก็บประมาณ 1 เมกะไบต์ ทำให้สิ้นเปลืองพื้นที่และเกินแบนด์วิธของการส่งวิธีการบีบอัดสัญญาณภาพจึงเป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการแก้ปัญหานี้ ซึ่งเป็นวิธีการลดข้อมูลที่ไม่จำเป็นในภาพ หรือกล่าวอีกอย่างว่าเป็นการเพิ่มปริมาณของพื้นที่ส่วนกลางที่ใช้จัดเก็บและเพิ่มแบนด์วิธของการสื่อสาร ทำให้ปัญหาด้านการบีบอัดสัญญาณภาพเป็นปัญหาที่มีความสำคัญในการประยุกต์ข้อมูลด้านมัลติมีเดีย

เทคนิคการบีบอัดสัญญาณภาพ (image coding) เป็นการช่วยลดความต้องการของจำนวนบิตที่ใช้ในการแทนสัญญาณภาพ ส่วนการย้อนกลับกระบวนการนี้เรียกว่า การถอดรหัส (image decoding) เพื่อสร้างกลับสัญญาณภาพจากข้อมูลที่ถูกบีบอัด ขั้นตอนการเข้ารหัสและถอดรหัสแสดงได้ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งเรียกรวมกันว่า CODEC จุดประสงค์ของการบีบอัดสัญญาณภาพ คือ การลดจำนวนบิตให้ได้มากที่สุด แต่ยังคงรักษาความละเอียดและคุณภาพของภาพให้ใกล้เคียงกับภาพต้นแบบ



รูปที่ 2.5 รูปแบบการเข้ารหัสและถอดรหัส CODEC

การบีบอัดสัญญาณภาพสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก คือ การบีบอัดสัญญาณภาพแบบไม่มีการสูญเสีย (lossless image compression) และการบีบอัดสัญญาณภาพแบบมีการสูญเสีย (lossy image compression) โดยการพิจารณาจากความแตกต่างกันของภาพต้นแบบกับภาพจากการสร้างกลับ ถ้าไม่มีความแตกต่างกันเลยแสดงว่าเป็นการบีบอัดสัญญาณภาพแบบไม่มีการสูญเสีย ส่วนการบีบอัดสัญญาณภาพแบบสูญเสียจะอาศัยการละทิ้งข้อมูลที่ไม่มีความสำคัญไป เพื่อให้เกิดความแตกต่างกับภาพต้นแบบน้อยที่สุด

การใช้การบีบอัดสัญญาณภาพแบบไม่มีการสูญเสียไม่เป็นที่แพร่หลายนัก ส่วนมากนิยมใช้กับงานที่ต้องการความละเอียดสูง เช่น งานทางด้านทางการแพทย์ เป็นต้น แต่การบีบอัดสัญญาณภาพแบบมีการสูญเสียจะนิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีอัตราการบีบอัดสูงกว่าการบีบอัดสัญญาณภาพแบบไม่มีการสูญเสียและคุณภาพของภาพหลังการบีบอัดอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้ กลุ่มย่อยของการบีบอัดสัญญาณภาพแต่ละประเภทสามารถจำแนกได้ดังรูปที่ 2.6

2.3.1 การบีบอัดสัญญาณภาพแบบไม่มีการสูญเสีย

เทคนิคการบีบอัดสัญญาณภาพแบบไม่มีการสูญเสีย เป็นวิธีการที่ภาพต้นแบบสามารถที่จะสร้างกลับจากข้อมูลภาพที่ถูกเข้ารหัสได้อย่างสมบูรณ์ โดยใช้ข้อมูลทางสถิติเพื่อช่วยในการกำจัดข้อมูลที่ซ้ำเป็น เทคนิคการบีบอัดสัญญาณภาพที่เป็นที่รู้จักกันมีดังนี้ (Gonzalez and Woods, 1992; Subramanya, 2001)

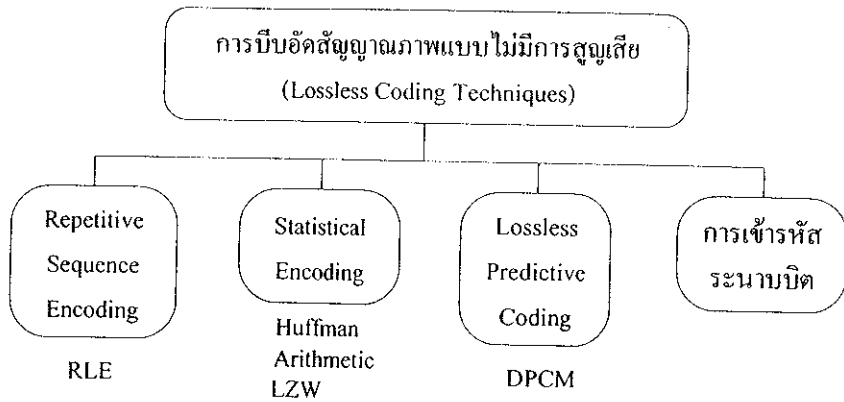
1) การเข้ารหัสรันเลนจอร์ เป็นเทคนิคการแทนค่าลำดับของสัญลักษณ์หรือค่าพิกเซลของภาพด้วยลำดับที่สั้นกว่า โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงของค่าพิกเซลของภาพที่อยู่ติดกันซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนักและจะมีค่าซ้ำกัน ทำให้สามารถเก็บค่าพิกเซลและจำนวนที่ซ้ำกันแทนการเก็บค่าพิกเซลโดยตรง ส่วนใหญ่การเข้ารหัสแบบนี้จะใช้หลังจากกระบวนการบีบอัดสัญญาณภาพแบบสูญเสีย

ถ้าข้อมูลภาพของแต่ละพิกเซลเป็นดังนี้

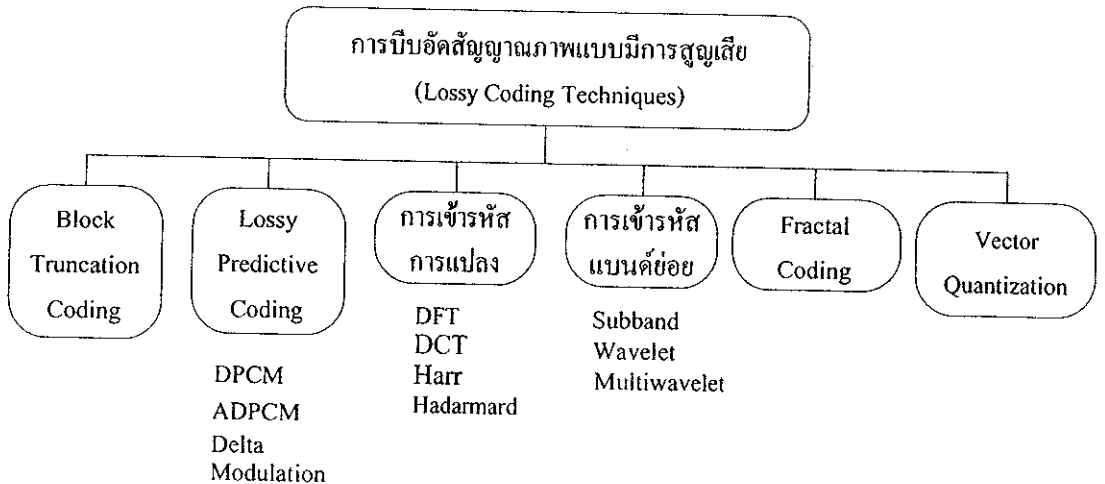
00 00 11 11 11 33 33 33 55 56 56 57 57 57 57 ...

เมื่อเข้ารหัสแบบรันเลนจอร์ จะได้ดังนี้

00 02 11 03 33 03 55 01 56 02 57 04 ...



(ก) การจำแนกประเภทของการบีบอัดสัญญาณภาพแบบไม่มีการสูญเสีย



(ข) การจำแนกประเภทของการบีบอัดสัญญาณภาพแบบมีการสูญเสีย

RLE = Run Length Encoding

LZW = Lempel-Ziv-Welch

DPCM = Differential Pulse Code Modulation

ADPCM = Adaptive Differential Pulse Code Modulation

รูปที่ 2.6 ประเภทของการบีบอัดสัญญาณภาพ (Subramanya, 2001)

2) การเข้ารหัสฮัฟแมน เป็นการเข้ารหัสสัญลักษณ์ที่ใช้หลักการของความน่าจะเป็น โดยสัญลักษณ์ที่มีความน่าจะเป็นมากจะถูกกำหนดให้ใช้จำนวนบิตน้อยกว่าสัญลักษณ์ที่มีความน่าจะเป็นน้อย ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการบีบอัดสัญญาณภาพแบบมาตรฐานจะใช้ขั้นตอนการบีบอัดสัญญาณภาพแบบสูญเสียก่อน จากนั้นจึงใช้การเข้ารหัสฮัฟแมนในส่วนของขั้นตอนสุดท้าย

3) การเข้ารหัสเลขคณิต คล้ายกับการเข้ารหัสฮัฟแมนนั่นคือจะใช้ข้อมูลทางสถิติ นั่นเอง แต่จะมีอัตราการบีบอัดที่สูงกว่าการเข้ารหัสฮัฟแมนและจำนวนบิตจะไม่ได้แทนสัญลักษณ์แต่ละตัวจึงทำให้อัตราบิตน้อยลง นอกจากนี้ยังแยกแบบจำลองทางสถิติจากโครงสร้างของขั้นตอนการเข้ารหัสและการถอดรหัส นั่นคือข้อมูลทางสถิติของสัญลักษณ์สามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยไม่ส่งผลต่อขั้นตอนการคำนวณในโมดูลการเข้ารหัสและถอดรหัส ซึ่งทำให้การเข้ารหัสเลขคณิตมีความน่าสนใจมากกว่าการเข้ารหัสฮัฟแมน

4) การเข้ารหัส Lempel-Ziv จากการเข้ารหัสฮัฟแมนและการเข้ารหัสเลขคณิตจะเห็นว่าจะต้องทราบถึงความน่าจะเป็นหรือข้อมูลทางสถิติของสัญลักษณ์ แต่ในบางกรณีไม่สามารถที่จะระบุได้แน่ชัดเนื่องจากมีข้อมูลหลายชนิดรวมกัน ทำให้มีการพัฒนาวิธีการเข้ารหัสแบบดิกชันนารี (dictionary-based) โดย Ziv and Lempel (1977) ซึ่งเป็นที่รู้จักกันในชื่อการเข้ารหัส Lempel-Ziv-77 (LZ77) และในอีกหนึ่งปีต่อมาได้นำเสนอวิธีการเลือกดิกชันนารีที่เรียกว่า LZ78

การเปลี่ยนแปลงของอัลกอริทึม LZ77 ทำให้มีการนำไปใช้กับงานด้านอื่น ๆ และเป็นพื้นฐานของการพัฒนาโปรแกรมการบีบอัดที่ได้รับความนิยมอย่างมาก เช่น gzip, winzip, pkzip และรูปแบบการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ Portable Network Graphics (PNG)

อัลกอริทึมที่ได้รับการพัฒนาอีกอย่างหนึ่งที่ได้รับคามนิยมคือ อัลกอริทึม Lempel-Ziv-Welch (LZW) ซึ่งพัฒนาต่อมาจาก LZ78 โดย Welch และอัลกอริทึมนี้ได้ถูกนำไปใช้สำหรับการดำเนินการบีบอัดในระบบปฏิบัติการ UNIX นอกจากนี้ขั้นตอนของ LZW ได้ถูกนำไปใช้ร่วมกับ ไฟล์ภาพ Graphics Interchange Format (GIF)

5) การเข้ารหัสระนาบบิต การเข้ารหัสรูปแบบนี้จะพิจารณาค่าพิกเซลของภาพด้วยค่าไบนารี โดยที่บิตในแต่ละตำแหน่งของแต่ละพิกเซลที่แสดงด้วยค่าไบนารีซึ่งจะมีขนาดเท่ากับขนาดของภาพต้นแบบจะเรียกว่าระนาบบิต แต่ละระนาบบิตสามารถที่จะนำมาใช้ในเทคนิคการเข้ารหัสแบบไม่มีการสูญเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากหลักการที่ว่าพิกเซลข้างเคียงจะมีความสัมพันธ์กัน นั่นหมายความว่าค่าของพิกเซลข้างเคียงจะแตกต่างกันน้อยมาก จึงทำให้บิตข้างเคียงในแต่ละระนาบบิตมีค่าเหมือนกัน ซึ่งจะทำให้เป็นผลดีต่อการเข้ารหัสนั่นเอง

2.3.2 การบีบอัดสัญญาณภาพแบบมีการสูญเสีย

การบีบอัดสัญญาณภาพแบบนี้เป็นวิธีการที่ยอมรับให้เกิดการสูญเสียกับสัญญาณภาพได้และเป็นที่ยอมรับใช้ในการบีบอัดสัญญาณภาพอย่างมาก เนื่องจากสัญญาณภาพที่ผ่านการบีบอัดจะไม่สามารถที่จะสังเกตเห็นข้อมูลในส่วนที่หายไปได้ด้วยตาเปล่า แต่ขนาดของข้อมูลจะขึ้นกับคุณภาพ

นั่นคือ ถ้าทำการบีบอัดสัญญาณภาพให้มีขนาดเล็กคุณภาพของภาพก็จะลดลงเช่นกัน จากระบบการมองเห็นของมนุษย์จะไวต่อส่วนของความถี่ต่ำมากกว่าความถี่สูงของสัญญาณภาพ ดังนั้นต้องจัดการจำนวนบิตที่ใช้แทนความถี่เหล่านั้นให้เหมาะสม ซึ่งองค์ประกอบที่ไม่มีความสำคัญก็สามารถที่จะละทิ้งได้ ทำให้ลดขนาดของข้อมูลลงและสร้างกลับภาพได้ใกล้เคียงกับภาพต้นแบบ

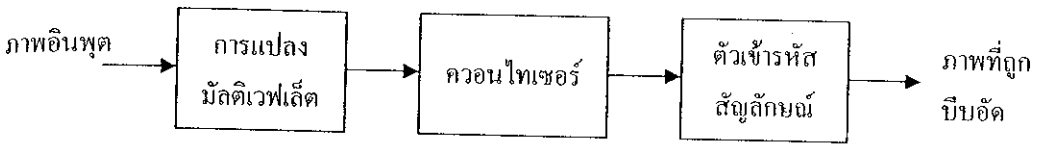
1) *Block truncation coding* วิธีการนี้จะแบ่งภาพออกเป็นบล็อกย่อยที่ไม่ซ้อนทับกัน ซึ่งแต่ละบล็อกจะประกอบไปด้วยค่าพิกเซลของภาพและนำไปคำนวณค่าขีดเริ่มเปลี่ยน ค่าการสร้างกลับ ส่วนใหญ่แล้วค่าขีดเริ่มเปลี่ยนจะใช้ค่าเฉลี่ยของค่าพิกเซลในบล็อกนั้น ๆ ต่อจากนั้นจะได้บิตแมปของแต่ละบล็อกโดยการแทนที่ทุกพิกเซลที่มากกว่าหรือเท่ากับค่าขีดเริ่มเปลี่ยนด้วยค่า 1 และพิกเซลที่น้อยกว่าด้วยค่า 0 ดังนั้นบิตแมปของแต่ละบล็อกจะมีเฉพาะค่า 1 และ 0 เท่านั้น เพื่อใช้ในการสร้างกลับภาพในขั้นตอนการถอดรหัสต่อไป (Bovik, 2005)

2) *การเข้ารหัสการแปลง* เป็นการเข้ารหัสที่ต้องแปลงข้อมูลจากโดเมนเวลาให้อยู่ในรูปของโดเมนความถี่ซึ่งการแปลงสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การแปลง DFT และ DCT เป็นต้น โดยการแปลงเหล่านั้นจะเปลี่ยนค่าพิกเซลของภาพให้อยู่ในรูปแบบที่เรียกว่า สัมประสิทธิ์การแปลง ซึ่งจะมีคุณสมบัติที่ต้องการบางอย่างคือพลังงานส่วนใหญ่ของข้อมูลต้นแบบจะถูกรวมไว้ในบางส่วนของสัมประสิทธิ์การแปลงเท่านั้น ทำให้เป็นผลดีต่อการบีบอัดสัญญาณภาพ เนื่องจากการเข้ารหัสจะเลือกเฉพาะสัมประสิทธิ์ที่มีความสำคัญเท่านั้น จากนั้นจะนำไปทำการควอนไทเซชันและเข้ารหัสเอ็นโทรปี

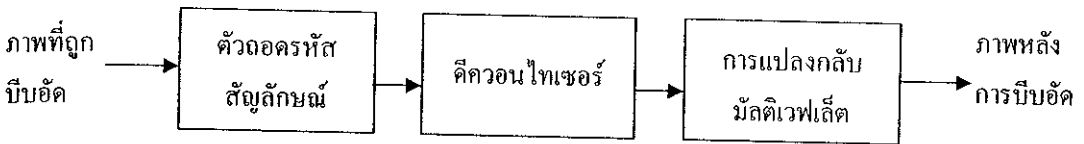
3) *Vector quantization* แนวความคิดพื้นฐานของวิธีนี้คือการพัฒนาคิกชันนารีของเวกเตอร์ที่มีขนาดคงที่เรียกว่า เวกเตอร์รหัส (code vector) โดยทั่วไปเวกเตอร์จะเป็นบล็อกของค่าพิกเซล ดังนั้นภาพจะถูกแบ่งออกเป็นบล็อกที่ไม่ซ้อนทับกัน ต่อจากนั้นนำไปหาเวกเตอร์ที่ตรงกันมากที่สุดในคิกชันนารีและเก็บตำแหน่งนั้นไว้เพื่อเข้ารหัสเอ็นโทรปี

4) *Fractal coding* แนวความคิดสำคัญคือการแยกภาพออกเป็นส่วนย่อยโดยใช้เทคนิคการประมวลผลภาพมาตรฐาน เช่น การแยกสี การตรวจจับขอบ เป็นต้น แต่ยังมีวิธีการอื่นที่สามารถแบ่งภาพออกเป็นส่วนย่อยและให้ผลการบีบอัดที่ดี เรียกว่า การแบ่งแบบ Quadtree และการแบ่งแบบ HV (Fisher, 1995) จากนั้นแต่ละส่วนย่อยจะถูกเปิดดูในไลบรารีที่เรียกว่า iterated function system (IFS) เพื่อให้ได้รหัสที่ใกล้เคียงกับภาพต้นแบบมากที่สุด

5) *การเข้ารหัสแบบคีย์ย่อย* เป็นวิธีการที่ต้องนำสัญญาณภาพไปผ่านแยกองค์ประกอบโดยการแปลง เช่น การแปลง DWT หรือ DMT ให้เป็นแบบคีย์ย่อยต่าง ๆ หลังจากนั้นทำการควอนไทเซชันและเข้ารหัสในแต่ละแบบคีย์ย่อยด้วยอัลกอริทึมการเข้ารหัส ซึ่งขั้นตอนโดยทั่วไปแสดงได้ดังรูปที่ 2.7



(ก) ขั้นตอนการเข้ารหัส



(ข) ขั้นตอนการถอดรหัส

รูปที่ 2.7 ขั้นตอนการบีบอัดสัญญาณภาพโดยใช้การแปลงมัลติเวฟเล็ต

จากรูปที่ 2.7(ก) เป็นขั้นตอนการบีบอัดสัญญาณภาพโดยการนำภาพอินพุตเข้ามาทำการแปลงโดยใช้การแปลงมัลติเวฟเล็ต เพื่อให้ข้อมูลภาพที่จะใช้ในการบีบอัดอยู่ในโดเมนความถี่ ซึ่งจะทำให้การเข้ารหัสมีประสิทธิภาพดีกว่าการใช้ข้อมูลภาพในโดเมนเวลา จากนั้นจะผ่านตัวควอนไทซ์ และเข้ารหัสด้วยอัลกอริทึมต่าง ๆ จากรูปที่ 2.7(ข) แสดงขั้นตอนการถอดรหัส โดยจะนำข้อมูลที่ได้จากการเข้ารหัสมาผ่านอัลกอริทึมการถอดรหัส ก็จะได้สัมประสิทธิ์การแปลงมัลติเวฟเล็ตกลับมา จากนั้นจึงทำการแปลงกลับมัลติเวฟเล็ตก็จะได้ภาพต้นแบบที่ได้จากการสร้างกลับ

2.4 การสร้างสัญญาณลายน้ำดิจิทัล

การสร้างสัญญาณลายน้ำ คือ กระบวนการของการฝังลายน้ำลงในข้อมูลดิจิทัลเพื่อใช้ในการระบุความเป็นเจ้าของ ส่วนลายน้ำดิจิทัล คือ สัญญาณที่ถูกฝังเข้าไปในข้อมูลดิจิทัล เช่น เสียง ภาพ วิดีโอ และข้อความ อย่างถาวรและสามารถตรวจจับหรือคัดแยกออกมาได้ในภายหลัง ลายน้ำดิจิทัลที่ถูกฝังเข้าไปนั้นจะต้องไม่สามารถแยกออกจากข้อมูลดิจิทัลได้ นั่นคือจะต้องมีความทนทานต่อการโจมตี (attack) แบบต่าง ๆ เช่น การกรองแบบต่ำผ่าน การกรองแบบค่ามัธยฐาน การบีบอัดสัญญาณภาพ หรือการตัดภาพ เป็นต้น และต้องไม่ทำให้คุณภาพของข้อมูลดิจิทัลลดลงมากนัก

เทคนิคการฝังลายน้ำดิจิทัล กำเนิดมาจากวิธีการ steganography ซึ่งหมายถึง การเขียนที่ถูกปกปิด (covered writing) มาจากภาษากรีกคำว่า stegano หรือ “covered” และ graphos หรือ “to write” ลายน้ำสามารถแบ่งตามการมองเห็น ออกเป็น 2 ประเภท คือ แบบสามารถมองเห็นได้

(visible) และแบบไม่สามารถมองเห็นได้ (invisible) เช่น สัญลักษณ์ของช่องโทรทัศน์ที่อยู่มุมของจอภาพจะเป็นแบบมองเห็นได้ ซึ่งสามารถทำได้ง่าย แต่จะทำให้คุณภาพของข้อมูลดิจิทัลลดลง สำหรับการฝังลายน้ำแบบไม่สามารถมองเห็นได้นั้น ในงานวิจัยส่วนใหญ่นิยมฝังลายน้ำในโดเมนการแปลง (Transform domain) ซึ่งการแปลงที่ใช้มีด้วยกันหลายประเภท เช่น การแปลงดีสครีตโคไซน์ (DCT) การแปลงเวฟเล็ต (DWT) เป็นต้น และเมื่อเจ้าของข้อมูลนั้นต้องการตรวจสอบก็จะต้องใช้กุญแจลับในการคัดแยกลายน้ำ ซึ่งในการตรวจสอบความถูกต้องของลายน้ำ ถ้าต้องใช้ข้อมูลต้นแบบในการเปรียบเทียบ จะเป็นรูปแบบการฝังลายน้ำที่เรียกว่า non-blind watermarking และถ้าไม่ใช้ข้อมูลต้นแบบในการตรวจจับลายน้ำ เรียกว่า blind watermarking

2.4.1 โครงสร้างของการฝังและการถอดสัญญาณลายน้ำ

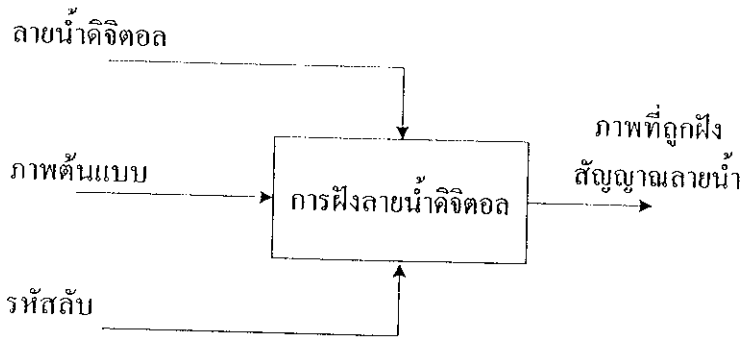
โดยทั่วไปกระบวนการในการสร้างสัญญาณลายน้ำดิจิทัลจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของการฝังลายน้ำดิจิทัลและส่วนของการกู้คืนสัญญาณลายน้ำดิจิทัล แสดงได้ดังรูปที่ 2.8 (Seitz, 2005) ซึ่งจะเห็นว่าในขั้นตอนของการฝังสัญญาณลายน้ำประกอบไปด้วยภาพต้นแบบสัญญาณลายน้ำและจะต้องมีการใส่รหัสลับหรือกุญแจสาธารณะจากผู้เป็นเจ้าของภาพเข้าไปเพื่อเป็นการเพิ่มความปลอดภัยให้กับภาพ เมื่อผ่านขั้นตอนการฝังลายน้ำแล้วก็จะได้ภาพที่ถูกฝังลายน้ำ และสำหรับการกู้คืนลายน้ำจะต้องใช้ลายน้ำดิจิทัลต้นแบบหรือภาพต้นแบบและรหัสลับขึ้นอยู่กับรูปแบบการฝังลายน้ำ เพื่อระบุว่าสัญญาณลายน้ำหรือไม่

2.4.2 ชนิดของสัญญาณลายน้ำดิจิทัล

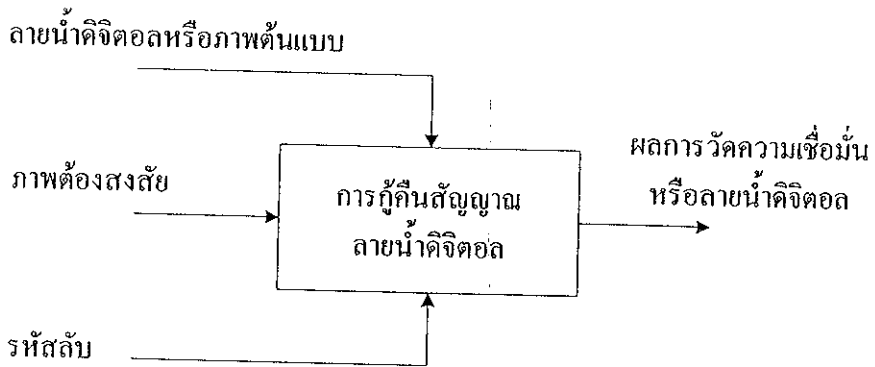
สัญญาณลายน้ำดิจิทัล โดยทั่วไปจะมีด้วยกัน 2 ชนิดหลักที่สามารถฝังลงไปบนสัญญาณภาพได้ คือ

1) สัญญาณลายน้ำแบบลำดับสุ่มเกาส์เซียน สัญญาณลายน้ำแบบนี้จะเป็นลำดับตัวเลขที่อยู่ระหว่าง -1 ถึง 1 ซึ่งอาจจะปรับให้มีค่าเป็นไบโพลาร์ คือ -1 กับ 1 เท่านั้นก็ได้ โดยจะมีการกระจายตัวแบบเกาส์เซียนด้วยค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 และค่าความแปรปรวนเท่ากับ 1 และส่วนใหญ่สัญญาณลายน้ำนี้จะถูกใช้สำหรับการตรวจจับที่ใช้การวัดค่าสหสัมพันธ์

2) สัญญาณลายน้ำแบบภาพขาวดำหรือภาพระดับเทา ในบางกรณีอัลกอริทึมจะฝังลายน้ำที่มีความหมาย นั่นคือ ภาพสัญลักษณ์แทนลำดับสุ่ม โดยภาพสัญลักษณ์นั้นจะอยู่ในรูปของภาพขาวดำหรือภาพระดับเทา



(ก) ขั้นตอนการฝังลายน้ำ



(ข) ขั้นตอนการถอดลายน้ำ

รูปที่ 2.8 การสร้างสัญญาณลายน้ำและการถอดสัญญาณลายน้ำ

2.4.3 ความต้องการของการฝังลายน้ำดิจิทัล

การประยุกต์ใช้การฝังลายน้ำแต่ละประเภทมีความต้องการที่แตกต่างกัน แต่ความต้องการหลัก คือ

1) ความไม่สามารถมองเห็นได้ (Invisibility) คือ สัญญาณลายน้ำที่ฝังเข้าไปจะต้องไม่ทำให้ภาพต้นแบบและภาพที่ถูกฝังลายน้ำแตกต่างกันมากนัก ซึ่งโดยทั่วไปแล้วผู้ใช้ไม่มีโอกาสที่จะเปรียบเทียบความแตกต่างกับภาพต้นแบบ ดังนั้น จึงสามารถยอมให้มีความแตกต่างกันเกิดขึ้นได้แต่อย่างไรก็ตาม ความต้องการนี้จะมีความขัดแย้งกับความทนทานของลายน้ำ ทำให้มีการนำหลักการทางด้านระบบการมองเห็นของมนุษย์มาช่วยในกระบวนการฝังลายน้ำ

2) ความทนทาน (Robustness) ความทนทานของสัญญาณลายน้ำต่อการถูกโจมตีเป็นปัญหาสำคัญของการป้องกันการละเมิดลิขสิทธิ์ ซึ่งเกิดจากผู้ใช้งานต้องการที่จะปรับปรุงคุณภาพของ

ภาพ ต้องการบีบอัดข้อมูล แก๊ซหรืออื่น ๆ ดังนั้น สัญญาณลายน้ำจะต้องมีความทนทานต่อการประมวลผลภาพ ดังนี้

2.1) การบีบอัดสัญญาณภาพแบบมีการสูญเสีย เนื่องจากเป็นวิธีการที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในการจัดเก็บหรือส่งข้อมูลภาพ วิดีโอ และเสียง ที่รู้จักกันดี คือ อัลกอริทึมการบีบอัดแบบ JPEG ซึ่งให้อัตราการบีบอัดสูงและมีคุณภาพของภาพดี แต่อย่างไรก็ตามอัลกอริทึมการบีบอัดแบบนี้ จะละทิ้งข้อมูลบางส่วน ทำให้ส่งผลกระทบต่อสัญญาณลายน้ำด้วยเช่นกัน

2.2) การกรองและการปรับปรุงคุณภาพ กระบวนการนี้ใช้ในการกรองสัญญาณรบกวนด้วยการกรองหรือปรับปรุงคุณภาพของภาพโดยใช้วิธีการมาตรฐานต่าง ๆ นอกจากนี้ยังอาจจะมีกรอกรูปแบบตัวกรองเพื่อใช้ในการทำลายสัญญาณลายน้ำโดยเฉพาะ

2.3) การตัดแปลงทางเรขาคณิต ในกรณีของสัญญาณภาพ เช่น การสเกล การหมุน การตัด การสะท้อน หรือการคัดแยกลายเส้น เป็นต้น ซึ่งยังไม่มียูนิฟอร์มทั่วไปในการแก้ปัญหา

2.4) การนำเสนอภาพด้วยวิธีการอื่น โดยปกติการนำภาพไปใช้จะคัดลอกไปใช้ได้โดยตรง แต่อาจจะมีการพิมพ์ภาพที่ถูกฝังลายน้ำ จากนั้นทำการสร้างภาพขึ้นมาใหม่โดยการสแกน ถ้ากระบวนการนี้ไม่ทำให้คุณภาพของภาพลดลง ดังนั้นสัญญาณลายน้ำควรจะตรวจสอบตรวจสอบลายน้ำได้

3) ความปลอดภัย (Security) คือ รูปแบบการฝังลายน้ำต้องมีความปลอดภัยเมื่ออัลกอริทึมการฝังถูกเผยแพร่ออกสู่สาธารณะ ซึ่งจะต้องมีรหัสลับในการป้องกัน ในบางอัลกอริทึมจะใช้ภาพต้นแบบในกระบวนการคัดแยกลายน้ำหรืออาจจะใช้รหัสลับในการสร้างสัญญาณลายน้ำ

2.5 การบีบอัดสัญญาณภาพแบบ Set Partitioning in Hierarchical Tree

ภาพที่นำมาทำการบีบอัดจะทำการแยกองค์ประกอบแบนด์ย่อยด้วยการแปลงดีสครีตเวฟเลตหรือการแปลงดีสครีตมัลติเวฟเลต จากการแยกองค์ประกอบนี้จะได้ส่วนของความถี่สูงและความถี่ต่ำ โดยในส่วนของแบนด์ย่อยความถี่สูงจะเป็นขอบหรือลายเส้นของวัตถุ ในขณะที่แบนด์ย่อยความถี่ต่ำจะเป็นส่วนที่เป็นพื้นผิวของวัตถุ ดังนั้นจะต้องให้ความสำคัญกับทุกแบนด์ย่อย เพื่อให้ภาพหลังการบีบอัดเหมือนภาพต้นแบบมากที่สุด ซึ่งอัลกอริทึม Set Partitioning in Hierarchical Tree (SPIHT) จะให้ความสำคัญกับขนาดของสัมประสิทธิ์ ดังนั้น การเข้ารหัสจึงให้ความสำคัญกับทุกแบนด์ย่อย

Embedded Zerotrees Wavelet (EZW) เป็นวิธีการบีบอัดสัญญาณภาพวิธีหนึ่ง ซึ่งให้ผลการบีบอัดที่ดีกว่า JPEG และกำจัดผลของการเกิดบล็อกอาร์ติแฟกต์ คือการเกิดบล็อกที่ขอบของวัตถุและลายเส้น เนื่องจาก EZW จะให้ความสำคัญกับขนาดของสัมประสิทธิ์ทุกแบนด์ย่อยไม่ว่าจะอยู่ในแบนด์ย่อยความถี่ใดก็ตาม ต่อมาได้มีการพัฒนาอัลกอริทึมนี้เพื่อให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นหลายวิธีด้วยกัน งานวิจัยนี้จะใช้อัลกอริทึมการเข้ารหัสด้วยวิธี SPIHT ซึ่งพัฒนาโดย Said และ Pearlman

อัลกอริทึมนี้ให้ผลการบีบอัดข้อมูลภาพได้ดีกว่า EZW นอกจากนี้ยังมีขั้นตอนการเข้ารหัสที่เร็วและเข้าใจง่าย

2.5.1 ความสัมพันธ์แบบ Spatial Orientation Trees

โดยปกติแล้วพลังงานของภาพส่วนใหญ่จะอยู่ในแบนด์ย่อยความถี่ต่ำ ซึ่งจะมีค่าลดลงไปตามการแปลงเวฟเล็ดระดับสูงสุดไปหาระดับต่ำสุด อย่างไรก็ตาม แต่ละแบนด์ย่อยจะมีความสัมพันธ์กันแบบ spatial และขนาดของสัมประสิทธิ์จะถูกคาดหวังว่าจะมีลำดับเรียงตามขนาดจากมากไปน้อย ถ้ามีทิศทางตามระดับการแปลงสูงสุดลงไปหาระดับการแปลงต่ำสุดเหมือน spatial orientation

โดยทั่วไปแล้ว spatial orientation จะนิยามความสัมพันธ์เป็นลำดับขั้นพีระมิดดังรูปที่ 2.9 โหนดจะอยู่ในระดับสูงสุดหรือในช่วงความถี่ต่ำ ซึ่งถูกระบุด้วยตำแหน่งพิกเซล ทิศทางของการสืบทอดจะอยู่ในระดับถัดไป หนึ่งพิกเซลจะมีการสืบทอดไปอีก 4 พิกเซล แต่ในระดับสูงสุดซึ่งเป็นโหนดจะถูกแบ่งเป็นกลุ่มขนาด 2×2 พิกเซลติดกัน ซึ่งจะมี 1 พิกเซลที่ไม่การสืบทอด และจะมีการกำหนดตารางของตำแหน่งเพื่อใช้กับความสัมพันธ์แบบ spatial orientation tree ดังนี้

(i, j) คือ ตำแหน่งของ โหนด (node)

$O(i, j)$ คือ เซตของตำแหน่งของการสืบทอด offspring ของ โหนด (i, j) โดย 1 โหนดจะมีค่าของ offspring ทั้งหมด 4 ค่า

$D(i, j)$ คือ เซตของตำแหน่งของการสืบทอดทั้งหมด (descendant) ของ โหนด (i, j)

H คือ เซตของตำแหน่งของ โหนดในแบนด์ย่อยสูงสุด

$L(i, j) = D(i, j) - O(i, j)$ คือ เซตของตำแหน่งการสืบทอดทั้งหมด (descendant) ยกเว้นการสืบทอดที่เป็น offspring

ยกตัวอย่างการหาตำแหน่งยกเว้นระดับแบนด์ย่อยสูงสุดและต่ำสุด สามารถหาตำแหน่งของ offspring ได้ดังนี้

$$O(i, j) = \{(2i, 2j), (2i, 2j+1), (2i+1, 2j), (2i+1, 2j+1)\} \quad (2.15)$$

ในวิธีการนี้จะใช้ส่วนของ spatial orientation tree แบ่งเป็นเซตย่อยในอัลกอริทึมการจัดลำดับความสำคัญของค่าสัมประสิทธิ์ (sorting) ซึ่งมีวิธีการดังนี้

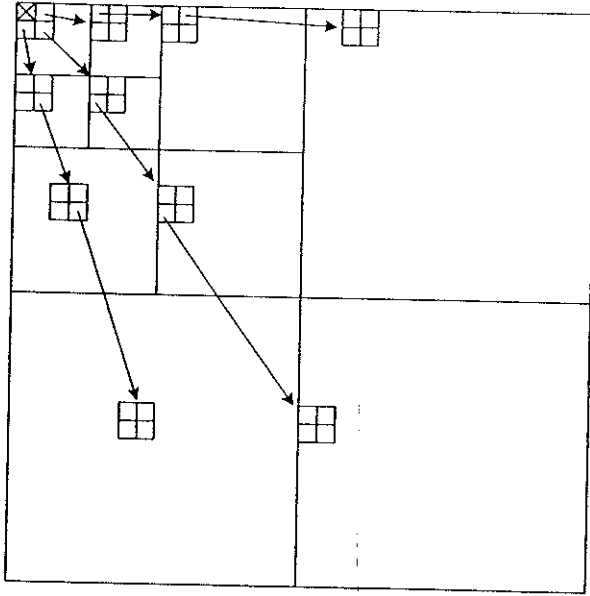
1) กำหนดให้การแบ่งอยู่ในรูปของเซต $\{(i, j)\}$ และ $D(i, j)$ เมื่อ $(i, j) \in H$

2) ถ้า $D(i, j)$ มีความสำคัญ ดังนั้นจะถูกแบ่งเป็น $L(i, j)$ กับเซตของตำแหน่ง 4

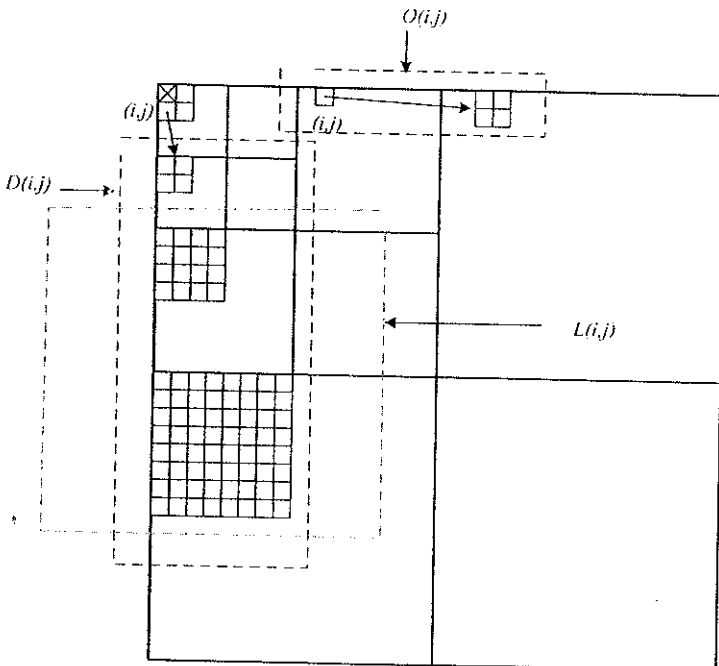
ตำแหน่ง คือ (k, l) ซึ่ง $(k, l) \in O(i, j)$

3) ถ้า $L(i,j)$ มีความสำคัญ ดังนั้นจะถูกแบ่งเป็นเซตของ $D(k,l)$ จำนวน 4 เซต ซึ่ง

$$(k,l) \in O(i,j)$$



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์แบบ spatial orientation tree



รูปที่ 2.10 ตำแหน่งการสืบทอดของ spatial orientation

2.5.2 อัลกอริทึมการเข้ารหัส

ในการเข้ารหัสจะให้ความสำคัญกับขนาดของสัมประสิทธิ์เพื่อกำหนดว่ามีความสำคัญหรือไม่มีความสำคัญ ซึ่งจะมีตารางที่ใช้ในการเก็บตำแหน่งของสัมประสิทธิ์ 3 ตาราง ดังนี้ (Said and Pearlman, 1996)

1) List of Insignificant Sets (LIS) ใช้เก็บตำแหน่งของกลุ่มสัมประสิทธิ์เวฟเล็ตที่ไม่มี ความสำคัญ สามารถแบ่งย่อยได้อีก 2 ชนิด คือชนิด A และชนิด B ซึ่งค่าที่จะเก็บในชนิด A แสดงว่า เป็น $D(i, j)$ และชนิด B แสดงว่าเป็น $L(i, j)$

2) List of Insignificant Pixels (LIP) ใช้เก็บตำแหน่งของสัมประสิทธิ์เวฟเล็ตที่ไม่มี ความสำคัญ

3) List of Significant Pixels (LSP) ใช้เก็บตำแหน่งของสัมประสิทธิ์เวฟเล็ตที่มี ความสำคัญ

ฟังก์ชันการเข้ารหัสระหว่างขนาดของสัมประสิทธิ์และการส่งออกค่าบิต เพื่อชี้ให้เห็น ว่าเซตของตำแหน่ง Γ มีความสำคัญ สามารถทำได้ดังสมการ

$$S_n(\Gamma) = \begin{cases} 1, & \max_{(i,j) \in \Gamma} \{|c_{i,j}|\} \geq 2^n \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.16)$$

และเพื่อให้รูปแบบการแทนของพิกเซลเดี่ยวของเซตนั้น ๆ ง่ายขึ้น จะเขียนแทน $S_n(\{(i,j)\})$ ด้วย $S_n(i, j)$

การเข้ารหัสโดยใช้อัลกอริทึม SPIHT สามารถเขียนเป็นขั้นตอนได้ดังนี้
ขั้นตอนที่ 1 การกำหนดค่าเริ่มต้นให้แก่ตารางและการหาค่าขีดเริ่มเปลี่ยน
 - คำนวณค่า n จากสมการ

$$n = \left\lfloor \log_2 \left(\max_{(i,j)} \{|c_{i,j}|\} \right) \right\rfloor \quad (2.17)$$

- คำนวณหาค่าขีดเริ่มเปลี่ยนจาก

$$T = 2^n \quad (2.18)$$

- กำหนดให้ LSP เป็นตารางว่าง
- กำหนดให้ LIP เก็บค่าตำแหน่งของสัมประสิทธิ์ของแบนด์ย่อยสูงสุด

โดย $(i, j) \in H$

- กำหนดให้ LIS เก็บค่าการสืบทอดทั้งหมดของโนดทุกโนดใน H และ

ให้เป็นชนิด A นั่นคือเป็น $D(i, j)$

ขั้นตอนที่ 2 Sorting Pass

กระบวนการของ LIP

2.1) สำหรับแต่ละค่าสัมประสิทธิ์ (i, j) ใน LIP

- ส่งค่า $S_n(i, j)$ ออก
- ถ้า $S_n(i, j) = 1$ ดังนั้น
 - ย้ายค่าตำแหน่ง (i, j) ไปที่ตาราง LSP
 - ส่งค่าบิตเครื่องหมายของค่าสัมประสิทธิ์ $c_{i,j}$ โดยที่ ถ้าเครื่องหมายเป็นลบส่งออกค่าบิต 0 และเครื่องหมายเป็นบวกส่งออกค่าบิต 1

กระบวนการของ LIS

2.2) สำหรับแต่ละเซต (i, j) ใน LIS

2.2.1) ถ้าเซตนั้นเป็นชนิด A ดังนั้น

- ส่งออกค่า $S_n(D(i, j))$
- ถ้า $S_n(D(i, j)) = 1$ ดังนั้น

* สำหรับแต่ละ $(k, l) \in O(i, j)$

- ส่งออกค่า $S_n(k, l)$

- ถ้า $S_n(k, l) = 1$

ดังนั้น เพิ่ม (k, l) ในตาราง LSP และ ส่งค่าบิตเครื่องหมายของสัมประสิทธิ์ $c_{k,l}$ โดยที่ ถ้าเครื่องหมายเป็นลบส่งออกค่าบิต 0 และเครื่องหมายเป็นบวกส่งออกค่าบิต 1

- ถ้า $S_n(k, l) = 0$

ดังนั้น เพิ่มตำแหน่ง (k, l) ไปที่ท้ายตารางของ LIP

* ถ้า $L(i, j)$ ไม่เท่ากับเซตว่าง ดังนั้น ย้ายตำแหน่ง (i, j) ไปที่ท้ายตารางของ LIS กำหนดให้เป็นชนิด B และไปที่

ขั้นตอน 2.2.2) ถ้าเป็นอย่างอื่น ให้นำค่าตำแหน่ง (i, j) ออกจากตารางของ LIS

2.2.2) ถ้าเซตที่นำเข้ามาเป็นชนิด B ดังนี้

- ส่งออกค่า $S_n(L(i, j))$
- ถ้า $S_n(L(i, j)) = 1$ ดังนี้
 - * เพิ่มค่าของแต่ละตำแหน่ง $(k, l) \in O(i, j)$ ที่ท้ายตารางของ LIS และกำหนดให้เป็นชนิด A
 - * ย้าย (i, j) ออกจากตาราง LIS

ขั้นตอนที่ 3 Refinement pass

กระบวนการของ LSP

- สำหรับแต่ละค่าตำแหน่ง (i, j) ในตาราง LSP ยกเว้นค่าที่เพิ่มเข้ามาในรอบล่าสุด

- ส่งออกค่าบิตที่มีความสำคัญตำแหน่งบิตที่ n ของ $|c_{i,j}|$

ขั้นตอนที่ 4 ขั้นตอนการปรับปรุง Quantization-Step

- ลดค่า n ลง เท่ากับ

$$n = n - 1$$

(2.19)

- ทำซ้ำตามขั้นตอนที่ 2 และขั้นตอนที่ 3

และหยุดการเข้ารหัสเมื่อได้จำนวนบิตตามที่ต้องการ

การเก็บไฟล์ข้อมูลภาพที่ได้

การเก็บไฟล์ข้อมูลภาพจะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนหัวและส่วนที่ได้รับจากการเข้ารหัส

โดยแต่ละส่วนแยกเป็นรายละเอียดดังนี้

1) ไฟล์ส่วนหัว

1.1) ค่า n

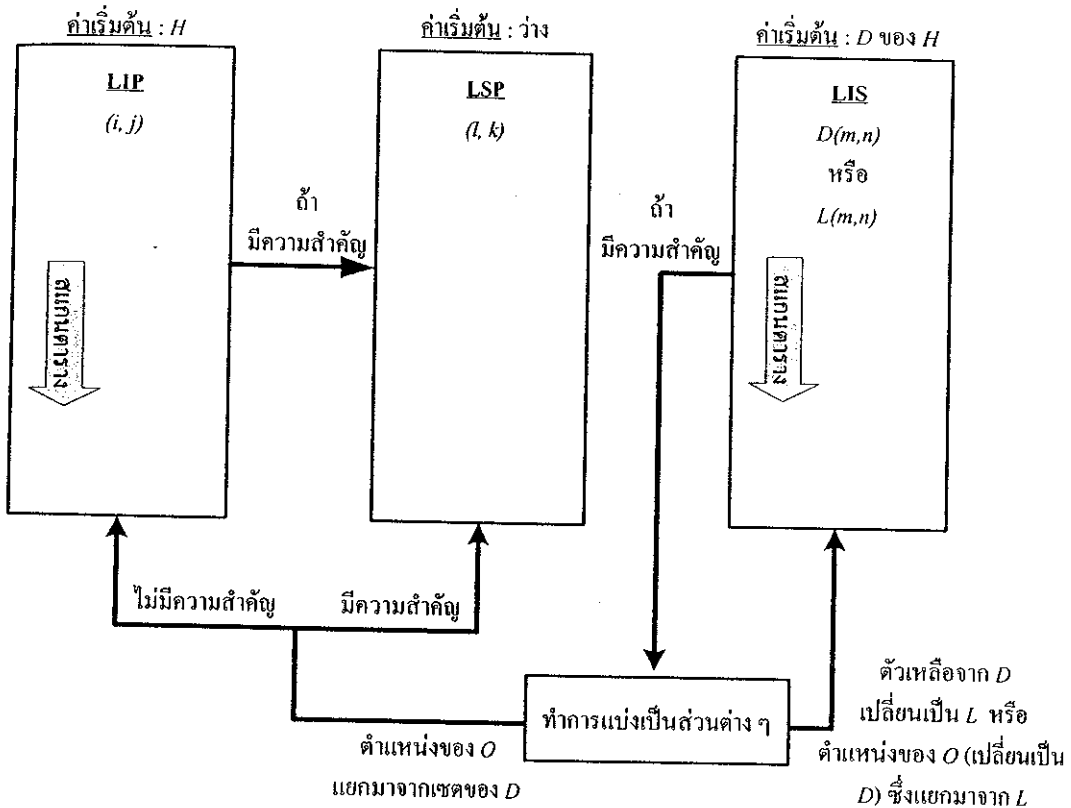
1.2) ระดับการแปลง

1.3) จำนวนคอลัมน์และจำนวนแถวของภาพ

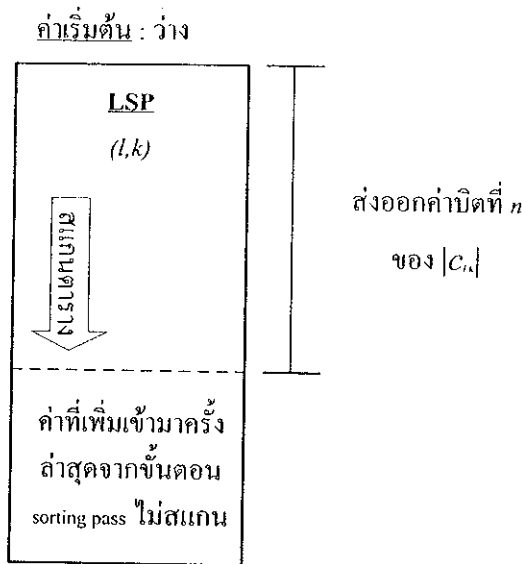
2) ไฟล์ข้อมูลที่ได้รับการเข้ารหัสด้วยวิธี SPIHT

2.5.3 อัลกอริทึมการถอดรหัส

การถอดรหัสจะใช้อัลกอริทึมเดียวกันกับการเข้ารหัส แต่เปลี่ยนจากส่งค่าออกเป็นรับค่าเข้าสำหรับแต่ละค่าของ n และจากการที่ตำแหน่งถูกย้ายเข้าสู่ตาราง LSP จะทำให้ทราบว่า $2^n \leq c_{i,j} \leq 2^{n+1}$ ดังนั้น จะใช้เงื่อนไขนี้กับบิตเครื่องหมายเพื่อสร้างกลับภาพโดย $\hat{c}_{i,j} = \pm 1.5 \times 2^n$ และในขั้นตอน refinement pass ก็จะทำให้การบวกรหรือลบด้วย 2^{n-1} หลังจากการถอดรหัสก็จะได้สัมประสิทธิ์การแปลงค่าใหม่ เพื่อใช้ในการแปลงกลับสัญญาณภาพ



รูปที่ 2.11 ขั้นตอนของกระบวนการ Sorting Pass



รูปที่ 2.12 ขั้นตอนของกระบวนการ Refinement Pass

2.6 การวัดประสิทธิภาพของการบีบอัดสัญญาณภาพและการฝังลายน้ำดิจิทัล

การวัดประสิทธิภาพนั้นจะพิจารณาออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของคุณภาพของภาพหลังการบีบอัดและฝังลายน้ำ โดยการบีบอัดสัญญาณภาพแบบสูญเสียจะมีการละทิ้งข้อมูลบางส่วนและกระบวนการฝังลายน้ำจะทำการคัดแปลงสัมประสิทธิ์การแปลงจึงทำให้ภาพหลังการบีบอัดพร้อมกับฝังลายน้ำมีความแตกต่างกับภาพต้นแบบ ในส่วนที่สองเป็นการวัดความทนทานของสัญญาณลายน้ำของภาพหลังการถูก โจมตีหรือภาพต้องสงสัยเพื่อบ่งชี้ว่าสามารถตรวจจับสัญญาณลายน้ำได้หรือไม่

2.6.1 การวัดเชิงปริมาณ

การวัดเชิงปริมาณเป็นการอาศัยข้อมูลเชิงตัวเลขหรือทางสถิติในการชี้วัดคุณภาพของภาพ ซึ่งสามารถหาได้หลายวิธี เช่น

1) ค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย ค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยของภาพขนาด $M \times N$ สามารถหาได้ดังนี้

$$MSE = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} (I_{org}(i,j) - I_w(i,j))^2 \quad (2.20)$$

เมื่อ

$I_{org}(i,j)$ คือ ค่าพิกเซลของภาพต้นแบบตำแหน่งที่ (i,j)

$I_w(i,j)$ คือ ค่าพิกเซลของภาพที่ถูกบีบอัดและฝังลายน้ำตำแหน่งที่ (i,j)

M คือ ขนาดความกว้างของภาพ

N คือ ขนาดความยาวของภาพ

ค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย ถ้ามีค่ามากแสดงว่าภาพที่ได้จากการสร้างกลับหลังการบีบอัดและฝังลายน้ำมีความแตกต่างกับภาพต้นแบบมาก แต่ถ้ามีค่าน้อยแสดงว่าภาพที่ได้จากการสร้างกลับมีความแตกต่างกับภาพต้นแบบน้อย

2) อัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสูงสุด เป็นหน่วยที่ใช้วัดคุณภาพของภาพที่นิยมใช้โดยทั่วไป ถ้าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสูงสุดมีค่ามาก แสดงว่าภาพที่ได้จากการสร้างกลับหลังจากการบีบอัดและฝังลายน้ำมีความแตกต่างกับภาพต้นแบบไม่มาก แต่ถ้าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสูงสุดมีค่าน้อยแสดงว่า ภาพที่ได้จากการสร้างกลับมีค่าแตกต่างกับภาพต้นแบบมาก ซึ่งสามารถหาได้ดังนี้

$$PSNR = 10 \log \left(\frac{255^2}{MSE} \right) \quad (\text{dB}) \quad (2.21)$$

3) อัตราบิต เป็นค่าที่ใช้บ่งบอกถึงค่าเฉลี่ยของจำนวนบิตต่อพิกเซลของภาพที่ผ่านการบีบอัด สามารถหาได้จาก

$$\text{อัตราบิต} = \frac{\text{จำนวนบิตทั้งหมดของภาพที่ผ่านการบีบอัดข้อมูล}}{\text{จำนวนพิกเซลทั้งหมดของภาพต้นแบบ}} \quad (2.22)$$

ถ้าอัตราบิตน้อยแสดงว่าขนาดของข้อมูลจะมีขนาดเล็ก แต่ถ้าอัตราบิตมากขนาดของข้อมูลจะมีขนาดใหญ่ขึ้นด้วยเช่นกัน

4) อัตราการบีบอัด (compression ratio, CR) เป็นค่าอัตราส่วนของจำนวนบิตของภาพต้นแบบต่อจำนวนบิตของภาพหลังการบีบอัด ซึ่งถ้าอัตราการบีบอัดสูงข้อมูลจะมีขนาดใหญ่ แต่ถ้ามีอัตราการบีบอัดต่ำข้อมูลจะมีขนาดเล็ก สามารถคำนวณได้จาก

$$CR = \frac{\text{จำนวนบิตทั้งหมดของภาพต้นแบบ}}{\text{จำนวนบิตทั้งหมดของภาพที่ผ่านการบีบอัดข้อมูล}} \quad (2.23)$$

5) ค่าอัตราส่วนความถูกต้องบิต (Bit Correct Ratio: BCR) ใช้เพื่อวัดค่าความถูกต้องของสัญญาณลายน้ำ คำนวณได้จาก

$$BCR(W, W') = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^{L_w} (w_i \oplus w'_i)}{L_w} \right) \times 100 \quad (2.24)$$

เมื่อ	W	คือ ลายน้ำต้นแบบ
	W'	คือ ลายน้ำที่ได้จากการคัดแยก
	L_w	คือ ความยาวของสัญญาณลายน้ำ
	w_i	คือ ลายน้ำต้นแบบตำแหน่งที่ i
	w'_i	คือ ลายน้ำที่ได้จากการคัดแยกตำแหน่งที่ i
	\oplus	คือ ตัวดำเนินการ Exclusive or (XOR)

6) อัตราความผิดพลาดบิต (Bit Error Rate, BER) ใช้วัดค่าความผิดพลาดของสัญญาณลายน้ำที่คัดแยกได้ คำนวณได้จาก

$$BER(W, W') = \left(\frac{\sum_{i=1}^{L_w} (w_i \oplus w'_i)}{L_w} \right) \times 100 \quad (2.25)$$

7) Normalized Cross-Correlation (NC) ใช้วัดค่าความคล้ายคลึงกันของสัญญาณลายน้ำต้นแบบและสัญญาณลายน้ำที่ได้จากการคัดแยก คำนวณได้จาก

$$NC(W, W') = \frac{\sum_{k=1}^n w_k w'_k}{\sum_{k=1}^n w_k w_k} \quad (2.26)$$

เมื่อได้ค่าสหสัมพันธ์แล้วจะต้องนำไปเปรียบเทียบกับค่าขีดเริ่มเปลี่ยนที่ได้กำหนดไว้ เพื่อระบุว่าสัญญาณลายน้ำที่คัดแยกมาเป็นสัญญาณลายน้ำที่ได้ถูกฝังเข้าไปหรือไม่

2.6.2 การวัดเชิงคุณภาพ

เป็นวิธีวัดที่มีประสิทธิภาพของการบีบอัดข้อมูลมากที่สุด ทำได้โดยการใช้สายตาของผู้ที่เกี่ยวข้องหรือใช้ภาพนั้น ๆ ซึ่งสามารถที่จะเห็นข้อผิดพลาดเพียงเล็กน้อยที่เกิดกับภาพหลังการบีบอัดได้ และตัดสินใจว่าภาพที่ได้นั้นมีความสามารถที่จะใช้ได้หรือไม่ ถึงแม้ว่าค่าการวัดเชิงปริมาณจะให้ผลดีมาก แต่ถ้าวัดเชิงคุณภาพใช้ไม่ได้ก็จะทำให้ภาพนั้นไม่สามารถนำไปใช้งานได้เช่นกัน

2.7 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของการแปลงมัลติเวฟเล็ดซึ่งมีความแตกต่างจากการแปลงเวฟเล็ดที่จำนวนของฟังก์ชันย่อ-ขยายและฟังก์ชันเวฟเล็ดมีมากกว่า 1 ฟังก์ชัน ทำให้มูลฐานของมัลติเวฟเล็ดสามารถมีคุณสมบัติต่างจาก คุณสมบัติสมมาตร คุณสมบัติการประมาณอันดับสองและคุณสมบัติ compact support พร้อมกัน ซึ่งไม่สามารถเกิดขึ้นได้ในมูลฐานของเวฟเล็ด นอกจากนี้ได้นำเสนอหลักการบีบอัดสัญญาณภาพเบื้องต้น ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก คือ การบีบอัดสัญญาณภาพแบบไม่มีการสูญเสียและการบีบอัดสัญญาณภาพแบบมีการสูญเสีย โดยการบีบอัดสัญญาณภาพที่ได้รับความนิยมจะเป็นแบบมีการสูญเสีย เนื่องจากสามารถบีบอัดที่อัตราการบีบอัดสูงทำให้ได้ขนาดของข้อมูลเล็กและยังไม่สามารถสังเกตเห็นส่วนของข้อมูลที่หายไปได้ วิธีการหนึ่งที่รู้จักกันเป็นอย่างดีคือ การบีบอัดสัญญาณภาพแบบ SPIHT ซึ่งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพ รวดเร็วและขั้นตอนไม่ซับซ้อนมาก โดยวิธีนี้จะอาศัยความสัมพันธ์แบบซีโรทรีช่วยในการเข้ารหัส นอกจากนี้ยังได้อธิบายถึงโครงสร้างของการฝังลายน้ำเพื่อเป็นแนวทางในการรวมกระบวนการบีบอัดสัญญาณภาพและการฝังลายน้ำเข้าด้วยกัน จากนั้นเพื่อประเมินประสิทธิภาพจึงได้นำเสนอค่าที่ใช้ในการวัดผลของการบีบอัดสัญญาณภาพและการฝังลายน้ำ

บทที่ 3

ผลของการแปลงสัญญาณภาพต่ออัลกอริทึม การบีบอัดสัญญาณภาพและการฝังลายน้ำ

3.1 กล่าวนำ

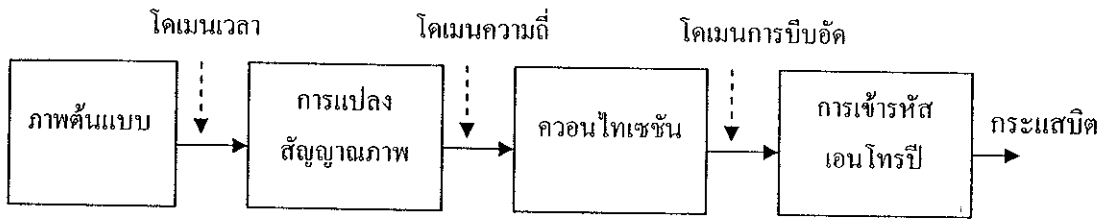
อัลกอริทึมการบีบอัดสัญญาณภาพส่วนใหญ่จะทำการเข้ารหัสของสัมประสิทธิ์การแปลง ซึ่งจะทำให้การบีบอัดมีประสิทธิภาพสูง การฝังลายน้ำดิจิทัลสามารถจำแนกออกเป็น โดเมนเวลาและโดเมนการแปลง โดยจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการฝังลายน้ำในโดเมนการแปลงให้ผลดีกว่าในโดเมนเวลา และเมื่อพิจารณาถึงกระบวนการทั้งสองแล้วจะเห็นว่าจะต้องใช้กระบวนการแปลงสัญญาณภาพเช่นเดียวกันทำให้สามารถรวมทั้งสองเข้าด้วยกัน ดังนั้นในบทนี้จึงได้ศึกษาผลกระทบของการแปลงสัญญาณภาพซึ่งประกอบด้วยการแปลงเวฟเล็ตและการแปลงมัลติเวฟเล็ต โดยใช้ อัลกอริทึมการบีบอัดสัญญาณภาพพร้อมกับการฝังลายน้ำแบบเดียวกัน ประสิทธิภาพของการแปลงสัญญาณภาพแต่ละวิธีจะถูกวัดในเทอมของคุณภาพของภาพและความทนทานของสัญญาณลายน้ำ ในหัวข้อที่ 3.2 จะได้กล่าวถึงรายละเอียดของขั้นตอนการบีบอัดสัญญาณภาพพร้อมกับการฝังลายน้ำที่ใช้ในการทดสอบ หัวข้อที่ 3.3 เป็นการนำเสนอผลของการทดสอบกับภาพตัวอย่าง และในหัวข้อที่ 3.4 เป็นการสรุปผลที่ได้จากการทดสอบดังกล่าว

3.2 การบีบอัดสัญญาณภาพพร้อมกับการฝังลายน้ำ

การฝังลายน้ำในสัญญาณภาพดิจิทัลเป็นการป้องกันการละเมิดลิขสิทธิ์ของข้อมูลภาพ โดยการซ่อนข้อมูลที่เหมาะสมเข้าไปในภาพต้นแบบ ซึ่งกระบวนการนี้จะต้องไม่ทำให้คุณภาพของภาพลดลงมากนักและข้อมูลที่ฝังเข้าไปจะต้องไม่สามารถกำจัดออกไปได้ โดยทั่วไปการฝังลายน้ำดิจิทัลสามารถแบ่งตามโดเมนการฝังลายน้ำได้ 2 ประเภท คือ โดเมนเวลาและโดเมนการแปลง ซึ่งในแต่ละโดเมนจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน หรืออาจแบ่งตามความสามารถของการมองเห็นก็สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทเช่นกัน คือ แบบสามารถมองเห็นได้ เช่น เครื่องหมายทางการค้า สัญลักษณ์ของสถานีโทรทัศน์ เป็นต้น ซึ่งจะทำให้คุณภาพของข้อมูลนั้นลดลง และแบบไม่สามารถมองเห็นได้ ซึ่งเมื่อฝังเข้าไปแล้วจะไม่สามารถสังเกตเห็นได้ เมื่อทำการตรวจสอบต้องทำการตัดแยกสัญญาณลายน้ำออกมาด้วยอัลกอริทึมที่ใช้ จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ารูปแบบการฝังลายน้ำที่ใช้โดเมนการแปลงจะให้ความทนทานของสัญญาณลายน้ำต่อการโจมตีจากสัญญาณรบกวน การประมวลผลสัญญาณภาพพื้นฐาน และการบีบอัดสัญญาณภาพได้ดีกว่ารูปแบบที่ใช้การฝังลายน้ำในโดเมนเวลา

การบีบอัดสัญญาณภาพดิจิทัลเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญก่อนที่จะนำภาพไปประยุกต์ใช้ในด้านอื่น ๆ โดยจุดประสงค์หลักของการบีบอัดสัญญาณภาพ คือ การลดความต้องการของหน่วยความจำที่ใช้ในการจัดเก็บข้อมูลลง แต่ยังคงรักษาคุณภาพของภาพหลังการบีบอัดไว้นั่นเอง เครื่องมือที่สำคัญอย่างหนึ่งในการช่วยทำให้การบีบอัดสัญญาณภาพมีอัตราการบีบอัดที่สูงแต่ให้คุณภาพของภาพที่ดี คือ การแปลงสัญญาณภาพ ซึ่งการแปลงสัญญาณภาพที่นิยมใช้กัน เช่น การแปลงโคไซน์ การแปลงเวฟเล็ตและการแปลงมัลติเวฟเล็ต เป็นต้น

เนื่องจากกระบวนการทั้งสองที่กล่าวมานั้นมีขั้นตอนบางอย่างที่เหมือนกัน ทำให้มีการหาวิธีที่จะรวมอัลกอริทึมการบีบอัดสัญญาณภาพและการฝังลายน้ำเข้าด้วยกัน งานวิจัยของ Ya-fei et al. (2001) และ Grosbois and Ebrahimi (2003) ได้พัฒนาวิธีการรวมการฝังลายน้ำกับการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ JPEG และ JPEG2000 ตามลำดับ โดยวิธีนี้ให้ผลการทดลองที่ดีแต่มีกระบวนการที่ซับซ้อนมาก นอกจากนี้ Yang, Chang, and Chen (2001) ได้นำเสนออัลกอริทึมการฝังลายน้ำรวมกับการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ SPIHT ซึ่งการฝังลายน้ำจะฝังในโดเมนการบีบอัด ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 โดเมนของการฝังลายน้ำ

บทนี้ได้ศึกษาผลกระทบของการแปลงสัญญาณภาพประกอบด้วย การแปลง DWT และ DMT สำหรับใช้ในอัลกอริทึมการบีบอัดสัญญาณภาพพร้อมกับการฝังลายน้ำที่นำเสนอโดย Yang, Chang, and Chen (2001) การฝังลายน้ำจะดำเนินการในขั้นตอน refinement pass ของการเข้ารหัส โดยการแก้ไขบิตที่ส่งออกด้วยสัญญาณลายน้ำ

3.2.1 วิธีการแปลงสัญญาณภาพ

การแปลง DWT กำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในการนำไปประยุกต์ใช้ในหลาย ๆ ด้านและกลายเป็นเครื่องมือสำคัญในด้านการประมวลผลภาพอีกด้วย เช่น การบีบอัดสัญญาณภาพและการฝังลายน้ำ เป็นต้น วัตถุประสงค์หลักของการแปลงเวฟเล็ตก็เพื่อแยกองค์ประกอบของสัญญาณออกเป็นส่วนของความถี่ต่ำและความถี่สูง โดยคุณสมบัติที่ต้องการของเวฟเล็ตมูลฐาน คือ คุณสมบัติการตั้งฉาก การสมมาตร การประมาณค่า สำหรับการแยกองค์ประกอบ

เวฟเล็ต p ระดับ จะได้แบนด์ย่อยออกมาทั้งหมด $(3p+1)$ แบนด์ย่อย ดังรูปที่ 3.2 เป็นการแยกองค์ประกอบเวฟเล็ต 3 ระดับโดยใช้เวฟเล็ตแม่ตระกูล Daubechies 4



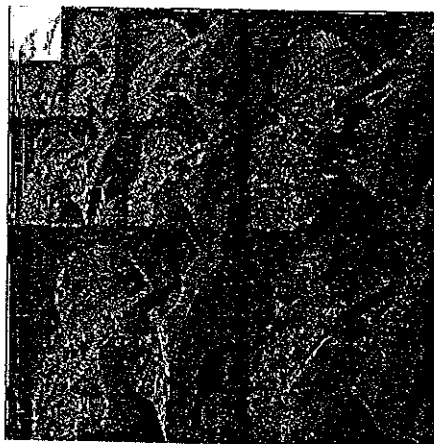
(ก) ภาพต้นแบบ Lena



(จ) ภาพแบนด์ย่อยของภาพ Lena

รูปที่ 3.2 ภาพแบนด์ย่อยจากการแยกองค์ประกอบเวฟเล็ต 3 ระดับ

การแปลงมัลติเวฟเล็ตมีแนวคิดคล้ายกับการแปลงเวฟเล็ต แต่มีข้อแตกต่างกันที่เวฟเล็ตจะมีฟังก์ชันสเกลลิงและฟังก์ชันเวฟเล็ตเพียงฟังก์ชันเดียว แต่มัลติเวฟเล็ตจะมีตั้งแต่ 2 ฟังก์ชันขึ้นไปและสามารถมีคุณสมบัติหลายอย่างได้พร้อมกัน รูปที่ 3.3 เป็นภาพแบนด์ย่อยของการแยกองค์ประกอบมัลติเวฟเล็ต โดยใช้ DGHM มัลติเวฟเล็ตและใช้ตัวกรองก่อนจาก Attakitmongcol K., Hardin, and Wilkes (2001)



รูปที่ 3.3 ภาพแบนด์ย่อยจากการแยกองค์ประกอบมัลติเวฟเล็ต 3 ระดับ

3.2.2 รูปแบบการบีบอัดสัญญาณภาพที่ใช้ในการทดสอบ

Shapiro (1993) ได้นำเสนอวิธีการเข้ารหัสภาพแบบ Embedded Zerotree Wavelet (EZW) โดยใช้โครงสร้างที่เรียกว่า ซีโรทรี (zerotree) จากการแยกองค์ประกอบเวฟเล็ตของภาพ ซึ่งสัมพันธ์กับการแปลงในแต่ละแบนด์ย่อยจะมีความสัมพันธ์กัน ต่อมา Said and Pearlman (1996) ได้พัฒนาวิธีการบีบอัดสัญญาณภาพที่เรียกว่า SPIHT โดยใช้หลักการของ EZW แต่มีความง่ายและรวดเร็วกว่า โดยลักษณะสำคัญอย่างหนึ่งของการเข้ารหัส SPIHT คือ การส่งข้อมูลไปข้างหน้า (progressive transmission) ซึ่งเป็นการเลือกข้อมูลที่มีความสำคัญเพื่อส่งหรือจัดเก็บไว้เป็นอันดับแรก ดังนั้น อัลกอริทึมที่ใช้ในการกำหนดความสำคัญของสัมประสิทธิ์การแปลงจึงมีความสำคัญสำหรับการเข้ารหัสรูปแบบนี้ จากนั้นกระบวนการเข้ารหัสจะดำเนินไปจนกระทั่งได้จำนวนบิตตามที่ต้องการ จึงหยุดการวนรอบ

3.2.3 อัลกอริทึมการฝังลายน้ำ

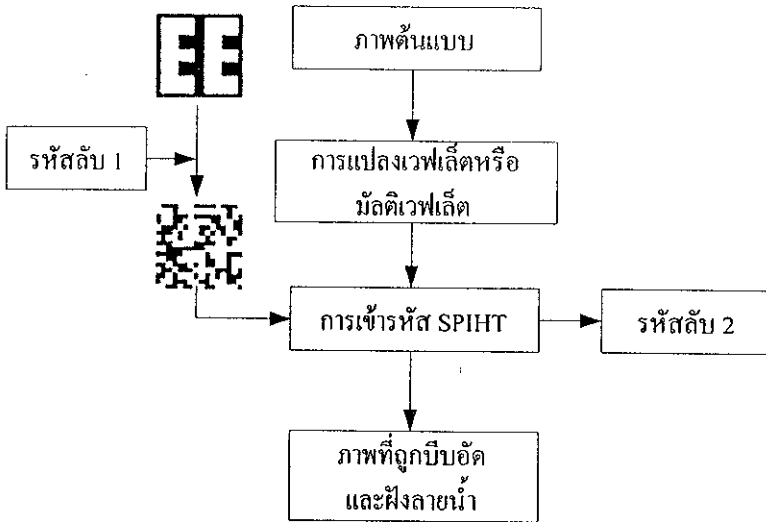
รูปแบบการฝังลายน้ำที่ใช้ในการทดสอบจะใช้วิธีการของ Yang, Chang, and Chen (2001) แสดงได้ดังรูปที่ 3.4 ซึ่งมีขั้นตอนการฝังลายน้ำ ดังนี้

- 1) เตรียมสัญญาณลายน้ำจากภาพลายน้ำแบบขาวดำ จากนั้นทำการสับเปลี่ยนตำแหน่งภาพขาวดำนั้นโดยใช้รหัสลับเพื่อสร้างลำดับไบนารี
- 2) แปลงสัญญาณภาพต้นแบบด้วยการแปลงเวฟเล็ตหรือการแปลงมัลติเวฟเล็ต
- 3) เข้ารหัส SPIHT และแทรกสัญญาณลายน้ำโดยการแทนที่รหัสต้นแบบที่ได้จากการส่งออกค่าบิตด้วยบิตของลำดับลายน้ำไบนารีของสัมประสิทธิ์ที่มีความสำคัญ ซึ่งพิจารณาจากขนาดของสัมประสิทธิ์ที่มากกว่าค่าขีดเริ่มเปลี่ยนในขั้นตอน refinement pass ของอัลกอริทึมการ บีบอัด
- 4) เก็บตำแหน่งการฝังไว้เพื่อใช้ในกระบวนการตรวจจับลายน้ำ
- 5) จัดเก็บข้อมูลที่ถูกบีบอัดและฝังลายน้ำ ซึ่งจะมีขนาดขึ้นอยู่กับอัตราการบีบอัด
- 6) ขั้นตอนในการสร้างกลับสัญญาณภาพ เริ่มจากการถอดรหัส SPIHT จากนั้นแปลงกลับสัญญาณภาพด้วยการแปลงที่ใช้ในข้อ 2) ก็จะได้ภาพหลังการบีบอัดสัญญาณภาพและฝังลายน้ำ

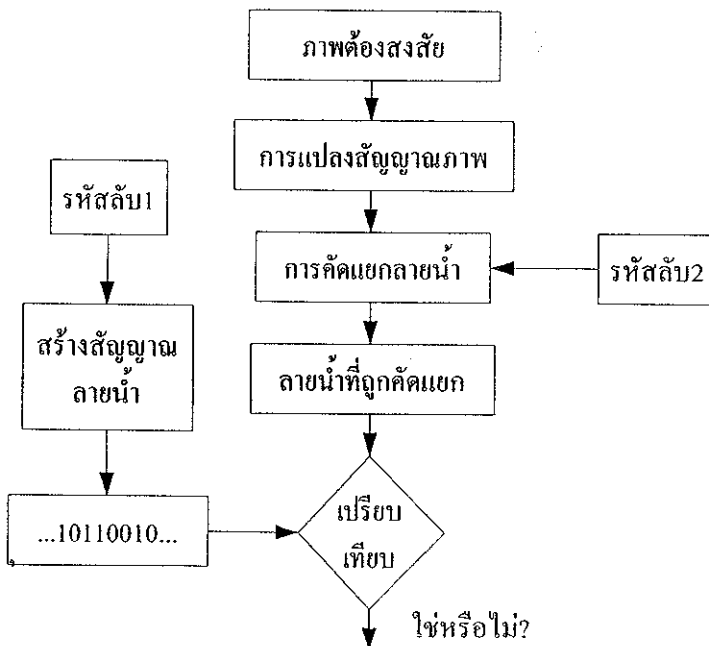
3.2.4 การคัดแยกลายน้ำ

สำหรับขั้นตอนการคัดแยกลายน้ำนั้น เริ่มจากการแปลงภาพต้องสงสัยด้วยการแปลงเวฟเล็ตหรือการแปลงมัลติเวฟเล็ต จากนั้นนำสัมประสิทธิ์การแปลงเข้ารหัส SPIHT และใช้รหัสลับที่ได้จากขั้นตอนการฝังลายน้ำช่วยในการคัดแยกด้วย ก็จะสามารถที่จะคัดแยกลายน้ำได้ และนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณลายน้ำต้นแบบโดยการวัดค่าความเหมือนซึ่งในที่นี้ใช้ค่าอัตราความผิดพลาดบิต (BER) ซึ่งจะบ่งบอกถึงเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของสัญญาณลายน้ำที่คัดแยกออกมาได้ว่ามีความผิดพลาดมากน้อยเพียงใด แสดงได้ดังรูปที่ 3.5

หลังจากการฝังสัญญาณลายน้ำแล้วทำการทดสอบความทนทานของสัญญาณลายน้ำ โดยการโจมตีด้วยการประมวลผลสัญญาณภาพพื้นฐาน เช่น การบีบอัดสัญญาณภาพแบบ JPEG การกรองแบบค่ามัธยฐาน การกรองแบบค่าผ่านและการเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน เป็นต้น



รูปที่ 3.4 แผนภาพขั้นตอนการเข้ารหัสและฝังลายน้ำ



รูปที่ 3.5 แผนภาพขั้นตอนการตรวจจับลายน้ำ

3.3 ผลการทดสอบ

เพื่อแสดงถึงผลกระทบของการแปลงสัญญาณภาพต่อรูปแบบการฝังลายน้ำในโดเมนการบีบอัดซึ่งประกอบไปด้วย การแปลงเวฟเล็ตและการแปลงมัลติเวฟเล็ต การทดลองใช้ภาพทดสอบจำนวน 3 ภาพ คือ ภาพ “Lena”, “Barbara” และ “Boat” ซึ่งมีขนาดเท่ากับ 512×512 จุดภาพ และเป็นภาพระดับเทา 256 ระดับ (8 bpp) นำไปทำการแปลงสัญญาณภาพทั้งหมด 5 ระดับ หลังจากนั้นนำสัมประสิทธิ์การแปลงที่ได้ไปเข้ารหัส SPIHT ที่อัตราบิตเท่ากับ 0.3 bpp สำหรับภาพ “Lena” กับภาพ “Boat” และอัตราบิตเท่ากับ 0.5 bpp สำหรับภาพ “Barbara” ซึ่งการทดสอบนี้จะไม่ใช้การเข้ารหัสเลขคณิต ในการวัดประสิทธิภาพของการแปลงสัญญาณภาพแต่ละแบบจะใช้ค่า *PSNR* และค่า *BER* เพื่อประเมินคุณภาพของภาพและความทนทานของสัญญาณลายน้ำ ตามลำดับ

การแปลงเวฟเล็ตจะใช้เวฟเล็ตแม่ตระกูล Daubechies-4 และการแปลงมัลติเวฟเล็ตใช้ DGHM มัลติเวฟเล็ต เนื่องจากมีการประมาณค่าอันดับสองเหมือนกัน สัญญาณลายน้ำเป็นแบบภาพขาวดำขนาดเท่ากับ 16×16 เมื่อทำการสับเปลี่ยนตำแหน่งด้วยรหัสลับจะได้ดังรูปที่ 3.6 และกำหนดให้ค่าขีดเริ่มเปลี่ยนของการฝังลายน้ำเท่ากับ 256



(ก) ภาพลายน้ำต้นแบบ



(ข) ภาพหลังการสับเปลี่ยนตำแหน่ง

รูปที่ 3.6 สัญญาณลายน้ำแบบภาพขาวดำ

ค่า *PSNR* ของภาพหลังการบีบอัด โดยไม่มีการฝังลายน้ำและภาพหลังการบีบอัดพร้อมกับถูกฝังลายน้ำแสดงได้ดังตารางที่ 3.1 ภาพต้นแบบและภาพที่ถูกฝังลายน้ำของภาพ “Lena”, “Boat” และ “Barbara” โดยการใช้การแปลงเวฟเล็ตและการแปลงมัลติเวฟเล็ตแสดงได้ดังรูปที่ 3.7 รูปที่ 3.8 และรูปที่ 3.9 ตามลำดับ จากการทดสอบพบว่าอัลกอริทึมที่ใช้ DMT ให้ผลของคุณภาพของภาพหลังการฝังลายน้ำดีกว่าอัลกอริทึมที่ใช้ DWT ที่อัตราบิตเดียวกัน ความทนทานของสัญญาณลายน้ำหลังถูกโจมตีด้วยการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ JPEG โดยการแปรค่า quality factor แสดงได้ดังตารางที่ 3.2 สำหรับอัลกอริทึมที่ใช้ DWT และตารางที่ 3.3 สำหรับอัลกอริทึมที่ใช้ DMT ซึ่งจะเห็นว่าวิธีการที่ใช้ DMT ให้ความทนทานของสัญญาณลายน้ำดีกว่าการใช้ DWT

ตารางที่ 3.1 คุณภาพของภาพวัดโดยใช้ค่า $PSNR$ (dB)

ภาพ	เวฟเล็ต		มัลติเวฟเล็ต	
	SPIHT ไม่ฝังลายน้ำ	SPIHT และฝังลายน้ำ	SPIHT ไม่ฝังลายน้ำ	SPIHT และฝังลายน้ำ
Lena	33.19	32.26	33.72	32.72
Boat	30.23	29.67	30.60	30.03
Barbara	30.17	29.64	31.06	30.37

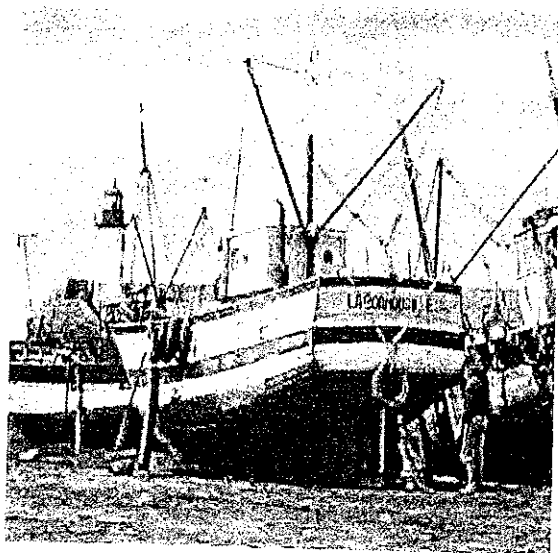


(ก)

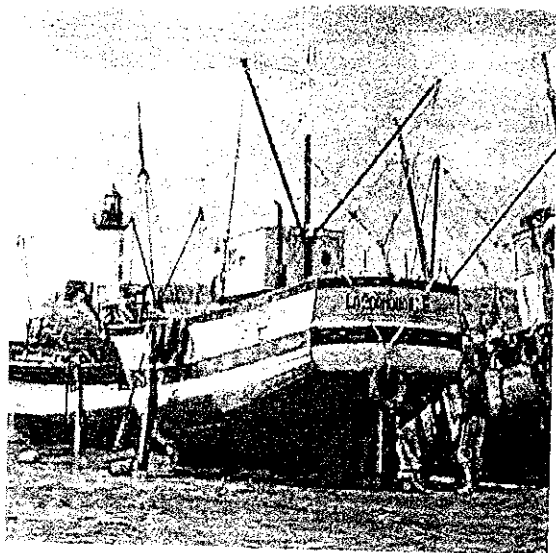


(ข)

รูปที่ 3.7 ภาพ "Lena" หลังการบีบอัดและฝังลายน้ำโดยใช้ (ก) DWT (ข) DMT



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.8 ภาพ “Boat” หลังการบีบอัดและฝังลายน้ำโดยใช้ (ก) DWT (ข) DMT





















(ก)





















(ข)

รูปที่ 3.9 ภาพ “Barbara” หลังการบีบอัดและฝังลายน้ำโดยใช้ (ก) DWT (ข) DMT

ตารางที่ 3.2 ลายน้ำที่ถูกคัดแยกและค่า BER จากอัลกอริทึมที่ใช้ DWT หลังถูกโจมตีด้วยการบีบอัด
สัญญาณภาพแบบ JPEG







Q.F. (%)	ภาพ					
	Lena		Boat		Barbara	
	ลายน้ำ	BER (%)	ลายน้ำ	BER (%)	ลายน้ำ	BER (%)
10		16.797		9.766		16.016
20		7.031		1.563		5.859
30		2.734		0.391		1.563
40		1.172		0		1.172
50		0.391		0		0.391
60		0		0		0

ตารางที่ 3.3 ลายน้ำที่ถูกคัดแยกและค่า BER จากอัลกอริทึมที่ใช้ DMT หลังถูกโจมตีด้วยการบีบอัด
สัญญาณภาพแบบ JPEG







Q.F. (%)	ภาพ					
	Lena		Boat		Barbara	
	ลายน้ำ	BER (%)	ลายน้ำ	BER (%)	ลายน้ำ	BER (%)
10		15.625		5.859		19.531
20		5.078		0		3.906
30		1.562		0.391		1.172
40		0		0		0
50		0		0		0
60		0		0		0

นอกจากนี้ยังได้ทำการโจมตีด้วยการประมวลผลสัญญาณภาพพื้นฐานดังรูปที่ 3.10 ซึ่งประกอบด้วย การกรองแบบค่ามัธยฐานขนาด 3×3 การกรองแบบค่าผ่านขนาด 3×3 และการเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน โดยแปรค่าความแปรปรวนจาก 100 ถึง 500 ตารางที่ 3.4 และ ตารางที่ 3.6 แสดงค่า BER ของลายน้ำที่ได้จากการคัดแยกหลังการถูกโจมตีของภาพที่ใช้การแปลง DWT ผลของอัลกอริทึมที่ใช้ DMT หลังการถูกโจมตีแสดงดังตารางที่ 3.5 และตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.4 ลายน้ำที่ถูกคัดแยกและค่า BER จากอัลกอริทึมที่ใช้ DWT หลังถูกโจมตีด้วยการกรองชนิดต่าง ๆ ขนาด 3×3

ชนิดการกรอง	ภาพ					
	Lena		Boat		Barbara	
	ลายน้ำ	BER (%)	ลายน้ำ	BER (%)	ลายน้ำ	BER (%)
แบบค่ามัธยฐาน		13.281		18.750		12.891
แบบค่าผ่าน		17.969		26.953		12.891

ตารางที่ 3.5 ลายน้ำที่ถูกคัดแยกและค่า BER จากอัลกอริทึมที่ใช้ DMT หลังถูกโจมตีด้วยการกรองชนิดต่าง ๆ ขนาด 3×3

ชนิดการกรอง	ภาพ					
	Lena		Boat		Barbara	
	ลายน้ำ	BER (%)	ลายน้ำ	BER (%)	ลายน้ำ	BER (%)
แบบค่ามัธยฐาน		4.688		5.078		12.109
แบบค่าผ่าน		13.281		17.188		12.500

จากผลการทดสอบจะเห็นว่า ภาพหลังการฝังลายน้ำที่ถูกโจมตีโดยการกรองแบบค่าผ่านและการกรองแบบค่ามัธยฐานของอัลกอริทึมที่ใช้การแปลง DMT มีความทนทานของสัญญาณลายน้ำดีกว่าการใช้ DWT เช่นกัน สำหรับกรณีของการโจมตีด้วยการเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียนยังไม่สามารถที่จะสรุปได้แน่ชัดว่าการแปลงชนิดใดให้ผลความทนทานดีกว่า



(ก) ภาพจากการบีบอัดแบบ JPEG

(ข) ภาพจากการกรองแบบค่ามัธยฐาน



(ค) ภาพจากการกรองแบบต่ำผ่าน

(ง) ภาพจากการเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน

รูปที่ 3.10 ภาพที่ฝังลายน้ำหลังการถูกโจมตีแบบต่างๆ

ตารางที่ 3.6 ลายน้ำที่ถูกคัดแยกและค่า BER จากอัลกอริทึมที่ใช้ DWT หลังถูกโจมตีด้วยการเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน

ค่าความแปรปรวน	ภาพ					
	Lena		Boat		Barbara	
	ลายน้ำ	BER (%)	ลายน้ำ	BER (%)	ลายน้ำ	BER (%)
100		2.734		0.000		0.781
200		7.031		0.391		4.688
300		9.766		2.734		7.813
400		9.766		4.688		10.547
500		12.11		6.250		13.281

ตารางที่ 3.7 ลายน้ำที่ถูกคัดแยกและค่า BER จากอัลกอริทึมที่ใช้ DMT หลังถูกโจมตีด้วยการเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน

ค่าความแปรปรวน	ภาพ					
	Lena		Boat		Barbara	
	ลายน้ำ	BER (%)	ลายน้ำ	BER (%)	ลายน้ำ	BER (%)
100		1.172		0.391		3.516
200		5.469		1.563		7.031
300		7.031		5.469		8.594
400		8.984		6.250		11.719
500		9.766		8.594		14.453

3.4 สรุป

จากการศึกษาผลกระทบของการแปลงสัญญาณภาพต่ออัลกอริทึมการฝังลายน้ำในโดเมนการบีบอัด ซึ่งเป็นวิธีการที่ให้ประโยชน์ทั้งในด้านของการลดขนาดของพื้นที่ในการจัดเก็บและการป้องกันการละเมิดลิขสิทธิ์ในเวลาเดียวกัน การแปลงสัญญาณภาพที่ใช้ในการศึกษานี้ประกอบด้วย การแปลงเวฟเลตและการแปลงมัลติเวฟเลต ซึ่งเป็นการแปลงที่ได้มีการนำไปใช้กันอย่างกว้างขวาง

โดยใช้อัลกอริทึมที่นำเสนอโดย Yang, Chang, and Chen (2001) ในการทดสอบเหมือนกัน อัลกอริทึมนี้เป็นการฝังลายน้ำที่ใช้รูปแบบการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ SPIHT โดยการดัดแปลงบิตที่ได้จากขั้นตอนการทำ refinement pass ผลการทดสอบกับภาพตัวอย่างจำนวนหลายภาพพบว่า อัลกอริทึมที่ใช้การแปลงมัลติเวฟเล็กให้คุณภาพของภาพหลังการบีบอัดและฝังลายน้ำดีกว่าอัลกอริทึมที่ใช้การแปลงเวฟเล็กที่อัตราบิตเดียวกัน นอกจากนี้ยังได้ทดสอบความทนทานของสัญญาณลายน้ำโดยการโจมตีด้วยการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ JPEG การกรองแบบค่ามัธยฐานและการกรองแบบค่าผ่านพบว่าอัลกอริทึมที่ใช้การแปลงมัลติเวฟเล็กมีความทนทานดีกว่าการใช้การแปลงเวฟเล็ก

บทที่ 4

การบีบอัดสัญญาณภาพพร้อมกับการฝังลายน้ำ

4.1 กล่าวนำ

จากการเล็งเห็นถึงประโยชน์ของการบีบอัดสัญญาณภาพและการฝังลายน้ำดิจิทัล จึงได้มีการรวมวิธีการรวมทั้งสองเข้าด้วยกันหรือเรียกว่าเป็นการฝังลายน้ำในโดเมนการบีบอัดนั่นเอง ซึ่งมีด้วยกันหลายวิธี แต่จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมายังไม่มีหรือนำการแปลงมัลติเวฟเล็ดไปใช้กับการบีบอัดสัญญาณภาพพร้อมกับการฝังลายน้ำ จากบทที่แล้วการแปลงมัลติเวฟเล็ดให้ผลการทดสอบดีกว่าการแปลงเวฟเล็ด สำหรับบทนี้จึงได้นำเสนอวิธีการบีบอัดสัญญาณภาพพร้อมกับการฝังลายน้ำ โดยใช้การแปลงมัลติเวฟเล็ด ซึ่งใช้การบีบอัดสัญญาณภาพแบบ SPIHT และการฝังลายน้ำในสัมประสิทธิ์การแปลงที่มีความสำคัญ ในหัวข้อที่ 4.2 ได้กล่าวถึงรายละเอียดของวิธีการที่นำเสนอซึ่งประกอบด้วย ขั้นตอนการเตรียมสัญญาณลายน้ำ ขั้นตอนการฝังลายน้ำในโดเมนการบีบอัดและการคัดแยกลายน้ำ และในหัวข้อที่ 4.3 เป็นการสรุปของบทนี้

4.2 วิธีการที่นำเสนอ

วิธีการที่นำเสนอเป็นการรวมการบีบอัดสัญญาณภาพกับการฝังลายน้ำเข้าด้วยกัน โดยการบีบอัดสัญญาณภาพใช้การบีบอัดแบบ SPIHT ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและรวดเร็ว การบีบอัดแบบนี้จะให้ความสำคัญกับสัมประสิทธิ์ในทุกแบนด์ย่อย ขั้นตอนของการเข้ารหัสประกอบด้วย 2 ขั้นตอนหลัก คือ การทำ sorting pass และ refinement pass

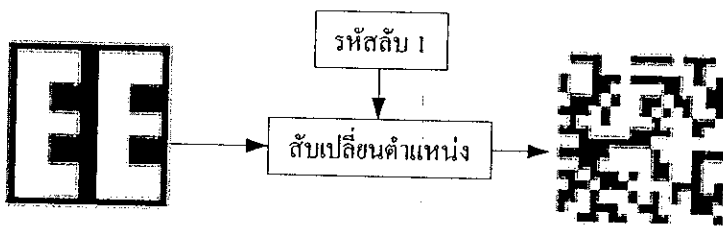
สำหรับขั้นตอนการทำ sorting pass เป็นขั้นตอนการกำหนดความสำคัญของสัมประสิทธิ์การแปลงและขั้นตอน refinement pass เป็นการส่งค่าบิตของสัมประสิทธิ์ในรอบก่อนหน้าเพื่อเข้ารหัส โดยสัมประสิทธิ์เหล่านี้ได้จากขั้นตอนที่แล้ว ซึ่งจะสังเกตว่าการเข้ารหัสแบบนี้จะดำเนินการกับสัมประสิทธิ์ที่มีความสำคัญเท่านั้น ทำให้การฝังลายน้ำควรจะดำเนินการกับสัมประสิทธิ์เหล่านั้นเช่นกันเพื่อป้องกันไม่ให้สัญญาณลายน้ำหายไป

การฝังลายน้ำในสัมประสิทธิ์ที่มีความสำคัญสามารถทำได้ใน 2 ส่วน คือ ดำเนินการกับสัมประสิทธิ์โดยตรงก่อนทำการเข้ารหัสและการดำเนินการกับบิตหรือสัมประสิทธิ์ในระหว่างการเข้ารหัส ซึ่งมีข้อดี ข้อเสียแตกต่างกัน คือ การฝังลายน้ำในสัมประสิทธิ์ก่อนการเข้ารหัสจะต้องทราบถึงสัมประสิทธิ์ที่มีความสำคัญก่อน ซึ่งถูกกำหนดโดยกระบวนการเข้ารหัสแบบ SPIHT ดังนั้น อาจจะต้องดำเนินการเข้ารหัสมากกว่าหนึ่งครั้ง และจะต้องคำนึงถึงการสูญเสียของสัมประสิทธิ์ที่เกิดจากการเข้ารหัสที่อัตราบิตต่ำด้วย ส่วนการฝังลายน้ำในระหว่างการเข้ารหัสโดยการแก้ไขบิตส่งออกทำให้กระบวนการใช้เวลาในการดำเนินการน้อย แต่ค่อนข้างจะมีความยืดหยุ่นในการฝังลายน้ำน้อยด้วย

เช่นกัน ดังนั้นจึงได้นำเสนอวิธีการฝังลายน้ำในสัมประสิทธิ์ก่อนการเข้ารหัสโดยอาศัยการเปลี่ยนระดับของค่าสัมประสิทธิ์เทียบกับค่าขีดเริ่มเปลี่ยน ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.2.1 การเตรียมสัญญาณภาพและสัญญาณลายน้ำ

สัญญาณภาพที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นสัญญาณภาพดิจิทัลที่มีไฟล์นามสกุล RAW ซึ่งเป็นข้อมูลภาพที่ยังไม่ผ่านการบีบอัด โดยข้อมูลเหล่านั้นจะเป็นค่าพิกเซลของภาพ และไม่มีไฟล์ส่วนหัว (header file) ใดๆ ส่วนสัญญาณลายน้ำจะเป็นภาพขาวดำซึ่งก่อนที่จะนำไปใช้ฝังเข้าไปในภาพ ต้องมีการสับเปลี่ยนตำแหน่งเพื่อความปลอดภัยในการกู้คืนสัญญาณลายน้ำ แสดงได้ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การเตรียมสัญญาณลายน้ำ

4.2.2 ขั้นตอนการบีบอัดสัญญาณภาพพร้อมกับการฝังลายน้ำ

กำหนดให้ภาพต้นแบบ I เป็นภาพระดับเทา W เป็นสัญญาณลายน้ำแบบภาพขาวดำ และ I_w เป็นภาพหลังการบีบอัดสัญญาณภาพและฝังลายน้ำ ซึ่งมีขั้นตอนการฝังลายน้ำพร้อมกับการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ SPIHT ดังนี้

1) ภาพลายน้ำแบบขาวดำ W ขนาด $M_1 \times N_1$ ถูกสับเปลี่ยนโดยใช้รหัสลับ 1 จากนั้นจะได้สัญญาณลายน้ำ V ที่เป็นลำดับเวกเตอร์แบบสุ่มซึ่งประกอบด้วย $v_k = \{0,1\}$ โดยที่ $k = 1, 2, 3, \dots, M_1 \times N_1$

2) แปลงสัญญาณภาพต้นแบบ I ด้วยการแยกองค์ประกอบเวฟเล็ทหรือมัลติเวฟเล็ททั้งหมด 5 ระดับ ดังนั้น จะได้แบนด์ย่อยทั้งหมด 16 แบนด์ย่อย ซึ่งจะถูกแทนด้วย LH_1, HL_1 และ HH_1 โดยที่ $l = \{1, 2, 3, 4, 5\}$ ในระดับการแปลงสูงสุดจะมีแบนด์ย่อย LL_5 อีกหนึ่งแบนด์ย่อย เรียกว่า แบนด์ย่อยการประมาณค่า (approximation subband) ซึ่งจะไม่ทำการฝังลายน้ำในแบนด์ย่อยนี้ เนื่องจากจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพของภาพเป็นอย่างมาก

3) เลือกสัมประสิทธิ์การแปลงที่มีขนาดอยู่ในช่วง (T_1, T_2) ในแบนด์ย่อย $LH_5, HL_5, HH_5, LH_4, HL_4, HH_4, LH_3, HL_3$ และ HH_3 โดยสัมประสิทธิ์การแปลงในแต่ละแบนด์ย่อยจะถูกแสดงโดยค่า $c(u, v)$ เมื่อ u และ v เป็นค่าตำแหน่งของสัมประสิทธิ์ในแบนด์ย่อย

4) เลือกสัมประสิทธิ์ที่ได้จากข้อ 3) โดยเลือกสัมประสิทธิ์ที่มีขนาดใกล้เคียงกับค่า T_w เนื่องจากจะช่วยลดการผิดเพี้ยนของภาพหลังการฝังลายน้ำ จากนั้นจึงนำสัมประสิทธิ์เหล่านั้นไปทำการฝังลายน้ำตามสมการที่ (4.1) จนครบตามจำนวนบิตที่ต้องการ

$$c'(u, v) = \begin{cases} \text{sign}(c(u, v)) \times [T_w + \alpha_1 (T_2 - T_w)] & \text{ถ้า } v_k = 1 \\ \text{sign}(c(u, v)) \times [T_w - \alpha_2 (T_w - T_1)] & \text{ถ้า } v_k = 0 \end{cases} \quad (4.1)$$

โดยที่ $c'(u, v)$ คือ สัมประสิทธิ์หลังการฝังลายน้ำที่พิกัด (u, v)

$c(u, v)$ คือ สัมประสิทธิ์ก่อนการฝังลายน้ำที่พิกัด (u, v)

T_w คือ ค่าขีดเริ่มเปลี่ยนของการฝังลายน้ำ

α_1 คือ ค่าความแกร่งของลายน้ำ เมื่อ $v_k = 1$

α_2 คือ ค่าความแกร่งของลายน้ำ เมื่อ $v_k = 0$

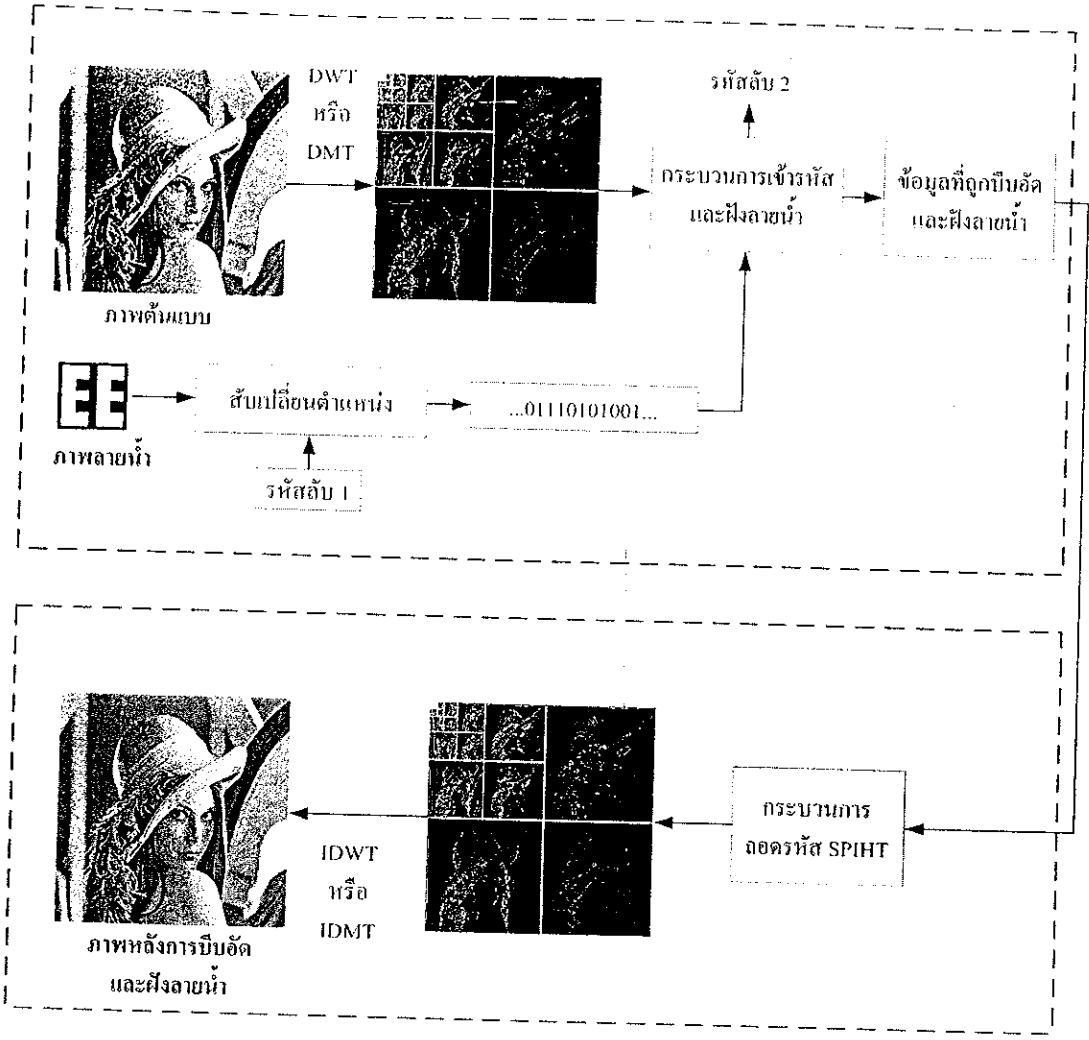
v_k คือ ลายน้ำลำดับเวกเตอร์แบบสุ่มบิตที่ k

สำหรับขอบเขตของค่าพารามิเตอร์ในสมการที่ (4.1) คือ ขอบเขตของ α จะอยู่ในช่วง $[0, 1)$ และขอบเขตของ α_2 อยู่ในช่วง $(0, 1)$

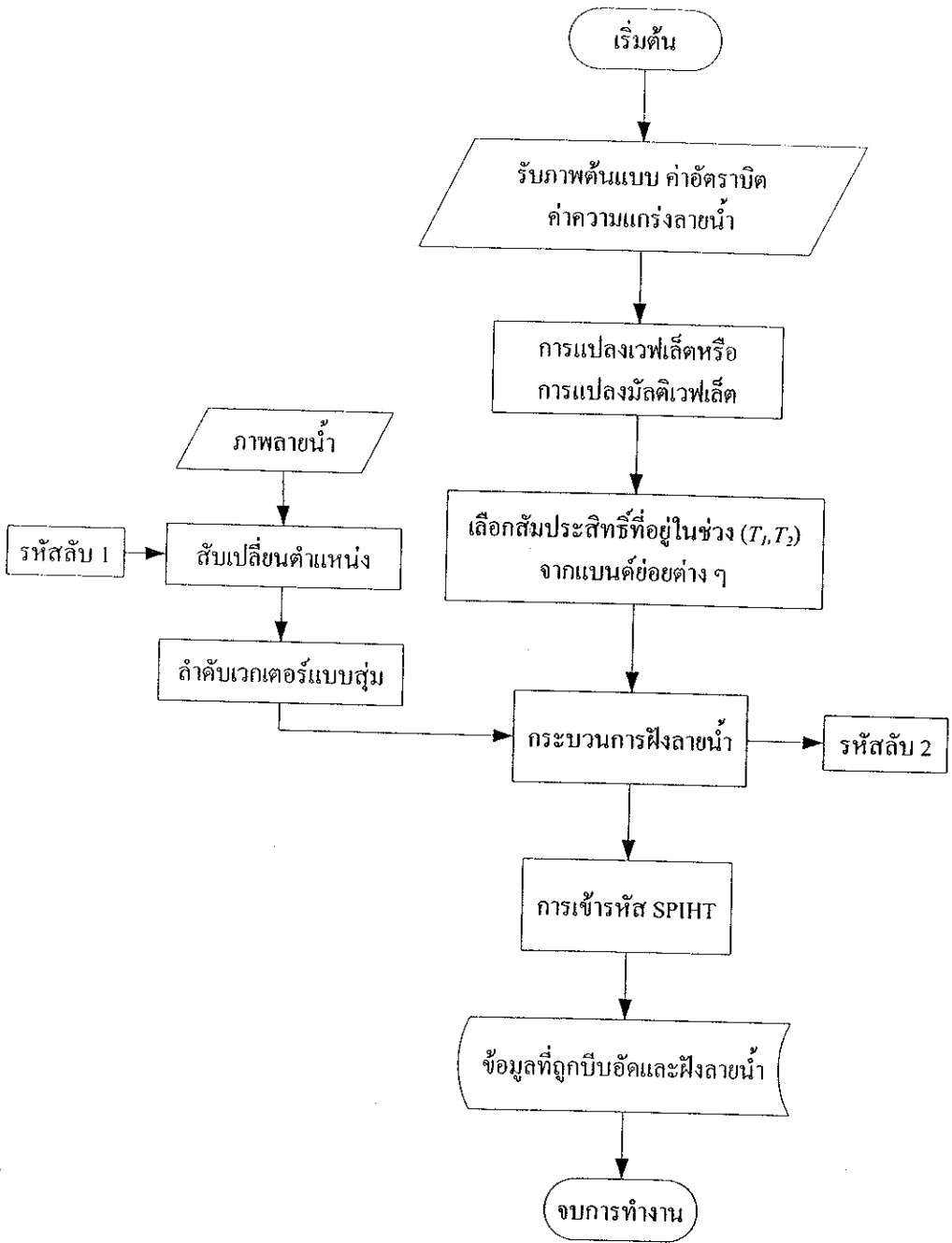
5) ทำการเข้ารหัส SPIHT ด้วยวิธีการปกติทั่วไป โดยใช้สัมประสิทธิ์การแปลงที่ผ่านการฝังลายน้ำแล้วในข้อ 4) ก็จะได้ข้อมูลที่ถูกรีบอัดและฝังลายน้ำ

6) สำหรับภาพที่ถูกรีบอัดและฝังลายน้ำแทนด้วย I_w สามารถสร้างกลับได้โดยการถอดรหัส SPIHT และแปลงกลับสัญญาณภาพ

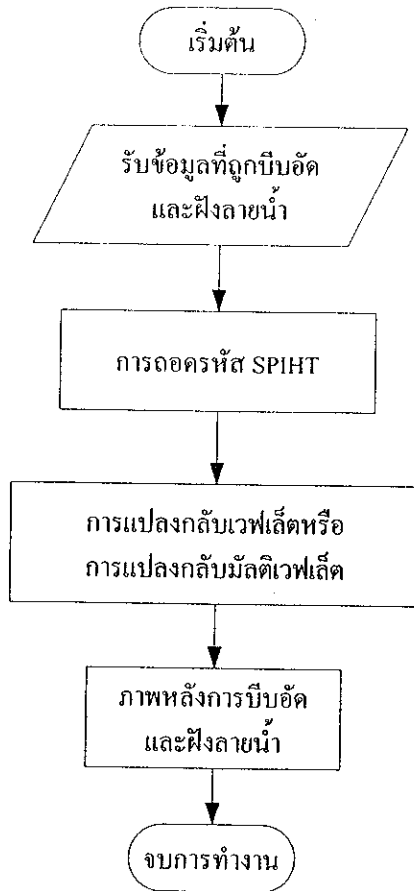
จากอัลกอริทึมการบีบอัดสัญญาณภาพและการฝังลายน้ำที่นำเสนอ จะประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ การเข้ารหัสพร้อมกับการฝังลายน้ำและกระบวนการสร้างกลับภาพหลังการบีบอัดและฝังลายน้ำ ซึ่งกระบวนการนี้จะทำให้ข้อมูลมีขนาดลดลงเพื่อใช้ในการจัดเก็บหรือส่งข้อมูล สามารถแสดงแผนภาพขั้นตอนและแผนผังการเข้ารหัสพร้อมฝังลายน้ำได้ดังรูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 ตามลำดับ นอกจากนี้การสร้างกลับภาพสามารถทำได้ตามแผนผังดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.2 แผนภาพกระบวนการฝังลายน้ำ



รูปที่ 4.3 แผนผังกระบวนการเข้ารหัสและฝังลายน้ำของวิธีการที่นำเสนอ



รูปที่ 4.4 แผนผังกระบวนการสร้างกลับภาพหลังถูกรีบอัดและฝึกลายน้ำ

4.2.3 ขั้นตอนการคัดแยกลายน้ำ

กำหนดให้ภาพ I'_w เป็นภาพต้องสงสัยที่ใช้ในการตรวจจับลายน้ำ และ w' เป็นสัญญาณลายน้ำที่ได้จากการคัดแยกของภาพ I'_w กระบวนการคัดแยกลายน้ำของวิธีการที่นำเสนอจะต้องอาศัยรหัสลับ 2 ช่วยในการคัดแยกลายน้ำและใช้รหัสลับ 1 ในการย้อนกลับการสับเปลี่ยนตำแหน่งของภาพลายน้ำ ซึ่งแสดงแผนภาพได้ดังรูปที่ 4.5 และมีรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) แปลงสัญญาณภาพต้องสงสัยโดยใช้การแยกองค์ประกอบเวฟเล็ตหรือมัลติเวฟเล็ตตามที่ใช้ในขั้นตอนการฝึกลายน้ำทั้งหมด 5 ระดับ เพื่อให้ได้สัมประสิทธิ์การแปลง $c'_w(u, v)$
- 2) ทำการคัดแยกลายน้ำจากสัมประสิทธิ์ที่ถูกฝึกลายน้ำในแบบค้อยต่าง ๆ โดยเทียบกับค่าขีดเริ่มเปลี่ยนของการคัดแยกลายน้ำ ดังสมการที่ (4.2)

$$v'_k = \begin{cases} 1 & , \text{ if } |c'_w(u,v)| \geq T'_w \\ 0 & , \text{ otherwise} \end{cases} \quad (4.2)$$

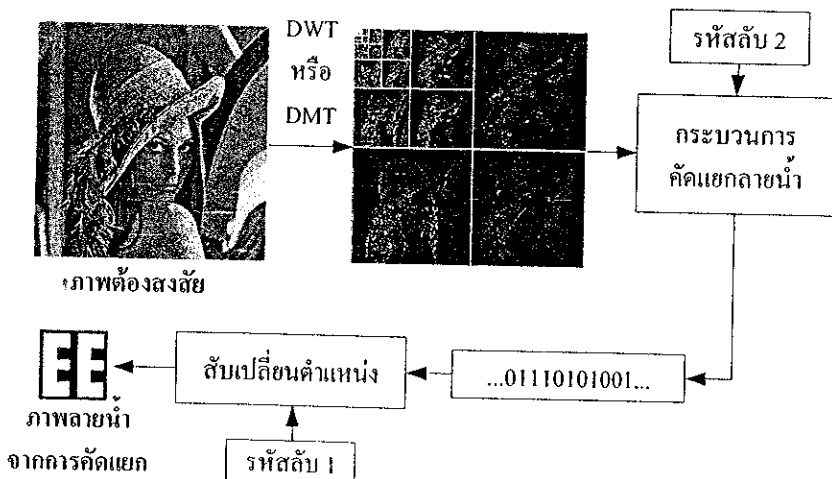
- โดยที่ v'_k คือ สายน้ำที่ได้จากการคัดแยกลำดับบิตที่ k
- $c'_w(u,v)$ คือ สัมประสิทธิ์การแปลงของภาพ I'_w ที่พิกัด (u,v)
- T'_w คือ ค่าขีดเริ่มเปลี่ยนของการคัดแยกสายน้ำ

ทำซ้ำขั้นตอนนี้จนกระทั่งได้สัญญาณสายน้ำครบทุกบิต หรือได้ V' ซึ่งเป็นลำดับเวกเตอร์แบบสุ่มที่ได้จากการคัดแยกนั่นเอง

3) จากนั้นนำสัญญาณสายน้ำที่ได้ไปจัดให้อยู่ในรูปแบบของภาพขาวดำ ขนาด $M_i \times N_i$ เท่ากับภาพสายน้ำต้นฉบับ โดยการย้อนกลับกระบวนการสับเปลี่ยนตำแหน่ง ซึ่งก็จะได้ภาพ W' จากการคัดแยก

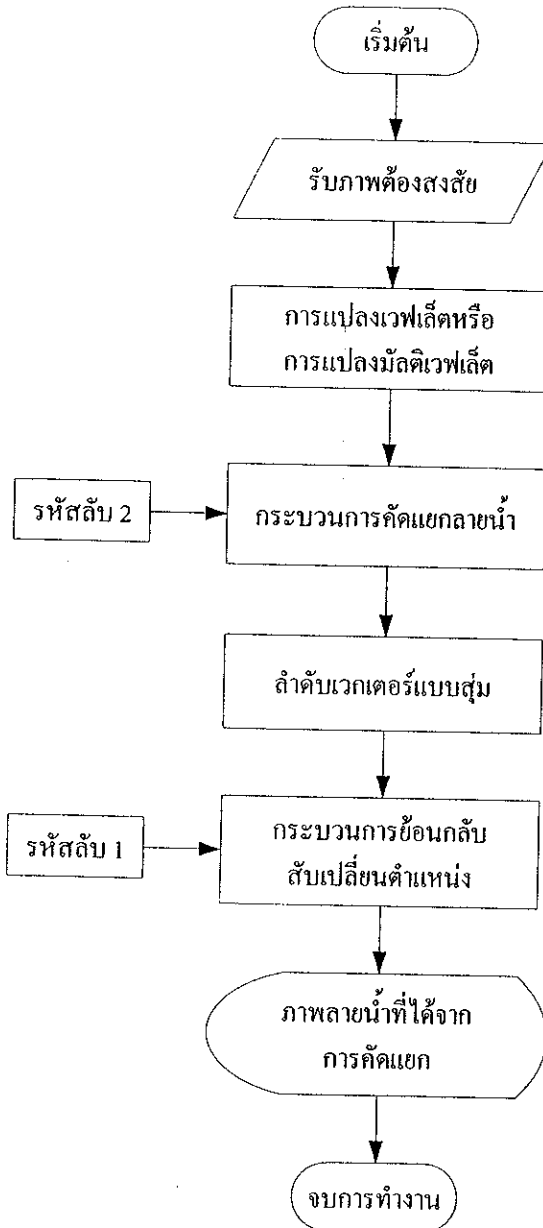
4) หลังจากการคัดแยกสายน้ำแล้วทำการวัดค่าความเหมือนของสัญญาณสายน้ำต้นฉบับกับสัญญาณสายน้ำที่ได้จากการคัดแยก โดยใช้ค่า Normalized Cross-Correlation (NC) ซึ่งสามารถหาได้จาก

$$NC(W, W') = \frac{\sum_{k=1}^n w_k w'_k}{\sum_{k=1}^n w_k w_k} \quad (4.3)$$



รูปที่ 4.5 แผนภาพกระบวนการคัดแยกสายน้ำ

โดยในการคำนวณค่า NC จะต้องทำการสลับขั้วของสัญญาณลายนํ้าก่อน ถ้า $w_k = 0$ ให้แทนค่าเป็น -1 และ $w_k = 1$ ก็แทนเป็น 1 เหมือนเดิม แผนภาพกระบวนการคัดแยกลายนํ้าและแผนผังอัลกอริทึมการคัดแยกลายนํ้าของวิธีการที่นำเสนอแสดงได้ดังรูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6 ตามลำดับ



รูปที่ 4.6 แผนผังอัลกอริทึมการคัดแยกลายนํ้า

4.3 สรุป

บทนี้ได้นำเสนออัลกอริทึมการบีบอัดสัญญาณภาพพร้อมกับการฝังลายน้ำโดยใช้การแปลงมัลติเวฟเล็ท ซึ่งจะได้รับประโยชน์ทั้งในด้านการลดขนาดของข้อมูลภาพและการป้องกันการละเมิดลิขสิทธิ์ การบีบอัดสัญญาณภาพที่ใช้เป็นการบีบอัดแบบ SPIHT ซึ่งจะอาศัยความสัมพันธ์แบบซีโรทรีและให้ความสำคัญกับสัมประสิทธิ์ในทุกแบนด์ย่อย การเข้ารหัสจะมีกระบวนการที่ใช้ในการกำหนดความสำคัญของสัมประสิทธิ์โดยพิจารณาจากขนาดของสัมประสิทธิ์เทียบกับค่าขีดเริ่มเปลี่ยนในแต่ละรอบ ทำให้เทคนิคการฝังลายน้ำที่นำเสนอต้องทำการฝังลายน้ำเข้าไปในส่วนของสัมประสิทธิ์ที่มีความสำคัญเหล่านั้นด้วย เพื่อป้องกันการสูญหายไปของลายน้ำเนื่องจากกระบวนการเข้ารหัส สำหรับการคัดแยกลายน้ำไม่ต้องใช้ภาพต้นแบบ แต่จะต้องใช้รหัสลับที่ได้จากขั้นตอนการฝังลายน้ำช่วยในการคัดแยกและเพื่อความปลอดภัยด้วย

บทที่ 5

ผลการทดสอบ

5.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดสอบประสิทธิภาพของการบีบอัดสัญญาณภาพพร้อมกับการฝังลายน้ำที่ได้นำเสนอ โดยพิจารณาออกเป็น 2 ส่วน คือ คุณภาพของภาพหลังฝังลายน้ำและความทนทานของสัญญาณลายน้ำหลังการถูกโจมตีด้วยวิธีการต่าง ๆ สำหรับภาพที่ใช้ในการทดสอบมีทั้งหมด 6 ภาพ การทดสอบหัวข้อที่ 5.2 จะเป็นการทดสอบอัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยที่อัตราการบีบอัดที่แตกต่างกัน ในหัวข้อที่ 5.3 เป็นการเปรียบเทียบผลระหว่างการใช้การแปลงมัลติเวฟเล็ดและการแปลงเวฟเล็ดกับอัลกอริทึมที่นำเสนอ

5.2 ผลการทดสอบของอัลกอริทึมที่นำเสนอ

ในหัวข้อนี้ได้วัดประสิทธิภาพของอัลกอริทึมที่นำเสนอกับภาพทดสอบจำนวน 6 ภาพ โดยพิจารณาถึงคุณภาพของภาพหลังการบีบอัดและฝังลายน้ำ ต่อจากนั้นทดสอบความทนทานของสัญญาณลายน้ำโดยการโจมตีด้วยการประมวลผลสัญญาณภาพพื้นฐานและการบีบอัดสัญญาณภาพ สำหรับการบีบอัดสัญญาณภาพจะเข้ารหัส SPIHT ที่อัตราบิตเท่ากับ 0.3 bpp เพื่อทดสอบที่อัตราบิตต่ำสำหรับภาพทดสอบทุกภาพ การแยกองค์ประกอบสัญญาณภาพใช้ DGHM มัลติเวฟเล็ดทั้งหมด 5 ระดับ โดยกำหนดให้ $T_1 = 64$, $T_2 = 256$ และ $T'_n = 128$ สำหรับพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ กำหนดให้ $\alpha_1 = 0.2$, $\alpha_2 = 0.2$ และ $T'_n = 128$

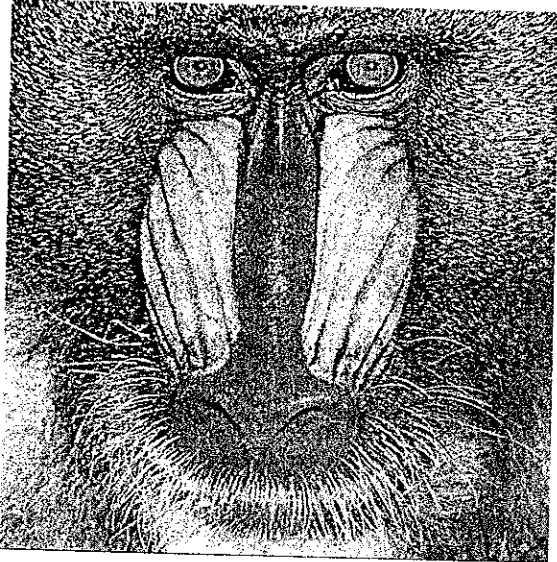
5.2.1 คุณภาพของภาพหลังการบีบอัดและฝังลายน้ำ

ในการวัดคุณภาพของภาพจะใช้ค่า $PSNR$ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.1 โดยวัดคุณภาพของภาพหลังการบีบอัดแต่ไม่ฝังลายน้ำและคุณภาพของภาพหลังการบีบอัดพร้อมกับฝังลายน้ำ ภาพ “Baboon” และ “Peppers” หลังการบีบอัดและฝังลายน้ำด้วยอัลกอริทึมที่นำเสนอแสดงได้ดังรูปที่ 5.1 และรูปที่ 5.2 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าไม่สามารถที่จะสังเกตเห็นความแตกต่างได้

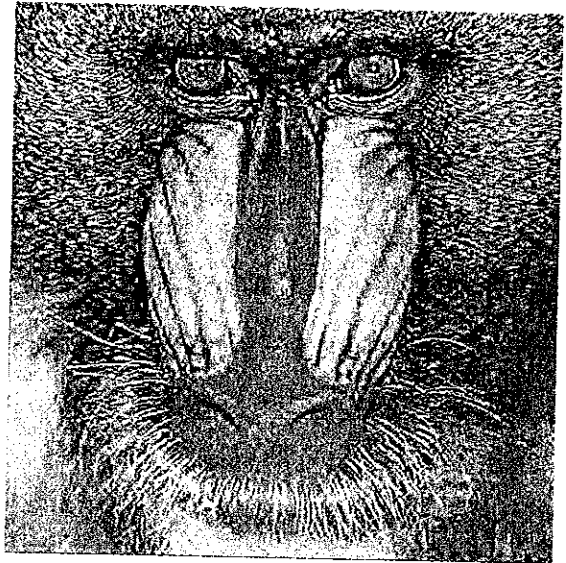
จากผลการทดสอบพบว่า คุณภาพของภาพหลังการบีบอัดและฝังลายน้ำของภาพทดสอบแต่ละภาพหลังจากทำการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ SPIHT แต่ไม่ฝังลายน้ำจะมีค่าที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะของแต่ละภาพว่ามีส่วนของพื้นหลังหรือลายเส้นมากน้อยเพียงใด แต่เมื่อทำการฝังลายน้ำเข้าไปพร้อมกับการบีบอัดสัญญาณภาพ คุณภาพของภาพจะลดลงจากเดิมไม่มากนัก

ตารางที่ 5.1 คุณภาพของภาพวัด โดยใช้ค่า $PSNR$ (dB) ที่อัตราบิต 0.3 bpp

ภาพ	SPIHT	SPIHT + การฟุ้งลายน้ำ
Baboon	22.2367	22.214
Barbara	28.0283	27.9725
Boat	30.5993	30.4925
Goldhill	30.5365	30.4335
Lena	33.72	33.59
Peppers	33.57	33.43



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.1 (ก) ภาพต้นแบบ (ข) ภาพหลังการบีบอัดและฟุ้งลายน้ำที่อัตราบิต 0.3 bpp



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.2 (ก) ภาพต้นแบบ (ข) ภาพหลังการบีบอัดและฝังลายน้ำที่อัตราบิต 0.3 bpp

5.2.2 ความทนทานของสัญญาณลายน้ำ

การทดสอบความทนทานของสัญญาณลายน้ำสามารถทำได้โดยการนำเอาภาพที่ถูกฝังลายน้ำไปโจมตีด้วยการกรองแบบค่ามัธยฐาน การกรองแบบต่ำผ่าน การเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียนและการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ JPEG หรือด้วยการประมวลผลสัญญาณภาพอื่น ๆ จากนั้นนำภาพหลังการถูกโจมตีไปทำการตัดแยกลายน้ำและคำนวณค่า NC หรือค่า BER ของลายน้ำที่ได้จากการตัดแยกกับลายน้ำต้นแบบ

การโจมตีสัญญาณลายน้ำด้วยการกรองแบบค่ามัธยฐานของภาพทดสอบ จะทดสอบด้วยตัวกรองขนาดเท่ากับ 3×3 , 5×5 , 7×7 , และ 9×9 สามารถแสดงค่า NC ของภาพหลังการถูกโจมตีได้ดังตารางที่ 5.2 ซึ่งจะเห็นว่า สัญญาณลายน้ำของอัลกอริทึมที่นำเสนอมีความทนทานที่ดีที่ขนาดตัวกรองเท่ากับ 3×3

การโจมตีสัญญาณลายน้ำด้วยการกรองแบบต่ำผ่าน ซึ่งการกรองแบบนี้นิยมนำไปใช้สำหรับการลดสัญญาณรบกวนบางชนิดและช่วยในการปรับปรุงคุณภาพของภาพ ในการทดสอบจะใช้ขนาดของตัวกรองเช่นเดียวกับการกรองแบบค่ามัธยฐาน โดยค่า NC ของลายน้ำจากภาพที่ถูกฝังลายน้ำหลังการถูกโจมตีแสดงได้ดังตารางที่ 5.3 ซึ่งจะเห็นว่า สัญญาณลายน้ำมีความทนทานต่อการถูกโจมตีด้วยการกรองแบบต่ำผ่านที่ขนาดตัวกรองเท่ากับ 3×3 ได้เป็นอย่างดี

ลำดับต่อมาเป็นการ โจมตีสัญญาณลายน้ำด้วยการเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน ซึ่งจะมีลักษณะเป็นสัญญาณแบบสุ่ม โดยในการทดสอบจะทำการแปรค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนจาก 100 ถึง 500 ทำให้ได้ค่า NC ของลายน้ำจากภาพที่ถูกฝังลายน้ำหลังการถูกโจมตีแสดงได้ดังตารางที่ 5.4 ซึ่งลายน้ำที่ได้มีความทนทานน้อยกว่าลายน้ำที่ถูกโจมตีด้วยการกรองทั้งสองชนิดข้างต้น

ตารางที่ 5.2 ค่า NC ของลายน้ำจากภาพที่ถูกฝังลายน้ำที่อัตราบิต 0.3 bpp หลังการถูกโจมตีด้วยการกรองแบบค่ามัธยฐาน

ภาพ	ขนาดของตัวกรอง			
	3×3	5×5	7×7	9×9
Baboon	0.976563	0.976563	0.851563	0.671875
Barbara	0.976563	0.90625	0.734375	0.648438
Boat	0.992188	0.921875	0.632813	0.414063
Goldhill	0.953125	0.96875	0.789063	0.570313
Lena	1	0.898438	0.609375	0.484375
Peppers	0.992188	0.765625	0.546875	0.359375

ตารางที่ 5.3 ค่า NC ของลายน้ำจากภาพที่ถูกฝังลายน้ำที่อัตราบิต 0.3 bpp หลังการถูกโจมตีด้วยการกรองแบบค่าผ่าน

ภาพ	ขนาดของตัวกรอง			
	3×3	5×5	7×7	9×9
Baboon	1	1	0.851563	0.695313
Barbara	1	0.953125	0.835938	0.640625
Boat	1	0.9375	0.789063	0.59375
Goldhill	0.984375	0.953125	0.789063	0.617188
Lena	0.992188	0.804688	0.507813	0.320313
Peppers	0.984375	0.765625	0.484375	0.320313

การบีบอัดสัญญาณภาพมาตรฐานแบบ JPEG เป็นการบีบอัดสัญญาณภาพที่นิยมใช้กัน
อย่างแพร่หลาย ทำให้ต้องมีการทดสอบภาพที่ถูกฝังลายน้ำด้วยการบีบอัดสัญญาณภาพชนิดนี้ โดยจะ
แปรค่า JPEG quality factor (Q.F.) จาก 10% จนถึง 50% ค่า NC ของลายน้ำที่คัดแยกได้ หลังการถูก
โจมตีแสดงได้ดังตารางที่ 5.5 จะเห็นว่าสัญญาณลายน้ำสามารถคัดแยกได้ทุกบิตหรือมีค่า NC เท่ากับ 1
ที่ค่า Q.F. เท่ากับ 50 สำหรับภาพทดสอบทุกภาพ และที่ค่า Q.F. ต่ำ ๆ สัญญาณลายน้ำยังคงรอดพ้น
จากการโจมตีได้ดีเช่นกัน

ตารางที่ 5.4 ค่า NC ของลายน้ำจากภาพที่ถูกฝังลายน้ำที่อัตราบิต 0.3 bpp หลังการถูกโจมตีด้วย
การเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน

ภาพ	ค่าความแปรปรวน				
	100	200	300	400	500
Baboon	0.929688	0.914063	0.859375	0.820313	0.78125
Barbara	0.992188	0.929688	0.851563	0.726563	0.625
Boat	0.960938	0.898438	0.820313	0.796875	0.734375
Goldhill	0.757813	0.671875	0.523438	0.484375	0.421875
Lena	0.84375	0.585938	0.53125	0.40625	0.265625
Peppers	0.640625	0.492188	0.382813	0.296875	0.265625

ตารางที่ 5.5 ค่า NC ของลายน้ำจากภาพที่ถูกฝังลายน้ำที่อัตราบิต 0.3 bpp หลังการถูกโจมตีด้วย
การบีบอัดสัญญาณภาพแบบ JPEG

ภาพ	Q.F. (%)				
	10	20	30	40	50
Baboon	0.929688	1	1	1	1
Barbara	0.867188	1	1	1	1
Boat	0.78125	1	1	1	1
Goldhill	0.820313	1	1	1	1
Lena	0.5	0.867188	0.984375	0.984375	1
Peppers	0.507813	0.773438	0.992188	1	1

จากผลการทดสอบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมที่ในงานวิจัยพบว่า คุณภาพของภาพลดลงไม่มากนัก และความทนทานของสัญญาณลายน้ำหลังถูกโจมตีแบบต่าง ๆ ดังตารางที่ 5.2 ถึง ตารางที่ 5.5 สัญญาณลายน้ำที่ได้มีความทนทานต่อการกรองแบบค่ามัธยฐาน การกรองแบบค่าผ่าน การเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียนและการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ JPEG ซึ่งการโจมตีที่ทำให้ลายน้ำเสียหายค่อนข้างมาก คือ การเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน

5.3 เปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างอัลกอริทึมที่ใช้การแปลงมัลติเวฟเล็ดและการแปลงเวฟเล็ด

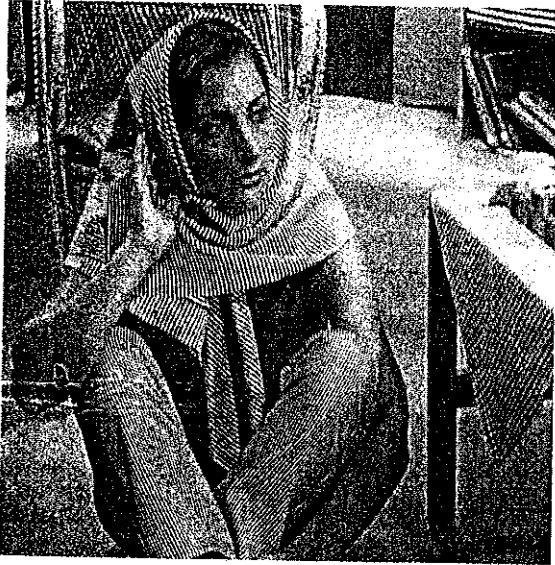
การเปรียบเทียบผลการทดสอบจะใช้การแปลงมัลติเวฟเล็ดและการแปลงเวฟเล็ดโดยใช้ อัลกอริทึมที่นำเสนอในงานวิจัย เริ่มจากการนำภาพทดสอบไปแยกองค์ประกอบ สำหรับการแยก องค์ประกอบมัลติเวฟเล็ดใช้ DGHM มัลติเวฟเล็ดและการแยกองค์ประกอบเวฟเล็ดใช้ Daubechies-4 จากนั้นทำการเข้ารหัส SPIHT ที่อัตราบิตเท่ากับ 1.0 bpp สำหรับภาพทดสอบทุกภาพ ในที่นี้ไม่ใช้การเข้ารหัสเลขคณิต โดยกำหนดให้ $T_1 = 64$, $T_2 = 256$ และ $T_\infty = 128$ ในขั้นตอนการฝังลายน้ำจะใช้ พารามิเตอร์ของการฝังลายน้ำ คือ $\alpha_1 = 0.2$, $\alpha_2 = 0.2$ และ $T'_\infty = 128$ เมื่อได้ภาพที่ถูกบีบอัดและ ฝังลายน้ำแล้วจะนำไปประเมินประสิทธิภาพของอัลกอริทึมที่ใช้การแปลงทั้งสองชนิดในด้านของ คุณภาพของภาพและความทนทานของสัญญาณลายน้ำหลังการถูกโจมตีด้วยการประมวลผลภาพและ การบีบอัดสัญญาณภาพ

5.3.1 ผลการเปรียบเทียบคุณภาพของภาพหลังการบีบอัดและฝังลายน้ำ

ลายน้ำที่ฝังเข้าไปในภาพจะต้องไม่ทำให้ภาพหลังการฝังลายน้ำมีความผิดเพี้ยนไปจาก ภาพต้นแบบมากนัก ซึ่งสามารถวัดได้โดยการใช้ค่า $PSNR$ ซึ่งผลของการบีบอัดสัญญาณภาพ แบบ SPIHT พร้อมกับการฝังลายน้ำแสดงได้ดังตารางที่ 5.6 โดยจะทำการวัดค่าหลังจากการ เข้ารหัส SPIHT แต่ยังไม่ฝังลายน้ำและเมื่อเข้ารหัส SPIHT พร้อมกับการฝังลายน้ำ ซึ่งจะให้เห็นการ ลดลงของคุณภาพของภาพเนื่องจากการฝังลายน้ำ ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่า คุณภาพของภาพหลัง การบีบอัดและฝังลายน้ำของอัลกอริทึมที่ใช้การแปลงมัลติเวฟเล็ดมีคุณภาพของภาพดีกว่าการใช้ การแปลงเวฟเล็ดในทุกภาพทดสอบ โดยรูปที่ 5.3 และรูปที่ 5.4 เป็นตัวอย่างภาพ “Barbara” และภาพ “Lena” หลังการบีบอัดพร้อมกับฝังลายน้ำ ตามลำดับ ซึ่งใช้การแปลงสัญญาณภาพที่แตกต่างกันแต่ อาจจะไม่สามารถสังเกตเห็นข้อแตกต่างได้

ตารางที่ 5.6 คุณภาพของภาพวัดโดยใช้ค่า $PSNR$ (dB) ที่อัตราบิต 1.0 bpp

ภาพ	วิธีการที่ใช้ทดสอบ			
	Proposed+DMT		Proposed+DWT	
	ไม่ฝังลายน้ำ	ฝังลายน้ำ	ไม่ฝังลายน้ำ	ฝังลายน้ำ
Baboon	26.2362	26.2113	26.0553	26.0312
Barbara	36.7360	36.4758	35.4375	35.2192
Boat	38.5034	38.1242	37.8782	37.5268
Goldhill	37.3675	37.0724	36.7409	36.485
Lena	40.5466	39.9253	40.0353	39.3876
Peppers	38.2677	37.9074	38.119	37.7582



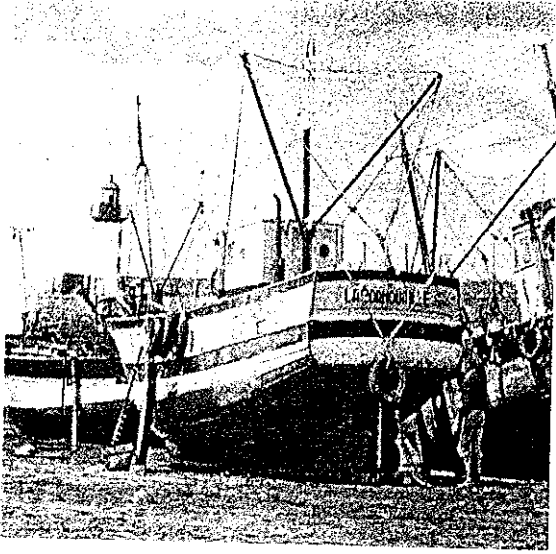
(ก)



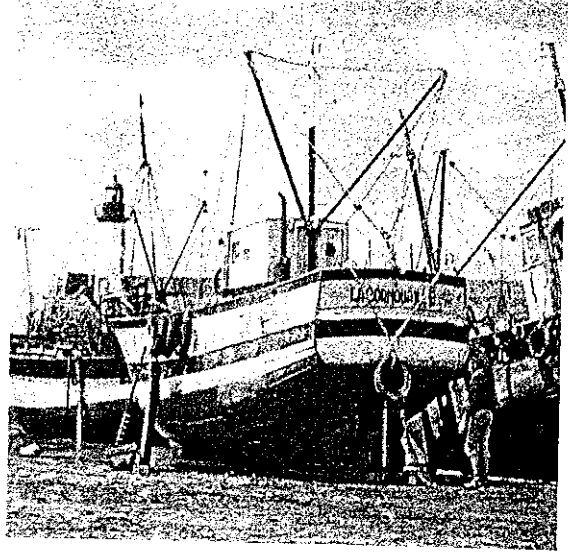
(ข)

รูปที่ 5.3 ภาพ "Barbara" หลังการบีบอัดและฝังลายน้ำที่อัตราบิต 1.0 bpp

โดยใช้ (ก) DMT (ข) DWT



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.4 ภาพ “Boat” หลังการบีบอัดและฝังลายน้ำที่อัตราบิต 1.0 bpp
โดยใช้ (ก) DMT (ข) DWT

5.3.2 ผลการเปรียบเทียบความทนทานของสัญญาณลายน้ำ

ผลการเปรียบเทียบความทนทานของสัญญาณลายน้ำระหว่างอัลกอริทึมในงานวิจัยที่ใช้การแปลงมัลติเวฟเล็ดและการแปลงเวฟเล็ดที่อัตราบิตเท่ากับ 1.0 bpp ซึ่งวัดจากค่า NC ดังแสดงในตารางที่ 5.7 และตารางที่ 5.8 เป็นการเปรียบเทียบผลการทดสอบของภาพหลังถูกโจมตีด้วยการกรองแบบค่าน้ชยฐาน ตารางที่ 5.9 และตารางที่ 5.10 เป็นการเปรียบเทียบผลการทดสอบของภาพหลังถูกโจมตีด้วยการกรองแบบค่าผ่าน ตารางที่ 5.11 และตารางที่ 5.12 เป็นการเปรียบเทียบผลการทดสอบของภาพหลังถูกโจมตีด้วยการเพิ่มสัญญาณแบบเกาส์เซียน ตารางที่ 5.13 และตารางที่ 5.14 เป็นการเปรียบเทียบผลการทดสอบของภาพหลังถูกโจมตีด้วยการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ JPEG

ตารางที่ 5.7 ค่า NC ของลายน้ำจากภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DMT ที่อัตราบิต 1.0 bpp หลังการถูกโจมตีด้วยการกรองแบบค่ามัธยฐาน

ภาพ	ขนาดของตัวกรอง			
	3×3	5×5	7×7	9×9
Baboon	0.71875	0.414063	0.28125	0.195313
Barbara	0.882813	0.671875	0.570313	0.460938
Boat	0.921875	0.625	0.375	0.296875
Goldhill	0.945313	0.726563	0.429688	0.257813
Lena	0.984375	0.945313	0.773438	0.617188
Peppers	0.976563	0.773438	0.539063	0.429688

ตารางที่ 5.8 ค่า NC ของลายน้ำจากภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DWT ที่อัตราบิต 1.0 bpp หลังการถูกโจมตีด้วยการกรองแบบค่ามัธยฐาน

ภาพ	ขนาดของตัวกรอง			
	3×3	5×5	7×7	9×9
Baboon	0.789063	0.609375	0.359375	0.25
Barbara	0.875	0.648438	0.476563	0.335938
Boat	0.898438	0.625	0.328125	0.21875
Goldhill	0.929688	0.734375	0.476563	0.320313
Lena	0.96875	0.882813	0.789063	0.632813
Peppers	0.9375	0.789063	0.585938	0.445313

ตารางที่ 5.9 ค่า NC ของลายน้ำจากภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DMT ที่อัตราบิต 1.0 bpp หลังการถูกโจมตีด้วยการกรองแบบต่ำผ่าน

ภาพ	ขนาดของตัวกรอง			
	3×3	5×5	7×7	9×9
Baboon	0.992188	0.710938	0.453125	0.296875
Barbara	1	0.914063	0.726563	0.492188
Boat	1	0.859375	0.671875	0.492188
Goldhill	0.984375	0.898438	0.671875	0.421875
Lena	1	0.960938	0.726563	0.484375
Peppers	1	0.78125	0.578125	0.375

ตารางที่ 5.10 ค่า NC ของลายน้ำจากภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DWT ที่อัตราบิต 1.0 bpp หลังการถูกโจมตีด้วยการกรองแบบต่ำผ่าน

ภาพ	ขนาดของตัวกรอง			
	3×3	5×5	7×7	9×9
Baboon	0.96875	0.75	0.523438	0.359375
Barbara	0.984375	0.875	0.710938	0.546875
Boat	0.976563	0.835938	0.585938	0.375
Goldhill	0.976563	0.804688	0.5625	0.359375
Lena	1	0.953125	0.796875	0.539063
Peppers	0.976563	0.796875	0.484375	0.390625

ตารางที่ 5.13 ค่า NC ของลายน้ำจากภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DMT ที่อัตราบิต 1.0 bpp หลังการถูก
โจมตีด้วยการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ JPEG

ภาพ	Q.F. (%)				
	10	20	30	40	50
Baboon	0.445313	0.882813	0.976563	0.992188	1
Barbara	0.515625	0.789063	0.898438	0.929688	0.992188
Boat	0.429688	0.734375	0.914063	0.960938	0.992188
Goldhill	0.507813	0.765625	0.921875	0.929688	0.992188
Lena	0.648438	0.859375	0.953125	0.96875	1
Peppers	0.453125	0.734375	0.882813	0.914063	0.976563

ตารางที่ 5.14 ค่า NC ของลายน้ำจากภาพที่ถูกฝังลายน้ำโดยใช้ DWT ที่อัตราบิต 1.0 bpp หลังการถูก
โจมตีด้วยการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ JPEG

ภาพ	Q.F. (%)				
	10	20	30	40	50
Baboon	0.65625	0.890625	0.976563	1	1
Barbara	0.507813	0.710938	0.882813	0.953125	0.96875
Boat	0.398438	0.742188	0.820313	0.9375	0.96875
Goldhill	0.5	0.820313	0.851563	0.914063	0.992188
Lena	0.515625	0.875	0.984375	0.976563	1
Peppers	0.546875	0.757813	0.851563	0.953125	0.960938

5.4 ผลการเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการประมวลผล

ในหัวข้อนี้เป็นการเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการประมวลผลระหว่างอัลกอริทึมการบีบอัดสัญญาณภาพพร้อมกับการฝังลายน้ำที่นำเสนอซึ่งใช้การแปลงมัลติเวฟเล็ดกับอัลกอริทึมดั้งเดิมที่นำเสนอโดย Yang, Chang, and Chen (2001) ซึ่งใช้การแปลงเวฟเล็ด การทดสอบดำเนินการโดยใช้คอมพิวเตอร์พกพา (1.73 GHz Intel Pentium M Processor, 512 MB RAM, 60 GB HDD) บนระบบปฏิบัติการวินโดวส์

สำหรับในกระบวนการทดสอบเวลาที่ใช้จะดำเนินการแปลงสัญญาณภาพทั้งหมด 5 ระดับโดยใช้ภาพระดับเทาขนาด 512×512 จำนวน 3 ภาพ ซึ่งจะทำการทดสอบซ้ำทั้งหมด 5 ครั้ง จากนั้นคำนวณหาค่าเฉลี่ยและเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการประมวลผลของทั้งสองอัลกอริทึมด้วยค่าอัตราส่วนเวลา ซึ่งเป็นค่าอัตราส่วนของเวลาที่ใช้ทั้งหมดระหว่างอัลกอริทึมดั้งเดิมที่ใช้การแปลงเวฟเล็ดกับอัลกอริทึมที่นำเสนอโดยใช้การแปลงมัลติเวฟเล็ด ถ้าอัตราส่วนเวลามีค่าเท่ากับ 1 แสดงว่าเวลาที่ใช้ทั้งหมดของทั้งสองอัลกอริทึมมีค่าเท่ากัน แต่ถ้าอัตราส่วนเวลามีค่าน้อยกว่า 1 แสดงว่าเวลาในการคำนวณของอัลกอริทึมดั้งเดิมที่ใช้การแปลงเวฟเล็ดน้อยกว่าอัลกอริทึมที่นำเสนอ และถ้าอัตราส่วนเวลามีค่ามากกว่า 1 แสดงว่าเวลาที่ใช้ในการคำนวณทั้งหมดของอัลกอริทึมดั้งเดิมที่ใช้การแปลงเวฟเล็ดมีค่ามากกว่าอัลกอริทึมที่นำเสนอ

ผลการเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการคำนวณเมื่อแยกออกเป็นแต่ละขั้นตอนแสดงได้ดังตารางที่ 5.15 ถึงตารางที่ 5.17 พบว่า ในขั้นตอนการแยกองค์ประกอบและการสร้างกลับภาพของอัลกอริทึมดั้งเดิมที่ใช้การแปลงเวฟเล็ดใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่าอัลกอริทึมที่นำเสนอ โดยไม่ขึ้นกับลักษณะของภาพและอัตราการบีบอัด แต่จะขึ้นอยู่กับขนาดของฟิลเตอร์และการจัดเรียงสัญญาณอินพุต ซึ่งเป็นความแตกต่างของการแปลงเวฟเล็ดและการแปลงมัลติเวฟเล็ด สำหรับขั้นตอนการเข้ารหัสพร้อมกับการบีบอัดสัญญาณภาพ พบว่าอัลกอริทึมที่นำเสนอใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่าอัลกอริทึมดั้งเดิมในทุกภาพการทดสอบที่อัตราบิตเดียวกันแต่แตกต่างกันไม่มากนัก ซึ่งวิธีการที่นำเสนอจะดำเนินการฝังลายน้ำเข้าไปในสัมประสิทธิ์โดยตรง แต่วิธีการดั้งเดิมใช้การฝังลายน้ำโดยการแก้ไขบิตในขั้นตอนการทำ refinement pass และในขั้นตอนการถอดรหัสภาพไม่มีความแตกต่างกันเนื่องจากทั้งสองอัลกอริทึมใช้การถอดรหัสเหมือนกันทุกประการ

ตารางที่ 5.15 เปรียบเทียบเวลาการคำนวณที่ใช้ในแต่ละขั้นตอนการบีบอัดสัญญาณภาพพร้อมกับการ
ฝังลายน้ำของภาพ Lena (หน่วย : วินาที)

อัตราบิต	ครั้งที่	การแยก องค์ประกอบภาพ		การสร้างกลับภาพ		การเข้ารหัส พร้อมกับการฝังลายน้ำ	
		DWT	DMT	DWT	DMT	DWT	DMT
0.3	1	0.1400	0.1720	0.1560	0.1880	0.5000	0.5000
	2	0.2190	0.2500	0.1560	0.1870	0.5150	0.5000
	3	0.1410	0.2030	0.1560	0.1720	0.5160	0.5000
	4	0.2030	0.2500	0.1560	0.1870	0.5000	0.5000
	5	0.1560	0.2180	0.1720	0.1870	0.5150	0.5160
ค่าเฉลี่ยเวลา		0.1718	0.2186	0.1592	0.1842	0.5092	0.5032
1.0	1	0.1720	0.2350	0.1410	0.1880	0.8120	0.5160
	2	0.1870	0.2660	0.1560	0.1870	0.8280	0.7500
	3	0.2030	0.2810	0.1560	0.1880	0.8130	0.7650
	4	0.1410	0.2030	0.1560	0.2030	0.8120	0.7500
	5	0.1400	0.2340	0.1560	0.1880	0.8120	0.7650
ค่าเฉลี่ยเวลา		0.1686	0.2438	0.1530	0.1908	0.8154	0.7092

ตารางที่ 5.16 เปรียบเทียบเวลาการคำนวณที่ใช้ในแต่ละขั้นตอนการบีบอัดสัญญาณภาพพร้อมกับการ
ฝังลายน้ำของภาพ Boat (หน่วย : วินาที)

อัตราบิต	ครั้งที่	การแยก องค์ประกอบภาพ		การสร้างกลับภาพ		การเข้ารหัส พร้อมกับการฝังลายน้ำ	
		DWT	DMT	DWT	DMT	DWT	DMT
0.3	1	0.2030	0.2190	0.1560	0.1880	0.4530	0.4220
	2	0.2030	0.2650	0.1560	0.1880	0.4370	0.4220
	3	0.1410	0.2660	0.1560	0.1870	0.4530	0.4220
	4	0.1560	0.2040	0.1570	0.1870	0.4530	0.4220
	5	0.2190	0.2030	0.1560	0.1870	0.4530	0.4370
ค่าเฉลี่ยเวลา		0.1844	0.2314	0.1562	0.1874	0.4498	0.4250
1.0	1	0.2030	0.2340	0.1560	0.1870	0.6720	0.6100
	2	0.1870	0.2350	0.1570	0.1880	0.6720	0.6090
	3	0.1880	0.1870	0.1560	0.1870	0.6720	0.6250
	4	0.1570	0.2650	0.1560	0.1880	0.6720	0.6250
	5	0.2190	0.2660	0.1400	0.1880	0.6720	0.6100
ค่าเฉลี่ยเวลา		0.1908	0.2374	0.1530	0.1874	0.6720	0.6100

ตารางที่ 5.17 เปรียบเทียบเวลาการคำนวณที่ใช้ในแต่ละขั้นตอนการบีบอัดสัญญาณภาพพร้อมกับการ
ฝังลายน้ำของภาพ Barbara (หน่วย : วินาที)

อัตราบิต	ครั้งที่	การแยกองค์ประกอบภาพ		การสร้างกลับภาพ		การเข้ารหัสพร้อมกับการฝังลายน้ำ	
		DWT	DMT	DWT	DMT	DWT	DMT
0.3	1	0.2040	0.2500	0.1560	0.2040	0.4530	0.4380
	2	0.1410	0.2650	0.1560	0.1880	0.4690	0.4370
	3	0.1720	0.2340	0.1560	0.1870	0.4690	0.4370
	4	0.1880	0.1720	0.1560	0.1880	0.4530	0.4370
	5	0.2190	0.1870	0.1560	0.1880	0.4690	0.4380
ค่าเฉลี่ยเวลา		0.1848	0.2216	0.1560	0.1910	0.4626	0.4374
1.0	1	0.2030	0.2190	0.1560	0.1870	0.6880	0.6250
	2	0.2190	0.1880	0.1570	0.1870	0.6870	0.6250
	3	0.1870	0.2500	0.1560	0.1870	0.6870	0.6250
	4	0.1720	0.2350	0.1560	0.1870	0.6880	0.6250
	5	0.1570	0.2500	0.1570	0.1870	0.6870	0.6250
ค่าเฉลี่ยเวลา		0.1876	0.2284	0.1564	0.1870	0.6874	0.6250

ผลการเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการคำนวณทั้งหมดของทั้งสองอัลกอริทึมแสดงได้ดังตารางที่ 5.18 ถึงตารางที่ 5.20 ผลการทดสอบพบว่า ค่าอัตราส่วนเวลามีค่าน้อยกว่า 1 ในทุกภาพการทดสอบ และทุกอัตราการบีบอัด นั้นแสดงว่า อัลกอริทึมดั้งเดิมใช้เวลาทั้งหมดในการคำนวณน้อยกว่า อัลกอริทึมที่นำเสนอ แต่ไม่แตกต่างกันมากนักโดยพิจารณาจากค่าอัตราส่วนเวลามีค่าเข้าใกล้ 1 และจากผลการเปรียบเทียบในแต่ละขั้นตอนทำให้ทราบว่า เวลาที่ใช้ในการคำนวณมีความแตกต่างกันในขั้นตอนการแปลงสัญญาณภาพนั่นเอง

ตารางที่ 5.18 เปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการคำนวณทั้งหมดของการบีบอัดสัญญาณภาพพร้อมกับการฝัง
ลายน้ำของภาพ Lena

อัตราบิต	ครั้งที่	เวลาทั้งหมดที่ใช้ (วินาที)		อัตราส่วนเวลา
		DWT	DMT	
0.3	1	0.9060	0.9690	0.9350
	2	0.9840	1.0470	0.9398
	3	0.9060	1.0470	0.8653
	4	0.9680	1.0150	0.9537
	5	0.9220	1.0320	0.8934
	ค่าเฉลี่ยเวลา	0.9372	1.0220	0.9170
1.0	1	1.2500	1.3280	0.9413
	2	1.2650	1.3280	0.9526
	3	1.2970	1.2650	1.0253
	4	1.2340	1.2970	0.9514
	5	1.2340	1.2340	1.0000
	ค่าเฉลี่ยเวลา	1.2560	1.2904	0.9733

ตารางที่ 5.19 เปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการคำนวณทั้งหมดของการบีบอัดสัญญาณภาพพร้อมกับการฝัง
ลายน้ำของภาพ Boat

อัตราบิต	ครั้งที่	เวลาทั้งหมดที่ใช้ (วินาที)		อัตราส่วนเวลา
		DWT	DMT	
0.3	1	0.9060	0.9380	0.9659
	2	0.9060	0.9840	0.9207
	3	0.8440	0.9840	0.8577
	4	0.8600	0.9220	0.9328
	5	0.9220	0.9220	1.0000
	ค่าเฉลี่ยเวลา	0.8876	0.9500	0.9343
1.0	1	1.1400	1.1400	1.0000
	2	1.1250	1.1570	0.9723
	3	1.1250	1.1090	1.0144
	4	1.0940	1.1720	0.9334
	5	1.1400	1.1880	0.9596
	ค่าเฉลี่ยเวลา	1.1248	1.1532	0.9754

ตารางที่ 5.20 เปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการคำนวณทั้งหมดของการบีบอัดสัญญาณภาพพร้อมกับการฝังลายน้ำของภาพ Barbara

อัตราบิต	ครั้งที่	เวลาทั้งหมดที่ใช้ (วินาที)		อัตราส่วนเวลา
		DWT	DMT	
0.3	1	0.9220	0.9850	0.9360
	2	0.8600	0.9840	0.8740
	3	0.8910	0.9530	0.9349
	4	0.9060	0.9060	1.0000
	5	0.9530	0.9060	1.0519
	ค่าเฉลี่ยเวลา	0.9064	0.9468	0.9573
1.0	1	1.1560	1.1410	1.0131
	2	1.1720	1.1090	1.0568
	3	1.1400	1.1710	0.9735
	4	1.1250	1.1560	0.9732
	5	1.1100	1.1720	0.9471
	ค่าเฉลี่ยเวลา	1.1406	1.1498	0.9920

5.5 สรุป

ในบทนี้ได้แสดงผลการทดสอบของอัลกอริทึมการบีบอัดสัญญาณภาพพร้อมกับการฝังลายน้ำที่ได้นำเสนอ ในการทดสอบทำการเข้ารหัสที่อัตราบิต 0.3 bpp จากนั้นนำภาพที่ถูกบีบอัดพร้อมกับการฝังลายน้ำไปวัดประสิทธิภาพโดยการพิจารณาถึงคุณภาพของภาพและความทนทานของสัญญาณลายน้ำ ในการวัดคุณภาพจะใช้ค่า *PSNR* และสำหรับความทนทานของลายน้ำใช้ค่า *NC* ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่า คุณภาพของภาพหลังการบีบอัดและฝังลายน้ำลดลงจากการไม่ฝังลายน้ำน้อยมากโดยไม่ขึ้นกับอัตราการบีบอัด เมื่อนำภาพที่ถูกบีบอัดและฝังลายน้ำไปทดสอบความทนทานของสัญญาณลายน้ำพบว่า สัญญาณลายน้ำมีความทนทานต่อการถูกโจมตีด้วยการกรองแบบค่ามัธยฐาน การกรองแบบต่ำผ่านที่ขนาดตัวกรองเท่ากับ 3×3 และการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ JPEG ได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังได้เปรียบเทียบผลของการแปลงสัญญาณภาพต่ออัลกอริทึมที่นำเสนอที่อัตราบิต 1.0 bpp ซึ่งจะเห็นว่าคุณภาพของภาพหลังการฝังลายน้ำของอัลกอริทึมที่ใช้การแปลงมัลติเวฟเลตให้คุณภาพดีกว่าการใช้การแปลงเวฟเลต และสัญญาณลายน้ำของอัลกอริทึมที่ใช้การแปลงมัลติเวฟเลตมีความทนทานต่อการถูกโจมตีด้วยการกรองแบบต่ำผ่านที่ตัวกรองขนาด 3×3 ได้ดีกว่าการใช้การแปลงเวฟเลต สำหรับการ

สำหรับความซับซ้อนของวิธีการที่นำเสนอได้มีการเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการคำนวณกับวิธีการดั้งเดิมซึ่งให้ผลการทดสอบที่ไม่แตกต่างกันมากนัก โดยขั้นตอนที่ทำให้เกิดความแตกต่างของเวลาเนื่องมาจากกระบวนการแปลงสัญญาณภาพระหว่างการแปลงมัลติเวฟเล็กและการแปลงเวฟเล็ก

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับการบีบอัดสัญญาณภาพพร้อมกับการฝังลายน้ำ เพื่อให้ข้อมูลมีขนาดเล็กลงและยังช่วยในการป้องกันการละเมิดลิขสิทธิ์ สำหรับการบีบอัดสัญญาณภาพใช้การเข้ารหัส SPIHT และแยกองค์ประกอบของสัญญาณภาพโดยใช้การแปลงมัลติเวฟเล็ด ซึ่งในการศึกษาวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

1) ผลของการแปลงสัญญาณภาพต่ออัลกอริทึมการบีบอัดสัญญาณภาพและการฝังลายน้ำ ประกอบด้วย การแปลงเวฟเล็ดและการแปลงมัลติเวฟเล็ด ซึ่งเป็นการแปลงที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ในการทดสอบใช้อัลกอริทึมการฝังลายน้ำในโดเมนการบีบอัดโดยการเข้ารหัส SPIHT สำหรับการแยกองค์ประกอบเวฟเล็ดใช้ Daubechies-4 และการแยกองค์ประกอบมัลติเวฟเล็ดใช้ DGHM มัลติเวฟเล็ด ทั้งนี้เนื่องจากมีการประมาณค่าอันดับ 2 เหมือนกัน จากการทดสอบกับภาพทดสอบพบว่า อัลกอริทึมที่ใช้การแปลงมัลติเวฟเล็ดให้คุณภาพของภาพหลังการบีบอัดและฝังลายน้ำดีกว่าอัลกอริทึมที่ใช้การแปลงเวฟเล็ดที่อัตราบิตเดียวกัน นอกจากนี้เมื่อทำการโจมตีภาพหลังการบีบอัดและฝังลายน้ำด้วยการประมวลผลภาพและการบีบอัดสัญญาณภาพ พบว่าสัญญาณลายน้ำของอัลกอริทึมที่ใช้การแปลงมัลติเวฟเล็ดมีความทนทานต่อการถูกโจมตีด้วยการกรองแบบค่ามัธยฐาน การกรองแบบค่าผ่านและการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ JPEG ได้ดีกว่าอัลกอริทึมที่ใช้การแปลงเวฟเล็ด

2) คุณภาพของภาพหลังการบีบอัดและฝังลายน้ำ อัลกอริทึมการบีบอัดสัญญาณภาพพร้อมกับการฝังลายน้ำที่นำเสนอให้คุณภาพของภาพหลังการบีบอัดและฝังลายน้ำที่ดี เมื่อพิจารณาจากคุณภาพของภาพหลังการบีบอัดแต่ไม่ฝังลายน้ำกับภาพหลังการบีบอัดพร้อมกับฝังลายน้ำจะแตกต่างกันไม่มากนัก นั่นคือ กระบวนการของการฝังลายน้ำส่งผลต่อคุณภาพของภาพน้อยมากที่อัตราบิต 0.3 bpp และเมื่อทำการเข้ารหัสที่อัตราบิต 1.0 bpp คุณภาพของภาพหลังการบีบอัดพร้อมกับฝังลายน้ำจะมีความแตกต่างกับภาพหลังการบีบอัดแต่ไม่ฝังลายน้ำเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงคุณภาพของภาพทดสอบแต่ละภาพที่อัตราบิตเดียวกันจะมีคุณภาพที่ไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับลักษณะของภาพ กล่าวคือ ภาพที่มีความถี่ต่ำมากจะสามารถเข้ารหัสได้ดีกว่าภาพที่มีความถี่สูงมากหรือมีส่วนของลายเส้นมากนั่นเอง

3) ความทนทานของสัญญาณลายน้ำ ในการทดสอบความทนทานของสัญญาณลายน้ำจะทำการโจมตีด้วยการประมวลผลภาพและการบีบอัดสัญญาณภาพพบว่า สัญญาณลายน้ำของอัลกอริทึมที่นำเสนอมีความทนทานต่อการถูกโจมตีด้วยการกรองแบบค่ามัธยฐาน การกรองแบบค่าผ่านที่ขนาด

ตัวกรองเท่ากับ 3×3 ได้เป็นอย่างดี แต่สำหรับการ โจมตีด้วยการเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน สัญญาณลายน้ำที่ได้จะมีความเสียหายค่อนข้างมาก นอกจากนี้เมื่อทำการ โจมตีด้วยการบีบอัดสัญญาณ ภาพแบบ JPEG จะสามารถคัดแยกสัญญาณลายน้ำได้ทั้งหมดที่ค่า $Q.F. = 20$ ยกเว้นภาพ "Lena" และ "Peppers" ที่อัตราบิต 0.3 bpp และเมื่อเข้ารหัสที่อัตราบิตสูงขึ้นจะเห็นว่า ความทนทานของสัญญาณลายน้ำ ลดลงต่ำกว่าที่อัตราบิตต่ำ

4) เปรียบเทียบผลการแปลงสัญญาณภาพด้วยการแปลงมัลติเวฟเล็ดและการแปลงเวฟเล็ดต่อ อัลกอริทึมที่นำเสนอ โดยพิจารณาจากความทนทานของสัญญาณลายน้ำและคุณภาพของภาพหลังการ บีบอัดพร้อมกับการฝังลายน้ำพบว่า คุณภาพของภาพหลังการบีบอัดและฝังลายน้ำของอัลกอริทึมที่ นำเสนอ โดยใช้การแปลงมัลติเวฟเล็ดมีคุณภาพดีกว่าการใช้การแปลงเวฟเล็ดในทุกภาพทดสอบ นอกจากนี้เมื่อ โจมตีสัญญาณลายน้ำของอัลกอริทึมที่ใช้การแปลงทั้งสองวิธีที่อัตราบิต 1.0 bpp สัญญาณลายน้ำหลังถูกโจมตีด้วยการกรองแบบต่ำผ่านที่ขนาดตัวกรองเท่ากับ 3×3 ของ อัลกอริทึมที่ใช้การแปลงมัลติเวฟเล็ดมีความทนทานดีกว่าการใช้การแปลงเวฟเล็ด สำหรับการ โจมตี สัญญาณลายน้ำด้วยการกรองแบบค่ามัธยฐาน การเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียนและการบีบอัด สัญญาณภาพแบบ JPEG ยังไม่สามารถสรุปได้แน่ชัดว่าสัญญาณลายน้ำของอัลกอริทึมที่ใช้การแปลง ชนิดใดมีความทนทานดีกว่า

6.2 ข้อเสนอแนะ

1) ในงานวิจัยที่นำเสนอเป็นการบีบอัดสัญญาณภาพพร้อมกับการฝังลายน้ำของภาพระดับเทา แต่ภาพที่ใช้งานทั่วไปจะเป็นภาพสีซึ่งจาก โครงสร้างของภาพสีสามารถที่จะนำอัลกอริทึมที่นำเสนอ ไปใช้ได้

2) ศึกษาเพิ่มเติมวิธีการบีบอัดและฝังลายน้ำของภาพเคลื่อนไหว เพื่อนำอัลกอริทึมที่นำเสนอ ไปใช้กับภาพเคลื่อนไหวได้

3) นำอัลกอริทึมที่นำเสนอไปพัฒนาเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปเพื่อให้สามารถนำไปใช้งานได้ จริงหรือทำเป็นเว็บเซอร์วิสเพื่อให้ใช้งานผ่านทางระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ต

บรรณานุกรม

- Attakitmongkol, K., Hardin, D. P., and Wilkes, D. M. (2001). Multiwavelet Prefilters II: Optimal Orthogonal Prefilters. IEEE Trans. on Image Processing. 10:1476-1487.
- Bovik, A. C. (2005). Handbook of image and video processing. USA: Elsevier Academic Press. 661-672.
- Fisher, Y. (1995). Fractal image compression: theory and application. USA: Springer-Verlag. 2-23.
- Gonzalez, R. C. and Woods, R. E. (1992). Digital image processing. USA: Addison-Wesley. 307-412.
- Grosbois, R., and Ebrahimi, T. (2001). Watermarking in the JPEG 2000 domain. IEEE Fourth Workshop on Multimedia Signal Processing. 339-344.
- Keinert, F. (2004). Wavelets and multiwavelets: studies in advanced mathematics. USA: Chapman & Hall/CRC. 121-176.
- Said, A., and Pearlman, W. A. (1996). A new fast and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees. IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technology. 6:243-250.
- Seitz, J. (2005). Digital watermarking for digital media. 1st ed. Information Science Publishing, America, p12-16.
- Shapiro, J. M. (1993). Embedded image coding using zerotrees of wavelet coefficients. IEEE Trans. Signal Processing. 41:3445-3462.
- Subramanya, S. R. (2001). Image compression technique. IEEE Potentials. 20: 19-23.
- Ya-fei, S., Li, Z., Guo-wei, W., and Xing-gang, L. (2001). An integrated algorithm with watermarking and compression. International Conference on Info-tech and Info-net. 2:797-802.
- Yang, S.-H., Chang, Y.-L., and Chen, H.- C. (2001). A digital watermarking scheme based on SPIHT coding. IEEE International Conference on Multimedia and Expo. 325-328.
- Ziv, J. and Lempel, A. (1977). A universal algorithm for sequential data compression. IEEE Trans. Information Theory. 337-343.

ภาคผนวก

รายชื่อบทความที่ได้จากโครงการวิจัย

การประชุมวิชาการระดับชาติ

- ทรงพล คำนิล และ กิตติ อัครกิจมงคล (2550). “ผลการแปลงสัญญาณภาพต่ออัลกอริทึมการบีบอัดสัญญาณภาพและการฝังลายน้ำ” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 30 (EECON30) ณ โรงแรมเฟลิกซ์ริเวอร์แควรีสอร์ท จังหวัดกาญจนบุรี วันที่ 25-26 ตุลาคม 2550: หน้า 693-696.

ประวัติผู้วิจัย

กิตติ อรรถกัจจวมงคล เกิดเมื่อ วันที่ 7 สิงหาคม พ.ศ. 2515 ที่จังหวัดสตูล ปัจจุบันดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์ และเป็นหัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จบการศึกษาปริญญาตรี วศ.บ. วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2537 ระดับปริญญาโท M.S. Electrical Engineering และปริญญาเอก Ph.D. Electrical Engineering จาก Vanderbilt University สหรัฐอเมริกา เมื่อ พ.ศ. 2539 และ พ.ศ. 2542 ตามลำดับ งานวิจัยที่สนใจ คือ การประมวลสัญญาณดิจิทัล การประมวลผลสัญญาณภาพ การแปลงเวฟเล็ท การแปลงมัลติเวฟเล็ทและการประยุกต์ใช้ สถานที่ติดต่อ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000 หรือ kitti@sut.ac.th