วิศวกรรมสาร ม.ข. ปีที่ 30 ฉบับที่ 1(17-36) มกราคม-มีนาคม 2546
KKU Engineering Journal Vol.30 No. 1(17-36) January-March 2003

วิธีการที่มีประสิทธิภาพสำหรับป้องกันสัญญาณลายน้ำดิจิตอลจากการบีบอัดรูปภาพ

ธำรงรัตน์ อมรรักษา และรัชตา ชิ้งสุนทร
ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการทำภาพพิมพ์ลายน้ำดิจิตอลที่มีประสิทธิภาพเพื่อใช้ในการปกป้องสัญญาณลายน้ำ ในกระบวนการลดขนาดข้อมูลด้วยการประมวลผลสัญญาณทางดิจิตอลแบบต่างๆ เช่น การบีบอัดข้อมูลชนิดรูปภาพตามมาตรฐาน JPEG ในงานวิจัยนี้ได้พิจารณา และประยุกต์ใช้หลักการแปลงโดเมนโดยอาศัยการแปลงเวฟเล็ตแพคเกตในกระบวนการฝังสัญญาณลายน้ำดิจิตอล นอกจากนี้ ในการสร้างสัญญาณลายน้ำได้ประยุกต์ใช้วิธีการกระจายแถบความถี่แบบอันดับโดยตรง โดยมีจุดประสงค์ที่จะเพิ่มความทนทานของสัญญาญลายน้ำที่ถูกฝัง และลดความซับซ้อนในกระบวนการกู้คืนสัญญาณลายน้ำ จากผลลัพธ์ที่ได้ในการทดลองพบว่า การใช้เวฟเล็ตแพคเกตในการแปลงโดเมนแทนการใช้เวฟเล็ตแบบธรรมดา จะช่วยให้ประสิทธิภาพในการทำภาพพิมพ์ลายน้ำดิจิตอลสูง โดยวัดจากคุณภาพที่ดีขึ้นของรูปภาพที่ผ่านการฝังสัญญาณลายน้ำ มากกว่านั้น สัญญาณลายน้ำที่ได้ยังมีความทนทานต่อการบีบอัดข้อมูลชนิดรูปภาพด้วยมาตรฐานการบีบอัด JPEG ที่อัตราการบีบอัดสูงถึง 70% และยังทนทานต่อกระบวนการลดขนาดของข้อมูลภาพด้วยวิธีการเปลี่ยนค่าระดับสัญญาณใหม่ การลดอัตราการสุ่มตัวอย่าง และการเปลี่ยนขนาดภาพใหม่ โดยวัดจากการที่สัญญาณลายน้ำที่กู้กลับคืนมาภายหลังที่ผ่านการบีบอัดหรือลดขนาดข้อมูลแล้ว มีความถูกต้องเที่ยงตรง 100%

An Efficient Method for Protecting Digital Watermark Data against Image Compression

Thumrongrat Amornraksa and Ratchata Sungsoonthorn
Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering,
King Mongkut's University of Technology Thonburi

Abstract

This paper presents an effective digital watermarking technique used for protecting the watermark data from the digital signal processing based data compression schemes such as JPEG compression standard. In this research work, a wavelet packet transform is considered, and applied in the watermark embedding process. Moreover, the direct sequence spread spectrum technique is used to generate the watermark signal in order to increase its robustness and reduce the complexity of the watermark retrieval process. From the experimental results, it is found that employing wavelet packet transform instead of ordinary wavelet transform improves the performance of digital watermarking, which is measured by the improved quality of the watermarked image. Furthermore, the embedded watermark signal is robust against JPEG compression, at the compression rate up to 70 %, requantizing, subsampling and rescaling processes, which is measured from the correctly retrieved watermark signal obtained after passing through those processes.

บทนำ

ในปัจจุบันนี้ ความนิยมในการใช้ข้อมูลมัลติมีเดียที่ถูกเก็บบันทึกอยู่ในรูปแบบดิจิตอลมีความแพร่หลายมากขึ้น อันเนื่องมาจากข้อดีหลายๆ ประการเช่น ความคมชัดของข้อมูลที่ถูกทำซ้ำขึ้นมา ความสะดวกในการรักษาข้อมูลที่ถูกทำซ้ำให้มีคุณภาพเทียบเท่ากับข้อมูลต้นฉบับ อย่างไรก็ตาม ข้อดีดังกล่าวก็ก่อให้เกิดปัญหาในการแยกแยะว่าข้อมูลตัวไหนคือข้อมูลต้นฉบับข้อมูลตัวไหนคือข้อมูลที่ถูกทำซ้ำขึ้นใหม่ และปัญหานี้ก็นำไปสู่อีกปัญหาหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับการละเมิดลิขสิทธิ์ทางปัญญาของข้อมูลที่ถูกสร้าง และเผยแพร่กันอยู่เสมอ วิธีการทำภาพพิมพ์ลายน้ำดิจิตอลเป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการป้องกันปัญหานี้ โดยการฝังสัญญาณลายน้ำที่มีลักษณะเฉพาะลงไปในตัวข้อมูลที่ต้องการเผยแพร่ในลักษณะที่ว่าสัญญาณดังกล่าวไม่สามารถถูกตรวจจับ เปลี่ยนแปลง ทำลาย หรือลบออก

ได้จากบุคคลทั่วไป นอกจากนี้ยังไม่ทำให้คุณภาพของข้อมูลต้นฉบับนั้นๆ ลดต่ำจนเกินไปอีกด้วย ภายหลังที่มีการเผยแพร่ข้อมูลที่มีสัญญาณลายน้ำดังกล่าวออกไปแล้ว ถ้ามีการทำซ้ำข้อมูลเกิดขึ้น สัญญาณลายน้ำที่อยู่ภายในจะติดไปกับตัวข้อมูลที่ถูกทำซ้ำขึ้นใหม่ด้วย ซึ่งในเวลาต่อมาเมื่อมีการค้นพบข้อมูลที่ถูกทำซ้ำขึ้นอย่างไม่ถูกต้อง สัญญาณลายน้ำดังกล่าวที่ติดไปกับข้อมูลนี้จะถูกนำมาใช้ประโยชน์ในด้านการสืบหาแหล่งที่มาของการทำซ้ำข้อมูล หรือใช้ในการบ่งบอกถึงบุคคลที่เป็นเจ้าของที่แท้จริงของข้อมูลนั้นๆ ได้ ดังนั้นการทำภาพพิมพ์ลายน้ำดิจิตอลจึงได้รับความสนใจจากบุคคลทั่วไปที่จะทำการศึกษา ค้นคว้าวิจัยและพัฒนากันอย่างกว้างขวาง

โดยทั่วๆ ไปเราอาจแบ่งวิธีการทำภาพพิมพ์ลายน้ำดิจิตอลที่มีอยู่ในปัจจุบันออกเป็นสองประเภทคือ การทำภาพพิมพ์ลายน้ำดิจิตอลในโดเมนความถี่และในโดเมนเวลา ในช่วงแรกของการพัฒนา การทำภาพพิมพ์ลายน้ำดิจิตอลในโดเมนเวลาจะได้รับความสนใจมากกว่า เนื่องจากเป็นวิธีการที่สามารถกระทำได้ง่ายและไม่ซับซ้อน อย่างไรก็ตามสัญญาณลายน้ำที่ฝังลงไปในตัวข้อมูลส่วนใหญ่จะไม่ทนทานต่อการโจมตีจากกระบวนการประมวณผลสัญญาณดิจิตอล (digital signal processing) เท่าใดนัก เช่น เมื่อมีการโจมตีสัญญาณลายน้ำด้วยวิธีการกรองความถี่ต่ำผ่าน หรือการบีบอัดข้อมูลที่มีอัตราการบีบอัดสูงๆ ในทางตรงข้ามกัน การทำภาพพิมพ์ลายน้ำดิจิตอลในโดเมนความถี่จะทำให้สัญญาณลายน้ำที่ถูกฝัง มีความทนทานต่อกระบวนการประมวณผลสัญญาณดิจิตอลมากกว่า แม้ว่าวิธีการทำจะยุ่งยากและซับซ้อนกว่ามากก็ตาม โดยทั่วไปลักษณะของการทำภาพพิมพ์ลายน้ำดิจิตอลที่ดี[1] ก็คือ มีความทนทานสูงจากการโจมตีทั้งแบบตั้งใจหรือไม่ตั้งใจก็ได้ สัญญาณลายน้ำที่ฝังอยู่ภายในข้อมูลต้นฉบับควรจะคงอยู่และมีความสมบูรณ์ครบถ้วนเมื่อถูกกู้กลับคืนมาในภายหลัง แม้ว่าตัวข้อมูลที่มีสัญญาณลายน้ำฝังอยู่จะผ่านการโจมตีชนิดใดมากก็ตาม อย่างไรก็ตามวิธีเดียวที่จะกำจัดสัญญาณลายน้ำที่ถูกฝังอยู่ภายในก็คือ จะต้องทำการโจมตีที่ตัวข้อมูลจนคุณภาพของมันลดต่ำลงกว่ามาตรฐานที่ได้กำหนดไว้ จนอาจถึงระดับที่ไม่สามารถนำข้อมูลนั้นมาใช้งานได้ ลักษณะที่สองก็คือ มีความสามารถในการรักษาคุณภาพของข้อมูลที่ถูกฝังสัญญาณลายน้ำ คุณสมบัตินี้ถือเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง เพราะการฝังสัญญาณลายน้ำลงในตัวข้อมูลต้นฉบับจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงบางส่วนในตัวข้อมูลไม่มากก็น้อยขึ้นอยู่กับวิธีการที่ใช้ ดังนั้น การทำภาพพิมพ์ลายน้ำดิจิตอลที่ดี จึงควรรักษาคุณภาพของข้อมูลที่ถูกฝังสัญญาณลายน้ำไว้ให้มีความใกล้เคียงกับข้อมูลต้นฉบับมากที่สุด และสุดท้ายสัญญาณลายน้ำที่กู้กลับคืนมาควรจะมีความถูกต้องและแม่นยำเชื่อถือได้ เนื่องจากจุดประสงค์หลักของการทำภาพพิมพ์ลายน้ำดิจิตอลก็คือ เพื่อประโยชน์ในการระบุชี้ชัดถึงบุคคลที่เป็นเจ้าของลิขสิทธิ์ข้อมูลอย่างถูก

ต้อง ดังนั้น สัญญาณลายน้ำที่ถูกกู้กลับคืนมาจะต้องมีความถูกต้อง ชัดเจน และสามารถเชื่อถือได้ นอกจากนี้กระบวนการกู้คืนสัญญาณลายน้ำควรจะกระทำได้โดยไม่จำเป็นต้องใช้ข้อมูลต้นฉบับเป็นส่วนประกอบ

วิธีการที่ใช้ในการทำภาพพิมพ์ลายน้ำดิจิตอลส่วนใหญ่ได้รับการพัฒนา โดยมีจุดมุ่งหมายให้สัญญาณลายน้ำที่ถูกฝังในตัวข้อมูลต้นฉบับมีความทนทาน และในขณะเดียวกันก็ยังคงคุณภาพที่ดีของตัวข้อมูลภายหลังที่ถูกฝังสัญญาณลายน้ำมาแล้ว อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่า คุณสมบัติข้างต้นทั้งสองประการมีความขัดแย้งกันในตัวกล่าวคือ สัญญาณลายน้ำดิจิตอลจะมีความทนทานต่อการโจมตีชนิดต่างๆ ได้ก็ต่อเมื่อมีการฝังสัญญาณลายน้ำที่มีความแรงมากๆไว้ในส่วนที่สำคัญของข้อมูลต้นฉบับ ซึ่งการทำเช่นนี้โอกาสที่จะกู้คืนสัญญาณลายน้ำที่สมบูรณ์จะยังคงอยู่มีสูงขึ้น แม้จะผ่านการโจมตีที่มีขนาดรุนแรงมากก็ตาม แต่การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในส่วนที่สำคัญของข้อมูลต้นฉบับก็จะส่งผลให้เกิดการลดทอนคุณภาพลงอย่างเด่นชัดในตัวข้อมูลที่ถูกฝังสัญญาณลายน้ำ ดังนั้น เพื่อให้บรรลุถึงระดับความทนทานของสัญญาณลายน้ำ และคุณภาพที่เป็นที่ยอมรับได้ของข้อมูลที่ถูกฝังสัญญาณลายน้ำ จึงควรจะพิจารณาหาจุดสมดุลย์ (trade off) ของค่าตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในกระบวนการทำภาพพิมพ์ลายน้ำดิจิตอลที่มีความเหมาะสมมากที่สุด โดยพิจารณาจากการนำไปใช้งาน (applications) เป็นหลัก

ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้นแล้วว่า ความนิยมในการฝังสัญญาณลายน้ำลงในโดเมนความถี่ของข้อมูลต้นฉบับเป็นไปอย่างกว้างขวาง นักวิจัยทั่วไปจึงมีความพยายามที่จะค้นหาวิธีการที่ใช้ในการใส่สัญญาณลายน้ำลงในข้อมูลต้นฉบับเช่น รูปภาพ ภายหลังจากการแปลงโดเมนของข้อมูลต้นฉบับไปสู่โดเมนความถี่แล้ว โดยวิธีการแปลงโดเมนแบบต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นการแปลงโคไซน์แบบไม่ต่อเนื่อง (discrete cosine transform, DCT) หรือการแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่อง (discrete wavelet transform, DWT) ทั้งนี้เนื่องมาจากข้อได้เปรียบอย่างหนึ่งของการใส่สัญญาณลายน้ำในโดเมนความถี่ นั่นคือ รูปภาพภายหลังการฝังสัญญาณลายน้ำแล้ว จะมีความทนทานต่อการโจมตีจากกระบวนการประมวณผลสัญญาณดิจิตอลชนิดต่างๆ ได้เป็นส่วนใหญ่ อย่างไรก็ตาม ปัญหาหนึ่งที่มักจะเกิดขึ้นเมื่อมีการบีบอัดข้อมูลชนิดรูปภาพ ที่ผ่านการฝังสัญญาณลายน้ำที่อัตราการบีบอัดสูงๆ ก็คือ เราไม่สามารถกู้คืนสัญญาณลายน้ำที่ถูกฝังเอาไว้ได้อย่างถูกต้อง 100%

บทความนี้ได้นำเสนอวิธีการทำภาพพิมพ์ลายน้ำดิจิตอล ในข้อมูลชนิดรูปภาพโดยอาศัยหลักการแปลงเวฟเล็ตแพคเกต ซึ่งรูปภาพที่ถูกฝังสัญญาณลายน้ำโดยวิธีการที่ได้นำเสนอมานี้จะมีความทนทานต่อมาตรฐานการบีบอัดข้อมูลชนิดรูปภาพ JPEG ที่

อัตราการบีบอัดสูงๆ ได้ มากกว่านั้นสัญญาณลายน้ำที่ได้ยังมีความทนทานต่อกระบวนการลดขนาดข้อมูลภาพด้วยวิธีการประมวณผลสัญญาณดิจิตอลแบบอื่นๆ อีกด้วย โดยในการทดลอง เราได้ทำการโจมตีรูปภาพที่ถูกฝังสัญญาณลายน้ำโดยการเปลี่ยนค่าระดับสัญญาณใหม่ การลดอัตราการสุ่มตัวอย่าง และการเปลี่ยนขนาดของภาพใหม่ ซึ่งผลการทดลองได้แสดงให้เห็นถึงผลลัพธ์ที่น่าพอใจ ข้อดีอีกประการหนึ่งของวิธีการทำภาพพิมพ์ลายน้ำดิจิตอลโดยอาศัยหลักการแปลงเวฟเล็ตแพคเกตก็คือ คุณภาพของรูปที่ได้ภายหลังที่ผ่านการฝังสัญญาณลายน้ำจะดีกว่าวิธีการแบบเดิม ที่อาศัยหลักการแปลงเวฟเล็ตแบบธรรมดา นอกจากนี้กระบวนการกู้คืนสัญญาณลายน้ำยังสามารถกระทำได้โดยไม่จำเป็นต้องใช้รูปภาพต้นฉบับ เนื่องมาจากสัญญาณลายน้ำที่ใช้ในการทดลองถูกสร้างขึ้นโดยใช้วิธีการกระจายแถบความถี่แบบอันดับโดยตรง (direct sequence spread spectrum technique) ในหัวข้อต่อๆ ไปจะกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำภาพพิมพ์ลายน้ำดิจิตอลที่มีการนำเสนอมาในอดีต รายละเอียดเกี่ยวกับวิธีการทำภาพพิมพ์ลายน้ำดิจิตอลที่ได้นำเสนอในบทความนี้ รวมไปถึงผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองพร้อมทั้งการอภิปรายถึงผลลัพธ์ที่ได้เหล่านั้น ในส่วนสุดท้ายจะเป็นบทสรุปที่ได้จากการทำวิจัย

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Racocevic และคณะฯ[2] ได้นำเสนอวิธีการใส่สัญญาณลายน้ำลงในโดเมนความถี่ของข้อมูลชนิดรูปภาพโดยอาศัยหลักการการแปลงโคไซน์แบบไม่ต่อเนื่อง ภายหลังการแปลงโดเมนแล้ว ค่าสัมประสิทธิ์ที่อยู่ในช่วงความถี่กลางจะถูกเลือกเพื่อใช้ในการฝังสัญญาณลายน้ำ โดยมีสมมุติฐานที่ว่าการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ที่อยู่ในช่วงความถี่กลางจะมีผลกระทบต่อคุณภาพของรูปไม่มากนัก ขณะเดียวกันก็จะมีความทนทานต่อกระบวนการประมวณผลทางสัญญาณดิจิตอลแบบต่างๆ อย่างไรก็ตามเมื่อรูปภาพที่ถูกฝังสัญญาณลายน้ำถูกบีบอัดที่อัตราการบีบอัดสูงๆ ค่าสัมประสิทธิ์ที่อยู่ในช่วงความถี่สูงทั้งหมดและช่วงความถี่กลางบางส่วนจะสูญหายไป ส่งผลให้สัญญาณลายน้ำบางส่วนสูญหายไปด้วย ต่อมาได้มีการประยุกต์ใช้วิธีการกระจายแถบความถี่แบบอันดับโดยตรงในกระบวนการทำภาพพิมพ์ลายน้ำดิจิตอล ซึ่งเป็นที่ยอมรับโดยนักวิจัยทั่วโลกว่าเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพสูง Cox และคณะฯ[3] เป็นนักวิจัยกลุ่มหนึ่งในนั้นที่ได้ทำการประยุกต์ใช้วิธีการดังกล่าว และได้นำเสนอวิธีการทำภาพพิมพ์ลายน้ำดิจิตอลโดยการฝังสัญญาณลายน้ำที่สร้างขึ้นจาก วิธีการกระจายแถบความถี่แบบอันดับโดยตรงลงไปในโดเมนความถี่ของรูปภาพที่ผ่านการแปลงโคไซน์แบบไม่ต่อเนื่องมาแล้ว ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่าสัญญาณลายน้ำที่ถูกฝังลงในรูปภาพมีความคงทนต่อการโจมตีแบบต่างๆ รวม

ทั้งการบีบอัดข้อมูลด้วย นอกจากนี้วิธีการกระจายแถบความถี่แบบอันดับโดยตรงยังมีจุดเด่นอยู่ที่สัญญาณลายน้ำที่ทำการฝังจะถูกกระจายออกในลักษณะเดียวกันกับสัญญาณสุ่มเทียม (pseudo random signal) ก่อนที่จะถูกฝังลงไปในรูปภาพ ทำให้ผลลัพธ์ของรูปภาพที่ถูกฝังสัญญาณลายน้ำ มีลักษณะเหมือนกับการถูกรบกวนจากสัญญาณรบกวน (noise) ภายนอกแต่เพียงเล็กน้อยเท่านั้น และส่งผลให้การตรวจจับสัญญาณลายน้ำที่ถูกฝังลงไปในรูปภาพกระทำได้อย่างยากลำบาก วิธีการดังกล่าวนี้อาจนำมาประยุกต์ใช้ได้ทั้งในแบบอาศัยรูปภาพต้นฉบับ และไม่อาศัยรูปภาพต้นฉบับในกระบวนการกู้คืนสัญญาณลายน้ำ เช่น วิธีการที่ได้นำเสนอโดย Hartung และคณะฯ[4] สัญญาณลายน้ำจะถูกฝังลงในรูปภาพต้นฉบับในลักษณะที่ว่า ในกระบวนการกู้คืนสัญญาณลายน้ำไม่จำเป็นต้องใช้รูปภาพต้นฉบับเป็นส่วนประกอบ

Xia และคณะฯ[5] ได้เสนอวิธีการทำภาพพิมพ์ลายน้ำดิจิตอลโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ที่อยู่ในแต่ละช่วงความถี่ ภายหลังการแปลงโคไซน์แบบไม่ต่อเนื่องมาแล้ว ซึ่งในการหาความสัมพันธ์ดังกล่าว ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงโดเมนจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้กำหนดเอาไว้แล้วเบื้องต้น ถ้าค่าสัมประสิทธิ์มีขนาดสูงกว่าก็จะกำหนดให้เป็น 1 และถ้ามีค่าต่ำกว่าก็จะกำหนดให้เป็น 0 เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์จนครบทุกตัวแล้ว จะก่อให้ความสัมพันธ์ในลักษณะของแผนภูมิต้นไม้ (tree) ของค่าสัมประสิทธิ์ที่เป็น 0 ขึ้น ซึ่งเรียกว่า ซีโรทรี (Zerotree) โดยจำนวนซีโรทรีที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของรูปภาพนั้น สามารถนำมาใช้ในการฝังสัญญาณลายน้ำได้เช่น ในกรณีที่สัญญาณลายน้ำที่ต้องการฝังมีค่าเป็น 1 และจำนวนซีโรทรีเป็นคี่ก็ไม่ต้องเปลี่ยนแปลงอะไร แต่ถ้าจำนวนซีโรทรีเป็นคู่ก็ให้ทำการปรับค่าสัมประสิทธิ์ที่อยู่ภายในส่วนนั้นของรูปภาพจนกว่าจำนวนซีโรทรีผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นคี่ ทั้งนี้ค่าสัมประสิทธิ์ที่ถูกเปลี่ยนแปลงจะต้องอยู่ในย่านความถี่ที่กระทบต่อคุณภาพของรูป ภายหลังการเปลี่ยนแปลงให้น้อยที่สุด วิธีการที่คล้ายคลึงกันแต่ใช้การแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่องแทนได้ถูกนำเสนอโดย Inoue และคณะฯ[6]

วิธีการแปลงเวฟเล็ตอีกชนิดหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ในการฝังสัญญาณลายน้ำได้ก็คือ การแปลงเวฟเล็ตแพคเกต[7] ซึ่งจุดเด่นของการแปลงเวฟเล็ตแพคเกตจะอยู่ที่ความสามารถในการแยกแยะรายละเอียดของสัญญาณภาพ ได้เด่นชัดมากกว่าการแปลงเวฟเล็ตแบบธรรมดาโดยเฉพาะในช่วงความถี่กลางและความถี่สูง ด้วยเหตุนี้ Onrit และคณะ [8] จึงได้นำเอาการแปลงเวฟเล็ตแพคเกตมาประยุกต์ใช้ในการทำภาพพิมพ์ลายน้ำดิจิตอลกับข้อมูลชนิดรูปภาพ โดยวิธีการดังกล่าวจะทำการแปลงโดเมนของสัญญาณภาพ

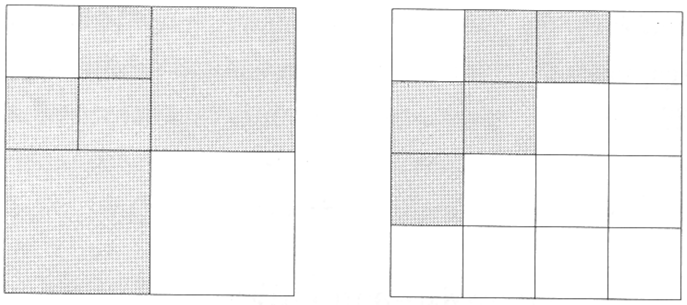
ไปสู่โดเมนความถี่โดยใช้การแปลงเวฟเล็ตแพคเกต ซึ่งจะให้ผลลัพธ์เป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่อยู่ในซับแบนด์ต่างๆ กัน และค่าสัมประสิทธิ์ที่อยู่ในซับแบนด์ที่ได้เลือกไว้จะถูกนำมาใช้ในการฝังสัญญาณลายน้ำ ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าสัญญาณลายน้ำที่ถูกฝังโดยวิธีการข้างต้น มีความคงทนต่อการบีบอัดข้อมูลที่อัตราการบีบอัดที่สูงมากๆ อย่างไรก็ตาม วิธีการดังกล่าวยังคงต้องอาศัยรูปภาพต้นฉบับในกระบวนการกู้คืนสัญญาณลายน้ำ ซึ่งมีความไม่สะดวกในการใช้งานจริงในทางปฏิบัติ

วิธีการภาพพิมพ์ลายน้ำดิจิตอลที่นำเสนอ

ก่อนที่จะอธิบายถึงวิธีการที่ใช้ในการฝังและกู้คืนสัญญาณลายน้ำ จะกล่าวถึงหลักการเบื้องต้นของการแปลงเวฟเล็ตแพคเก็ต และพื้นฐานการทำภาพพิมพ์ลายน้ำดิจิตอลโดยใช้วิธีการกระจายแถบความถี่แบบอันดับโดยตรงก่อน

การแปลงเวฟเล็ตแพคเกต

โดยปกติคำจำกัดความของเวฟเล็ตก็คือ ลักษณะของรูปคลื่นสัญญาณในช่วงระยะใดๆ ระยะหนึ่งที่ถูกจำกัด โดยจะมีผลรวมเฉลี่ยของค่าขนาดในช่วงระยะนั้นเท่ากับศูนย์ โดยทั่วไปเวฟเล็ตจะมีคาบเวลาเป็นช่วงสั้นๆ ลักษณะการเปลี่ยนแปลงในช่วงดังกล่าวจะเป็นแบบสูงชัน และคุณสมบัติข้อนี้เองที่ทำให้เวฟเล็ตมีความเหมาะสมในการนำไปใช้วิเคราะห์ข้อมูลที่มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่มีความถี่สูงๆ การแปลงโดเมนโดยใช้คุณสมบัติของเวฟเล็ตนั้น ก็คือการหาค่าความสัมพันธ์ที่เกี่ยวเนื่องกันในแต่ละช่วงความถี่ของสัญญาณที่ทำการแปลง ซึ่งค่าขนาดของผลลัพธ์ที่ได้ เรียกว่าค่าสัมประสิทธ์ จะขึ้นอยู่กับความเกี่ยวเนื่องกันที่เป็นไปตามคุณสมบัติของเวฟเล็ต ในช่วงระยะของสัญญาณนั้นๆ ที่กำลังทำการพิจารณา การแปลงเวฟเล็ตในสัญญาณใดๆ จะเริ่มจากการหาค่าความสัมพันธ์ที่เกี่ยวเนื่องกันของข้อมูลทั้งหมดก่อน เพื่อแยกออกเป็นช่วงๆ เรียกว่า ซับแบนด์ ค่าสัมประสิทธ์ที่ได้จากการแปลงนี้ จะถูกแยกออกตามค่าความถี่ที่ประกอบอยู่ภายในของแต่ละซับแบนด์ โดยสัญญาณขนาด 1 มิติจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ซับแบนด์ ที่มีช่วงความถี่สูงและช่วงความถี่ต่ำ หลังจากนั้นเมื่อมีการแปลงเวฟเล็ตอีกครั้ง ก็จะเริ่มทำการหาค่าความสัมพันธ์ที่เกี่ยวเนื่องกันใหม่ในช่วงสัญญาณหรือซับแบนด์ที่มีค่าความถี่ต่ำที่สุด



(ก) (ข)

รูปที่ 1 ลักษณะของซับแบนด์ที่ได้จาก (ก) การแปลงเวฟเล็ต 2 ครั้ง (ข) การแปลงเวฟเล็ตแพคเกต 2 ครั้ง

สำหรับกรณีของการแปลงเวฟเล็ตแพคเกตนั้น ก็มีความคล้ายคลึงกันกับการแปลงเวฟเล็ต เนื่องจากเวฟเล็ตแพคเกตก็คือรูปแบบเฉพาะอย่างหนึ่งของเวฟเล็ต ความแตกต่างของการแปลงเวฟเล็ตแพคเกตนั้นจะเริ่มที่การแปลงในครั้งที่สอง โดยในการแปลงเวฟเล็ตแพคเกตครั้งแรกนั้น จะได้ผลลัพธ์เหมือนกับการแปลงเวฟเล็ตแบบธรรมดาทุกประการ สำหรับการแปลงเวฟเล็ตแพคเกตในครั้งที่สอง จะเป็นการหาค่าความสัมพันธ์ที่เกี่ยวเนื่องกันใหม่ในทุกๆ ช่วงสัญญาณหรือทุกๆ ซับแบนด์อย่างเท่าเทียมกัน และนี่เป็นสาเหตุที่ทำให้การแปลงเวฟเล็ตแพคเกตมีคุณสมบัติในการแยกแยะรายละเอียดของข้อมูลในทุกๆ ย่านความถี่ได้ดีกว่าการแปลงเวฟเล็ตแบบธรรมดา เพื่อให้เข้าใจถึงความแตกต่างระหว่างผลลัพธ์ที่ได้จากการแปลงโดเมนโดยใช้วิธีการทั้งสองดังที่กล่าวมาข้างต้น ลักษณะของซับแบนด์ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ต และเวฟเล็ตแพคเกตอย่างละสองครั้งได้ถูกแสดงไว้เป็นตัวอย่างในรูปที่ 1(ก) และ 1(ข) ตามลำดับ ซึ่งจากรูปที่แสดงจะเห็นได้ว่า ในการแปลงเวฟเล็ตแพคเกต จะมีการแบ่งแยกช่วงความถี่ของทุกๆ ซับแบนด์ออกเป็นซับแบนด์ย่อยๆ และจะมีซับแบนด์ย่อยเกิดขึ้นทั้งหมด 2^{2n} ซับแบนด์จากการแปลงเวฟเล็ตแพคเกต n ครั้ง

จากที่กล่าวมาในหัวข้อที่แล้วว่า ในการออกแบบวิธีการทำภาพพิมพ์ลายน้ำดิจิตอลที่ดีนั้น เราควรจะพิจารณาถึงระดับความทนทานของสัญญาณลายน้ำที่ถูกฝัง และคุณภาพของรูปที่ได้ภายหลังที่ถูกฝังสัญญาณลายน้ำแล้วให้มีความเหมาะสมมากที่สุด ดังนั้นตำแหน่งในการฝังสัญญาณลายน้ำ (ซึ่งในที่นี้ก็คือซับแบนด์) จึงมีผลต่อปัจจัยทั้งสอง

6 มี.ย. 2546
ห้องสมุด
มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ข้างต้นเป็นอย่างมาก จากลักษณะของซับแบนด์ที่แสดงในรูปที่ 1 จะพบว่า การเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธ์ที่เกิดจากกระบวนการฝังสัญญาณลายน้ำในแต่ละซับแบนด์ต่างๆ จะให้ค่าความทนทานของสัญญาณลายน้ำ ละระดับคุณภาพของรูปภาพที่ถูกฝังสัญญาณลายน้ำที่แตกต่างกันออกไป โดยซับแบนด์ที่อยู่ทางด้านซ้ายบนสุดของรูปจะประกอบไปด้วยสัมประสิทธ์ที่มีค่าความถี่ต่ำที่สุดและถือเป็นส่วนที่สำคัญที่สุดของข้อมูล ในขณะที่ซับแบนด์ที่อยู่ทางด้านขวาล่างสุดของรูปจะประกอบไปด้วย สัมประสิทธ์ที่มีค่าความถี่สูงสุดและถือเป็นส่วนที่สำคัญที่น้อยที่สุดของข้อมูล[9] การกำหนดซับแบนด์ที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการฝังสัญญาณลายน้ำ จึงนับว่าเป็นวิธีการที่ดีที่สุดที่จะสามารถบรรลุถึงวัตถุประสงค์ของการทำภาพพิมพ์ลายน้ำดิจิตอลที่ดีได้ ในงานวิจัยนี้ เราได้เลือกซับแบนด์ที่อยู่ในช่วงความถี่กลางๆ เยื้องมาทางด้านซ้ายบนของรูป ซึ่งถือว่าเป็นช่วงที่เหมาะสมที่สุดในการฝังสัญญาณลายน้ำ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจะไม่ไปกระทบกับส่วนที่สำคัญที่สุดของรูป ขณะเดียวกัน สัญญาณลายน้ำก็ไม่ได้ถูกฝังอยู่ในส่วนที่มีความสำคัญน้อยที่สุดของรูป ให้สังเกตว่าถ้าสัญญาณลายน้ำถูกฝังอยู่ในซับแบนด์ที่อยู่ในช่วงความถี่กลางๆ เบี่ยงมาทางขวาล่างของรูปแล้ว สัญญาณลายน้ำที่ฝังอาจจะมีการสูญหายไปเป็นบางส่วนเมื่อมีการประมวณผลสัญญาณดิจิตอลกับรูปภาพที่มีสัญญาณลายน้ำฝังอยู่ สำหรับซับแบนด์ทั้ง 5 ซับแบนด์ที่ได้เลือกไว้ภายหลังการแปลงเวฟเล็ตแพคเกตสองครั้ง ได้ถูกแสดงไว้ในพื้นที่แรเงาในรูปที่ 1(ข)

การทำภาพพิมพ์ลายน้ำดิจิตอลโดยใช้วิธีการกระจายแถบความถี่แบบอันดับโดยตรง

วิธีการกระจายแถบความถี่แบบอันดับโดยตรง ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานในระบบต่างๆ กันอย่างกว้างขวาง หนึ่งในนั้นก็คือการทำภาพพิมพ์ลายน้ำดิจิตอล หลักการของการฝังสัญญาณลายน้ำที่ใช้วิธีการนี้มีอยู่ว่า กำหนดให้ a_j เป็นลำดับข้อมูลของสัญญาณลายน้ำที่ต้องการจะฝัง โดยที่สมาชิกของ a_j มีเพียง 1 และ -1; $a_j \in \{-1,1\}$ ค่า -1 ในที่นี้ก็คือค่าบิตที่เป็น 0 ในเลขฐานสอง ขณะที่ค่า 1 ก็คือค่าบิตที่เป็น 1 ตามปกติ ข้อมูลเหล่านี้จะถูกกระจาย (spread) ออกเป็นจำนวนเท่าเท่ากับค่าชิพเรต (chip rate, cr) เพื่อเพิ่มความซ้ำซ้อนของข้อมูลให้มากขึ้น ดังสมการที่ (1)

$$b_i = a_j,\ j.cr \le i < (j+1).cr \tag{1}$$

ข้อมูลที่ถูกกระจาย b_i นี้ จะถูกนำไปม็อดดูเลท (modulate) โดยการคูณกับสัญญาณรบกวนแบบสุ่มเทียม (pseudo random noise, p_i) เพื่อจะได้สัญญาณลายน้ำที่พร้อมจะนำไปฝังลงในข้อมูลต้นฉบับโดยที่ $p_i \in \{-1,1\}$ เช่นกัน ก่อนที่จะทำการฝังสัญญาณลายน้ำนี้ อาจถูกปรับขยายค่าขนาดของมันให้มีความเหมาะสม กับการใช้งานแต่ละชนิดได้โดยการคูณค่าขนาดของสัญญาณลายน้ำกับค่า α ซึ่งอาจเป็นตัวเลขจำนวนจริงใดๆ เข้าไปก็ได้ ทั้งนี้ในเบื้องต้น ค่า α ที่เหมาะสม ควรจะทำให้การเปลี่ยนแปลงของข้อมูลภายหลังการฝังสัญญาณลายน้ำไม่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า ค่าสัญญาณลายน้ำที่ถูกปรับความแรงแล้ว $w_i : w_i = \alpha b_i p_i$ จะถูกบวกเข้ากับค่าสัมประสิทธ์ (v_i) ของข้อมูลที่ผ่านการแปลงโดเมนมาแล้ว ดังสมการที่ (2)

$$V_i = v_i + \alpha b_i p_i \qquad (2)$$

ในกระบวนการกู้คืนสัญญาณลายน้ำดิจิตอลสัญญาณลายน้ำที่ถูกฝังอยู่สามารถถูกกู้กลับคืนมาได้โดยการแปลงโดเมนข้อมูลที่มีสัญญาณลายน้ำฝังอยู่ 2 ครั้ง แล้วนำค่าสัมประสิทธ์ที่ได้ในซับแบนด์เดียวกันกับที่เลือกไว้ในกระบวนการฝังสัญญาณลายน้ำ ไปม็อดดูเลทโดยการคูณอีกครั้ง กับสัญญาณรบกวนแบบสุ่มเทียมตัวเดียวกันกับที่ใช้ในการฝังสัญญาณลายน้ำ ซึ่งจะได้ผลลัพธ์ดังสมการที่ (3)

$$S_j = \sum_{i=j.cr}^{(j+i).cr-1} p_i \, V_i = \sum_{i=j.cr}^{(j+i).cr-1} p_i \, v_i + \sum_{i=j.cr}^{(j+i).cr-1} p_i^2 \alpha \, b_i \qquad (3)$$

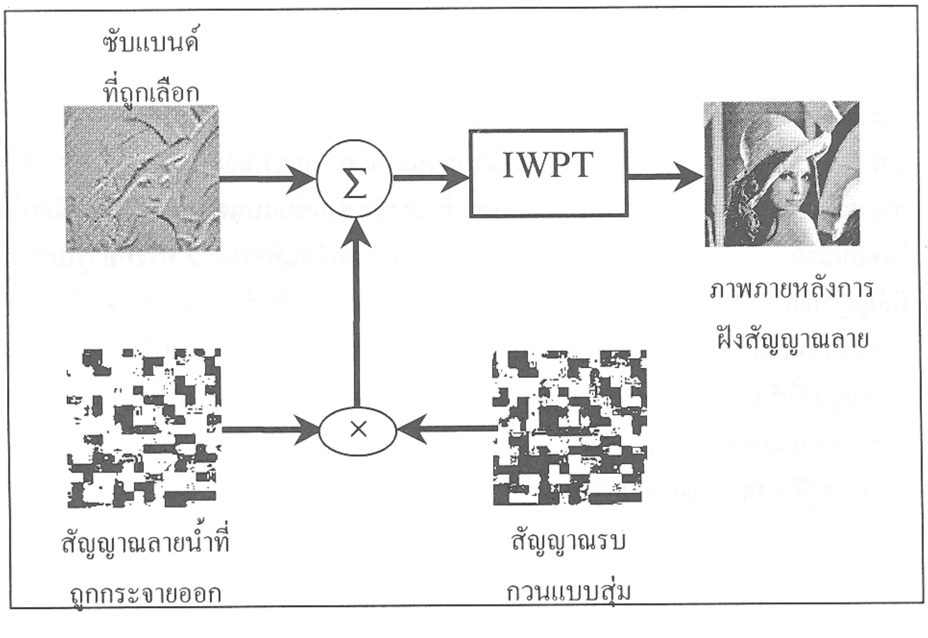
จากการกระจายสมการข้างต้น ยังผลให้เทอมแรกทางซ้ายมือของสมการหายไป ในกรณีที่จำนวน 1 และ -1 ในสัญญาณรบกวนแบบสุ่มเทียมที่ถูกสร้างขึ้นมีจำนวนเท่ากัน นั่นคือ $\sum_{i=j.cr}^{(j+i).cr-1} p_i = 0$ อย่างไรก็ตาม ในความเป็นจริงแล้วผลรวมที่ได้ของ 1 และ -1 จะไม่เท่ากับศูนย์ในบางครั้ง และจะมีผลให้ทำเกิดค่าเบี่ยงเบนซึ่งมีขนาดเท่ากับ $\Delta = -\left(\sum_{i=j.cr}^{(j+1).cr-1} p_i\right)$ mean (V_i) ดังนั้น ค่าเบี่ยงเบนนี้จะถูกนำไปคิดรวมกับสมการที่ (3) จะได้เป็น

$$S_j = \sum_{i=j.cr}^{(j+1).cr-1} p_i . V_i + \Delta \approx cr.\alpha.a_j \qquad (2)$$

ค่า S_j ที่คำนวณได้ในที่นี้ก็คือ การหาค่าผลรวมของผลคูณระหว่างสัญญาณรบกวนแบบสุ่มเทียมกับค่าสัมประสิทธิ์ที่ถูกฝังสัญญาณลายน้ำในช่วงระยะห่างที่เท่ากับค่าชิพเรต โดยจะต้องรวมค่าเบี่ยงเบน Δ เข้าไปในการคำนวณด้วย สุดท้ายข้อมูลของสัญญาณลายน้ำ a_j ที่เป็นเลขฐานสองที่ต้องการกู้กลับคืนมา จะหาได้จากเครื่องหมายหน้า $S_j : a_j = sign(S_j)$ โดยที่ a_j จะมีค่าเป็น 1 ถ้า S_j มีค่าขนาดมากกว่า 0 ขณะที่ a_j จะมีค่าเป็น -1 หรือ 0 ถ้า S_j มีค่าขนาดน้อยกว่า 0

กระบวนการฝังและกู้คืนสัญญาณลายน้ำ

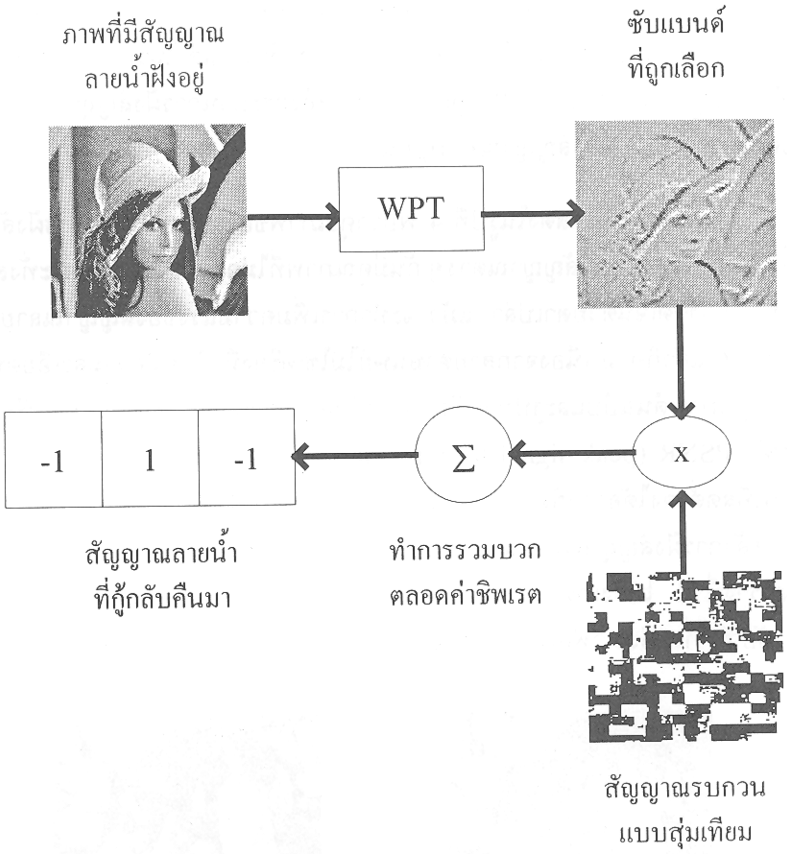
รูปภาพต้นฉบับซึ่งมีขนาด N×N พิกเซลถูกแปลงไปสู่โดเมนความถี่ด้วยการแปลงเวฟเล็ตแพคเกต ในการทดลองได้ทำการแปลงเวฟเล็ตแพคเกต 2 ครั้ง และค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการฝังสัญญาณลายน้ำก็คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่อยู่ในซับแบนด์ที่ถูกแรเงา ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 1 (ข) แผนผังแสดงขั้นตอนการฝังสัญญาณลายน้ำดิจิตอลได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนผังแสดงขั้นตอนการฝังสัญญาณลายน้ำดิจิตอล

จากรูปที่ 1(ข) จะพบว่ามี 5 ซับแบนด์ที่ใช้ในการฝังสัญญาณลายน้ำ โดยแต่ละซับแบนด์จะมีขนาด $M \times M$ พิกเซล โดยที่ M มีค่าเท่ากับ N หารด้วยจำนวนครั้งที่ทำการแปลงโดเมนยกกำลังสอง ในงานวิจัยนี้ได้ทำการฝังสัญญาณลายน้ำตัวลงในซับแบนด์ทั้ง 5 เหมือนๆ กัน โดยมีจุดประสงค์ที่จะเพิ่มความทนทานต่อการโจมตีแบบต่างๆ เนื่องจากจำนวนบิตสูงสุดของข้อมูลที่จะทำการฝังลงไปในแต่ละซับแบนด์ที่ค่าชิฟเรต cr จะมีค่าเท่ากับ $\left(M \times M\right)/cr$ ดังนั้น ข้อมูลภายหลังจากการกระจายด้วยค่าชิฟเรตที่เหมาะสมแล้วจะมีจำนวนเท่ากับ $M \times M$ บิต จากรูปที่ 2 ข้อมูลที่ถูกกระจายแล้วจะถูกจัดอยู่ในรูปของอาเรย์ 2 มิติขนาด $M \times M$ บิต หลังจากนั้นข้อมูลในอาเรย์นี้จะถูกนำไปคูณกับสัญญาณรบกวนแบบสุ่มเทียมซึ่งอยู่ในรูปของอาเรย์ 2 มิติขนาด $M \times M$ บิตเช่นเดียวกัน ผลลัพธ์ที่ได้ก็คือสัญญาณลายน้ำที่มีขนาดอาเรย์เท่ากัน และพร้อมสำหรับการรวมโดยการบวกเข้ากับค่าสัมประสิทธิ์ในซับแบนด์ที่ถูกเลือกไว้ ทำเช่นนี้กับทุกๆ ซับแบนด์จนครบก่อนที่จะทำการแปลงเวฟเล็ตแพ็คเกตกลับคืน เพื่อจะได้รูปภาพที่ถูกฝังสัญญาณลายน้ำที่เสร็จสมบูรณ์ ให้สังเกตว่าก่อนทำการบวกสัญญาณลายน้ำเข้ากับกับค่าสัมประสิทธิ์ จะมีการปรับค่าความแรง α ของสัญญาณลายน้ำก่อน ซึ่งจากรูปที่ 2 α จะมีค่าเท่ากับ 1

สัญญาณลายน้ำสามารถกู้กลับคืนออกมาได้ด้วย วิธีการเดียวกันกับที่ใช้ในกระบวนการฝังสัญญาณลายน้ำ โดยไม่มีความจำเป็นต้องใช้รูปภาพต้นฉบับเป็นส่วนประกอบ เริ่มด้วยการนำสัญญาณรบกวนแบบสุ่มเทียมที่มีลักษณะเดียวกันกับที่ใช้กระบวนการฝังสัญญาณลายน้ำมาคูณกับค่าสัมประสิทธิ์ในซับแบนด์เดียวกันกับที่เลือกไว้ในตอนแรก โดยค่าสัมประสิทธิ์นี้จะได้จากการแปลงเวฟเล็ตแพ็คเกต 2 ครั้งที่ตัวรูปภาพที่มีสัญญาณลายน้ำฝังอยู่ จากนั้นก็ทำการหาผลรวมของผลลัพธ์ที่ได้จากการคูณในแต่ละช่วงของชิฟเรต และเครื่องหมายของผลรวมที่ได้ในแต่ละช่วงของชิฟเรตก็คือค่าขนาดของบิตข้อมูลที่ใช้เป็นสัญญาณลายน้ำที่ถูกฝังลงในส่วนนั้นของรูปภาพ เป็นไปตามทฤษฎีของการกระจายแถบความถี่แบบอันดับโดยตรงดังที่ได้อธิบายไว้ก่อนหน้านี้ แผนผังแสดงขั้นตอนการกู้คืนสัญญาณลายน้ำดิจิตอลได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 3



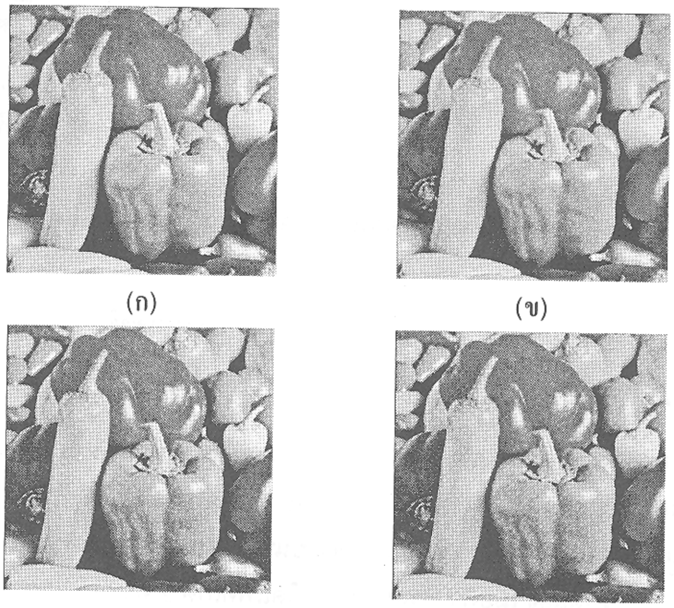
รูปที่ 3 แผนผังแสดงขั้นตอนการกู้คืนสัญญาณลายน้ำดิจิตอล

ผลการทดลองและบทวิเคราะห์

ในการทดลองเราได้ใช้รูปภาพดิจิตอล 'Lena', 'Barbara', 'Mandrill', 'Peppers' และ 'Bridge' ขนาด 512×512 พิกเซลเป็นรูปภาพต้นฉบับซึ่งมีความหลากหลายในรวยละเอียดต่างๆ เช่น ลวดลาย รูปแบบ และอื่นๆ ในขณะที่สัญญาณลายน้ำที่ใช้จะเป็นข้อมูลเลขฐานสองที่ถูกสุ่มขึ้นอย่างอิสระขนาด 8 บิต และค่าชิพเรตที่ใช้เท่ากับ 2048 ซึ่งจากการทดลอง เมื่อทำการแปลงเวฟเล็ตแพ็คเกต 2 ครั้งที่ตัวรูปภาพต้นฉบับ จะได้ซับแบนด์ขนาด 128×128 พิกเซลทั้งหมด 16 ซับแบนด์ และ 5 ซับแบนด์ในนั้นจะถูกเลือกเพื่อใช้ในการฝังสัญญาณลายน้ำ โดยสัญญาณลายน้ำที่เป็นข้อมูลเลขฐานสองขนาด 8 บิตจะถูกกระจายแถบความถี่ออกด้วยค่าชิพเรตเท่ากับ 2048 แล้วทำการจัดรูปให้อยู่ใน

อาเรย์ 2 มิติขนาด 128×128 บิตก่อนที่จะทำการปรับค่าขนาดของสัญญาณและบวกเข้ากับค่าสัมประสิทธิ์ในซับแบนด์ที่มีขนาดเดียวกันทั้ง 5 ซับแบนด์ ในรูปที่ 4 ได้แสดงถึงผลลัพธ์ที่ได้ของรูปภาพดิจิตอล 'Peppers' ภายหลังกระบวนการฝังสัญญาณลายน้ำที่ค่าระดับความแรง (α) ของสัญญาณต่างๆ กัน

จากผลลัพธ์ที่แสดงในรูปที่ 4 พบว่าคุณภาพของรูปภาพที่ผ่านการฝังสัญญาณลายน้ำที่ค่าความแรงของสัญญาณต่างๆ กันมีคุณภาพที่ไม่ลดต่ำลงมากจนกระทั่งสามารถสังเกตได้อย่างชัดเจนด้วยตาเปล่า แม้ว่าจะทำการเพิ่มความแรงของสัญญาณลายน้ำไปที่ค่าเท่ากับ 6 แล้วก็ตาม เนื่องจากสายตามนุษย์ไม่ใช่เครื่องมือวัดที่มีความละเอียดพอ คุณภาพของรูปภาพต้นฉบับและรูปภาพที่ผ่านการฝังสัญญาณลายน้ำจึงถูกนำมาเปรียบเทียบโดยใช้ค่า PSNR (peak signal to noise ratio)[10] เพื่อให้เห็นถึงความแตกต่างของคุณภาพที่ลดต่ำลงได้อย่างชัดเจน จากผลการทดลองค่า PSNR ของรูปภาพชนิดต่างๆ ที่ได้ภายหลังการฝังสัญญาณลายน้ำที่ค่าระดับความแรงของสัญญาณต่างๆ กันได้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 1 ให้สังเกตว่าค่า PSNR ที่อยู่ในวงเล็บจะได้จากการฝังสัญญาณลายน้ำโดยอาศัยวิธีการแปลงเวฟเล็ตแบบธรรมดา



(ก) (ข) (ค) (ง)

รูปที่ 4: รูปภาพผลลัพธ์ที่ได้ภายหลังการฝังสัญญาณลายน้ำที่ค่า α ต่าง ๆ กัน
(ก) รูปภาพต้นฉบับ (ข) $\alpha = 1$ (ค) $\alpha = 3$ (ง) $\alpha = 6$

ตารางที่ 1

ค่า PSNR ของรูปภาพที่ได้ภายหลังการฝังสัญญาณลายน้ำที่ค่า α ต่าง ๆ

รูปภาพ ขนาด 512×512 พิกเซล	PSNR ของรูปภาพผลลัพธ์ที่ค่า α ต่างๆ (dB)					
	α=1	α=2	α=3	α=4	α=5	α=6
Lena	50.17 (48.21)	46.37 (43.36)	43.18 (40.00)	41.14 (37.72)	39.03 (35.70)	37.52 (34.15)
Barbara	50.17 (48.12)	46.37 (43.36)	43.18 (40.00)	41.13 (37.71)	39.03 (35.70)	37.52 (34.15)
Mandrill	50.17 (48.12)	46.37 (43.36)	43.18 (40.00)	41.14 (37.72)	39.03 (35.70)	37.52 (34.15)
Peppers	50.17 (48.12)	46.37 (43.36)	43.18 (40.00)	41.14 (37.72)	39.03 (35.00)	37.52 (34.15)
Bridge	50.19 (48.14)	46.38 (43.37)	43.20 (40.02)	41.15 (37.73)	39.05 (35.72)	37.54 (34.17)

จากผลลัพธ์ที่แสดงในตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่า รูปภาพผลลัพธ์ที่ได้จากการฝังสัญญาณลายน้ำ โดยอาศัยวิธีการแปลงเวฟเล็ตแพ็คเกตจะมีคุณภาพที่ดีกว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ตแบบธรรมดาอยู่ประมาณ 2-3.5 dB ในการทดลองขั้นต่อมา เราได้ทำการโจมตีรูปภาพที่ผ่านการฝังสัญญาณลายน้ำด้วยวิธีการบีบอัดข้อมูลชนิดรูปภาพตามมาตรฐาน JPEG โดยในการโจมตีนั้นค่าความแรงของการโจมตีจะถูกเพิ่มขึ้น โดยการปรับค่าอัตราการบีบอัดให้สูงขึ้นเรื่อย ๆ จนกว่าสัญญาณลายน้ำที่ถูกกู้กลับคืนมาจะมีความสมบูรณ์ถูกต้องเหมือนกับสัญญาณลายน้ำต้นฉบับ จากผลทดลองพบว่า สัญญาณลายน้ำที่ถูกกู้กลับคืนยังมีความถูกต้องเที่ยงตรง 100% แม้ว่าคุณภาพของรูปภาพที่ถูกบีบอัดจะลดลงไปมากก็ตาม ในการทดลองเราได้เพิ่มอัตราการบีบอัดให้สูงถึง 70% ตารางที่ 2 ได้แสดงให้เห็นถึงค่า PSNR ของรูปภาพที่มีสัญญาณลายน้ำ 'Lena' ภายหลังการถูกบีบอัดด้วยมาตรฐานการบีบอัดข้อมูลชนิดรูปภาพ JPEG ที่อัตราการบีบอัดต่าง ๆ

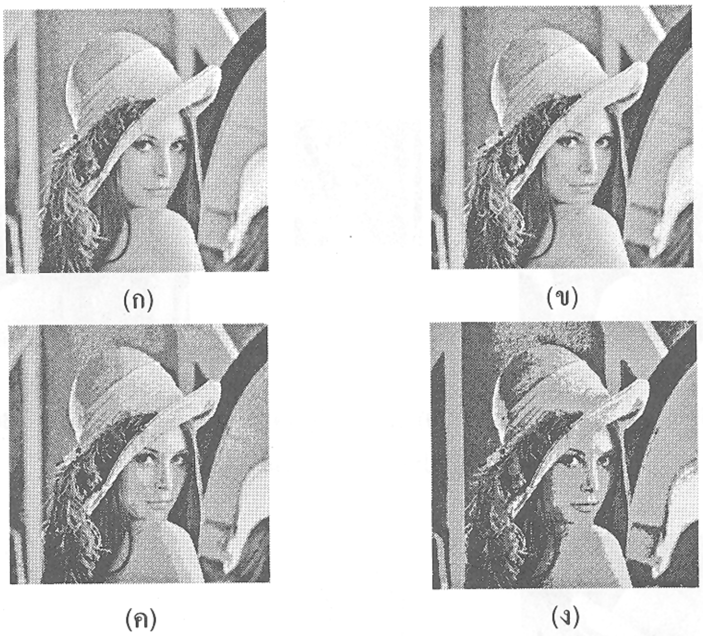
ตารางที่ 2

ค่า PSNR ของรูปภาพที่มีสัญญาณลายน้ำภายหลังการถูกบีบอัดที่ค่าอัตราการบีบอัดต่าง ๆ

	α	อัตราการบีบอัด (%)						
		10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%
PSNR (dB)	1	33.59	33.47	33.36	33.25	33.13	33.03	32.91
	2	33.50	33.38	33.28	33.17	33.06	32.95	32.83
	3	33.35	33.23	33.13	33.02	32.92	32.82	32.70
	4	33.15	33.03	32.94	32.84	32.74	32.65	32.54
	5	32.83	32.72	32.63	32.54	32.45	32.36	32.26
	6	32.51	32.42	32.33	32.24	32.16	32.08	31.99

นอกจากนี้เรายังได้ทำการลดขนาดของข้อมูลภาพด้วยวิธีการประมวณผลสัญญาณดิจิตอลแบบอื่นๆ อีกเช่น การเปลี่ยนค่าระดับสัญญาณใหม่ (requantizing) การลดอัตราการสุ่มตัวอย่าง (subsampling) และการเปลี่ยนขนาดภาพใหม่ (rescaling)

การเปลี่ยนค่าระดับสัญญาณใหม่ เป็นการลดขนาดของข้อมูลโดยการกำหนดช่วงค่าระดับของสัญญาณภาพใหม่ ยกตัวอย่างเช่น จากเดิมที่มี 256 ระดับจะถูกปรับลดค่าลงให้เหลือเพียง 128 ระดับหรือ 64 ระดับ การเปลี่ยนค่าระดับสัญญาณใหม่โดยการลดค่าระดับให้น้อยลงไปเรื่อยๆ เช่นนี้ จะก่อให้เกิดผลลัพธ์ที่เรียกว่า false contouring ซึ่งส่งผลให้คุณภาพของรูปภาพที่ได้ลดต่ำลงอย่างมาก จนสามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่าอย่างชัดเจนในที่สุด ในการทดลองเราได้ทำการเปลี่ยนค่าระดับสัญญาณใหม่จนกระทั่งเกิด false contouring ในรูปภาพที่ผ่านการฝังสัญญาณลายน้ำ (ที่ค่าระดับสัญญาณใหม่เท่ากับ 8) จากผลการทดลองพบว่าสัญญาณลายน้ำที่กู้กลับคืนมายังคงมีความถูกต้องเหมือนเดิมถ้าความแรงของสัญญาณลายน้ำที่ใช้ในกระบวนการฝังมีค่าอย่างต่ำเท่ากับ 6 ตัวอย่างของรูปภาพผลลัพธ์ที่ได้ 'Lena' ภายหลังการเปลี่ยนค่าระดับสัญญาณใหม่ที่ค่าต่างๆ กันได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 5



รูปที่ 5 รูปภาพที่มีสัญญาณลายน้ำภายหลังการเปลี่ยนค่าระดับสัญญาณใหม่ที่ค่าต่าง ๆ กัน (ก) 128 (ข) 64 (ค) 16 (ง) 8 ระดับ

สำหรับการลดขนาดของข้อมูลโดยการลดอัตราการสุ่มตัวอย่าง และการเปลี่ยนขนาดภาพใหม่ จะมีผลที่ทำให้ขนาดของรูปภาพผลลัพธ์เปลี่ยนไป และกระบวนการกู้คืนสัญญาณลายน้ำจะกระทำได้ก็ต่อเมื่อ มีการปรับขนาดของรูปภาพให้กลับมามีขนาดเท่าเดิม อย่างไรก็ตามรูปภาพที่ถูกสร้างขึ้นมาใหม่โดยการขยายขนาดนี้จะมีคุณภาพที่ต่ำลงไปจากรูปภาพเดิมก่อนที่จะทำการลดอัตราการสุ่มตัวอย่าง หรือเปลี่ยนขนาดเป็นอันมาก แต่เมื่อทำการทดลองกู้คืนสัญญาณลายน้ำที่ผ่านการลดอัตราการสุ่มตัวอย่างที่ 50% และการเปลี่ยนขนาดภาพใหม่ที่ 256×128 พิกเซล พบว่า ยังสามารถกู้คืนสัญญาณลายน้ำกลับคืนมาได้อย่างถูกต้องถ้าความแรงของสัญญาณลายน้ำที่ใช้มีค่ามากกว่า 6 ตัวอย่างของรูปภาพผลลัพธ์ที่ได้ภายหลังการลดอัตราการสุ่มตัวอย่าง และการเปลี่ยนขนาดภาพใหม่ รวมทั้งความแตกต่างระหว่างรูปภาพต้นฉบับกับรูปภาพที่ถูกปรับขนาดกลับมาเท่ากับของเดิมได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 6 และ 7 ตามลำดับ

(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 6: (ก) รูปภาพต้นฉบับ (ข) รูปภาพที่ถูกลดอัตราการสุ่มตัวอย่างที่ 50%
(ค) รูปภาพที่ถูกปรับขนาดกลับมาเท่ากับของเดิม

(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 6: (ก) รูปภาพต้นฉบับ (ข) รูปภาพที่ถูกเปลี่ยนขนาดภาพใหม่ที่ 256×128 พิกเซล
(ค) รูปภาพที่ถูกปรับขนาดกลับมาเท่ากับของเดิม

สรุปผลการทดลอง

บทความนี้ได้นำเสนอวิธีการทำภาพพิมพ์ลายน้ำดิจิตอล โดยอาศัยหลักการแปลงเวฟเล็ตแพคเกต จุดประสงค์ในการเลือกใช้เวฟเล็ตแพคเกตก็เพื่อที่จะทำการแยกแยะรายละเอียดของรูปภาพที่ช่วงความถี่ต่างๆ อย่างเท่าเทียมกัน โดยภายหลังการแปลงเวฟเล็ตแพคเกต ค่าสัมประสิทธิ์ในซับแบนด์ทั้ง 5 ที่ประกอบไปด้วยช่วงความถี่กลางเยื้องไปทางต่ำได้ถูกเลือกใช้ในการฝังสัญญาณลายน้ำดิจิตอล นอกจากนี้ในวิธีการที่นำเสนอสัญญาณลายน้ำได้ถูกสร้างขึ้นโดยอาศัยวิธีการกระจายแถบความถี่แบบอันดับโดยตรง ซึ่งช่วยให้สัญญาณลายน้ำมีความทนทานมากขึ้น และทำให้กระบวนการกู้คืนสัญญาณลายน้ำสามารถกระทำได้โดยไม่จำเป็นต้องใช้รูปภาพต้นฉบับเป็นส่วนประกอบ ผลลัพธ์ที่ได้

จากการทดลองแสดงให้เห็นว่า การนำการแปลงเวฟเล็ตแพคเกตมาใช้แทนการแปลงเวฟเล็ตแบบธรรมดาจะช่วยให้รูปภาพที่ผ่านการแปลงโดเมนมาแล้ว 2 ครั้ง มีการจัดระดับค่าสัมประสิทธิ์ในแต่ละช่วงความถี่หรือซับแบนด์อย่างชัดเจนและละเอียดมากกว่า ซึ่งส่งผลให้รูปภาพที่ผ่านการฝังสัญญาณลายน้ำมีคุณภาพสูงขึ้นโดยเฉลี่ย 2-3.5 dB นอกจากนี้สัญญาณลายน้ำยังมีความทนทานต่อ การบีบอัดข้อมูลด้วยมาตรฐานการบีบอัดข้อมูลชนิดรูปภาพ JPEG ที่อัตราการบีบอัดสูงถึง 70% ซึ่งประเมินได้จากสัญญาณลายน้ำที่กู้กลับคืนมาภายหลังที่ผ่านการบีบอัดข้อมูลแล้วยังคงมีความถูกต้องเที่ยงตรงอยู่ จากผลการทดลองที่ได้ ยังพบว่าวิธีการทำภาพพิมพ์ลายน้ำดิจิตอลที่ได้นำเสนอนี้มีความทนทานต่อการลดขนาดของข้อมูลภาพด้วยวิธีการเปลี่ยนค่าระดับสัญญาณใหม่ การลดอัตราการสุ่มตัวอย่าง และการเปลี่ยนขนาดภาพใหม่อีกด้วย

กิตติกรรมประกาศ

ผู้ทำวิจัยใคร่ขอขอบพระคุณ ศูนย์เทคโนโลยี และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ NECTEC ที่ได้สนับสนุนงานวิจัยนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ตามโครงการ NT-B-06-4C-20-319

เอกสารอ้างอิง

[1] P. Jirakulsawad and T. Amornraksa, "Spread spectrum watermarking for compressed video", Proceedings of the 2001 International Conference on Information Technology IConIT'2001, Bangkok, Thailand, May 28-30, 2001, pp. 112-121.

[2] I. Racocevic, B. Reljin and I. Reljin, "A method for providing digital image authenticity", Proceedings of the 4th International conference on Telecommunications in modern satellite, cable and broadcasting services, vol. 1, 1999, pp. 173-176.

[3] J. Cox, J. Kilian, F. T. Leighton and T. Shammoon, "Secure spread spectrum watermarking for multimedia", Technical Report 95-10, NEC Research Institute, Princeton; NJ, USA, 1995.

[4] F. Hartung and B. Girod, "Watermarking of uncompressed and compressed video", Signal Processing, vol. 66, no.3 (Special issue on Watermarking), May 1998, pp. 283-301.

[5] M. N. Xia, M. L. Zhe and H. S. Sheng, "Digital watermarking based on zerotrees of DCT coefficients", Proceedings of ICIP, Vol. 2, pp. 237-240, 1996.

[6] H. Inoue, A. Miyazaki, A. Yamamoto and T. Katsura, "A digital watermark based on image compression", Proceedings of

International Conference on Image Processing ICIP98, Vol. 2 pp. 391-395, 1998.
[7] X. G. Xia, C. G. Boncelet and G. R. Arce, "A multiresolution watermark for digital images", Proceedings of Int. Conference on Image processing, 1997, pp. 548-551.
[8] S. Onrit, Y. Attavetchakul, S. Aroonrungratsami and K. Chamnongthai, "Digital watermarking embedding and extracting by using wavelet packet transform", Proceedings of Electrical Engineering Conference, Chiang Mai, pp. 512-524, 2000.
[9] M. V. Wickerhauser, "Lectures on wavelet packet algorithms," INRIA/Rocquencourt Minicourse Lecture Notes, Washington University, 1992, pp. 1-74.
[10] T. Amornraksa and R. Puertpan, "Efficiency improvement in watermarking embedding process", Songklanakarin Journal of Science and Technology, Vol.24, No.1, January-March 2002, pp.77-87.