

การปรับปรุงตัวทำนายโลมบัสสำหรับการฝังข้อมูลแบบกู้คืนกลับได้บนพื้นฐานของ PEHS และการเรียงลำดับโดยใช้การถ่วงน้ำหนักแบบเชิงเส้น

Improved Rhombus Predictor for Reversible Data Hiding Based on PEHS and Sorting Using Linear Weight Fitting

ชัยพร ปานยินดี

Chaiyaporn Panyindee

สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์,
Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology
Rattanakosin (RMUTR),

*Corresponding author E-mail: chaiyaporn.pan@gmail.com, Chaiyaporn.pan@rmutr.ac.th

(Received: July 9 , 2018, Revised: October 12, 2018, Accepted: January 24, 2019)

บทคัดย่อ

การถ่วงน้ำหนักที่เท่ากันของตัวทำนายสำหรับทุกภาพ และทุกขนาดของการฝังก่อให้เกิดความผิดพลาด ในบทความนี้นำเสนอการปรับปรุงตัวทำนายสำหรับการฝังข้อมูลแบบกู้คืนกลับได้ (Reversible Data Hiding: RDH) ที่อยู่บนพื้นฐานของวิธีการเลื่อนฮิสโตแกรมของค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย (Prediction Error Histogram Shift: PEHS) และการเรียงลำดับ (Sorting) ตัวทำนายโลมบัส (Rhombus predictor) ถูกใช้ประโยชน์อย่างมีนัยยะสำคัญในหลายงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ RDH สี่พื้นที่ข้างเคียงแบบคงที่ (static) ถูกใช้สำหรับการทำนาย เพื่อช่วยให้ได้ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย (Prediction-error: PE) ที่มีขนาดเล็ก เมื่อมีการฝังข้อมูลลงในค่าเหล่านี้จะได้รับความบิดเบือนที่ต่ำ ในงานนี้ผู้วิจัยปรับปรุงตัวทำนายโลมบัสแบบดั้งเดิมโดยใช้การถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสมแบบเชิงเส้น (Linear Weight Fitting: LWF) การหาค่าถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสมใหม่ช่วยให้บรรลุผลลัพธ์ค่า PSNR สูงสุดที่เป็นไปได้ ในแต่ละภาพ และแต่ละขนาดของการฝัง ผลการทดลองของวิธีการที่นำเสนอแสดงให้เห็นการปรับปรุงค่า PSNR ที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวทำนายโลมบัสแบบดั้งเดิมของวิธีการก่อนหน้า

คำสำคัญ: ตัวทำนายโลมบัส, การฝังข้อมูลแบบที่สามารถกู้คืนกลับได้ (RDH), การถ่วงน้ำหนักแบบเชิงเส้น

Abstract

The equal weighting values of a predictor for every image and embedding size cause mistakes. This article presents an improvement rhombus predictor for Reversible Data Hiding (RDH) based on prediction-error histogram shift (PEHS) and sorting. The rhombus predictor has been exploited significantly in many researches related to RDH. Four neighboring statics are used for prediction in order to obtain a small prediction-error value. When embed data into these values, there is low distortion. In this work, the researcher improved the traditional rhombus predictor by using linear weight fitting (LWF). Finding a suitable new weight value achieved maximum possible PSNR results in each image and each embedding size. The experimental results of the proposed method showed improvement the PSNR value compared to the rhombus predictor in previous work.

Keywords: Rhombus predictor, Reversible Data Hiding, Linear Weight Fitting

1. บทนำ

เทคนิคการซ่อนข้อมูลแบบกู้คืนกลับได้เป็นการฝังข้อมูลลงในสื่อดิจิทัล อาทิเช่น รูปภาพ เสียง หรือ วิดีโอ ซึ่งสามารถกู้คืน

ข้อมูลกลับได้ทั้งภาพต้นฉบับ และข้อมูลที่ถูกฝังได้อย่างสมบูรณ์ งานบางประเภทต้องการคุณสมบัติเหล่านี้ได้แก่ การแพทย์ และการทหาร เป็นต้น

เทคนิคการขยายความแตกต่าง (Difference Expansion: DE) ถูกนำเสนอโดย Tian [1] เป็นเทคนิคพื้นฐานสำหรับการซ่อนข้อมูลแบบกู่คืนกลับได้ ซึ่งจะขยายค่าความแตกต่างของคู่พิกเซลเพื่อซ่อนข้อมูลหนึ่งบิต เทคนิคของเขาให้ประสิทธิภาพสูงสุดเพียง 0.5 บิตต่อพิกเซล Alattar [2] พัฒนาแนวคิดของ Tian โดยนำเสนอวิธีการฝังสำหรับค่าความแตกต่างระหว่างสามพิกเซลเพื่อซ่อนสองบิต นอกจากนี้ พวกเขายังคงพัฒนาต่อสำหรับการซ่อนข้อมูลสามบิตโดยใช้สี่พิกเซล [3]

หลังจากนั้น เทคนิคการขยายค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย (Prediction-error Expansion: PEE) ได้ถูกนำเสนอโดย Thodi และ Rodriguez [4] พวกเขาใช้รูปแบบการขยายความแตกต่างเดิม (DE) ร่วมกับค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย (Prediction-error: PE) ซึ่งหมายถึงค่าพิกเซลที่ทำนายไว้ได้รับการขยายสำหรับการซ่อนข้อมูลแบบที่สามารถกู่คืนกลับได้ ฟังก์ชันการกระจายความน่าจะเป็นของค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายมีรูปทรงที่สูง และแคบกว่าค่าความแตกต่างของพิกเซล [1] ซึ่งดีกว่าสำหรับการซ่อนข้อมูลแบบกู่คืนกลับได้ ความบิดเบือนขนาดเล็กที่เกิดจากการฝังข้อมูลขนาดใหญ่เป็นคุณลักษณะที่พึงประสงค์ในการซ่อนข้อมูลแบบกู่คืนกลับได้ Thodi และ Rodriguez ใช้ตัวทำนาย Median Edge Detector (MED) ซึ่งเป็นตัวทำนายมาตรฐานสำหรับการบีบอัดภาพแบบไม่สูญเสีย (Lossless Compression) เช่นเดียวกับที่พบได้ใน JPEG-LS [5]

Chen และคณะ [6] เปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวทำนายในรูปแบบต่าง ๆ เช่น MED, Gradient-adjusted predictor (GAP), Context-based adaptive lossless image compression (CALIC) [7] และ Full context prediction (FCP) ในขณะที่การทำนายแบบ FCP ที่ใช้ค่าเฉลี่ยสำหรับสี่ตำแหน่งข้างเคียงในรูปทรงโลมบัสร่วมกับเทคนิคการเรียงลำดับถูกพบใน [8] ทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้นถูกจัดประเภทเป็นตัวทำนายแบบคงที่โดย [9] การทำนายโลมบัสแบบ FCP ให้ประสิทธิภาพดีที่สุดในบรรดาตัวทำนายแบบคงที่อื่น ๆ นั่นจึงเป็นเหตุผลสำคัญที่ทำให้มีงานวิจัยจำนวนมาก เช่น [10-13] ใช้ขั้นตอนวิธีการฝังตามตัวทำนายโลมบัสแบบ FCP [8]

ถึงแม้ว่าการทำนายโลมบัสแบบ FCP [8] จะมีประสิทธิภาพสูงแต่การใช้เพียงค่าเฉลี่ยในสี่ตำแหน่งสำหรับการทำนายกับทุกภาพ และทุกขนาดของการฝังไม่สามารถให้ผลลัพธ์ที่ดีได้ทั้งหมด ข้อเท็จจริงบางประการพบว่า ในแต่ละภาพ และแต่ละขนาดของการฝังต้องการค่าถ่วงน้ำหนัก (w) ที่ไม่เท่ากัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำเสนอวิธีการเพื่อให้ได้รับค่าถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสมสำหรับแต่ละภาพ และแต่ละขนาดของการฝังโดยอยู่บนพื้นฐานของการทำนายโลมบัสแบบ FCP สี่ค่าสัมประสิทธิ์ถ่วงน้ำหนักดั้งเดิมถูกคำนวณใหม่โดยพิจารณาความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นระหว่างสมการในแต่ละเซลล์กับแต่ละขนาดของ

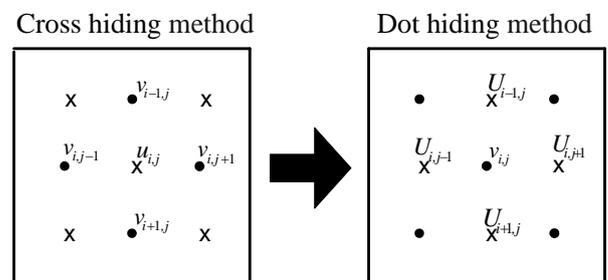
การฝัง และแต่ละภาพ เพื่อให้บรรลุผลลัพธ์ PSNR สูงสุดที่เป็นไปได้ นอกจากนี้ กระบวนการของผู้วิจัยยังคงอาศัยหลายเทคนิคที่มีบทบาทสำคัญในการซ่อนข้อมูลแบบกู่คืนกลับได้ เช่น การขยายค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย (PEE) การเลื่อนฮิสโตแกรมของค่า PE (PEHS) [4] และการเรียงลำดับข้อมูล (Data Sorting) [14] ซึ่งจะถูกอธิบายต่อในหัวข้อถัดไป

รายละเอียดส่วนอื่น ๆ ของบทความมีดังต่อไปนี้ ส่วนที่ 2 อธิบายงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้อง ส่วนที่ 3 อธิบายวิธีการที่นำเสนอ ส่วนที่ 4 อธิบายผลการทดลอง และส่วนที่ 5 สรุปผลการทดลอง

2. งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้อง

2.1 ตัวทำนายโลมบัสกับรูปแบบ FCP

สำหรับงาน RDH สมัยใหม่ รูปแบบ FCP เป็นที่นิยม และถูกใช้อย่างแพร่หลายในหมู่นักวิจัย เช่น [10-13] ความได้เปรียบในแง่มุมมองของการบิดเบือนต่ำหลังการฝังเป็นเหตุผลหลักในการถูกประยุกต์ใช้งานมากกว่ารูปแบบดั้งเดิม (การฝังเพลาเดี่ยว) การทำนายแบบดั้งเดิม เช่น MED หรือ GAP ไม่สามารถให้การเรียงลำดับค่า (PE) d_{ij} ได้ รูปแบบการฝัง FCP ถูกแทนที่เพื่อช่วยให้การเรียงลำดับสามารถทำได้ ร่วมกับการทำนายแบบโลมบัส (Rhombus) [8]



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างพิกเซลที่อยู่ในครอสเซต และดอทเซต สำหรับรูปแบบการฝัง FCP [8]

พิกเซลทั้งหมดของภาพจะถูกแบ่งออกเป็นสองเซต ครอสเซต และดอทเซตดังแสดงในรูปที่ 1 ทั้งสองเซตเป็นอิสระต่อกัน สังเกตว่า เมื่อฝังข้อมูลในครอสเซต พิกเซลในดอทเซตจะถูกใช้สำหรับคำนวณค่าการทำนายซึ่งจะไม่ถูกเปลี่ยน และเมื่อฝังข้อมูลในครอสเซตเสร็จสิ้น การฝังในดอทเซตจะเริ่มต้นขึ้น พิกเซลในครอสเซตจะถูกใช้สำหรับการคำนวณค่าการทำนายเช่นเดียวกับการฝังในครอสเซตก่อนหน้า ดังนั้น การเรียงลำดับของพิกเซลสามารถทำได้

สำหรับรูปแบบการซ่อนข้อมูลในครอส หนึ่งเซลล์ (หนึ่งเซลล์ประกอบไปด้วยห้าพิกเซลดังรูปที่ 2) ในการฝังข้อมูลโดยอยู่บนพื้นฐานของวิธีการ PEE อธิบายดังนี้ พิกเซลศูนย์กลาง u_{ij}

ของเซลล์สามารถถูกทำนายจากสี่พิกเซลข้างเคียง ค่าการทำนาย u'_{ij} สามารถคำนวณดังนี้

$$u'_{i,j} = \left\lfloor \frac{v_{i,j+1} + v_{i-1,j} + v_{i,j-1} + v_{i+1,j}}{4} \right\rfloor \quad (1)$$

ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย (PE) d_{ij} สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ (2)

$$d_{i,j} = u_{i,j} - u'_{i,j} \quad (2)$$

ค่า (PE) d_{ij} นี้สามารถถูกขยาย (expanded) เพื่อซ่อนข้อมูลเช่นเดียวกับขั้นตอนวิธีการขยายค่าความแตกต่าง (difference expansion algorithm: DE) ที่ถูกนำเสนอโดย Tian [1] การคำนวณค่า PE ตามสมการที่ (2) ผลลัพธ์ที่ได้ถูกขยายเพื่อให้เกิดพื้นที่ว่าง 1 บิต สำหรับการฝัง บิตในที่มีสถานะที่เป็นไปได้ คือ 0 หรือ 1 ($b \in \{0,1\}$)

ผลลัพธ์ของค่า PE ที่ถูกขยายคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$D_{i,j} = 2d_{i,j} + b \quad (3)$$

โดยที่ D_{ij} คือ ค่า PE ที่ได้หลังการขยาย (expansion) หรืออาจเรียกว่าค่า PE ที่ถูกโมดิไฟด์ b คือ หนึ่งบิตของข้อมูลที่ถูกซ่อน สังเกตว่า D_{ij} ที่ถูกโมดิไฟด์ตามวิธีการเลื่อนฮิสโตรแกรม ซึ่งจะอธิบายไว้ในภายหลัง (ในหัวข้อที่ 2.2) หลังการซ่อนข้อมูล ค่าพิกเซลต้นฉบับ u_{ij} ถูกเปลี่ยนเป็น U_{ij} ดังนี้

$$U_{i,j} = D_{i,j} + u'_{i,j} \quad (4)$$

ขั้นตอนการถอดรหัส หรือ กู้คืนข้อมูลสำหรับรูปแบบครอส จะทำตรงข้ามกับการเข้ารหัส ในช่วงของการฝังพิกเซลจากดอทเซตจะไม่ถูกโมดิไฟด์ ดังนั้น ค่าการทำนาย u'_{ij} จะไม่เปลี่ยนการใช้ค่าการทำนาย u'_{ij} และค่าพิกเซลที่ถูกโมดิไฟด์ U_{ij} ผู้ถอดรหัสสามารถกู้คืนข้อมูลที่ถูกซ่อน และค่าพิกเซลต้นฉบับได้ ค่า PE ที่ถูกโมดิไฟด์สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$D_{i,j} = U_{i,j} - u'_{i,j} \quad (5)$$

บิตที่ถูกฝังสามารถกู้คืนได้ดังนี้

$$b = D_{i,j} \bmod 2 \quad (6)$$

ค่า PE ต้นฉบับสามารถคำนวณจาก

$$d_{i,j} = \left\lfloor \frac{D_{i,j}}{2} \right\rfloor \quad (7)$$

และพิกเซลต้นฉบับสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$u_{i,j} = d_{i,j} + u'_{i,j} \quad (8)$$

2.2 การเลื่อนฮิสโตรแกรมของค่า PE (PEHS)

วิธีการเลื่อนฮิสโตรแกรมของค่า PE (PEHS) ถูกนำเสนอครั้งแรกโดย Thodi และ Rodriguez [4] เพื่อลดความบิดเบือนของการฝังที่ และยังคงช่วยหลีกเลี่ยงปัญหาการซ่อนทับกันของค่า PE ที่เกิดขึ้นจากการขยาย เริ่มต้นด้วยการกำหนดสองค่าขีดแบ่งคือ ค่าขีดแบ่งเชิงลบ (negative threshold) และ ค่าขีดแบ่งเชิงบวก (positive threshold) สังเกตว่า ค่า PE ที่สามารถขยายได้ (Expandable set: E) จะอยู่ในช่วง $[T_n, T_p]$ ตามสมการที่ (3) โดยที่ค่า PE เหล่านั้นไม่ก่อให้เกิดปัญหา Overflow และ Underflow ในสเปเชียลโดเมน (spatial domain) ค่า PE ที่ไม่ได้อยู่ในช่วง $[T_n, T_p]$ จะถูกเลื่อนเพื่อให้มีพื้นที่ว่างสำหรับการขยายก่อนหน้า โดยกำหนด S เซต (Shiftable set: S) คือ เซตของค่า PE ที่ถูกเลื่อนได้ อย่างไรก็ตาม บางค่า PE ในพื้นที่อื่น ๆ จะไม่ถูกขยาย หรือ ไม่ถูกเลื่อนเนื่องจากเกิดปัญหา Overflow หรือ Underflow ความจุในการฝังของวิธีการนี้ คือ $|E| - |L|$ โดยที่ $|L|$ คือ ขนาดของพื้นที่แมปสำหรับพิกเซลที่มีปัญหา

การเข้ารหัสของวิธีการเลื่อนฮิสโตรแกรมทำได้โดยโมดิไฟด์ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย (PE) d_{ij} ดังนี้

$$D_{i,j} = \begin{cases} 2d_{i,j} + b, & \text{if } d_{i,j} \in [T_n; T_p] \\ d_{i,j} + T_p + 1, & \text{if } d_{i,j} > T_p \text{ and } T_p \geq 0 \\ d_{i,j} + T_n, & \text{if } d_{i,j} < T_n \text{ and } T_n < 0 \end{cases} \quad (9)$$

การถอดรหัสของค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย (PE) d_{ij} และบิตข้อมูลที่ฝัง b สามารถทำได้โดยใช้

$$d_{i,j} = \begin{cases} \lfloor D_{i,j} / 2 \rfloor, & \text{if } D_{i,j} \in [2T_n; 2T_p + 1] \\ D_{i,j} - T_p - 1, & \text{if } D_{i,j} > 2T_p + 1 \text{ and } T_p \geq 0 \\ D_{i,j} - T_n, & \text{if } D_{i,j} < 2T_n \text{ and } T_n < 0 \end{cases} \quad (10)$$

การควบคุมความจุในการฝังสามารถควบคุมได้โดยการเปลี่ยนค่าขีดแบ่ง T_p และ T_n ซึ่งจะทำได้อัตราส่วนระหว่าง E เซต และ S เซตเปลี่ยน ความบิดเบือนดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับรูปทรงของฮิสโตแกรมของค่า PE และค่าเทรซโฮลด์ที่มีการขยับ ลักษณะของการบิดเบือนจะแตกต่างกัน ซึ่งความบิดเบือนในเซตที่สามารถเลื่อนได้ (S เซต) จะสูงกว่าเซตที่สามารถขยายได้ (E เซต) ในภาวะเชิงการนับ (cardinality) ของเซลล์ในภาพ

2.3 การเรียงลำดับข้อมูล (Data Sorting)

การเรียงลำดับข้อมูล (ข้อมูลในที่นี้คือค่า PE) สำหรับ RDH เป็นสิ่งจำเป็นถูกนำเสนอโดย Kamstra และ Heijmans [14] งานของพวกเขาแสดงให้เห็นถึงข้อได้เปรียบของประสิทธิภาพการทำงานของวิธีการเรียงลำดับอย่างมีนัยสำคัญมากกว่าวิธีการก่อนหน้านี้ อย่างไรก็ตาม การเรียงลำดับจะเป็นไปได้เฉพาะเมื่อเซลล์ (ทำพิกเซลแสดงในรูปที่ 2) มีความเป็นอิสระต่อกัน หรือในความหมายอื่น การฝังข้อมูลลงในหนึ่งเซลล์ควรจะไม่กระทบต่อเซลล์อื่น ๆ อย่างไรก็ตาม วิธีการ PEHS [4] ขึ้นอยู่กับเซลล์อื่น ๆ โดยที่การฝังข้อมูลไปยังเซลล์หนึ่งมีการเปลี่ยนแปลงค่า PE ในเซลล์อื่น

สังเกตว่า ดอทเซต และครอสเซตของรูปแบบ FCP มีความเป็นอิสระซึ่งกันและกัน เพื่อให้ซ่อนข้อมูลได้มากขึ้นกับการทำให้ภาพบิดเบือนที่น้อยลง (less visual degradation) เซลล์จะต้องมีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้น เซลล์สามารถถูกจัดเรียงลำดับใหม่โดยการเรียงลำดับตามค่าความแปรปรวนในพื้นที่ข้างเคียง (local variance) $\mu_{i,j}$ สำหรับแต่ละเซลล์สามารถคำนวณจากพิกเซลข้างเคียง $v_{i,j-1}$, $v_{i+1,j}$, $v_{i,j+1}$, และ $v_{i-1,j}$ (ดูรูปที่ 1 ด้านซ้าย) ดังต่อไปนี้

$$\mu_{i,j} = \frac{1}{4} \sum_{k=1}^4 (\Delta v_k - \Delta \bar{v}_k)^2 \quad (11)$$

โดยที่ $\Delta v_1 = |v_{i,j-1} - v_{i-1,j}|$, $\Delta v_2 = |v_{i-1,j} - v_{i,j+1}|$, $\Delta v_3 = |v_{i,j+1} - v_{i+1,j}|$, $\Delta v_4 = |v_{i+1,j} - v_{i,j-1}|$, $\Delta \bar{v}_k = (\Delta v_1 + \Delta v_2 + \Delta v_3 + \Delta v_4)/4$ ค่าความแปรปรวนในพื้นที่ข้างเคียง $\mu_{i,j}$ ถูกคำนวณโดยใช้สมการที่ (11) เพื่อช่วยให้ได้การเรียงลำดับที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการซ่อนข้อมูล ค่าความแปรปรวนในพื้นที่ข้างเคียง $\mu_{i,j}$ มีหลายคุณลักษณะที่สำคัญ ได้แก่ ค่าเหล่านี้ที่ไม่เปลี่ยนแปลงหลังจากการฝังข้อมูล และค่าเหล่านี้แปรผันตามขนาดของความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย (PE) $d_{i,j}$ ของเซลล์นั้น สำหรับตัวอย่าง ค่าความแปรปรวนขนาดเล็ก บ่งชี้ว่าค่า PE น่าจะมีขนาดเล็กเช่นเดียวกัน

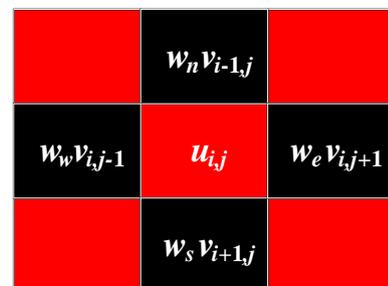
สมมุติว่า d_{sort} ถูกเรียงลำดับเป็นแถวในทุกตำแหน่งของ $d_{i,j}$ ในภาพ วิธีการ PEHS ถูกใช้สำหรับการฝังข้อมูลรวมกับการปรับค่าเทรซโฮลด์ที่เหมาะสม เมื่อเซลล์ถูกเรียงลำดับตามค่า

ความแปรปรวน โดยให้ค่าความแปรปรวนขนาดเล็กขึ้นก่อนค่าที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งเหมาะสำหรับการฝัง ดังนั้น กระบวนการฝังจะเริ่มต้นจากเซลล์ที่มีค่าความแปรปรวนขนาดเล็กในข้อมูลที่ถูกเรียง และย้ายเซลล์ที่มีขนาดใหญ่กว่าออกไปยังเซลล์ถัดไปจนกว่าจะถึงพิกเซลสุดท้ายของข้อมูลที่ถูกฝัง วิธีการ PEHS ถูกประยุกต์ใช้ที่ตำแหน่งเซลล์ซึ่งมีค่าความแปรปรวนขนาดเล็กใน E เซต และ S เซต โดยที่ $P = |E|$ อย่างไรก็ตาม เพโฮลด์ P ยังคงขึ้นอยู่กับค่า T_n และ T_p ทั้งสองค่านี้จำเป็นสำหรับการแยกข้อมูลที่ถูกฝัง และการกู้คืนภาพต้นฉบับ สังเกต บิตสุดท้ายที่ถูกเปลี่ยนของพิกเซล และค่าขีดแบ่งเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อให้ได้การบิดเบือนต่ำสุดในขณะที่มีพื้นที่เพียงพอสำหรับการฝัง

3. วิธีการที่นำเสนอ

หนึ่งส่วนที่สำคัญในกระบวนการของงานก่อนหน้านี้ [8] เพื่อลดความบิดเบือนของภาพหลังการฝัง คือ ตัวทำนาย ตัวทำนายที่มีความแม่นยำจะให้ค่า PE ที่มีขนาดเล็ก เมื่อถูกฝังโดยใช้ HS ความบิดเบือนที่ได้รับจะต่ำตามค่า PE ที่มีขนาดเล็กก่อนหน้านี้ ในรูปแบบการฝังครอส และดอท ตัวทำนายที่มีลักษณะพิเศษเป็นแบบคางที่ (Rhombus predictor) ถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างมีนัยสำคัญสำหรับการลดความบิดเบือนของภาพหลังการฝัง

โดยทั่วไป ในระบบสมการ หรือ กระบวนการฝังข้อมูลแบบ กู้คืนกลับได้ส่วนใหญ่มักพยายามใช้ตัวทำนายแบบคางที่ในขนาดของการฝัง และทุกภาพในการทดสอบ ผลลัพธ์ที่ได้รับมักจะเป็นไปในบางการฝัง และบางภาพ ตัวทำนายโลมบัสเป็นหนึ่งในต้นแบบการทำนายแบบคางที่ที่ใช้ในหนึ่งกระบวนการฝัง ข้อมูลแบบกู้คืนกลับได้ สังเกต สมการที่ (1) พบว่า การใช้ค่าเฉลี่ยของสี่พิกเซลข้างเคียง ค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนัก (w) ของแต่ละพิกเซลมีค่าเท่ากันคือ 0.25 ซึ่งไม่ควรใช้เท่ากันในแต่ละการฝัง และแต่ละภาพ



รูปที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักสำหรับสี่พิกเซลข้างเคียงในครอสเซต

ค่า w_w , w_e , w_n , w_s ควรได้รับการปรับปรุงเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสม (ค่า PSNR สูงสุดที่เป็นไปได้) ดังนั้น ผู้วิจัยจึงนำเสนอการปรับปรุงตัวทำนายโลมบัสโดยใช้การถ่วงน้ำหนักแบบเชิง

เส้น อธิบายได้ดังนี้ u_{ij} คือจุดศูนย์กลางของเซลล์ในการคำนวณค่าการทำนายใหม่ ซึ่งค่าการทำนายใหม่ u'_{ij} สามารถคำนวณได้โดยสี่พิกเซลข้างเคียงที่ประกอบไปด้วย $w_w v_{i-1,j}$, $w_e v_{i,j+1}$, $w_n v_{i+1,j}$ และ $w_s v_{i,j-1}$ ดังนี้

$$u'_{i,j} = \left[\frac{w_w v_{i,j-1} + w_e v_{i,j+1} + w_n v_{i-1,j} + w_s v_{i+1,j}}{\sum w_{i,j}} \right] \quad (12)$$

โดยที่กำหนดให้ $u'_{ij} = u^{Q1}_{ij}$ เป็นตัวแปรที่ขึ้นกับค่าพิกเซลของตำแหน่งแรก $Q1$ คือชุดลำดับของค่าพิกเซลในภาพ / เมื่อ r คือจำนวนแถว และ c คือจำนวนคอลัมน์ถูกเรียงตามลำดับเป็นระบบสมการ ผู้วิจัยจำเป็นต้องหาฟังก์ชันที่สอดคล้องกับค่าในภาพ / โดยใช้ $f(v_{ij-1}, v_{ij+1}, v_{i-1,j}, v_{i+1,j})$ ซึ่งสัมพันธ์ระหว่าง $v_{ij-1}, v_{ij+1}, v_{i-1,j}, v_{i+1,j}$ และ u_{ij} สามารถเขียนได้ดังนี้

$$f(v_{ij-1}, v_{ij+1}, v_{i-1,j}, v_{i+1,j}) = w_w v_{i,j-1} + w_e v_{i,j+1} + w_n v_{i-1,j} + w_s v_{i+1,j} \quad (13)$$

สมการที่สร้างขึ้นโดยการแทนที่ในสมการที่ (13) ระบบสมการใหม่คือ

$$\begin{aligned} u^{Q1}_{i,j} &= f(w_w v_{i,j-1} + w_e v_{i,j+1} + w_n v_{i-1,j} + w_s v_{i+1,j}) \\ u^{Q2}_{i,j} &= f(w_w v_{i,j-1} + w_e v_{i,j+1} + w_n v_{i-1,j} + w_s v_{i+1,j}) \\ &\dots \\ &\dots \\ u^{Qn}_{i,j} &= f(w_w v_{i,j-1} + w_e v_{i,j+1} + w_n v_{i-1,j} + w_s v_{i+1,j}) \end{aligned} \quad (14)$$

ผู้วิจัยสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของเมทริกซ์คือ $VW = U$ [15], [16] เมื่อ V เป็นค่าคงที่ของระบบสมการ หลังจากแทนที่ $v_{ij-1}, v_{ij+1}, v_{i-1,j}, v_{i+1,j}$ และ u^{Q1}_{ij} สำหรับ $Q = 1, 2, \dots, N$ โดยที่ U เป็นเมทริกซ์คอลัมน์แทน u_{ij} และ W เป็นเมทริกซ์คอลัมน์ที่เป็นตัวแทนสัมประสิทธิ์ค่าถ่วงน้ำหนักสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (15)

$$V^1 VW = V^1 U \text{ or } W = U/V \quad (15)$$

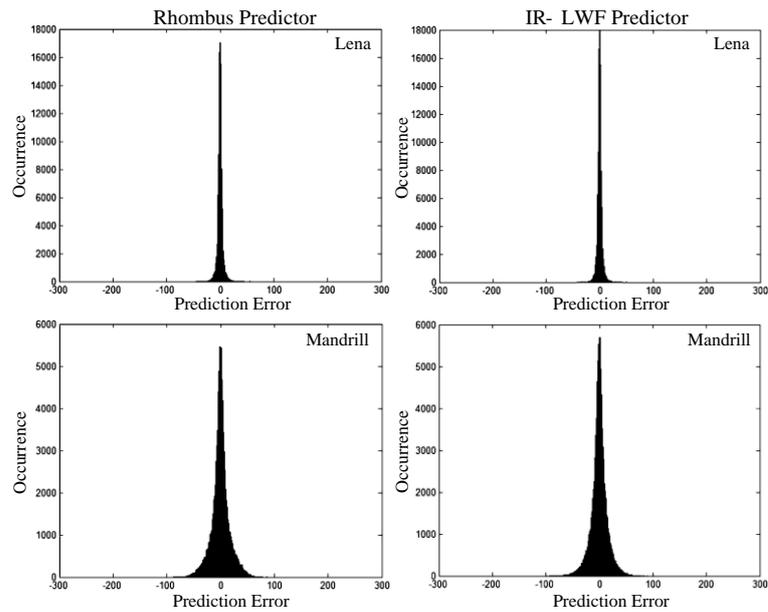
$$\begin{bmatrix} u^{Q1}_{i,j} \\ u^{Q2}_{i,j} \\ \vdots \\ u^{Qn}_{i,j} \end{bmatrix}_{N \times 1} = \begin{bmatrix} v^1_{i,j-1} & v^1_{i,j+1} & v^1_{i-1,j} & v^1_{i+1,j} \\ v^2_{i,j-1} & v^2_{i,j+1} & v^2_{i-1,j} & v^2_{i+1,j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ v^n_{i,j-1} & v^n_{i,j+1} & v^n_{i-1,j} & v^n_{i+1,j} \end{bmatrix}_{N \times 4} \times \begin{bmatrix} w_w \\ w_e \\ w_n \\ w_s \end{bmatrix}_{4 \times 1}$$

[16] เริ่มต้นแนวคิดสำหรับการใช้ค่าถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสมโดยมุ่งเน้นไปที่ภาพทางการแพทย์ที่แตกต่าง (Ultrasound 8 บิต, MRI 12 บิต, CT 16 บิต และ PET 16 บิต) บริเวณที่ขรุขระและราบเรียบเป็นปัจจัยสำหรับรูปแบบการทำนายบนพื้นฐานของ DMT สี่ตำแหน่งสำหรับค่าถ่วงน้ำหนักของพื้นผิวที่ราบเรียบให้ผลลัพธ์ PSNR ที่สูงกับเพิโลดขนาดเล็ก ในขณะที่บริเวณที่ขรุขระเกือบทั้งหมดไม่สามารถฝังข้อมูลได้ สังเกต พิกเซลของภาพทางการแพทย์ส่วนใหญ่มีค่าเข้าใกล้ค่าสูงสุดและต่ำสุด ซึ่งมักก่อให้เกิดปัญหา Overflow และ Underflow ระหว่างการฝัง และยังคงต้องได้รับการปรับปรุง สำหรับในภาพมาตรฐานระดับเทา (Lena, Barbara, Airplane และ Mandrill) สัมประสิทธิ์ค่าการถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสมยังคงเป็นสิ่งจำเป็นเช่นกัน เพื่อให้ได้ผลลัพธ์การทำนายที่ถูกต้อง ($d = 0$) สำหรับในบางภาพ (เช่นในภาพ Barbara) และบางขนาดของการฝังต้องการ w เพียงสองตำแหน่ง (w_w และ w_e) ในแนวแกนนอน สี่ตำแหน่งเป็นสิ่งที่ไม่จำเป็น

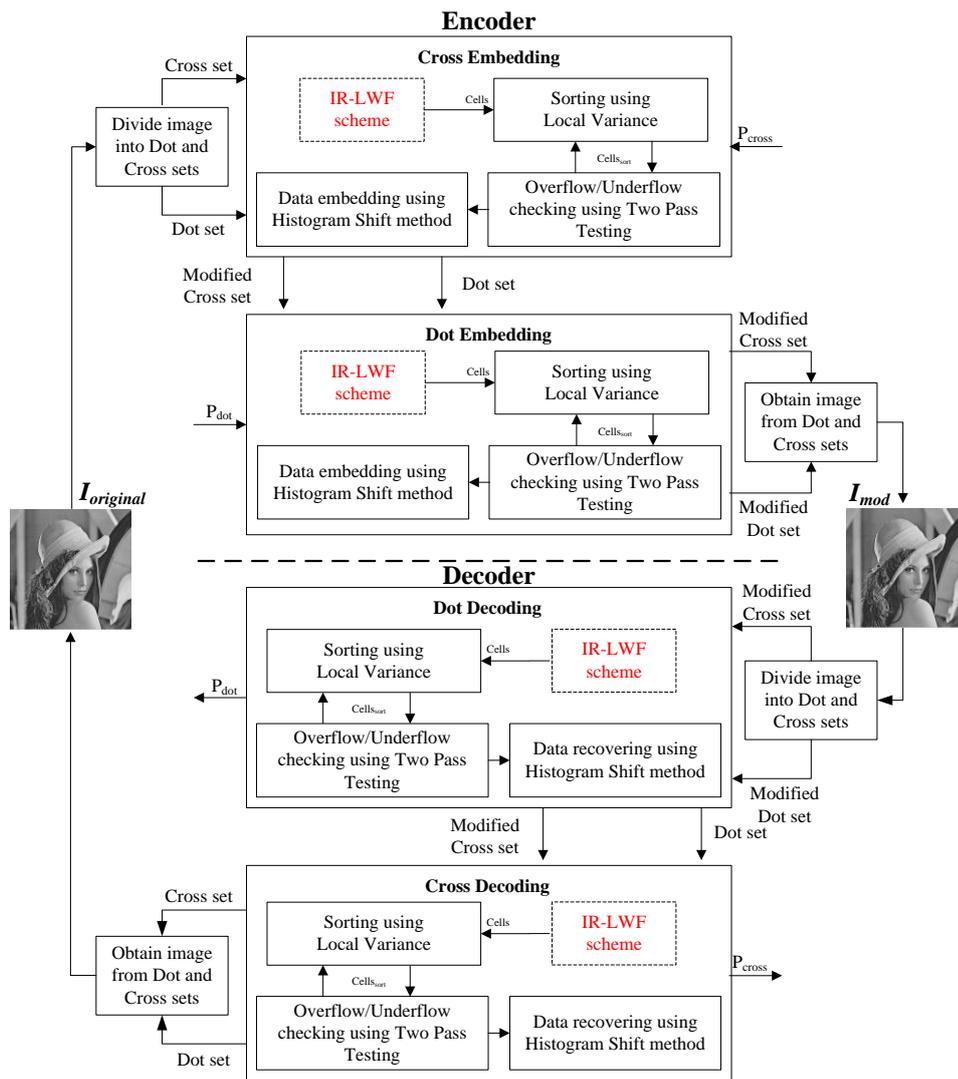
ในรูปที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบผลลัพธ์ฮิสโตแกรมของค่า PE ที่ได้จากตัวทำนายทั้งสองแบบในภาพ Lena และ Mandrill ตัวทำนาย IR-LWF ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับตัวทำนายโลบัสแบบดั้งเดิม สังเกตว่า ฮิสโตแกรมของตัวทำนาย IR-LWF สูงกว่าตัวทำนายโลบัส หรืออีกนัยหนึ่งหมายถึงจำนวนพิกเซลที่ทายถูกมากกว่าโดยใช้สมการที่ (2) จำนวน PE ($d = 0$) จำนวนมาก เมื่อนำไปฝังข้อมูลโดยใช้ HS จะให้ผลลัพธ์ความบิดเบือนที่ต่ำกว่า PE > 0 ตัวอย่างสำหรับการคำนวณ PE ที่แตกต่าง ($d = 0$ และ ($d = 2$ และกำหนดให้ $b = 1$, $u'_{ij} = u' = 200$ เหมือนกันทั้งสองกรณี

กรณีที่ 1 PE ($d = 0$)
 $U = 2d + b + u'$
 $= 2(0) + 1 + 200 = 201$

กรณีที่ 2 PE ($d = 2$)
 $U = 2d + b + u'$
 $= 2(2) + 1 + 200 = 205$



รูปที่ 3 ตัวอย่างการเปรียบเทียบฮิสโตแกรมของค่า PE ระหว่างตัวทำนายโลมบัสกับตัวทำนาย IR-LWF ในภาพ Lena และภาพ Mandrill



รูปที่ 4 แผนผังการเข้ารหัสและถอดรหัสของวิธีการที่นำเสนอ

เห็นได้ชัดว่า กรณีที่ 2 ให้ผลลัพธ์ขนาดใหญ่กว่ากรณี 1 ในทำนองเดียวกันความบิดเบือนที่สูงกว่า 4 ระดับสำหรับหนึ่งเซลล์ เป็นสิ่งที่ผู้วิจัยไม่ต้องการ ดังนั้น การได้สัมประสิทธิ์ค่าถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสมเป็นสิ่งจำเป็นที่จะช่วยให้การทำนายเข้าใกล้ค่าที่ดีที่สุด บล็อกไดอะแกรมการทำงานแสดงไว้ดังรูปที่ 4

ก่อนการฝังข้อมูล ทุกพิกเซลจะถูกแบ่งออกเป็นครอสเซตและดอทเซต เพโพลด์สำหรับกระบวนการเข้ารหัสครอสเซตและดอทเซต คือ P_{Cross} และ P_{Dot} ตามลำดับ สำหรับการกู้คืนข้อมูล ค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสม w_w, w_e, w_n, w_s ค่าขีดแบ่ง T_{nCross} และ T_{pCross} และขนาดของเพโพลด์จริง $|P_{Cross}|$ (สำหรับกระบวนการฝังครอส) หรือ $|P_{Dot}|$ (สำหรับกระบวนการฝังดอท) ควรถูกส่งให้ผู้รับ (หรือ ผู้ถอดรหัส) ค่า LSB ของ 54 ตำแหน่งแรกในค่า PE จาก d_{sort} ถูกแทนที่ด้วยสัมประสิทธิ์ค่าถ่วงน้ำหนัก w_w, w_e, w_n, w_s (20 บิต) ค่าขีดแบ่ง T_{nCross} (7 บิต) และ T_{pCross} (7 บิต) ขนาดของเพโพลด์ $|P_{Dot}|$ (20 บิต) หรือ $|P_{Cross}|$ (20 บิต) ค่า LSB ของภาพต้นฉบับทั้ง 54 ตำแหน่งควรถูกเก็บลงในเซตเรียกว่า S_{LSB} เซต และถูกรวมเป็นส่วนหนึ่งกับเพโพลด์ ค่า PE ทั้ง 54 ตำแหน่งเหล่านี้จะถูกแยกออกจาก d_{sort} จำนวนของบิตที่ถูกเก็บเป็นไปตามการประยุกต์ใช้งาน

ขั้นตอนการเข้ารหัส (Encoder)

1. ทำการหาทุกเซลล์ตามกระบวนการฝังครอส
2. สำหรับแต่ละเซลล์คำนวณดังนี้
 - 2.1) ค่าการทำนาย u' ใหม่โดยใช้สมการ (13)
 - 2.2) สัมประสิทธิ์ค่าถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสม w_w, w_e, w_n, w_s โดยใช้สมการ (12)
 - 2.3) ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย (PE) d โดยใช้สมการ (2)
 - 2.4) ค่าความแปรปรวนในพื้นที่ใกล้เคียง μ โดยใช้สมการ (12)
3. เรียงลำดับเซลล์ตามค่าความแปรปรวนในพื้นที่ใกล้เคียง μ และสร้างแถวของค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายที่ถูกเรียง d_{sort} โดยข้าม 54 ตำแหน่งแรก เก็บค่าต้นฉบับ LSB 54 ตำแหน่งแรกของค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายไว้ที่ S_{LSB} เซต และรวม S_{LSB} เซตเป็นส่วนหนึ่งของเพโพลด์
4. หาค่าขีดแบ่งที่เหมาะสมสำหรับ T_{nCross} (ค่าขีดแบ่งเชิงลบ) และ T_{pCross} (ค่าขีดแบ่งเชิงบวก) ตามขนาดของเพโพลด์ P_{Cross} โดยใช้แถว d_{sort} ที่ถูกเรียงตาม [8]
5. แยกเซลล์ในเซตที่สามารถฝังได้ (Expandable set: E) และเซตที่สามารถเลื่อนได้ (Shiftable set: S) และสร้างพื้นที่แมป (location map: L) สำหรับแต่ละเซลล์เริ่มต้นจากตำแหน่งที่ 55 ตามลำดับเซลล์ที่ถูกเรียงตาม [4]

5.1) ตรวจสอบสถานะสำหรับความเป็นไปได้ของปัญหา Overflow และ Underflow (ในแต่ละกรณี ET(a) ET(b) และ ET(c)) ตาม [8] ถ้าพบว่าอยู่ในกลุ่ม ET(b) และ ET(c) ให้เก็บพื้นที่แมป แต่ถ้าเซลล์เป็น ET(a) ให้ไปขั้นตอนที่ 5.3

5.2) ตรวจสอบสำหรับเซลล์ที่สามารถขยายได้ หนึ่งเซลล์ปัจจุบันอยู่ในเซตที่สามารถขยายได้ E และเซตที่สามารถเลื่อนได้ S (เฉพาะเซตเหล่านี้) ถ้าเซลล์อยู่ในกลุ่มของเซตที่สามารถขยายได้ E และอยู่ในกรณี ET (b) ให้ย้ายเซลล์เหล่านี้จากเซตที่สามารถขยายได้ไปที่เซตพิเศษ S_{OPE}

5.3) ถ้าเซลล์ปัจจุบัน คือ เซลล์สุดท้าย และเงื่อนไข $|P_{Cross}| + |L| = |E|$ ไม่ถูกพบ ให้เพิ่มขนาดของค่าขีดแบ่ง $|T_{nCross}|$ หรือ $|T_{pCross}|$ และกลับไปทำซ้ำขั้นตอนที่ 5 อีกครั้ง ถ้าเงื่อนไขถูกพบให้ไปต่อในขั้นตอนที่ 6

6. ทำการฝังเพโพลด์ P_{Cross} และพื้นที่แมป L ลงในเซตที่สามารถขยายได้ E โดยใช้อัลกอริทึมการเลื่อนฮิสโตแกรมในการเข้ารหัส (ดูหัวข้อที่ 2.2) หนึ่งเซตของค่า PE ที่ถูกโมดิไฟล์

7. คำนวณพิกเซลที่ถูกโมดิไฟล์ U โดยใช้สมการที่ (4) จะได้ครอสเซตที่ถูกโมดิไฟล์

8. โมดิไฟล์ค่า LSB 54 ตำแหน่งแรกของค่า PE ที่แยกออกมาในขั้นตอนที่ 3 โดยแทนด้วยเลขฐานสองของค่าสัมประสิทธิ์ถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสม w_w, w_e, w_n, w_s ค่าขีดแบ่ง T_{nCross}, T_{pCross} และขนาดของ $|P_{Cross}|$

ผลลัพธ์ของกระบวนการฝังครอส พิกเซล v จากดอทเซตจะไม่ถูกเปลี่ยน และพิกเซลที่ถูกโมดิไฟล์ U จากครอสเซต (ดูลูกศรชี้คู่กันของ “ดอท” และ “ครอส” ตามลำดับ ในรูปที่ 4)

กระบวนการฝังดอทถูกออกแบบตามการฝังครอส รูปแบบการฝังดอทใช้พิกเซลที่ถูกโมดิไฟล์จากครอสเซตสำหรับคำนวณค่าการทำนาย และพิกเซลต้นฉบับจากดอทเซต (ในรูปที่ 1 ฝั่งขวา) สำหรับการฝังข้อมูล ผลลัพธ์เอาต์พุตของรูปแบบการฝังดอท คือ ตำแหน่งในดอทเซต และในครอสเซตจะถูกโมดิไฟล์ (ดูจากลูกศรที่ชี้เส้นทางการเข้ารหัสที่มีการฝัง “Dot_m” และ “Cross_m” ในรูปที่ 4) ซึ่งก็คือ ภาพที่ถูกฝังข้อมูลแล้ว Dot_m ถูกฝังลงในดอทเซต และ Cross_m ถูกฝังลงในครอสเซต

กระบวนการถอดรหัสแบบ FCP คือ การทำย้อนกลับของกระบวนการเข้ารหัส (ดูส่วนของการถอดรหัสในรูปที่ 4) การคำนวณสำหรับกระบวนการครอส และดอทของการถอดรหัสมีรูปแบบที่เหมือนกัน ผู้วิจัยจะอธิบายเพียงกระบวนการถอดรหัสในครอส

ขั้นตอนการถอดรหัส (Decoder)

1. ทำตามขั้นตอนที่ 1 และ 2 ของกระบวนการเข้ารหัสครอส

2. เรียงลำดับเซลล์ตามค่าความแปรปรวนในพื้นที่ใกล้เคียง μ และเมื่อได้รับเซตของค่า PE ที่ถูกเรียงลำดับ d_{sort} ให้นำจำนวนค่า LSB 54 ตำแหน่งแรกจาก d_{sort} และก๊อปปี้สัมประสิทธิ์ค่าถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสม w_w, w_e, w_n, w_s ค่าขีดแบ่ง T_{pCross} และ T_{nCross} และขนาดของเพโหลด $|P_{Cross}|$ โดยข้าม 54 เซลล์แรกที่ถูกเรียงลำดับ

3. แยกเซลล์ในเซตที่สามารถฝังได้ E และเซตที่สามารถเลื่อนได้ S ตามสัมประสิทธิ์ค่าถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสม w_w, w_e, w_n, w_s ค่าขีดแบ่งที่เหมาะสม T_{pCross} และ T_{nCross} และขนาดของเพโหลด $|P_{Cross}|$

4. ค้นหาเซลล์ที่มีปัญหาโดยใช้การทดสอบการถอดรหัสสำหรับ Overflow/Underflow และกำจัดตำแหน่งเหล่านั้นออกจาก E เซต และ S เซต ตาม [8]

5. ใช้วิธีการเลื่อนบิตโปรแกรมของการถอดรหัส เพื่อก๊อปปี้ต้นฉบับค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย d พื้นที่แมป L และเพโหลด P_{Cross} กำจัดเซต S_{LSB} จากเพโหลด P_{Cross} ตาม [8]

6. ทำการก๊อปปี้ต้นฉบับค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย d จากเซลล์ที่มีปัญหา โดยใช้การถอดรหัสของวิธีการเลื่อนบิตโปรแกรมตามพื้นที่แมป L อ้างอิงตาม [4]

7. คำนวณต้นฉบับพิกเซล u_{ij} โดยใช้สมการที่ (8)

8. วางค่า LSB 54 ตำแหน่งแรกของค่า PE ที่ถูกเรียงกับต้นฉบับ LSB จากเซต S_{LSB} ลงตำแหน่งเดิม เป็นอันเสร็จสิ้นกระบวนการถอดรหัส

4. ผลการทดลอง

ผู้วิจัยทดสอบวิธีการที่นำเสนอเกี่ยวกับภาพมาตรฐานระดับเทาที่แตกต่างกันสี่ภาพประกอบด้วย Lena, Barbara, Airplane และ Mandrill ภาพเหล่านี้มีขนาด 512x512 พิกเซล ซึ่งดาวน์โหลดมาจากฐานข้อมูล [17] ประสิทธิภาพของกระบวนการฝังข้อมูลที่นำเสนอถูกวัดผลสำหรับความบิดเบือนโดยใช้ค่า PSNR กระบวนการทั้งหมดถูกทดสอบโดยคอมพิวเตอร์ PC CPU Core i7-7700HQ 2.8GHz, RAM 4 GB, HDD 256 GB บนระบบปฏิบัติการ Windows 10 Pro 64 bit ประมวลผลโดยใช้โปรแกรม MATLAB เวอร์ชัน R2016a ผู้วิจัยแยกการทดสอบออกเป็น 2 ชุด ประกอบด้วย การฝังเพโหลดขนาดใหญ่

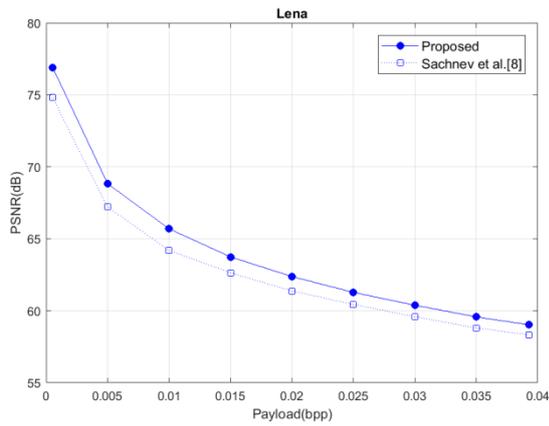
ตารางที่ 1 ตัวอย่างสำหรับสี่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสมกับสี่ภาพระดับมาตรฐานระดับเทาที่การฝัง 10,000 บิต

Weight (W)	Lena(512x512)		Barbara(512x512)		Mandrill(512x512)		Airplane(512x512)	
	Cross	Dot	Cross	Dot	Cross	Dot	Cross	Dot
W_w	0.4007	0.4087	0.5850	0.5889	0.4060	0.0800	0.2558	0.2574
W_e	0.3994	0.4073	0.5911	0.5848	0.4081	0.0763	0.2308	0.2301
W_n	0.0997	0.0919	-0.0853	-0.0882	0.0940	0.4214	0.2429	0.2396
W_s	0.1006	0.0928	-0.0898	-0.0846	0.0928	0.4246	0.2720	0.2743

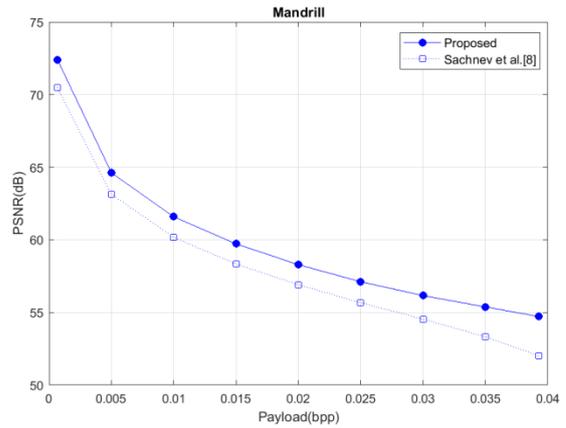
ดังแสดงในรูปที่ 9-12 และการฝังเพโหลดขนาดเล็กดังแสดงในรูปที่ 5-8 การทดสอบสำหรับเพโหลดขนาดใหญ่จะเริ่มต้นการฝังที่ 10,000 บิต และเพิ่มขึ้นครั้งละ 10,000 บิต จนกว่าขนาดของความจุในภาพจะไม่เพียงพอสำหรับการฝังแล้วจึงหยุด ในส่วนของชุดเพโหลดขนาดเล็กจะเริ่มต้นการฝังที่ 140 บิต 500 บิต และเพิ่มครั้งละ 500 บิต จนกว่าจะถึงความจุสุดท้ายแล้วจึงหยุดเช่นเดียวกับเพโหลดขนาดใหญ่

ผลลัพธ์ในรูปที่ 5-8 แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการปรับปรุงที่ชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับงานก่อนหน้า [8] ซึ่งผลลัพธ์ค่า PSNR ที่ได้รับสูงกว่าในทุกขนาดของการฝัง และทุกภาพในการทดสอบ โดยเฉพาะภาพ Airplane ค่า PSNR ของวิธีการที่นำเสนอสูงกว่าวิธีการดั้งเดิม [8] เฉลี่ยประมาณ 2 dB สำหรับทุกการฝัง และประมาณ 1 dB สำหรับภาพ Lena และ Barbara สังเกต ความจุในช่วงแรก (การฝังเพโหลดขนาดเล็ก) ให้ผลลัพธ์ที่สูงมาก เนื่องจากการทำนายค่า PE ที่ถูกต้อง (หรือ $d = 0$) ถูกใช้ก่อน ซึ่งเมื่อฝังข้อมูลในส่วนนี้จะส่งผลโดยตรงต่อการบิดเบือนต่ำทำให้ค่า PSNR ที่ได้รับสูง ในรูปที่ 9 และ 12 สำหรับเพโหลดขนาดใหญ่มีค่า PSNR ที่สูงกว่างานดั้งเดิม [8] ในช่วงเริ่มต้นของการฝัง อันเนื่องมาจากจำนวน PE ที่ถูกต้องยังมีจำนวนที่มากพอในช่วงแรก ๆ ของการฝัง แต่เมื่อขนาดของการฝังที่สูงขึ้นผลลัพธ์ที่ได้จะไม่แตกต่างกัน พิจารณาต่อในรูปที่ 10 ผลลัพธ์จะดีเกือบทุกช่วงของการฝัง และในรูปที่ 11 (Airplane) ผลลัพธ์จะสูงมากในช่วง 40,000 บิตแรก สังเกตในช่วงปลายของกราฟสำหรับการฝังเพโหลดขนาดใหญ่ ผลลัพธ์ที่ได้รับจะไม่สูงกว่างานก่อนหน้า เนื่องจากพิกเซลที่มีค่า d ขนาดเล็กไม่เพียงพอสำหรับการฝัง d ที่มีขนาดใหญ่ถูกใช้

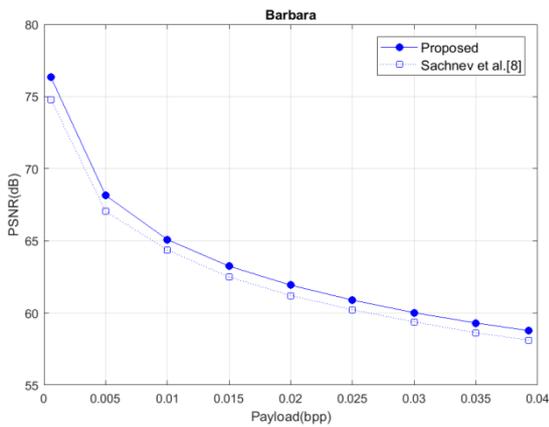
ในตารางที่ 1 ผู้วิจัยแสดงบางตัวอย่างสำหรับสี่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสมสำหรับรูปแบบการฝัง FCP โดยทดสอบกับเพโหลดขนาด 10,000 บิต อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าการปรับปรุงตัวทำนายจะเป็นสิ่งสำคัญสำหรับผลลัพธ์การบิดเบือนที่ต่ำ แต่ในกระบวนการส่วนอื่น ๆ เช่น การแบ่งเลย์เออร์ของภาพ การเรียงลำดับข้อมูล การเลื่อนบิตโปรแกรม หรือแม้กระทั่งการตรวจสอบพิกเซลก่อนการฝัง ยังคงต้องถูกปรับปรุงเพื่อให้ได้ผลลัพธ์สูงสุดที่เป็นไปได้



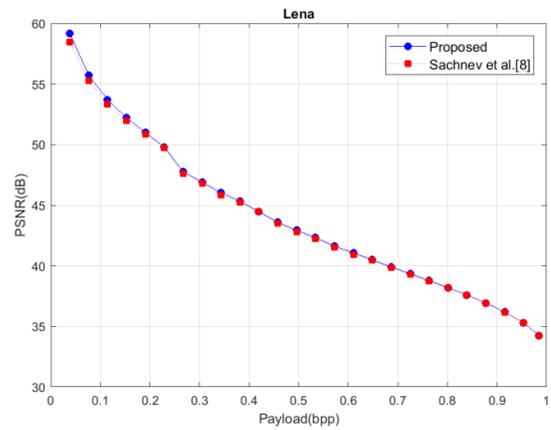
รูปที่ 5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในภาพ Lena สำหรับเพโหลดขนาดเล็ก



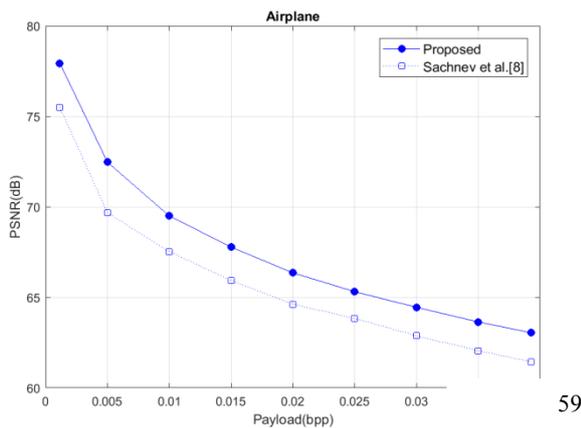
รูปที่ 8 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในภาพ Mandrill สำหรับเพโหลดขนาดเล็ก



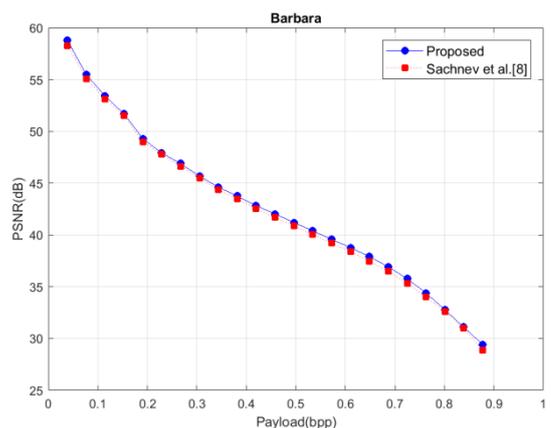
รูปที่ 6 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในภาพ Barbara สำหรับเพโหลดขนาดเล็ก



รูปที่ 9 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในภาพ Lena สำหรับเพโหลดขนาดใหญ่

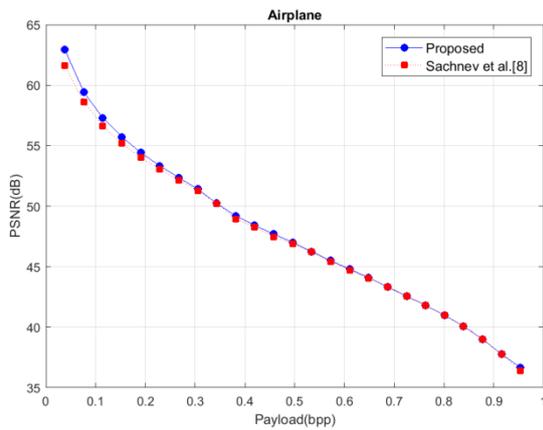


รูปที่ 7 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในภาพ Airplane สำหรับเพโหลดขนาดเล็ก

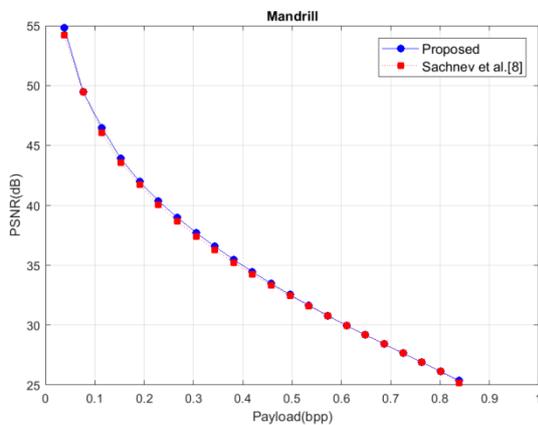


รูปที่ 10 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในภาพ Barbara สำหรับเพโหลดขนาดใหญ่

59



รูปที่ 11 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในภาพ Airplane สำหรับเพโหลดขนาดใหญ่



รูปที่ 12 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในภาพ Mandrill สำหรับเพโหลดขนาดใหญ่

อย่างไรก็ตาม การใช้ค่าถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสมสำหรับสี่ตำแหน่งเพื่อทำนายค่า PE ที่ถูกต้อง มีข้อจำกัดอยู่หลายประการ ประการแรก สี่ตำแหน่งถูกออกแบบให้คงที่เพื่อใช้กับทุกภาพ และทุกขนาดของการฝัง ซึ่งในบางภาพควรใช้สองตำแหน่ง บางภาพควรใช้มากกว่าสี่ตำแหน่ง ประการต่อมา การเพิ่ม หรือ ปรับปรุงกระบวนการ นั้นอาจหมายถึงเวลาในการประมวลผลที่จะสูงขึ้นตามความซับซ้อนของวิธีการที่เพิ่มเข้าไป เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีขึ้น การคำนึงถึงความเหมาะสมของวิธีการยังคงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการประยุกต์ใช้งานจริง

5. สรุป

ในงานวิจัยฉบับนี้ นำเสนอการปรับปรุงตัวทำนายโลมบัสแบบดั้งเดิมบนพื้นฐานกระบวนการฝังแบบ FCP โดยใช้การถ่วงน้ำหนักแบบเชิงเส้นเพื่อให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์ที่เหมาะสมและให้ผลลัพธ์ PSNR สูงสุดที่เป็นไปได้ในทุกภาพ และทุกขนาดของการฝัง ผลลัพธ์ถูกเปรียบเทียบกับงานในอดีตก่อนหน้า วิธีการที่นำเสนอปรับปรุงการบิดเบือนได้ต่ำกว่างานต้นฉบับโดยเฉพาะ

อย่างยิ่งที่เพโหลดขนาดเล็ก สำหรับแนวทางการพัฒนาต่อตัวทำนายแบบที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ตามลักษณะของภาพ และขนาดของฝังอาจถูกนำมาประยุกต์ใช้แทนที่ตัวทำนาย IR-LWF ร่วมกับการแบ่งภาพออกเป็นสี่เหลี่ยมเพื่อให้ได้ขนาดการฝังที่สูงขึ้น ในขณะที่ความบิดเบือนลดลง หรือ เท่าเดิม

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ สำหรับทุนสนับสนุนการทำวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Tian, J. (2003). Reversible data embedding using a difference expansion. *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol*, 13(8), 890–896.
- [2] Alattar, A.M. (2003). Reversible watermark using difference expansion of triplets, in *Proc. IEEE Int. Conf. Image Process. IEEE International Conference on Image Processing, Catalonia, Spain, vol. 1*, 501–504.
- [3] Alattar, A.M. (2004). Reversible watermark using the difference expansion of a generalized integer transform. *IEEE Trans. Image Process.* 13, 1147–1156.
- [4] Thodi, D.M., Rodriguez, J.J. (2007). Expansion embedding techniques for reversible watermarking. *IEEE Trans. Image Process* 16(3), 721–730.
- [5] Weinberger, M.J., Seroussi, G., Sapiro, G. (2000). The LOCO-I lossless image compression algorithm: principles and standardization into JPEG-LS. *IEEE Trans. Image Process.* 9(8), 1309–1324.
- [6] Chen, M., Chen, Z., Zeng, X., Xiong, Z. (2010). Model order selection in reversible image watermarking. *IEEE J. Sel. Top. Signal Process.* 4(3), 592–604.
- [7] Wu, X., Memon, N. (1997). Context-based, adaptive, lossless image coding. *IEEE Trans. Commun.* 45(4), 437–444.
- [8] Sachnev, V., Kim, H.J., Nam, J., Suresh, S., Shi, Y.Q. (2009). Reversible watermarking algorithm using sorting and prediction. *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.* 19(7), 989–999.

- [9] Dragoi, I.C., Coltuc, D. (2014). Local-prediction-based difference expansion reversible watermarking. *IEEE Trans. Image Process.* 23(4), 1779–1790.
- [10] Hwang, H.J., Kim, H.J., Sachnev, V., Joo, S.H. (2010). Reversible watermarking method using optimal histogram pair shifting based on prediction and sorting. *KSII, Trans. Internet Inform. Syst.* 4(4), 655–670.
- [11] Kang, S.U., Hwang, H.J., Kim, H.J. (2012) Reversible watermark using an accurate predictor and sorter based on payload balancing. *ETRI J.* 34(3), 410–420.
- [12] Feng, G., Qian, Z., Dai, N. (2012). Reversible watermarking via extreme learning machine prediction. *Neuro computing* 82(1), 62–68.
- [13] Luo, L., Chen, Z., Chen, M., Zeng, X., Xiong, Z. (2010). Reversible image watermarking using interpolation technique. *IEEE Trans. Inf. Forensics Secur.* 5(1), 187–193.
- [14] Kamstra, L.H.J., and Heijmans, A.M. (2005). Reversible data embedding into images using wavelet techniques and sorting. *IEEE Trans. Image Process.*, 14(12), 2082–2090.
- [15] Yang, W.Y., Cao, W., Chung, T.S., and Morris, J. (2005). *Applied Numerical Methods Using MATLAB*, New Jersey: A John Wiley and Sons.
- [16] Panyindee, C., Pintavirooj, C. (2014). Reversible Data Hiding Scheme Using Optimal Weight Predictor Based on DMT in Medical Imaging. in *Proc. IEEE Int. The 7th 2014 Biomedical Engineering International Conference*, 247.
- [17] Miscellaneous Gray Level Images (512 X 512). <http://decsai.ugr.es/cvg/dbimagenes/g512.php>. [Accessed: Oct. 11, 2013].