Một phương pháp giấu tin thuận nghịch có khả năng nhúng cao sử dụng kỹ thuật ảnh kép và hệ tính toán cơ số 13.

Phạm Minh Thái[1], Lê Kinh Tài[2], Nguyễn Hiếu Cường[3*], Nguyễn Quang Chánh[1]
[1]Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp, 456 Minh Khai, Hà Nội, Việt Nam
[2]Trường Đại học Công đoàn, 169 Tây Sơn, Đống Đa, Hà Nội, Việt Nam
[3]Trường Đại học Giao thông Vận tải, số 3 Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

Tác giả liên hệ: Nguyễn Hiếu Cường. Email: cuongnh@utc.edu.vn
Ngày nhận bài: 18/03/2025, ngày sửa chữa: 24/04/2025, ngày duyệt đăng: 22/05/2025
DOI: 10.32913/mic-ict-research-vn.v2025.n1.1364

Tóm tắt: Phương pháp Chen và cộng sự [1] đề xuất một sơ đồ RDH mới dựa trên khai thác biến đổi theo hướng (EMD) với hình ảnh kép. Nhờ khai thác các đặc tính của ma trận EMD, một bit và một chữ số cơ số 5 có thể được giấu trong một ảnh gốc để tạo ra một cặp điểm ảnh chứa thông điệp. Dữ liệu sẽ được nhúng trên 1 trong 4 hướng, trong đó các tác giả nhúng thêm được 1 bit ngoài việc nhúng 1 hệ cơ số 5, nên tỷ lệ nhúng $\frac{\log_2 5+1}{2} = 1.66$ bpp. Để tăng khả năng nhúng, chúng tôi đề xuất một phương pháp nhúng dựa trên cơ sở số 13. Vì vậy, tỷ lệ nhúng có thể gần bằng: $\frac{\log_2 13}{2} = 1.8502$ bpp. Ngoài ra, số lượng ảnh biến đổi trong phương pháp giải quyết vấn đề xuất ra nhỏ hơn, nên chất lượng ảnh tốt hơn phương pháp của Chen và cộng sự.

Từ khóa: *giấu tin thuận nghịch, ảnh kép, hệ tính toán cơ số 13, PSNR, ER.*

Title: **A Reversible Steganography with High Embedding Capacity using Dual Image Technique and Base 13 Calculation System**

Abstract: Chen et al. [1] proposed a new RDH scheme based on the extraction of directional transformations (EMD) with dual images. By exploiting the properties of the EMD matrix, a bit of the password and a base 5 number can be hidden in an original image to generate a pair of pixels containing relaxation. The data will be embedded in 1 of 4 instructions, in which the authors embed 1 more aromatic in addition to embedding 1 base 5, so the embedding ratio is $\frac{\log_2 5+1}{2} = 1.66$ bpp. To increase the embedding capacity, we propose an embedding method based on base 13. Therefore, the embedding ratio can be developed by using: $\frac{\log_2 13}{2} = 1.8502$ bpp. In addition, the number of image transformations in the output problem solving method is smaller, so the image quality is better than the method of Chen et al.

Keywords: *reversible data hidding, dual-image, base 13 number system, PSNR, ER.*

I. GIỚI THIỆU

Việc truyền thông tin qua Internet và lưu trữ trên "đám mây" ngày càng được áp dụng rộng rãi. Thế nhưng, Internet và "đám mây" dễ bị tin tặc xâm phạm, nên việc bảo vệ thông tin mật là một yêu cầu quan trọng. Mã hóa dữ liệu và giấu tin trên các tệp đa phương tiện là hai giải pháp bảo mật quan trọng. Trong mã hóa, dữ liệu gốc (bản rõ) bị biến đổi thành một dãy ký tự lạ (bản mã), khiến tin tặc không thể biết ý nghĩa của chúng. Tuy nhiên, tin tặc dễ dàng nhận ra bên trong các ký tự lạ có thể chứa dữ liệu quan trọng, khiến chúng cố gắng thám mã. Đây là nhược điểm của phương pháp mật mã [2]. Theo hướng giấu tin, thông tin mật được giấu vào các tệp ảnh; sau đó ảnh chứa tin được chuyển đi và người nhận hợp pháp có thể lấy thông tin từ ảnh được gửi cho họ. Vì ảnh ban đầu và ảnh gửi đi không thể phân biệt được, nên sẽ dễ dàng qua mặt tin tặc.

Các thuật toán giấu tin không thuận nghịch, như [3–6], chỉ có thể lấy dữ liệu đã giấu mà không thể tái tạo được ảnh ban đầu. Vì vậy, phạm vi ứng dụng của chúng bị hạn chế trong nhiều trường hợp cần tái tạo ảnh gốc. Do đó, các kỹ thuật giấu tin có khả năng phục hồi (reversible) hoặc không mất dữ liệu (lossless), thường được gọi chung là RDH (Reversible Data Hiding), đã ra đời và ngày càng được hoàn thiện.

Trong giai đoạn đầu, các phương pháp RDH chủ yếu dựa trên việc nén không tổn hao các bit có trọng số thấp trong ảnh. Các kỹ thuật này có khả năng nhúng thấp vì hiệu quả nén các bit thấp không cao. Mở rộng hiệu số, viết tắt là DE (Difference Expansion) của Tian [7], là kỹ thuật đáng chú ý đầu tiên. Trong đó, hiệu của một cặp hai điểm lân cận được dịch chuyển sang trái để một bit được chèn vào bên phải. Tuy DE có thể nhúng được nhiều bit, nhưng các điểm ảnh bị biến đổi nhiều, nên ảnh chứa tin có chất lượng thấp. Phương pháp DE được nhiều người cải tiến và mở rộng nhằm nâng cao độ trung thực hình ảnh đồng thời tăng dung lượng nhúng dữ liệu như [8–10].

Sau đó, kỹ thuật dịch chuyển histogram của Ni và cộng sự [11], gọi là HS (Histogram Shifting), có thể xem như phương pháp đáng chú ý thứ hai sau DE. Trong HS, histogram của ảnh được xây dựng. Hai giá trị đỉnh histogram có tần suất xuất hiện cao nhất được xác định lần lượt là PeakL (giá trị nhỏ hơn) và PeakR (giá trị lớn hơn). Các pixel trong ảnh được dịch chuyển về phía trái của PeakL và về phía phải của PeakR nhằm tạo ra các vùng trống tại hai vị trí đỉnh này; chúng sẽ được dùng để chứa dữ liệu. Trong HS, mỗi phần tử ảnh chỉ bị biến đổi một đơn vị nên chất lượng ảnh sau khi nhúng tin khá cao. Số bit có thể nhúng trong HS bằng tổng số lần xuất hiện tại PeakL và PeakR; tổng này nói chung không lớn, vì đa số ảnh tự nhiên có histogram không nhọn nên các giá trị PeakL và PeakR thường nhỏ. Kỹ thuật mở rộng hiệu số và dịch chuyển biểu đồ tần suất, với những đặc tính ưu việt, thường được ứng dụng làm nền tảng để phát triển nhiều thuật toán RDH khác nhau [12–20].

Yếu điểm của các kỹ thuật RDH là dung lượng nhúng không cao. Xuất phát từ nhu cầu thực tế đó, nhiều giải pháp RDH sử dụng ảnh kép đã ra đời và không ngừng được hoàn thiện. Các kỹ thuật này tạo hai bản sao từ ảnh gốc; cả hai đều được dùng để chứa dữ liệu, nên khả năng nhúng của chúng vượt trội so với các phương pháp RDH thông thường. Độ trung thực hình ảnh của các phương pháp này cũng rất cao vì độ biến đổi của các bản sao thường không nhiều. Ngoài ra, độ an toàn của chúng cũng rất cao vì phải biết cả hai bản sao ảnh chứa tin thì mới có thể trích xuất dữ liệu. Các phương pháp RDH ảnh kép có thể chia thành một số kiểu sau:

Kiểu thứ nhất dùng cách gấp ở giữa (center folding strategy). Quy trình nhúng giá trị $d, (d \geq 0)$ vào điểm ảnh x được thực hiện bằng cách tách d thành hai thành phần: $u = \lfloor \frac{d}{2} \rfloor$ và $v = \lceil \frac{d}{2} \rceil$. Sau đó, hai điểm dùng để nhúng d được tính như sau: $x' = x + u$ và $x'' = x - v$. Rõ ràng, x có thể được khôi phục bằng công thức: $x = \lceil \frac{x'+x''}{2} \rceil$.

Kiểu thứ hai [21, 22]: cặp điểm ảnh ban đầu được kết hợp và biểu diễn dưới dạng một điểm P trên hệ tọa độ. Một hình vuông mỗi chiều 3 đơn vị, có tâm là điểm P, được tạo ra. Các cặp điểm giấu tin được chọn từ hai pixel liền kề trong hình vuông. Với 25 tổ hợp khả thi, các phương pháp này có khả năng nhúng hơn 4 bit trên mỗi cặp pixel, tương đương tỷ lệ nhúng trung bình lớn hơn 1 bit/pixel (bpp). Do các cặp pixel dùng để giấu tin đều nằm kề cặp pixel gốc P, mỗi giá trị điểm ảnh chỉ bị biến đổi tối đa một đơn vị, nhờ đó đảm bảo chất lượng hình ảnh sau khi nhúng luôn ở mức cao.

Kiểu thứ ba sử dụng hàm khai thác biến đổi hướng (EMD – Exploiting Modification Direction) để xây dựng một ma trận hàm với kích thước 256×256, tương ứng với không gian điểm ảnh 256×256. Mỗi cặp hai điểm ảnh được xem như một điểm (phần tử) trên ma trận hàm. Hai cặp điểm ảnh nhúng tin được xác định như những điểm trên ma trận hàm. Mặc dù cho dung lượng nhúng lớn, các kỹ thuật RDH dựa trên hàm EMD cho hai ảnh [1, 23–25] thường dẫn đến suy giảm chất lượng hình ảnh đáng kể.

Gần đây, Chen và cộng sự trình bày một phương pháp nhúng tin thuận nghịch trên hai ảnh bằng cách kết hợp EMD và việc chọn một trong bốn hướng (trái, phải, trên, dưới), đạt được khả năng nhúng cao (ER = 1.66), nhưng độ biến đổi tối đa của một ảnh lớn (khoảng 5 đơn vị). Phương pháp này được xem như một trong các phương pháp ảnh kép có khả năng nhúng cao nhất.

Phương pháp đề xuất của chúng tôi sử dụng 13 tổ hợp nhúng dữ liệu trên một điểm ảnh, nên ER có thể đạt xấp xỉ bằng $(\log_2 13)/2 = 1.8502$, tức là cao hơn so với phương pháp của Chen. Ngoài ra, độ biến đổi tối đa của mỗi ảnh là 3 đơn vị, nên chất lượng ảnh cao hơn phương pháp của Chen.

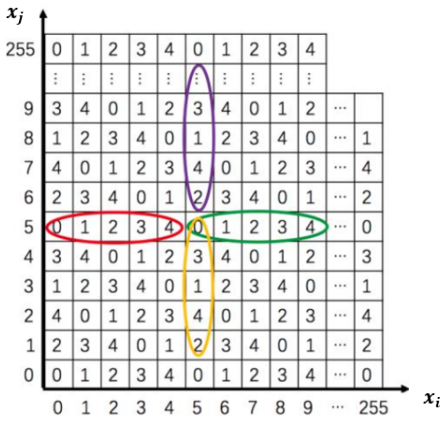
Bài báo được tổ chức như sau. Mục II trình bày phương pháp của Chen và cộng sự [1]. Phương pháp đề xuất được giới thiệu ở mục III. Mục IV trình bày kết quả thử nghiệm trên 12 ảnh để so sánh khả năng nhúng và chất lượng ảnh của phương pháp đề xuất với phương pháp của Chen và cộng sự [1]. Kết luận được đưa ra ở mục IV.

II. PHƯƠNG PHÁP CHEN VÀ CỘNG SỰ

Chen và cộng sự [1] đã đề xuất một sơ đồ giấu tin thuận nghịch trên hai ảnh sử dụng biến đổi theo hướng (EMD) và cho khả năng nhúng cao. Đầu tiên, tác giả xây dựng một ma trận tham chiếu EMD có kích thước 256×256 như Hình 1; ma trận này được xây dựng theo Công thức (1) như sau:

$$f(x_i, x_j) = (x_i + 2x_j) \bmod 5 \quad (1)$$

Phương pháp này nhúng trên cặp điểm ảnh (x_i, x_j), với điều kiện $5 \leq x_i, x_j \leq 251$. Trong phương pháp này, mỗi đoạn trong Hình 1 có độ dài là 5. Việc nhúng dữ liệu được thực hiện theo một trong bốn hướng; nhờ có bước lựa chọn này, tác giả nhúng thêm được 1 bit ngoài việc nhúng theo



Hình 1. Ma trận tham chiếu EMD E

một hệ cơ số 5. Các phương pháp khác thường chỉ nhúng dữ liệu dựa trên ma trận này.

1. Thuật toán nhúng tin trên một cặp điểm ảnh

Đầu vào: Ảnh X có kích thước $M \times N$, dãy bit dữ liệu $B = (b_1, \cdots, b_s)$

Đầu ra: Ảnh X',X''

Phương pháp:

B1: Xây dựng ma trận tham chiếu EMD E như Hình 1. Tạo một dãy bit nhị phân ngẫu nhiên $r_1, r_2, \cdots, r_K$ với $(K = M \times N)$.

B2: Chia các thông điệp bí mật B thành 2 thành phần:

∗ Một thành phần chuyển sang hệ cơ số 5 kí hiệu là $d_1,\ d_2, \cdots, d_K\ \ (d_i = 0 \rightarrow 4)$.

∗ Chọn 1 bit bí mật b_i và một chữ số hệ cơ số 5 d_i tạo thành 1 cặp (d_i, b_i).

∗ Nhận xét rằng những điểm ảnh x_i từ ảnh X, mà $x_i \in [0,\ 4]$ hoặc $x_i \in [252,\ 255]$ thì x_i không nhúng và giá trị được giữ nguyên vào X', X'' ở cùng 1 ví trí.

∗ Liệt kê tất cả các cặp ảnh liên tiếp $(x_i, x_j), 5 \leq x_i,\ x_j \leq 251$.

∗ Xét nếu số ngẫu nhiên $r_i = 0$, thì lấy theo chiều ngang:

- Nếu bit nhị phân $b_i = 0$ lấy về phía bên trái.
- Nếu bit nhị phân $b_i = 1$ lấy về phía bên phải.

∗ Nếu số ngẫu nhiên $r_i = 1$, thì lấy theo chiều dọc:

- Nếu bit nhị phân $b_i = 0$ lấy về phía bên dưới.
- Nếu bit nhị phân $b_i = 1$ lấy về phía bên trên.

∗ Ví dụ xét 1 bit đầu tiên b_1:

- Nếu $r_1 = 0$ và $b_1 = 0$ thì nhúng vào đoạn bên trái.
- Nếu $r_1 = 0$ và $b_1 = 1$ thì nhúng vào đoạn bên phải.
- Nếu $r_1 = 1$ và $b_1 = 0$ thì nhúng vào đoạn bên dưới.
- Nếu $r_1 = 1$ và $b_1 = 1$ thì nhúng vào đoạn bên trên.

∗ Ví dụ: Cho $x = (5,\ 5)$, bit bí mật 0100 và $r = 0$:

- $r = 0$ và $b_1 = 0$ nên lấy đoạn bên trái.
- $d = 100_2 = 4_{10}$.

Dựa vào Hình 1 với $d = 4$, $x = (5, 5)$ ta có $x' = 4$, $x'' = 5$.

2. Thuật toán trích tin và khôi phục ảnh

Đầu vào: Ảnh X', X'', một dãy bit nhị phân ngẫu nhiên $r_1,\ r_2, \cdots, r_K, (K = M \times N)$.

Đầu ra: Ảnh X, dãy bit dữ liệu B.

Phương pháp:

∗ Tất cả các cặp điểm ảnh đều làm giống nhau nên ở đây xét đại diện 1 cặp điểm ảnh $(x'_i,\ x''_j)$.

∗ Với r_i xét giống như thuật toán nhúng tin.

∗ Nếu $x'_j < x''_j$ lấy đoạn bên trái ta được b_i và tra theo Hình 1 được d_i.

∗ Nếu $x'_j \geq x''_j$ lấy đoạn bên phải ta được b_i và tra theo Hình 1 được d_i.

∗ Nếu $x'_i = x''_j$ và thuộc đoạn [0, 4] hoặc đoạn [252, 255] thì $x_i = x'_i = x''_j$.

∗ Nhận xét trong x'_i hoặc x''_j phải có 1 cái bằng x_i.

- Nếu $5 \leq\ x'_i \leq 251$ thì $x_i = x'_i$.
- Ngược lại $x_i = x''_i$.

∗ Ví dụ như trên:

Đã có $x' = 4, x'' = 5$ và $r = 0$

- Xét thấy $x' < x''$ và $r = 0$ nên $b_1 = 0$.
- Dựa vào Hình 1 với $b_1 = 0$, $x' = 4, x'' = 5$ ta được $d = 4_{10} = 100_2$.
- Từ đây thu được dãy bit bí mật là: 0100
- Thấy $x' < 5$ nên suy ra $x = x'' = 5$. Vậy $x = (5, 5)$

∗ Nhận xét rằng theo phương pháp của Chen và cộng sự [1] thì khả năng nhúng là: $\log_2 5 + 1 = 3.32$ bit và tỷ lệ nhúng $ER = \frac{\log_2 5+1}{2} = \frac{3.32}{2} = 1.66$ bpp.

III. PHƯƠNG PHÁP ĐỀ XUẤT

1. Nhúng một chữ số hệ cơ số 13 trên một điểm ảnh

∗ Vì cơ chế nhúng áp dụng tương tự cho từng điểm ảnh, chúng tôi chỉ cần mô tả thuật toán cho một điểm ảnh đại diện. Ở đây, chúng tôi sẽ nhúng vào 1 điểm ảnh gọi là x để được 2 điểm ảnh chứa tin gọi là x' và x''.

∗ Chúng tôi đề xuất công thức nhúng như sau:

$$x' = x + a, x'' = x + b \tag{2}$$

Với điều kiện như sau:

- Điều kiện 1: $-3 \leq a, b \leq 3$.

Bảng I
QUY TẮC NHÚNG CỦA THUẬT TOÁN ĐỀ XUẤT

d	a	b	x'	x''	$x' - x''$
0	-3	3	x - 3	x + 3	-6
1	-3	2	x - 3	x + 2	-5
2	-2	2	x - 2	x + 2	-4
3	-2	1	x - 2	x + 1	-3
4	-1	1	x - 1	x + 1	-2
5	-1	0	x - 1	x	-1
6	0	0	x	x	0
7	0	-1	x	x - 1	1
8	1	-1	x + 1	x - 1	2
9	1	-2	x + 1	x - 2	3
10	2	-2	x + 2	x - 2	4
11	2	-3	x + 2	x - 3	5
12	3	-3	x + 3	x - 3	6

- Điều kiện 2: $\lceil \frac{a+b}{2} \rceil = 0$. Từ đây, chúng tôi sẽ xây dựng được Bảng I như sau:

$*$ Ví dụ: Cho $x = 125$ và $d = 10$.

Tra theo Bảng I ta được:

$x' = 125 + 2 = 127$

$x'' = 125 - 2 = 123$

Từ Bảng I, ta có thể khái quát hoá công thức tổng quát cho quy tắc nhúng như sau:

$*$ Điều kiện cơ bản:

- Giá trị điểm ảnh gốc: x

- Giá trị điểm ảnh sau khi nhúng: x' và x''.

- Chữ số hệ cơ số 13 cần nhúng: $d \in 0,\ 1,\ 2,\ \cdots, 12$.

- Độ dịch chuyển a và b thỏa mãn điều kiện 1 và 2 của công thức 2.

$*$ Công thức xác định a và b:

Ta có thể biểu diễn a và b dựa trên giá trị d như sau:

$$a = \begin{cases} -3 & \text{nếu } d \in \{0, 1\}, \\ -2 & \text{nếu } d \in \{2, 3\}, \\ -1 & \text{nếu } d \in \{4, 5\}, \\ 0 & \text{nếu } d \in \{6, 7\}, \\ 1 & \text{nếu } d \in \{8, 9\}, \\ 2 & \text{nếu } d \in \{10, 11\}, \\ 3 & \text{nếu } d = 12, \end{cases}$$

và $b = d - a$

- Công thức tổng quát cho x' và x'' như công thức 2.

2. Xác định dãy bit cho một lần nhúng

Bước 1: Gọi k số pixel cho một lần nhúng. Như vậy mỗi 1 lần nhúng chúng ta sẽ nhúng được k chữ số hệ 13.

Bước 2: Gọi d là giá trị cực đại của cơ số hệ 13 với độ dài k, suy ra $d = 13^k - 1$.

Bước 3: Chuyển d thành hệ cơ số 2 suy ra ta được một giá trị nhị phân gọi là bd và có độ dài là ld (đây chính là số bit dữ liệu có thể nhúng).

Bước 4: Số nhị phân lớn nhất có độ dài ld là: $b_{max} = 2^{ld} - 1$

Bước 5: Số nhị phân nhỏ nhất có độ dài ld là: $b_{min} = 2^{ld-1}$

Bước 6:

- Lấy ra ld bit của dữ liệu bí mật. Sau đó chuyển dãy bit này sang hệ cơ số 10 gọi là bV

- Nếu $b_{min} \leq bV \leq d$ thì nhúng được ld bit dữ liệu.

- Nếu $0 \leq bV < b_{min}$ hoặc $d < bV \leq b_{max}$ thì nhúng được ld - 1 bit dữ liệu.

3. Thuật toán nhúng tin

Đầu vào: Ảnh X, dãy bit dữ liệu $B = (b_1, \cdots, b_{s)}$

Đầu ra: Ảnh X', X''

Các bước chỉnh:

Bước 1: Liệt kê liên tiếp tất cả các điểm ảnh x với $3 \leq x \leq 252$, ta được k điểm ảnh cho 1 lần nhúng.

Bước 2: Nhúng ld bit hoặc $ld - 1$ bit của B vào k điểm ảnh theo thuật toán phần III.2

Bước 3: Nếu tất cả các bit đã được nhúng hoặc tất cả các điểm ảnh đã được xét thì dừng thuật toán. Ngược lại chuyển lên bước 1 thì nhúng tiếp.

4. Bài toán tràn số

- Nếu 1 điểm ảnh $x \notin [3,\ 252]$ thì việc nhúng 1 chữ số hệ 13 vào x theo phần III.1 có thể dẫn đến $x', x'' < 0$ hoặc $x', x'' > 252$, tức là ra ngoài điểm ảnh gọi là tràn trên/ tràn dưới.

- Để khắc phục điểm này thì $x' = x'' = x$

5. Phân tích khả năng nhúng ER

Để cho phương pháp có khả năng nhúng nhiều nhất thì ta sẽ tìm giá trị k ($k = 1 \rightarrow 20$) sao cho tỷ lệ nhúng đạt giá trị lớn nhất.

$$ER = \frac{L}{k \times 2} \tag{3}$$

trong đó, L là số bit trung bình (capacity):

$$L = \frac{\alpha \times ld + \beta \times (ld - 1)}{\alpha + \beta} \tag{4}$$

với

$$\begin{cases} \alpha = (d - b_{\min} + 1) \\ \beta = (b_{\max} - d) \end{cases}$$

Sau khi tính toán, phương pháp cho khả năng nhúng nhiều nhất với giá trị $k = 10$ như Bảng II sau:

Bảng II
KẾT QUẢ TỶ LỆ NHÚNG THEO k

k	**Số bit trung bình nhúng được**	ER
1	3.3125	1,6563
2	7.1602	1,7900
3	11.0364	1,8394
4	14.3716	1,7965
5	18.2082	1,8208
6	22.0754	1,8396
7	25.4350	1,8168
8	29.2597	1,8287
9	33.1173	1,8398
10	**37.0015**	**1,8501**
11	40.3150	1,8325
12	44.1622	1,8401
13	48.0380	1,8476
14	51.3743	1,8348
15	55.2103	1,8403
16	59.0772	1,8462
17	62.4379	1,8364
18	66.2620	1,8406
19	70.1191	1,8452
20	74.0031	1,8501

6. Độ đo PSNR

Độ đo $PSNR$ (Peak Signal to Noise Ratio) dùng để đánh giá chất lượng ảnh giữa ảnh A và B cùng kích thước được tính toán như sau:

$$PSNR(A, B) = 10 \log_{10} \left(\frac{255^2}{\mathrm{MSE}(A, B)} \right) \tag{5}$$

trong đó:

$$\mathrm{MSE}(A, B) = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} (a_{i,j} - b_{i,j})^2 \tag{6}$$

ở đây, $a_{i,j}$, $b_{i,j}$ là giá trị điểm ảnh gốc, ảnh giấu tin. M là số hàng và N là số cột của ảnh.

Như vậy, giá trị $PSNR\,(A, B)$ càng lớn thì hai ảnh A và B càng giống nhau.

7. Trích thông tin và khôi phục ảnh gốc

Đầu vào: Ảnh X',X''

Đầu ra: Ảnh X, dữ liệu bí mật B

Các bước chỉnh:

B1. Khôi phục điểm ảnh **x**:

∗ Khôi phục **x** theo công thức (7)

$$\mathbf{x} = \left\lceil \frac{\mathbf{x}' + \mathbf{x}''}{2} \right\rceil \tag{7}$$

∗ Chứng minh công thức (7)

$$\begin{aligned} \left\lceil \frac{x' + x''}{2} \right\rceil &= \left\lceil \frac{x + a + x + b}{2} \right\rceil \\ &= \left\lceil \frac{2x + a + b}{2} \right\rceil \\ &= \left\lceil x + \frac{a + b}{2} \right\rceil \\ &= x + \left\lceil \frac{a + b}{2} \right\rceil \\ &= x \end{aligned}$$

Vì x là số nguyên và $\left\lfloor \frac{a+b}{2} \right\rfloor = 0$ (theo điều kiện 2 công thức 2)

B2: Trích dữ liệu.

Tính giá trị $x' - x''$. Theo Bảng I, ta được giá trị của a và b, sau đó tìm hàng tương ứng, ta được giá trị d, suy ra giá trị đã nhúng.

8. Ví dụ về thuật toán nhúng tin

Ví dụ 1:

Cho khối ảnh X:

$$X = \begin{bmatrix} 12 & 8 & 10 & 20 \\ 6 & 9 & 5 & 55 \\ 10 & 12 & 7 & 85 \end{bmatrix}$$

Với $k = 10$ và dữ liệu bí mật B = [0010 0001 0111 1010 0001 0111 1010 0001 0111 10].

Cần nhúng dãy bit B vào X để có X' và X'':

Bước 1: Tính $d = 13^{10} - 1 = 137858491848$

Bước 2: Đổi d ra nhị phân ta được giá trị nhị phân có độ dài $ld = 38$ bit.

Bước 3: Số nhị phân lớn nhất có độ dài 38 bit là: $b_{max} = 2^{38} - 1 = 274877906943$.

Bước 4: Số nhị phân nhỏ nhất có độ dài 38 bit là: $b_{min} = 2^{37} = 137438953472$.

Bước 5:

Lấy 38 bit trong B là: "0010 0001 0111 1010 0001 0111 1010 0001 0111 10". Chuyển sang hệ 10 được $bV = 35945572446_{(10)}$. Thấy $bV < b_{min}$ nên theo thuật toán III.2 ta sẽ lấy 37 bit trong B là: "0100001011110100001011110100001011110". Đổi dãy bit này sang hệ 13 ta được 3 5 0 11 0 11 5 3 12 $4_{(13)}$. và nhúng tuần tự vào 10 điểm ảnh [12, 8, 10, 20, 6, 9, 5, 55, 10, 12] theo Bảng I.

Áp dung thuật toán theo Bảng I ta được kết quả theo Bảng III như sau:

Bảng III
KẾT QUẢ NHÚNG

x	12	8	10	20	6	9	5	55	10	12
d	3	5	0	11	0	11	5	3	12	4
$x\prime$	10	7	7	22	3	11	4	53	13	11
$x\prime\prime$	13	8	13	17	9	6	5	57	7	13

Từ đó suy ra:

$$X' = \begin{bmatrix} 10 & 7 & 7 & 22 \\ 3 & 11 & 4 & 53 \\ 13 & 11 & 7 & 85 \end{bmatrix}$$

$$X'' = \begin{bmatrix} 13 & 8 & 13 & 17 \\ 9 & 6 & 5 & 57 \\ 7 & 13 & 7 & 85 \end{bmatrix}$$

Tính **ER**: Theo công thức (3-4), được:

$L = 37,0015$

$ER = \frac{37.0015}{10\times 2} = 1,8501$ bpp

Qua đây thấy tỷ lệ nhúng của phương pháp đề xuất là hơn hẳn với $ER = 1,66$ bpp của phương pháp Chen và cộng sự [1].

Tính **PSNR**:

- Sai số bình phương của X' và X'' bằng:

SE(X', X)=4+1+9+4+9+4+1+4+9+1 = 46,

SE(X'', X)=1+ 9+ 9+ 9+ 9+ 4+9 +1 = 51.

- Sai số bình phương trung bình bằng:

MSE(X', X) = SE(X', X)/ (3*4) = 46/12 = 3,83

MSE(X'', X)= SE(X'', X)/(3*4) = 51/12 = 4,25

Cuối cùng:

$$PSNR\,(X', X) = 10\log_{10}\left(\frac{255^2}{3,83}\right) = 42,299$$

$$PSNR\,(X'', X) = 10\log_{10}\left(\frac{255^2}{4,25}\right) = 41,847$$

Các giá trị này lớn hơn giá trị PSNR của Chen và cộng sự.

Ví dụ 2: Cho khối ảnh X như ví dụ 1 với k =10.

- Chọn 10 điểm ảnh liên tiếp từ X ta được: X = [12, 8, 10, 20, 6, 9, 5, 55,10, 12]

- Nhúng dữ liệu: Giả sử dữ liệu cần nhúng là bit "0" (ứng với $d = 0$ trong hệ cơ số 13). Theo Bảng I trong phương pháp đề xuất với $d = 0$ ta có: $X' = x - 3$, $X'' = x + 3$. Áp dụng cho 10 điểm ảnh:

$x'_1 = 12 - 3 = 9,\ x''_1 = 12 + 3 = 15$

$x'_2 = 8 - 3 = 5,\ x''_2 = 8 + 3 = 11$

$x'_3 = 10 - 3 = 7,\ x''_3 = 10 + 3 = 13$

$x'_4 = 20 - 3 = 17,\ x''_4 = 20 + 3 = 23$

$x'_5 = 6 - 3 = 3,\ x''_5 = 6 + 3 = 9$

$x'_6 = 9 - 3 = 6,\ x''_6 = 9 + 3 = 12$

$x'_7 = 5 - 3 = 2,\ x''_7 = 5 + 3 = 8$

$x'_8 = 55 - 3 = 52,\ x''_8 = 55 + 3 = 58$

$x'_9 = 10 - 3 = 7,\ x''_9 = 10 + 3 = 13$

$x'_{10} = 12 - 3 = 9,\ x''_{10} = 12 + 3 = 15$

Vậy ảnh sau khi nhúng là:

$$X' = \begin{bmatrix} 9 & 5 & 7 & 17 \\ 3 & 6 & 2 & 52 \\ 7 & 9 & 7 & 85 \end{bmatrix}$$

$$X'' = \begin{bmatrix} 15 & 11 & 13 & 23 \\ 9 & 12 & 8 & 58 \\ 13 & 15 & 7 & 85 \end{bmatrix}$$

- Khôi phục ảnh gốc: Sử dụng công thức 7 để khôi phục. Với pixel đầu tiên ta có: $X = \left\lceil \frac{9 + 15}{2} \right\rceil = 12$. (Khôi phục chính xác với ảnh gốc).

- Trích xuất bit "0"

Tính hiệu $X' - X'' = -6$. Do đó trong Bảng I thì $d = 0$ (ứng với bit 0).

Kết quả: Dữ liệu trích xuất là bit "0".

- Đánh giá thay đổi:

∘ Độ biến đổi pixel:

Mỗi pixel bị thay đổi tối đa ±3 đơn vị (ví dụ: 12 → 9 và 15). Do đó, đảm bảo chất lượng ảnh (PSNR cao).

∘ Khả năng nhúng:

Mỗi pixel nhúng được 1 chữ số hệ cơ số 13 (trong ví dụ này là $d = 0$).

Tổng tỷ lệ nhúng (ER) đạt ~ 1.8501 bpp (cao hơn phương pháp Chen).

∗ **Ví dụ 3:** Cho khối ảnh X như ví dụ 1 với k =10.

- Chọn 10 điểm ảnh liên tiếp từ X ta được: x = [12, 8, 10, 20, 6, 9, 5, 55, 10, 12]

- Nhúng dữ liệu:

∘ Giả sử dữ liệu cần nhúng là bit "1" (ứng với d = 1 trong hệ cơ số 13).

∘ Theo Bảng I trong phương pháp đề xuất với $d = 1$ ta có: $x' = x - 3$ và $x'' = x + 2$

Áp dụng cho 10 điểm ảnh:

$x'_1 = 12 - 3 = 9,\ x''_1 = 12 + 2 = 14$
$x'_2 = 8 - 3 = 5,\ x''_2 = 8 + 2 = 10$
$x'_3 = 10 - 3 = 7,\ x''_3 = 10 + 2 = 12$
$x'_4 = 20 - 3 = 17,\ x''_4 = 20 + 2 = 22$
$x'_5 = 6 - 3 = 3,\ x''_5 = 6 + 2 = 8$
$x'_6 = 9 - 3 = 6,\ x''_6 = 9 + 2 = 11$
$x'_7 = 5 - 3 = 2,\ x''_7 = 5 + 2 = 7$
$x'_8 = 55 - 3 = 52,\ x''_8 = 55 + 2 = 57$
$x'_9 = 10 - 3 = 7,\ x''_9 = 10 + 2 = 12$
$x'_{10} = 12 - 3 = 9,\ x''_{10} = 12 + 2 = 14$

Vậy ảnh sau khi nhúng là:

$$X' = \begin{bmatrix} 9 & 5 & 7 & 17 \\ 3 & 6 & 2 & 52 \\ 7 & 9 & 7 & 85 \end{bmatrix}$$

$$X'' = \begin{bmatrix} 14 & 10 & 12 & 22 \\ 8 & 11 & 7 & 57 \\ 12 & 14 & 7 & 85 \end{bmatrix}$$

- Khôi phục ảnh gốc:

Sử dụng công thức 7 để khôi phục.

Ví dụ với pixel đầu tiên:

$X = \left\lceil \frac{9 + 14}{2} \right\rceil = 12$ (khôi phục chính xác với ảnh gốc)

- Trích xuất bit "1"

∘ Tính hiệu $X' - X'' = -5$ => Trong Bảng I thì $d = 1$ (ứng với bit 1)

∘ Kết quả: Dữ liệu trích xuất là bit "1".

- Đánh giá thay đổi:

∘ Độ biến đổi pixel:

Mỗi pixel bị thay đổi tối đa - 3 hoặc + 2 đơn vị (ví dụ:12 → 9 và 14). Do đó, đảm bảo chất lượng ảnh ($PSNR$ cao).

∘ Khả năng nhúng:

Mỗi pixel nhúng được 1 chữ số hệ cơ số 13 (trong ví dụ này là $d = 1$).

Tổng tỷ lệ nhúng (ER) đạt ~ 1,8501 bpp (cao hơn phương pháp Chen).

IV. KẾT QUẢ

1. So sánh hai phương pháp về mặt lý thuyết

Nhìn vào Bảng IV ta có nhận xét:

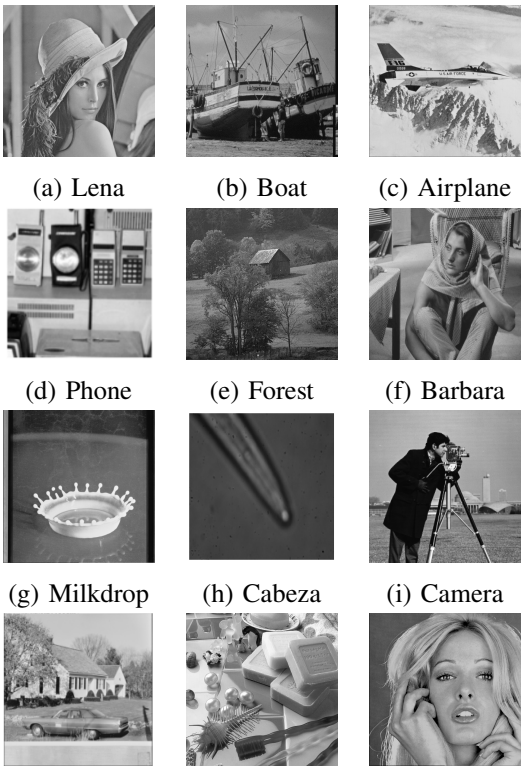
- Phương pháp đề xuất vượt trội về ER (1,8501 bpp so với 1,66 bpp) và chất lượng ảnh ($PSNR$ cao hơn) nhờ tận dụng hệ cơ số 13 và giới hạn biến đổi điểm ảnh tối đa 3 đơn vị.

- Phương pháp của Chen có ưu điểm đơn giản nhưng bị hạn chế bởi hệ cơ số 5 và độ biến đổi điểm ảnh lớn.

- Cả hai phương pháp đều đảm bảo tính thuận nghịch (RDH), nhưng phương pháp đề xuất phù hợp hơn cho ứng dụng yêu cầu dung lượng nhúng cao và chất lượng ảnh tốt.

Bảng IV
SO SÁNH KHI NHÚNG BIT 0 VÀ BIT 1

Đặc điểm	Nhúng bit 0 ($d = 0$)	Nhúng bit 1 ($d = 1$)
Công thức nhúng	$x' = x - 3$ $x'' = x + 3$	$x' = x - 3$ $x'' = x + 2$
Hiệu $x' - x''$	-6	-5
Độ biến đổi ảnh	± 3	- 3 hoặc + 2



(a) Lena (b) Boat (c) Airplane
(d) Phone (e) Forest (f) Barbara
(g) Milkdrop (h) Cabeza (i) Camera
(j) Car (k) Things (l) Tiffany

Hình 2. Hình ảnh chuẩn hóa dùng để kiểm tra khả năng nhúng thông tin.

2. So sánh hai phương pháp về thực nghiệm

Trong nghiên cứu này, phương pháp đề xuất được đánh giá thông qua 12 ảnh xám chuẩn (512×512), với các chỉ tiêu so sánh gồm: (1) khả năng nhúng dữ liệu và (2) chất lượng ảnh sau nhúng, đối chiếu với kết quả từ phương pháp Chen và cộng sự (2).

Bảng V
SO SÁNH GIỮA PHƯƠNG PHÁP ĐỀ XUẤT VÀ PHƯƠNG PHÁP CHEN VÀ CỘNG SỰ.

Tiêu chí	**Phương pháp Chen và cộng sự [1]**	**Phương pháp đề xuất**
Số tổ hợp nhúng	5 tổ hợp (hệ cơ số 5)	13 tổ hợp (hệ cơ số 13)
Tỷ lệ nhúng (ER)	$ER = \frac{\log_2 5+1}{2} = 1,66$ bpp	$ER = \frac{\log_2 13}{2} \approx 1,8501$ bpp
Khả năng nhúng (Cap)	Dung lượng nhúng thấp hơn do giới hạn hệ cơ số 5.	Dung lượng nhúng cao hơn nhờ hệ cơ số 13, tối ưu hóa số tổ hợp.
Độ biến đổi điểm ảnh	Tối đa 5 đơn vị	Tối đa 3 đơn vị
Chất lượng ảnh (PSNR)	PSNR trung bình ~ 40, 72 dB	PSNR trung bình ~ 42, 55 dB
Độ phức tạp tính toán	Sử dụng ma trận EMD và 4 hướng nhúng, phức tạp hơn so với phương pháp đề xuất.	Sử dụng Bảng tra cứu 13 tổ hợp, đơn giản hơn do giảm số hướng biến đổi.
Phạm vi áp dụng	Phục hồi ảnh gốc chính xác nhưng độ biến đổi lớn.	Phục hồi ảnh gốc chính xác với độ biến đổi nhỏ hơn, chất lượng ảnh tốt hơn.
Khả năng phục hồi	Phục hồi ảnh gốc chính xác nhưng độ biến đổi lớn.	Phục hồi ảnh gốc chính xác với độ biến đổi nhỏ hơn, chất lượng ảnh tốt hơn.
Ưu điểm chính	- Kết hợp EMD và 4 hướng nhúng - Đơn giản trong triển khai.	- Tăng số tổ hợp nhúng lên 13 - Cải thiện ER và PSNR - Độ biến đổi điểm ảnh thấp hơn.
Nhược điểm chính	- ER thấp hơn - Độ biến đổi điểm ảnh lớn, ảnh hưởng chất lượng.	Yêu cầu xử lý Bảng tra cứu 13 tổ hợp có thể tăng độ phức tạp so với hệ cơ số 5.

Phương pháp đề xuất của chúng tôi hướng tới mục tiêu khả năng nhúng được nhiều hơn nhưng chất lượng ảnh vẫn cao hơn so với phương pháp Chen và cộng sự [1]. Khi thử nghiệm nhúng chúng tôi sẽ tính khả năng nhúng Cap, giá trị ER , giá trị $PSNR1$ của ảnh chứa tin thứ nhất, giá trị $PSNR2$ của ảnh chứa tin thứ hai (công thức 5-6). và giá trị $PSTB$ là trung bình cộng của $PSNR1$ và $PSNR2$. Kết quả thử nghiệm trình bày trên Bảng VI cho thấy, cả ER và $PSNR$ của phương pháp đề xuất đều lớn hơn đáng kể so với phương pháp của Chen và cộng sự.

V. KẾT LUẬN

Phương pháp Chen và cộng sự [1] sử dụng một số hệ cơ số 5 và ma trận tham chiếu EMD nhằm tăng thêm

Bảng VI
SO SÁNH TỶ LỆ NHÚNG GIỮA CÁC PHƯƠNG PHÁP

Ảnh	Phương pháp	LocSize	Cap	**ER**	PSNR1	PSNR2	**PSTB**
Lena	[1]	0	869250	1,6580	40,7280	40,7109	40,7195
	Đề xuất	0	969961	1,8501	42,5533	42,5574	42,5554
Boat	[1]	1356	867894	1,6554	40,7183	40,7231	40,7207
	Đề xuất	844	969117	1,8484	42,5533	42,5574	42,5554
Airplane	[1]	0	869250	1,6580	40,7327	40,7091	40,7209
	Đề xuất	0	969961	1,8501	42,5533	42,5574	42,5554
Phone	[1]	17166	852084	1,6252	40,7302	40,7369	40,7336
	Đề xuất	7773	962188	1,8352	42,5533	42,5574	42,5554
Forest	[1]	0	869250	1,6580	40,7403	40,7261	40,7332
	Đề xuất	0	969961	1,8501	42,5533	42,5574	42,5554
Barbara	[1]	57	869193	1,6579	40,7378	40,7142	40,7260
	Đề xuất	39	969922	1,8500	42,5533	42,5574	42,5554
Blob	[1]	0	869250	1,6580	40,7229	40,7146	40,7188
	Đề xuất	0	969961	1,8501	42,5533	42,5574	42,5554
Cabeza	[1]	180	869070	1,6576	40,7445	40,7403	40,7424
	Đề xuất	120	969841	1,8498	42,5533	42,5574	42,5554
Camera man	[1]	6164	863086	1,6462	40,7272	40,7176	40,7224
	Đề xuất	3510	966451	1,8434	42,5533	42,5574	42,5554
Car	[1]	0	869250	1,6580	40,7396	40,7225	40,7311
	Đề xuất	0	969961	1,8501	42,5533	42,5574	42,5554
Things	[1]	7369	861881	1,6439	40,7240	40,7421	40,7331
	Đề xuất	4976	964985	1,8406	42,5533	42,5574	42,5554
Tiffany	[1]	19521	849729	1,6207	40,7194	40,7332	40,7263
	Đề xuất	17347	952614	1,8170	42,5533	42,5574	42,5554
Average	[1]			**1,649**			**40,7273**
	Đề xuất			**1,8446**			**42,5554**

khả năng nhúng. Trong bài báo này, chúng tôi đưa ra một phương pháp đề xuất là sử dụng 13 tổ hợp nhúng trên một điểm ảnh (hệ cơ số 13). Nhờ đó, phương pháp cho khả năng nhúng dữ liệu lớn hơn nhưng vẫn đảm bảo chất lượng ảnh chứa tin tốt hơn so với phương pháp Chen và cộng sự. Kết quả thực nghiệm cho thấy, khả năng nhúng dữ liệu của phương pháp đề xuất lớn hơn so với phương pháp hiện có, đồng thời vẫn duy trì được chất lượng ảnh nhúng tin cao.

LỜI CẢM ƠN

"Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Giao thông Vận tải (ĐH GTVT) thông qua đề tài mã số T2025-CN-003."

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] X. Chen and C. Hong, "An efficient dual-image reversible data hiding scheme based on exploiting modification direction," *Journal of Information Security and Applications*, vol. 58, pp. 1–9, 2021.

[2] N. H. Cường, P. M. Thái, M. M. Trừng, T. Hạnh, N. T. Tuyết, and P. V. Ất, "Sử dụng kỹ thuật mã hóa dữ liệu để nâng cao chất lượng ảnh trong giấu tin thuận nghịch," in *Kỷ yếu Hội nghị Khoa học công nghệ Quốc gia lần thứ XVII về Nghiên cứu cơ bản và ứng dụng Công Nghệ thông tin*, pp. 766–775, 2024.

[3] H.-K. Pan, Y.-Y. Chen, and Y.-C. Tseng, "A secure data hiding scheme for two-color image"s," in *Proceedings ISCC 2000. Fifth IEEE Symposium on Computers and Communications*, pp. 750–755, 2000.

[4] D.-C. Wu and W.-H. Tsai, "A stego method for images by pixel value differencing," *Pattern Recognition Letters*, vol. 24, no. 9, pp. 1613–1626, 2003.

[5] X. Zhang and S. Wang, "Efficient steganographic embedding by exploiting modification direction," *IEEE Communications Letters*, vol. 10, no. 11, pp. 781–783, 2006.

[6] J. Mielikainen, "LSB matching revisited," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 13, no. 5, pp. 285–287, 2006.

[7] J. Tian, "Reversible data embedding using a difference expansion," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 13, no. 8, pp. 890–896, 2003.

[8] A. Alattar, "Reversible watermark using the difference expansion of a generalized integer transform," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 13, no. 8, pp. 1147–1156, 2004.

[9] D. Thodi and J. Rodríguez, "Expansion embedding techniques for reversible watermarking," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 16, no. 3, pp. 721–730, 2007.

[10] I. Dragoi and D. Coltuc, "Local-prediction-based difference expansion reversible watermarking," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 23, no. 4, pp. 1779–1790, 2014.

[11] Z. Ni, Y. Shi, and N. Ansari, "Reversible data hiding," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 16, no. 3, pp. 354–362, 2006.

[12] C. Lin, W. Tai, and C. Chang, "Multilevel reversible data hiding based on histogram modification of difference images," *Pattern Recognition*, vol. 41, pp. 3582–3591, 2008.

[13] Y. Li, C. Yeh, and C. Chang, "Data hiding based on the similarity between neighboring pixels with reversibility," *Digital Signal Processing*, vol. 20, pp. 1116–1128, 2010.

[14] X. Li, B. Yang, and T. Zeng, "Efficient reversible watermarking based on adaptive prediction-error expansion and pixel selection," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 20, no. 12, pp. 3524–3533, 2011.

[15] X. Ma, Z. Pan, S. Hu, and L. Wang, "High-fidelity reversible data hiding scheme based on multi-predictor sorting and selecting mechanism," *Journal of Visual Communication and Image Representation*, vol. 28, pp. 71–82, 2015.

[16] X. Li, J. Li, B. Li, and B. Yang, "High-fidelity reversible data hiding scheme based on pixel-value-ordering and prediction-error expansion," *Signal Processing*, vol. 93, no. 1, pp. 198–205, 2013.

[17] F. Peng, X. Li, and B. Yang, "Improved PVO-based reversible data hiding," *Digital Signal Processing*, vol. 25, pp. 255–265, 2014.

[18] B. Ou, X. Li, Y. Zhao, and R. Ni, "Reversible data hiding using invariant pixel value-ordering and prediction-error expansion," *Signal Processing: Image Communication*, vol. 29, no. 7, pp. 760–772, 2014.

[19] J. Li, Y. Wu, C. Lee, and C. Chang, "Generalized PVO-k embedding technique for reversible data hiding," *International Journal of Network Security*, vol. 20, no. 1, pp. 65–77, 2018.

[20] N. Sao, N. Hoa, and A. P.V., "An effective reversible data hiding method based on pixel-value-ordering," *Journal of Computer Science and Cybernetics*, vol. 36, no. 2, pp. 139–158, 2020.

[21] C. Lee and Y. Huang, "Reversible data hiding scheme based on dual stegano-images using orientation combinations," *Telecommunication Systems*, vol. 52, pp. 2237–2247, 2013.

[22] X. Chen and W. Guo, "Reversible data hiding scheme based on fully exploiting the orientation combinations of dual stego-images," *International Journal of Network Security*, vol. 22, no. 1, pp. 126–135, 2020.

[23] C. Chang, T. D. Kieu, and Y. Chou, "Reversible data hiding scheme using two steganographic images," in *Proceedings of IEEE Region 10 International Conference (TENCON)*, pp. 1–4, 2007.

[24] C. Chang, Y. Chou, and T. D. Kieu, "Information hiding in dual images with reversibility," in *Proceedings of the Third IEEE International Conference on Multimedia and Ubiquitous Engineering*, pp. 145–152, 2009.

[25] C. Chang, T.-C. Lu, G. Horng, Y. Huang, and Y. Hsu, "A high payload embedding scheme using dual stego-images with reversibility," in *Proceedings of the Third International Conference on Information, Communication and Signal Processing*, pp. 1–5, 2013.

Phạm Minh Thái tốt nghiệp đại học chuyên ngành Công nghệ thông tin tại Trường Đại học Nha Trang vào năm 2008. Ông nhận bằng Thạc sĩ chuyên ngành Khoa học máy tính tại học viện Kỹ thuật Quân sự năm 2011, bằng Cử nhân Tiếng Anh tại Đại học Thái Nguyên vào năm 2023 và đang làm nghiên cứu sinh chuyên ngành Công nghệ thông tin tại trường Đại học Giao thông vận tải. Hiện công tác tại khoa công nghệ thông tin, Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp. Các lĩnh vực quan tâm của ông bao gồm giấu tin và an ninh thông tin.

Email: pmthai@uneti.edu.vn

Lê Kinh Tài nhận bằng Cử nhân từ Học viện Tài chính vào năm 2006, bằng Thạc sĩ Quản trị Nguồn nhân lực từ Trường Đại học Công đoàn vào năm 2012, và bằng Cử nhân Tiếng Anh từ Trường Đại học Mở Hà Nội vào năm 2014. Hiện tại, ông đang công tác tại Đại học Công đoàn. Các lĩnh vực quan tâm của ông bao gồm giấu tin và an ninh thông tin.
Email: tailk@dhcd.edu.vn

Nguyễn Hiếu Cường nhận bằng Đại học và Thạc sỹ ngành Đảm bảo toán học cho máy tính và các hệ thống tính toán tại Trường Đại học Khoa học Tự nhiên (Đại học quốc gia Hà Nội) tương ứng vào năm 1995 và 1999. Ông nhận bằng Tiến sĩ ngành Tin học tại trường Đại học Công nghệ Darmstadt (CHLB Đức) năm 2013. Các lĩnh vực quan tâm của ông bao gồm: giấu tin và phát hiện ảnh giả.
Email: cuongnh@utc.edu.vn

Nguyễn Quang Chánh nhận bằng Đại học chuyên ngành Toán-Tin tại Trường Đại học Sư phạm Hà Nội 2 vào năm 2003. Ông nhận bằng Thạc sí chuyên ngành công nghệ thông tin tại trường Đại học Sư phạm Kỹ Thuật Hưng Yên vào năm 2022. Các lĩnh vực quan tâm của ông bao gồm: bảo mật và an ninh mạng.
Email: nqchanh@uneti.edu.vn