

A EFFICIENT PIXEL VALUE ORDERING DATA HIDING METHOD BASED ON THREE STEGO IMAGES

Nguyen Kim Sao^{1*}, Cao Thi Luyen¹, Mai Van Linh²

¹University of Transport and Communications, ²East Asia University of Technology

ARTICLE INFO	ABSTRACT
<p>Received: 03/11/2022</p> <p>Revised: 22/11/2022</p> <p>Published: 22/11/2022</p>	<p>Reversible data hiding is an active information security field that has received the attention of many researchers. This paper focuses on researching the reversible hiding method based on PVO (Pixel Value Ordering). This is a technique to partition pixels into blocks and arrange them in ascending order, embedding information based on the prediction errors at the largest and smallest pixels. The characteristics of the PVO method are high image quality but limited embedding capacity. The proposed method provides a reversible data hiding method based on three stego images. The proposed idea uses the technique of PVO that is dividing pixels into blocks and arranging pixel values in a ascending order, then embedding secret bits on the largest and smallest pixels. The experimental results confirmed that the embedding capacity of the proposed method is superior to some of the relevant PVO works on the aspects of embedding capacity and the image quality remains high.</p>
<p>KEYWORDS</p> <hr/> <p>Data hiding Pixel value ordering PVO Three images Data Embedding</p>	

MỘT PHƯƠNG PHÁP GIẤU TIN SẮP XẾP THỨ TỰ ĐIỂM ẢNH HIỆU QUẢ DỰA TRÊN BA ẢNH CHỨA TIN

Nguyễn Kim Sao^{1*}, Cao Thị Luyên¹, Mai Văn Linh²

¹Trường Đại học Giao thông vận tải, ²Trường Đại học Công nghệ Đông Á

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
<p>Ngày nhận bài: 03/11/2022</p> <p>Ngày hoàn thiện: 22/11/2022</p> <p>Ngày đăng: 22/11/2022</p>	<p>Giấu tin thuận nghịch là một lĩnh vực bảo mật thông tin một cách chủ động nhận được sự quan tâm của nhiều nhà nghiên cứu. Bài báo này tập trung nghiên cứu phương pháp giấu tin thuận nghịch dựa trên PVO (Pixel Value Ordering). Đây là một kỹ thuật phân hoạch các điểm ảnh thành các khối và sắp xếp theo chiều tăng dần, việc nhúng tin dựa trên sai số dự báo ở các điểm ảnh lớn nhất và nhỏ nhất. Đặc điểm của phương pháp PVO là có chất lượng ảnh cao nhưng khả năng nhúng còn hạn chế. Phương pháp đề xuất đưa ra một phương pháp giấu tin thuận nghịch với ba ảnh chứa tin. Ý tưởng đề xuất sử dụng kỹ thuật của PVO về sắp xếp giá trị điểm ảnh theo tăng dần, sau đó nhúng tin trên các điểm ảnh lớn nhất và nhỏ nhất. Bằng thực nghiệm cho thấy, khả năng nhúng tin của phương pháp đề xuất tỏ ra vượt trội so với các phương pháp PVO được so sánh và chất lượng ảnh vẫn duy trì ở mức cao.</p>
<p>TỪ KHÓA</p> <hr/> <p>Giấu tin Sắp xếp giá trị điểm ảnh PVO Ba ảnh chứa tin Nhúng tin</p>	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.6869>

* Corresponding author. Email: saonkoliver@utc.edu.vn

1. Giới thiệu

Giấu tin thuận nghịch là kỹ thuật nhúng thông tin bí mật vào sản phẩm số cần được bảo vệ sao cho kỹ thuật giấu này tồn tại phép biến đổi ngược để người ta có thể dễ dàng khôi phục nguyên vẹn cả thông tin bí mật đã giấu và sản phẩm ban đầu được nhúng tin [1]. Loại giấu tin thuận nghịch này đã mở rộng tính ứng dụng của giấu tin trong cuộc sống nhất là trong các lĩnh vực cần sự bảo mật cao như quân sự, y tế, giáo dục.

Năm 2003, Tian đề xuất phương pháp giấu tin thuận nghịch nổi tiếng với tên gọi mở rộng hiệu [2]. Từ đó đến nay rất nhiều kỹ thuật nhúng tin đã được công bố cũng như cải tiến để nâng cao khả năng nhúng cũng như chất lượng ảnh của ảnh chứa tin. Các kỹ thuật hay được sử dụng như mở rộng sai số dự báo, dịch chuyển histogram, dịch chuyển histogram trên miền sai số,...

Một kỹ thuật nhúng tin còn khá mới cũng nhận được sự quan tâm của các nhà nghiên cứu đó là nhúng tin dựa trên sự sắp xếp giá trị điểm ảnh PVO (Pixel Values Ordering) [3] - [10]. Phương pháp này được Li và cộng sự [4] đề xuất lần đầu tiên vào 2013. Theo [4], đầu tiên ảnh gốc sẽ được chia thành các khối con rời nhau. Tiếp đến, các điểm ảnh trong mỗi khối sẽ được sắp xếp theo trật tự tăng dần của giá trị điểm ảnh. Sau đó, các phương pháp thực hiện tính sai số giữa điểm ảnh có giá trị lớn nhất và lớn thứ nhì (sai số lớn nhất) và sai số giữa điểm ảnh có giá trị nhỏ nhất và nhỏ thứ nhì. Nếu sai số lớn nhất (nhỏ nhất) bằng 1 (-1) thì sẽ nhúng một bit sao cho thứ tự sắp xếp của một dãy điểm ảnh không đổi để phục vụ cho quá trình khôi phục thông tin. Lược đồ [7] cải tiến [4] bằng việc sử dụng cả những khối có sai số là 0 để nâng cao khả năng nhúng. [9] cải tiến kỹ thuật nhúng để nhúng trên các điểm ảnh lớn nhất và các điểm ảnh nhỏ nhất thay vì bỏ qua như ở [7] nhằm nâng cao khả năng nhúng tin.

Kỹ thuật giấu tin với hai ảnh chứa tin (dual-images) là kỹ thuật giấu tin thuận nghịch gần đây được nghiên cứu và mở rộng nhờ tính ưu việt vượt trội về khả năng nhúng. Kỹ thuật giấu tin thuận nghịch với hai ảnh chứa tin dựa trên PVO nhận được nhiều sự quan tâm của các nhà nghiên cứu [5], [6], [10]. Bài báo này là một cải tiến phương pháp của Y. Niu và S. Shen [6]. [6] đưa ra phương pháp nhúng dựa trên sai số dự báo của giá trị lớn nhất và lớn thứ nhì (và sai số giữa giá trị nhỏ nhất và nhỏ thứ nhì), với mỗi giá trị sai số này, [6] đưa ra quy tắc nhúng từ 1 đến 3 bit trên mỗi điểm ảnh lớn nhất (hoặc nhỏ nhất) để đưa ra hai ảnh chứa tin. Dựa trên ý tưởng này, phương pháp đề xuất đưa ra phương pháp giấu tin thuận nghịch với ba ảnh chứa tin, thay vì nhúng 1 đến 3 bit như [6], phương pháp đề xuất nhúng 4 bit cho mỗi điểm ảnh lớn nhất (cũng như nhỏ nhất) và sự thay đổi tối đa là 2 đơn vị. Bằng chứng minh lý thuyết và thống kê thực nghiệm cho thấy phương pháp đề xuất cho khả năng nhúng cao mà vẫn đảm bảo chất lượng ảnh.

Nội dung tiếp theo của bài báo sẽ trình bày phương pháp nghiên cứu ở mục 2, mục 3 là thực nghiệm và phân tích và cuối cùng là kết luận.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Các phương pháp dựa trên PVO

2.1.1. Phương pháp của Li và cộng sự [4]

Đây được coi là phương pháp giấu tin thuận nghịch đầu tiên theo hướng PVO. Ở phương pháp này, ảnh được chia thành các khối rời nhau kích thước $m \times n$. Véc tơ của khối $x = (x_1, x_2, \dots, x_{m \times n})$ được sắp xếp theo chiều tăng dần $(x_{\sigma(1)}, x_{\sigma(2)}, \dots, x_{\sigma(m \times n)})$. Phương pháp này sử dụng điểm ảnh lớn thứ nhì là ngưỡng cảnh dự báo cho điểm ảnh lớn nhất, điểm ảnh nhỏ thứ nhì làm dự báo cho điểm ảnh nhỏ nhất. Mỗi bit dữ liệu b được nhúng vào sai số dự báo mỗi điểm ảnh lớn nhất hoặc nhỏ nhất theo công thức:

$$d_{max} = x_{\sigma(m \times n)} - x_{\sigma(m \times n - 1)} \quad (1) \quad d_{min} = x_{\sigma(1)} - x_{\sigma(2)} \quad (2)$$

$$d'_{max} = \begin{cases} d_{max} & \text{nếu } d_{max} = 0 \\ d_{max} + b & \text{nếu } d_{max} = 1 \\ d_{max} + 1 & \text{nếu } d_{max} > 1 \end{cases} \quad (3) \quad d'_{min} = \begin{cases} d_{min} & \text{nếu } d_{min} = 0 \\ d_{min} - b & \text{nếu } d_{min} = -1 \\ d_{min} - 1 & \text{nếu } d_{min} < -1 \end{cases} \quad (4)$$

Điểm ảnh chứa tin được tính bằng công thức:

$$x'_{\sigma(m \times n) - 1} + d'_{max}; x'_{\sigma(1)} = x_{\sigma(2)} + d'_{min} \quad (5)$$

2.2.2. Phương pháp của Y. Niu và S. Shen [6]

Phương pháp này xây dựng chiến lược nhúng tin dựa trên dự báo PVO cho hai ảnh chứa tin. Đầu tiên, tương tự như PVO, ảnh được chia thành các khối ảnh rời nhau và sắp xếp theo chiều tăng dần. Việc thực hiện nhúng các bit dữ liệu trong một khối ảnh dựa trên giá trị của các sai số dự báo như Bảng 1.

Bảng 1. Nguyên tắc nhúng tin của phương pháp [6]

Sai số dự báo	Bít nhúng được	Giá trị điểm ảnh chứa tin	
Tại điểm ảnh lớn nhất của khối $x_{\sigma(n)}$ $d_{max} = 0, 1$	0	$x_{1\sigma(n)} = x_{\sigma(n)}, x_{2\sigma(n)} = x_{\sigma(n)}$	
	100	$x_{1\sigma(n)} = x_{\sigma(n)} + 1, x_{2\sigma(n)} = x_{\sigma(n)}$	
	101	$x_{1\sigma(n)} = x_{\sigma(n)}, x_{2\sigma(n)} = x_{\sigma(n)} + 1$	
	110	$x_{1\sigma(n)} = x_{\sigma(n)} + 2, x_{2\sigma(n)} = x_{\sigma(n)}$	
	111	$x_{1\sigma(n)} = x_{\sigma(n)}, x_{2\sigma(n)} = x_{\sigma(n)} + 2$	
	$d_{max} > 1$	0	$x_{1\sigma(n)} = x_{\sigma(n)}, x_{2\sigma(n)} = x_{\sigma(n)}$
		10	$x_{1\sigma(n)} = x_{\sigma(n)} + 1, x_{2\sigma(n)} = x_{\sigma(n)}$
01		$x_{1\sigma(n)} = x_{\sigma(n)}, x_{2\sigma(n)} = x_{\sigma(n)} + 1$	
Tại điểm ảnh nhỏ nhất của khối $x_{\sigma(1)}$ $d_{min} = 0, -1$	0	$x_{1\sigma(1)} = x_{\sigma(1)}, x_{2\sigma(1)} = x_{\sigma(1)}$	
	100	$x_{1\sigma(1)} = x_{\sigma(1)}, x_{2\sigma(1)} = x_{\sigma(1)} - 1$	
	101	$x_{1\sigma(1)} = x_{\sigma(1)} - 1, x_{2\sigma(1)} = x_{\sigma(1)}$	
	110	$x_{1\sigma(1)} = x_{\sigma(1)}, x_{2\sigma(1)} = x_{\sigma(1)} - 2$	
	111	$x_{1\sigma(1)} = x_{\sigma(1)} - 2, x_{2\sigma(1)} = x_{\sigma(1)}$	
	$d_{min} < -1$	0	$x_{1\sigma(1)} = x_{\sigma(1)}, x_{2\sigma(1)} = x_{\sigma(1)}$
		10	$x_{1\sigma(1)} = x_{\sigma(1)}, x_{2\sigma(1)} = x_{\sigma(1)} - 1$
01		$x_{1\sigma(1)} = x_{\sigma(1)} - 1, x_{2\sigma(1)} = x_{\sigma(1)}$	

Mỗi một điểm ảnh lớn nhất (nhỏ nhất) sẽ nhúng được từ 1 đến 3 ảnh, đây là sự cải tiến đáng kể so với phương pháp PVO do mọi điểm ảnh đều được chứa tin.

2.2. Phương pháp đề xuất

Ở phương pháp đề xuất, mỗi điểm ảnh lớn nhất (nhỏ nhất) đều được nhúng 4 bít, việc nhúng này không phụ thuộc vào sai số của điểm ảnh lớn nhất và lớn nhì (hay nhỏ nhất và nhỏ nhì). Dưới đây là thuật toán chi tiết.

2.2.1. Nhúng và trích tin trên một khối ảnh

- Nhúng tin trên một khối ảnh

Đầu vào: Khối ảnh $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ và 8 bít nhúng nhị phân $b_1 b_2 b_3 b_4 b_5 b_6 b_7 b_8$,

Đầu ra: Các khối ảnh chứa tin X_1, X_2, X_3

Thuật toán nhúng trên khối ảnh được thực hiện như sau:

Bước 1: Sắp xếp giá trị các điểm ảnh trong khối ảnh theo thứ tự tăng dần, giả sử được

$$X_{\sigma} = \{x_{\sigma(1)}, x_{\sigma(2)}, \dots, x_{\sigma(n)}\}$$

Bước 2: Thực hiện nhúng tin trên điểm ảnh có giá trị lớn nhất được liệt kê ở Bảng 2:

Bảng 2. Nguyên tắc nhúng tin trên các điểm ảnh lớn nhất

Bít nhúng $b_1b_2b_3b_4$	Giá trị 3 ảnh chứa tin
0000	$x_{1\sigma(n)} = x_{\sigma(n)}, x_{2\sigma(n)} = x_{\sigma(n)}, x_{3\sigma(n)} = x_{\sigma(n)}$
0001	$x_{1\sigma(n)} = x_{\sigma(n)}, x_{2\sigma(n)} = x_{\sigma(n)}, x_{3\sigma(n)} = x_{\sigma(n)} + 1$
0010	$x_{1\sigma(n)} = x_{\sigma(n)}, x_{2\sigma(n)} = x_{\sigma(n)} + 1, x_{3\sigma(n)} = x_{\sigma(n)}$
0011	$x_{1\sigma(n)} = x_{\sigma(n)}, x_{2\sigma(n)} = x_{\sigma(n)} + 1, x_{3\sigma(n)} = x_{\sigma(n)} + 1$
0100	$x_{1\sigma(n)} = x_{\sigma(n)} + 1, x_{2\sigma(n)} = x_{\sigma(n)}, x_{3\sigma(n)} = x_{\sigma(n)}$
0101	$x_{1\sigma(n)} = x_{\sigma(n)} + 1, x_{2\sigma(n)} = x_{\sigma(n)}, x_{3\sigma(n)} = x_{\sigma(n)} + 1$
0110	$x_{1\sigma(n)} = x_{\sigma(n)} + 1, x_{2\sigma(n)} = x_{\sigma(n)} + 1, x_{3\sigma(n)} = x_{\sigma(n)}$
0111	$x_{1\sigma(n)} = x_{\sigma(n)}, x_{2\sigma(n)} = x_{\sigma(n)}, x_{3\sigma(n)} = x_{\sigma(n)} + 2$
1000	$x_{1\sigma(n)} = x_{\sigma(n)}, x_{2\sigma(n)} = x_{\sigma(n)} + 2, x_{3\sigma(n)} = x_{\sigma(n)}$
1001	$x_{1\sigma(n)} = x_{\sigma(n)}, x_{2\sigma(n)} = x_{\sigma(n)} + 2, x_{3\sigma(n)} = x_{\sigma(n)} + 1$
1010	$x_{1\sigma(n)} = x_{\sigma(n)} + 1, x_{2\sigma(n)} = x_{\sigma(n)}, x_{3\sigma(n)} = x_{\sigma(n)} + 2$
1011	$x_{1\sigma(n)} = x_{\sigma(n)} + 1, x_{2\sigma(n)} = x_{\sigma(n)} + 2, x_{3\sigma(n)} = x_{\sigma(n)}$
1100	$x_{1\sigma(n)} = x_{\sigma(n)} + 2, x_{2\sigma(n)} = x_{\sigma(n)}, x_{3\sigma(n)} = x_{\sigma(n)}$
1101	$x_{1\sigma(n)} = x_{\sigma(n)} + 2, x_{2\sigma(n)} = x_{\sigma(n)}, x_{3\sigma(n)} = x_{\sigma(n)} + 1$
1110	$x_{1\sigma(n)} = x_{\sigma(n)} + 2, x_{2\sigma(n)} = x_{\sigma(n)}, x_{3\sigma(n)} = x_{\sigma(n)} + 2$
1111	$x_{1\sigma(n)} = x_{\sigma(n)} + 2, x_{2\sigma(n)} = x_{\sigma(n)} + 2, x_{3\sigma(n)} = x_{\sigma(n)}$

Việc nhúng tin trên điểm ảnh lớn nhất của khối không làm thay đổi trật tự đã sắp xếp. Sau đó thực hiện nhúng tin trên điểm ảnh nhỏ nhất $x_{\sigma(1)}$.

Bước 3: Thực hiện nhúng tin trên điểm ảnh có giá trị nhỏ nhất như trong Bảng 3:

Bảng 3. Nguyên tắc nhúng tin trên các điểm ảnh nhỏ nhất

Bít nhúng $b_5b_6b_7b_8$	Giá trị 3 ảnh chứa tin
0000	$x_{1\sigma(1)} = x_{\sigma(1)}, x_{2\sigma(1)} = x_{\sigma(1)}, x_{3\sigma(1)} = x_{\sigma(1)}$
0110	$x_{1\sigma(1)} = x_{\sigma(1)}, x_{2\sigma(1)} = x_{\sigma(1)}, x_{3\sigma(1)} = x_{\sigma(1)} - 1$
0101	$x_{1\sigma(1)} = x_{\sigma(1)}, x_{2\sigma(1)} = x_{\sigma(1)} - 1, x_{3\sigma(1)} = x_{\sigma(1)}$
0100	$x_{1\sigma(1)} = x_{\sigma(1)}, x_{2\sigma(1)} = x_{\sigma(1)} - 1, x_{3\sigma(1)} = x_{\sigma(1)} - 1$
0011	$x_{1\sigma(1)} = x_{\sigma(1)} - 1, x_{2\sigma(1)} = x_{\sigma(1)}, x_{3\sigma(1)} = x_{\sigma(1)}$
0010	$x_{1\sigma(1)} = x_{\sigma(1)} - 1, x_{2\sigma(1)} = x_{\sigma(1)}, x_{3\sigma(1)} = x_{\sigma(1)} - 1$
0001	$x_{1\sigma(1)} = x_{\sigma(1)} - 1, x_{2\sigma(1)} = x_{\sigma(1)} - 1, x_{3\sigma(1)} = x_{\sigma(1)}$
1111	$x_{1\sigma(1)} = x_{\sigma(1)}, x_{2\sigma(1)} = x_{\sigma(1)}, x_{3\sigma(1)} = x_{\sigma(1)} - 2$
1110	$x_{1\sigma(1)} = x_{\sigma(1)}, x_{2\sigma(1)} = x_{\sigma(1)} - 2, x_{3\sigma(1)} = x_{\sigma(1)}$
1101	$x_{1\sigma(1)} = x_{\sigma(1)}, x_{2\sigma(1)} = x_{\sigma(1)} - 2, x_{3\sigma(1)} = x_{\sigma(1)} - 1$
1011	$x_{1\sigma(1)} = x_{\sigma(1)} - 1, x_{2\sigma(1)} = x_{\sigma(1)}, x_{3\sigma(1)} = x_{\sigma(1)} - 2$
1010	$x_{1\sigma(1)} = x_{\sigma(1)} - 1, x_{2\sigma(1)} = x_{\sigma(1)} - 2, x_{3\sigma(1)} = x_{\sigma(1)}$
1100	$x_{1\sigma(1)} = x_{\sigma(1)}, x_{2\sigma(1)} = x_{\sigma(1)} - 2, x_{3\sigma(1)} = x_{\sigma(1)} - 2$
1001	$x_{1\sigma(1)} = x_{\sigma(1)} - 2, x_{2\sigma(1)} = x_{\sigma(1)}, x_{3\sigma(1)} = x_{\sigma(1)} - 1$
1000	$x_{1\sigma(1)} = x_{\sigma(1)} - 2, x_{2\sigma(1)} = x_{\sigma(1)}, x_{3\sigma(1)} = x_{\sigma(1)} - 2$
0111	$x_{1\sigma(1)} = x_{\sigma(1)} - 2, x_{2\sigma(1)} = x_{\sigma(1)} - 2, x_{3\sigma(1)} = x_{\sigma(1)}$

Cuối cùng, nhận được ba khối ảnh chứa tin

$$X_1 = \{x_{1\sigma(1)}, x_{\sigma(2)}, \dots, x_{\sigma(n-1)}, x_{1\sigma(n)}\} \quad (6)$$

$$X_2 = \{x_{2\sigma(1)}, x_{\sigma(2)}, \dots, x_{\sigma(n-1)}, x_{2\sigma(n)}\} \quad (7)$$

$$X_3 = \{x_{3\sigma(1)}, x_{\sigma(2)}, \dots, x_{\sigma(n-1)}, x_{3\sigma(n)}\} \quad (8)$$

• *Trích tin trên một khối ảnh*

Đầu vào: Các khối ảnh chứa tin X_1, X_2, X_3

Đầu ra: Khối ảnh $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ và 8 bít nhúng nhị phân $b_1b_2b_3b_4b_5b_6b_7b_8$,

Thuật toán trích được thực hiện như sau.

Bước 1: Sắp xếp giá trị các điểm ảnh của các khối X_1, X_2, X_3 theo thứ tự tăng dần

Bước 2: Tính các hiệu:

$$d_1 = x_{2\sigma(n)} - x_{1\sigma(n)}, d_2 = x_{3\sigma(n)} - x_{2\sigma(n)}, d_3 = x_{2\sigma(1)} - x_{1\sigma(1)}, d_4 = x_{3\sigma(1)} - x_{2\sigma(1)} \quad (9)$$

Bước 3: Trích tin và khôi phục điểm ảnh gốc

Dựa trên Bảng 4, với các cặp giá trị $(d_3, d_4), (d_1, d_2)$ tính được từ công thức (9) và giá trị điểm ảnh chứa tin $x_{1\sigma(1)}, x_{1\sigma(n)}$ xác định được các bit nhúng $b_1b_2b_3b_4, b_5b_6b_7b_8$ và điểm ảnh gốc $x_{\sigma(1)}, x_{\sigma(n)}$.

Bảng 4. Nguyên tắc trích tin dựa trên sai số giữa các điểm ảnh chứa tin

Trường hợp	$d_1(d_3)$	$d_2(d_4)$	$b_5b_6b_7b_8 (b_1b_2b_3b_4)$	$x_{\sigma(1)}$	$x_{\sigma(n)}$
0	0	0	0000	$x_{1\sigma(1)}$	$x_{1\sigma(n)}$
1	0	1	0001	$x_{1\sigma(1)} + 1$	$x_{1\sigma(n)}$
2	1	-1	0010	$x_{1\sigma(1)} + 1$	$x_{1\sigma(n)}$
3	1	0	0011	$x_{1\sigma(1)} + 1$	$x_{1\sigma(n)}$
4	-1	0	0100	$x_{1\sigma(1)}$	$x_{1\sigma(n)} - 1$
5	-1	1	0101	$x_{1\sigma(1)}$	$x_{1\sigma(n)} - 1$
6	0	-1	0110	$x_{1\sigma(1)}$	$x_{1\sigma(n)} - 1$
7	0	2	0111	$x_{1\sigma(1)} + 2$	$x_{1\sigma(n)}$
8	2	-2	1000	$x_{1\sigma(1)} + 2$	$x_{1\sigma(n)}$
9	2	-1	1001	$x_{1\sigma(1)} + 2$	$x_{1\sigma(n)}$
10	-1	2	1010	$x_{1\sigma(1)} + 1$	$x_{1\sigma(n)} - 1$
11	1	-2	1011	$x_{1\sigma(1)} + 1$	$x_{1\sigma(n)} - 1$
12	-2	0	1100	$x_{1\sigma(1)}$	$x_{1\sigma(n)} - 2$
13	-2	1	1101	$x_{1\sigma(1)}$	$x_{1\sigma(n)} - 2$
14	-2	2	1110	$x_{1\sigma(1)}$	$x_{1\sigma(n)} - 2$
15	0	-2	1111	$x_{1\sigma(1)}$	$x_{1\sigma(n)} - 2$

• **Vấn đề tràn**

Do sự biến đổi là ± 2 với mỗi khối ảnh để chứa tin nhúng, như vậy các điểm ảnh có giá trị 0, 1, 254, 255 sẽ gây ra hiện tượng tràn miền điểm ảnh (underflow/overflow). Để tránh hiện tượng tràn, các khối ảnh chứa các giá trị này sẽ được bỏ qua không tham gia vào quá trình nhúng tin.

Khi thực hiện trích tin, các khối ảnh có các giá trị chứa 0, 1, 254, 255 và bằng nhau ở cả ba ảnh chính là các khối không nhúng tin và bỏ qua xét các khối này.

• **Ví dụ**

Cho khối ảnh gốc X như Hình 1 và chuỗi bit nhúng 11101001.

Sau khi sắp xếp $X_\sigma = \{122, 123, 123, 125, 126, 126\}$

Nhúng ở điểm ảnh có giá trị lớn nhất: nhúng 1110 vào giá trị 126, theo Bảng 2,

$$x_{1\sigma(n)} = x_{\sigma(n)} + 2 = 128, x_{2\sigma(n)} = x_{\sigma(n)} = 126, x_{3\sigma(n)} = x_{\sigma(n)} + 2 = 128$$

Nhúng ở điểm ảnh có giá trị nhỏ nhất nhất: nhúng 1001 vào giá trị 123, theo Bảng 3,

$$x_{1\sigma(1)} = x_{\sigma(1)} - 2 = 121, x_{2\sigma(1)} = x_{\sigma(1)} = 123, x_{3\sigma(1)} = x_{\sigma(1)} - 1 = 122$$

Như vậy ta được các khối ảnh chứa tin X_1, X_2, X_3 (Hình 1).

123	123	125	121	123	125	123	123	125	122	123	125
126	122	126	126	122	128	126	122	126	126	122	128
X			X_1			X_2			X_3		

Hình 1. Ví dụ khối ảnh gốc và các khối ảnh chứa tin

Tiến trình trích tin: Có 3 block chứa tin X_1, X_2, X_3 như Hình 1.

Sắp xếp các điểm ảnh trong từng khối theo chiều tăng dần ta được

$$x_{1\sigma(1)} = 121, x_{2\sigma(1)} = 123, x_{3\sigma(1)} = 122, x_{1\sigma(6)} = 128, x_{2\sigma(6)} = 126, x_{3\sigma(6)} = 128$$

$$d_1 = 2, d_2 = -1; d_3 = -2, d_4 = 2$$

Tham chiếu bảng 4, với $(d_1, d_2) = (-2; 2)$ được dãy bit nhúng là: 1110, $x_{\sigma(6)} = 128 - 2 = 126$. Với $(d_3, d_4) = (2; -1)$ được dãy bit nhúng là: 1001, $x_{\sigma(1)} = 121 + 2 = 123$.

Vậy chuỗi bit nhúng 11101001 được trích và khôi điểm ảnh ban đầu được khôi phục.

2.2.2. Nhúng và trích tin trên toàn ảnh

- *Nhúng tin trên toàn ảnh*

Đầu vào là ảnh gốc I và dãy bit nhúng B. Đầu ra là ba ảnh chứa tin I_1, I_2, I_3 .

Dưới đây là thuật toán nhúng tin trên toàn ảnh

Bước 1: Chia ảnh thành các khối có n điểm ảnh.

Bước 2: Duyệt trên từng khối ảnh và nhúng các bit B vào khối ảnh theo thuật toán được trình bày trong phần 3.1.1.

Bước 3: Lấy 2 bit thấp của hai điểm ảnh cuối cùng ở mỗi ảnh chứa tin tiếp tục nhúng vào ảnh.

Bước 4: Chèn thứ tự của ảnh vào hai điểm ảnh cuối cùng theo phương pháp chèn bit thấp.

- *Trích tin trên toàn ảnh*

Đầu vào là ba ảnh chứa tin I_1, I_2, I_3 . Đầu ra là ảnh gốc I và dãy bit nhúng B.

Bước 1: Trích 2 bit cuối cùng của các điểm ảnh trên các ảnh chứa tin để biết ảnh nào là I_1, I_2, I_3

Bước 1: Chia ảnh thành các khối có n điểm ảnh như thuật toán nhúng.

Bước 2: Duyệt trên từng khối ảnh và trích các bit B và khôi phục khối ảnh gốc theo thuật toán được trình bày trong phần 3.1.2.

Bước 3: Lấy 6 bit thấp cuối cùng của B, lấy 2 bit đầu trong 6 bit chèn vào hai điểm ảnh cuối cùng của I_1 để khôi phục ảnh gốc.

3. Kết quả thực nghiệm và phân tích

Trong phần này chúng tôi sẽ đánh giá phương pháp đề xuất theo hai tiêu chí về khả năng nhúng và chất lượng ảnh. Tập ảnh thử nghiệm gồm các ảnh đa mức xám có kích thước 512x512 như trong Hình 2, chương trình được chạy trên phần mềm Malab R2019a. Phương pháp đề xuất được so sánh với các phương pháp PVO [4], IPVO [7], PVOK [8], iGePVO-K [9], Dual-PVO [6].



Hình 2. Các ảnh thử nghiệm

Bảng 5. So sánh khả năng nhúng (bpp) (ảnh chia thành các khối ảnh 2x2)

Ảnh	PVO	IPVO	PVOK	iGePVO-K	Dual-PVO	Đề xuất
Airplane	0,07	0,10	0,11	0,19	0,56	0,67
Barbara	0,05	0,08	0,09	0,15	0,56	0,67
Blob	0,07	0,10	0,12	0,18	0,56	0,67
Boat	0,05	0,07	0,07	0,11	0,56	0,67
Camera man	0,07	0,13	0,14	0,26	0,56	0,67
Car	0,06	0,09	0,09	0,18	0,56	0,66
Couple	0,04	0,07	0,06	0,08	0,56	0,67
Gold hill	0,05	0,06	0,07	0,09	0,56	0,67
Lena	0,06	0,08	0,09	0,13	0,56	0,67
Tiffany	0,06	0,08	0,09	0,13	0,56	0,67
Trung bình	0,06	0,09	0,09	0,13	0,56	0,67

Trong Bảng 5 là kết quả so sánh dựa trên số bit nhúng trên mỗi điểm ảnh. Công thức so sánh như sau: $\beta = \frac{Ca}{n \times (M \times N)}$ (10)

Trong đó, β (bpp- bits per pixel) là khả năng nhúng được tính bằng số bit nhúng trên mỗi điểm ảnh. Ca là số bit nhúng tối đa có thể nhúng được vào ảnh, $M \times N$ là kích thước ảnh, n là số ảnh chứa tin. Với phương pháp đề xuất, khả năng nhúng không phụ thuộc vào thông tin nhúng mà phụ thuộc vào số khối khả nhúng (khối không tràn – xem mục 3.1.3), Ca của phương pháp đề xuất được tính đơn giản như sau: Số khối khả nhúng *8. Chính vì vậy, với những ảnh thử nghiệm, đa số giá trị Ca là như nhau vì không có khối gây hiện tượng tràn. Việc so sánh trên tỉ lệ nhúng trên mỗi điểm ảnh để đảm bảo tính công bằng trong quá trình so sánh, trên thực tế, số bit nhúng của phương pháp đề xuất lớn hơn rất nhiều so với các phương pháp được so sánh: iGePVO-K: $0.13 \times 512 \times 512 \approx 34,079$, Dual-PVO: $0.56 \times 2 \times 512 \times 512 \approx 293,601$, phương pháp đề xuất: $0.67 \times 3 \times 512 \times 512 \approx 526,909$. Như vậy, phương pháp đề xuất lớn hơn phương pháp Dual-PVO là 233,308 bit, là số bit rất lớn.

Bảng 6, 7 là sự so sánh chất lượng ảnh dựa trên chỉ số PSNR khi nhúng cùng một số lượng bit nhúng, có thể thấy rõ chất lượng ảnh của phương pháp được duy trì ở mức cao.

Bảng 6. So sánh chất lượng ảnh theo chỉ số PSNR (dB) với 10000 bit nhúng (các khối ảnh 2x2)

Ảnh	PVO	IPVO	PVOK	iGePVO-K	Dual-PVO (trung bình 2 ảnh)	Đề xuất (trung bình 3 ảnh)
Airplane	59,60	59,18	58,48	56,61	68,50	67,49
Barbara	57,76	58,78	57,03	56,54	68,59	67,49
Blob	58,60	58,43	57,72	56,46	68,43	67,49
Boat	58,84	58,93	57,82	56,88	68,19	67,49
Camera man	63,07	62,47	60,27	57,92	67,54	67,49
Car	58,27	62,50	59,41	59,82	67,63	67,49
Couple	55,83	56,77	55,09	54,92	68,69	67,49
Gold hill	58,05	58,62	58,16	57,92	67,73	67,49
Lena	58,38	58,77	57,56	56,92	68,09	67,49
Tiffany	56,23	55,43	54,78	54,18	68,17	67,49
Trung bình	58,46	58,99	57,63	56,82	68,16	67,49

Bảng 7. So sánh chất lượng ảnh theo chỉ số PSNR (dB) với 20000 bit nhúng (các khối ảnh 2x2)

Ảnh	PVO	IPVO	PVOK	iGePVO-K	Dual-PVO	Đề xuất
Airplane	56,82	56,70	55,81	54,46	65,33	64,45
Barbara	54,92	56,04	54,37	54,26	65,57	64,45
Blob	56,15	55,87	55,08	54,10	65,43	64,45
Boat	54,05	55,17	53,85	53,80	65,24	64,45
Camera man	59,50	59,52	57,33	55,92	64,54	64,45
Car	54,40	56,88	54,15	57,26	64,67	64,45
Couple	52,64	53,41	51,90	51,76	65,65	64,45
Gold hill	53,32	53,44	53,21	52,98	64,91	64,45
Lena	54,97	55,13	54,34	53,81	65,18	64,45
Tiffany	54,16	53,65	52,94	52,35	65,32	64,45
Trung bình	55,09	55,58	54,30	54,07	65,18	64,45

Như vậy có thể thấy, với cùng một lượng bit nhúng ngẫu nhiên chất lượng ảnh trung bình của nhiều ảnh chứa tin sẽ cao hơn đáng kể so với các phương pháp mà chỉ có một ảnh chứa tin đầu ra. Với số lượng ảnh chứa tin nhiều hơn, không chỉ tăng khả năng nhúng mà dễ dàng đảm bảo chất lượng ảnh của các ảnh chứa tin, đồng thời cũng tăng tính bảo mật cho thông tin bí mật. Chất lượng ảnh biểu thị trên bảng 6, 7 cho thấy, phương pháp đề xuất có chất lượng ảnh rất tốt chỉ kém phương pháp Dual-PVO một chút nhưng lớn hơn rất nhiều so với các phương pháp PVO được so sánh. Thêm nữa, thuật toán đề xuất luôn nhúng 8 bit vào mỗi khối ảnh, không phụ thuộc vào sai

số d_{max} , d_{min} như của Dual-PVO. Điều này là một lợi thế trong việc điều khiển khả năng nhúng để được chất lượng ảnh mong muốn.

4. Kết luận

Bài báo đề xuất một phương pháp giấu tin thuận nghịch mới hiệu quả cho ảnh đa mức xám sử dụng phương pháp PVO. Từ một ảnh xám gốc, sau khi nhúng tin sẽ thu được ba ảnh xám chứa thông tin bí mật. Thực nghiệm cho thấy, phương pháp đề xuất có khả năng nhúng cao và chất lượng ảnh tốt khi so sánh với các phương pháp giấu tin dựa trên PVO hiện hành. Thêm nữa, tin tặc cần nhận được ba ảnh cùng lúc mới có thể khôi phục được ảnh gốc và thông tin bí mật do đó mô hình giấu tin thuận nghịch đề xuất có tính bảo mật tốt hơn.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Giao thông vận tải trong đề tài mã số T2022-CN-005.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] J. Cox, L. Miller, A. Boom, J. Fridrich, and T. Kaller, *Digital watermarking and steganography*, 2nded. Elsevier, 2008. [E-book]. Available: <https://books.google.com.vn/books?id=JZQLpzihtecC> [Accessed: 10 Oct 2022].
- [2] J. Tian, "Reversible data embedding using a difference expansion," *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, vol. 13, no. 8, pp. 890–896, 2003. [Abstract]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1227616> [Accessed: 10 Oct 2022].
- [3] Z. Pan and E. Gao, "A Reversible data hiding based on novel embedding structure PVO and adaptive block-merging strategy," *Multimedia Tools and Applications*, vol. 78, no. 18, pp. 26047–26071, 2019. [Abstract]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11042-019-7692-3>. [Accessed: 10 Oct 2022].
- [4] X. Li, J. Li, B. Li, and B. Yang, "High fidelity reversible data hiding scheme based on pixel value ordering and prediction," *Signal Process.*, vol. 93, pp. 198–205, 2013. [Abstract]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0165168412002551>. [Accessed: 10 Oct 2022].
- [5] Y. Niu and S. Shen, "A novel pixel value ordering reversible data hiding based on dual-image," *Multimedia Tools and Applications*, vol. 81, pp. 13751–13771, 2022. [Abstract]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11042-022-12149-y>. [Accessed: 10 Oct 2022].
- [6] F. Peng, X. Li, and B. Yang, "Improved PVO-based reversible data hiding," *Digital Signal Processing*, vol. 25, pp. 255–265, 2014. [Abstract]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1051200413002479>. [Accessed: 10 Oct 2022].
- [7] O. Bo, 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. [Abstract]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0923596514000824>. [Accessed: 10 Oct 2022].
- [8] P.-H. Kim, K.-W. Ryu, and K.-H. Jung, "Reversible data hiding scheme based on pixel-value differencing in dual images," *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 16, no. 7, pp. 1–3, 2020. [Abstract]. Available: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/1550147720911006>. [Accessed: 10 Oct 2022].
- [9] K. S. Nguyen, T. L. Cao, K. T. Le, and V. A. Pham, "Reversible Data Hiding Based on Prediction Error Histogram Shifting and Pixel-Based PVO," in *Asian Conference on Intelligent Information and Database Systems*, Springer, Cham, 2020, pp. 570–581. [Abstract]. Available: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-42058-1_48. [Accessed: 10 Oct 2022].
- [10] K. H. Jung, "Data hiding scheme based on pixel-value differencing in dual images," in *International Conference on Electronics, Information, and Communication (ICEIC)*, IEEE, 2018, pp. 1–3. [Abstract]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8330722>. [Accessed: 10 Oct 2022].