



## A REVERSIBLE DATA HIDING BASED ON GENERALIZED PIXEL VALUE ORDERING

Nguyen Trong Phuc, Cao Thi Luyen

University of Transport and Communications, No 3 Cau Giay Street, Hanoi, Vietnam

### ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 10/12/2020

Revised: 25/12/2020

Accepted: 26/12/2020

Published online: 15/2/2021

<https://doi.org/10.47869/tcsj.72.2.5>

\* *Corresponding author*

Email: luyenct@utc.edu.vn; Tel: 0912403345

**Abstract.** The security and integrity verification of the data has been becoming supreme importance and concerning, especially, almost data communications are performed through the Internet. In this paper, we propose the reversible data hiding scheme based on generalized pixel value ordering in order to solve authentication the digital integrity images. In the proposed scheme, each selected sub block first is sorted in ascending order then embedding  $k$  bits of data without changing order. The criteria for selecting smooth blocks is also proposed in this paper. Embedding in those smooth blocks make image quality better. Experimental results show that the proposed reversible data hiding scheme gains not only high embedding capacity but also good imperceptibility.

**Keywords:** reversible data hiding, pixel value ordering, generalized pixel value ordering.

© 2021 University of Transport and Communications



## MỘT LƯỢC ĐỒ GIẤU TIN THUẬN NGHỊCH DỰA THEO PHƯƠNG PHÁP GEPVOK

Nguyễn Trọng Phúc, Cao Thị Luyện

Trường Đại học Giao thông vận tải, Số 3 Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

### THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 10/12/2020

Ngày nhận bài sửa: 25/12/2020

Ngày chấp nhận đăng: 26/12/2020

Ngày xuất bản Online: 15/2/2021

<https://doi.org/10.47869/tcsj.72.2.5>

\* Tác giả liên hệ

Email: luyenct@utc.edu.vn; Tel: 0912403345

**Tóm tắt.** Việc xác minh bản quyền cũng như tính toàn vẹn của dữ liệu số đã và đang là mối quan tâm hàng đầu, nhất là hiện nay việc truyền tải dữ liệu được thực hiện thông qua mạng Internet. Trong bài báo này, chúng tôi đề xuất lược đồ giấu tin thuận nghịch dựa trên thứ tự điểm ảnh của một khối ảnh nhằm xác thực ảnh số này có bị biến đổi trái phép trên đường truyền hay không. Trong lược đồ được đề xuất, mỗi khối con được chọn trước tiên được sắp xếp theo thứ tự tăng dần sau đó nhúng kbit dữ liệu mà không thay đổi thứ tự. Tiêu chí để lựa chọn các khối phẳng cũng được đề xuất trong bài báo này. Việc nhúng vào các khối phẳng đó làm cho chất lượng ảnh chứa tin tốt hơn. Kết quả thực nghiệm cho thấy lược đồ giấu tin thuận nghịch đề xuất có khả năng nhúng cao và chất lượng ảnh tốt so với các lược đồ có cùng phương pháp.

**Từ khóa:** giấu tin thuận nghịch, thứ tự giá trị điểm ảnh PVO, thứ tự giá trị điểm ảnh tổng quát GePVOK

© 2021 Trường Đại học Giao thông vận tải

### 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Việc bảo mật thông tin cũng như kiểm tra tính toán vẹn dữ liệu khi truyền tải trên mạng ngày càng trở thành vấn đề cấp bách, đặc biệt trong thời đại Internet cũng như có những phần mềm chỉnh sửa dữ liệu số rất tinh vi mà chúng ta khó có thể phát hiện bằng mắt thường. Một trong những công cụ hữu hiệu được biết đến để giải quyết vấn nạn trên là giấu tin nói chung, giấu tin thuận nghịch nói riêng.

Giấu tin là kỹ thuật nhúng thông tin bí mật vào dữ liệu đa phương tiện như ảnh số, âm thanh hay video... Thông tin bí mật sau này có thể được khôi phục làm cơ sở để chứng minh bản quyền hoặc xác thực tính toàn vẹn của dữ liệu đa phương tiện. Loại giấu tin mà cho phép khôi phục nguyên vẹn dữ liệu đa phương tiện gốc bên cạnh việc khôi phục thông tin bí mật thì được gọi là giấu tin thuận nghịch [1]. Giấu tin thuận nghịch là cơ sở để xây dựng mô hình thủy thuận nghịch ứng dụng cho bài toán xác định tính toàn vẹn của dữ liệu số. Các phương pháp giấu tin thuận nghịch có thể liệt kê theo trình tự thời gian đề xuất như sau: phương pháp nén bảo toàn [2], mở rộng hiệu [3,4], biến đổi nguyên [5,6], dịch chuyển histogram [7,8], mở rộng sai số dự báo [9,10], sắp xếp giá trị điểm ảnh [11,12,13,14,15]. Trong các phương pháp nói trên thì phương pháp giấu tin dựa trên sự xếp giá trị điểm ảnh là một hướng mới nhất hiện nay cho chất lượng ảnh tốt mà khả năng nhúng cao. Bài báo này nghiên cứu giấu tin thuận nghịch trên ảnh số dựa trên sự sắp xếp giá trị điểm ảnh nhằm tìm hiểu và mở rộng để phát hiện lược đồ giấu tin thuận nghịch hiệu quả. Giấu tin thuận nghịch dựa trên sự sắp xếp các điểm ảnh (pixel value orderring- PVO) này được Li và các cộng sự đề xuất đầu tiên vào năm 2013 [11]. Phương pháp này nhúng 2 bit vào trong mỗi khối con nếu sai số dự báo lớn nhất (hoặc nhỏ nhất) bằng 1 (hoặc -1) sao cho thứ tự sắp xếp của một dãy điểm ảnh không đổi để việc khôi phục thông tin được thực hiện. Lược đồ [11] bỏ qua các khối mà có sai số dự báo là 0, trong khi các khối có tính chất như vậy tương đối nhiều nhất là các ảnh tự nhiên. Lược đồ [12] cải tiến [11] bằng việc sử dụng cả những khối có sai số là 0 để nâng cao khả năng nhúng. Tuy nhiên, ở lược đồ [12], nếu khối có nhiều điểm ảnh có giá trị lớn nhất và nhiều điểm ảnh có giá trị nhỏ nhất thì bị bỏ qua. Lược đồ [13] đã mở rộng [12] ở điểm trên và được gọi là phương pháp PVOK. Tuy nhiên, [13] chỉ nhúng được 1 bit trong khối có K giá trị lớn nhất đó và phải biến đổi K điểm ảnh. Điều này làm gia tăng không mấy khả năng nhúng nhưng chất lượng ảnh lại giảm đi đáng kể. [14] tiếp tục phát triển lược đồ [13], được gọi là lược đồ GePVOK nhằm nhúng được K bit trong K giá trị điểm ảnh lớn nhất (nhỏ nhất). Kết quả là khả năng nhúng cũng như chất lượng ảnh được cải thiện hơn [13]. Điểm yếu của [14] là sử dụng 2 bit để lưu trữ bản đồ trong khi bản đồ cũng là một thông tin cần được nhúng vào trong ảnh. Kích thước bản đồ càng lớn thì không gian dùng để lưu trữ thông tin bí mật càng bị thu hẹp. [15] đã khắc phục nhược điểm đồng thời sử dụng thêm cả khối có giá trị điểm ảnh là 0,1,254,255 nhờ đó mà khả năng nhúng của lược đồ này cao hơn so với [14]. Tuy nhiên trong 1 số trường hợp, để nhúng được dữ liệu [15] phải biến đổi 2 đơn vị trong khi [14] chỉ thay đổi 1 giá trị. Điều này làm giảm chất lượng ảnh của lược đồ [15] so với [14]. Bài báo này sẽ khắc phục nhược điểm trên bằng cách đưa ra tiêu chuẩn chọn khối để nhúng tin, thông tin chỉ được nhúng ở trong các khối thỏa mãn điều kiện cho trước. Nội dung tiếp theo của bài báo là những công trình liên quan được trình bày ở Mục 2. Mục 3 sẽ đề xuất lược đồ nhúng tin thuận nghịch để vỡ khóa công khai trên ảnh. Việc so sánh khả năng nhúng tin và chất lượng ảnh giữa lược đồ đề xuất với các phương pháp liên quan được trình bày ở Mục 4. Mục 5 là một số kết luận của bài báo.

## 2. CÁC CÔNG TRÌNH LIÊN QUAN

### 2.1. Lược đồ PVO

PVO được Li và cộng sự đề xuất đầu tiên năm 2013 và được đánh giá là phương pháp có khả năng nhúng cao mà chất lượng ảnh tốt, do đó đã và đang có nhiều nghiên cứu mở rộng dựa theo phương pháp này [11]. Theo PVO, ảnh gốc được chia thành thành các khối không giao nhau. Với mỗi khối cho trước có n điểm ảnh  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  tiếp theo được sắp xếp theo thứ tự tăng dần để được dãy  $(x_{\sigma(1)}, x_{\sigma(2)}, \dots, x_{\sigma(n)})$ , với  $\sigma: \{1, \dots, n\} \rightarrow \{1, \dots, n\}$  là một ánh xạ một - một

là  $x_{\sigma(1)} \leq x_{\sigma(2)} \leq \dots \leq x_{\sigma(n)}$ . Sau đó, sai số dự báo lớn nhất  $d_{max}$  và nhỏ nhất  $d_{min}$  được tính theo công thức dưới đây:

$$d_{max} = x_{\sigma(n)} - x_{\sigma(n-1)} \text{ và } d_{min} = x_{\sigma(1)} - x_{\sigma(2)}$$

Tiếp theo, thông tin bí mật  $b$  được nhúng theo công thức sau:

$$d'_{max} = \begin{cases} d_{max}, & \text{nếu } d_{max} = 0 \\ d_{max} + b, & \text{nếu } d_{max} = 1 \\ d'_{max} + 1, & \text{nếu } d_{max} > 1 \end{cases}$$

$$d'_{min} = \begin{cases} d_{min}, & \text{nếu } d_{min} = 0 \\ d_{min} - b, & \text{nếu } d_{min} = -1 \\ d_{min} - 1, & \text{nếu } d_{min} < -1 \end{cases}$$

Cuối cùng, điểm ảnh chứa tin được tính bằng công thức dưới đây tương ứng với trường hợp nhúng tại  $d_{max}$  và  $d_{min}$ :

$$x' = x_{\sigma(n-1)} + d'_{max}$$

$$x' = x_{\sigma(2)} + d'_{min}$$

## 2.2. Lược đồ GePVOK

Lược đồ PVO [13] bỏ qua tất cả các khối mà sai số bằng 0 mà chỉ sử dụng các dấu hiệu  $d_{max} = 1$  và  $d_{min} = -1$  để nhúng tin. Điều này là không tối ưu đặc biệt các ảnh tự nhiên thì khối ảnh có sai số là 0 tương đối nhiều, nghĩa là khả năng nhúng sẽ tốt hơn nếu sử dụng cả dấu hiệu sai số là 0 để nhúng tin. GePVOK là một phương pháp cải tiến của phương pháp PVO giải quyết nhược điểm trên, hơn nữa GePVOK cho phép nhúng  $K$  bit trong một khối có  $K$  phần tử lớn nhất. Cũng như phương pháp PVO, đầu tiên ảnh gốc cũng được chia thành các khối không giao nhau rồi sắp xếp các điểm ảnh của khối theo thứ tự tăng dần. Giả sử các điểm ảnh của một khối sau sắp xếp là:

$$x_{\sigma(1)} = \dots = x_{\sigma(k_1)} < x_{\sigma(k_1+1)} \leq \dots \leq x_{\sigma(n-K)} < x_{\sigma(n-K+1)} = \dots = x_{\sigma(n)}$$

với  $K$  là số các giá trị lớn nhất và  $k_1$  là số các giá trị nhỏ nhất. GePVOK sử dụng hai bit để đánh dấu khối thành ba trường hợp: 2 cho khối chứa 0, 1, 254, 255; 1 cho khối phẳng (mọi điểm ảnh trong khối bằng nhau), 0 cho các khối còn lại. Trong trường hợp bản đồ định vị là 2 thì bỏ qua khối này tức là không xử lý. Trong trường hợp bản đồ định vị của khối là 1 thì  $n-1$  bit dữ liệu được nhúng theo công thức dưới đây:

$$x'_{\sigma(i)} = \begin{cases} x_{\sigma(i)}, & \text{nếu } i = 1 \\ x_{\sigma(i)} + b_{i-1} + 1, & \text{nếu } i = 2, 3, \dots, n \end{cases}$$

Trong trường hợp bản đồ định vị là 0, sai số lớn nhất của khối ảnh nhúng tin được tính toán như sau:

$$d_{max} = x_{\sigma(n)} - x_{\sigma(n-K)} \tag{1}$$

Trường hợp 1: nếu  $d_{max} > 1$ : không có dữ liệu được nhúng, mọi phần tử lớn nhất được tăng lên 1.

Trường hợp 2: nếu  $d_{max} = 1$ :  $K$  bit dữ liệu được nhúng vào các phần tử lớn nhất, nghĩa là mọi phần tử lớn nhất và lớn thứ nhì được tăng 1, sau đó nhúng dữ liệu và  $K$  phần tử lớn nhất:

$$x'_{\sigma(i)} = \begin{cases} x_{\sigma(i)}, & \text{nếu } i = 1 \leq \sigma(i) < n - K - S \\ x_{\sigma(i)} + 1, & \text{nếu } n - K - S + 1 \leq n - K \leq n \\ x_{\sigma(i)} + b_i + 1, & \text{nếu } n - K \leq i \leq n \end{cases}$$

trong đó  $S$  là số điểm ảnh có giá trị lớn thứ hai.

Sau khi nhúng vào các phần tử lớn nhất, các tác giả nhúng dữ liệu và các phần tử nhỏ nhất theo cách tương tự.

Bản đồ nén sẽ được nhúng vào ảnh gốc kèm theo thông tin bí mật để phục vụ cho quá trình khôi phục. Với mỗi một ảnh thì khả năng nhúng là hữu hạn, nếu dung lượng dành cho việc nhúng bản đồ nhiều thì đồng nghĩa với việc không gian sử dụng để nhúng thông tin bí mật sẽ bị thu hẹp. Lược đồ GePVOK sử dụng 2 bit lưu trữ bản đồ trong khi PVO chỉ dùng 1 bit. Yếu điểm của GePVOK làm giảm khả năng nhúng. Lược đồ [15] cải tiến GePVOK ở điểm này, thêm vào đó các khối chứa  $\{0,1,254,25\}$  cũng được sử dụng để nhúng tin. Nhờ vậy mà [15] đã nâng cao được khả năng nhúng so với GePVOK. Tuy nhiên, chất lượng ảnh của [15] không được tốt bằng GePVOK do biến đổi 2 đơn vị trong khi GePVOK chỉ thay đổi 1 đơn vị. Bài báo này sẽ đưa ra giải pháp để nâng cao chất lượng ảnh cũng như tận dụng các lợi thế mà [15] có.

### 3. LƯỢC ĐỒ ĐỀ XUẤT

Lược đồ [15] khắc phục nhược điểm của lược đồ GePVOK là sử dụng các khối phẳng có chứa giá trị 0,1, 254, 255 cũng như chỉ sử dụng 1 bit để lưu trữ bản đồ thay vì sử dụng 2 bit nên làm tăng khả năng nhúng tin. Bài báo sử dụng kỹ thuật xây dựng bản đồ và nhúng tin của [15] bổ sung thêm tiêu chuẩn để đánh giá độ phẳng của khối và chỉ nhúng tin trên những khối có độ phẳng cao. Dưới đây sẽ trình bày chi tiết tiêu chuẩn chọn khối và lược đồ nhúng tin.

#### 3.1 Tiêu chuẩn chọn khối ảnh

[11] đã chỉ ra rằng việc nhúng tin vào các khối có tính phẳng càng cao thì chất lượng ảnh của lược đồ càng tốt. [11] tính độ phẳng dựa vào hai giá trị chính là hiệu của giá trị lớn và giá trị nhỏ thứ hai trong khối. Tính tương quan của một khối có nhiều điểm ảnh hơn sẽ tốt hơn nên chúng tôi sử dụng một hàng và một cột lân cận của khối kích thước  $m \times n$  để đánh giá độ phẳng thay vì dùng 2 giá trị như [11]. Dưới đây là minh họa cho tiêu chí chọn khối:

0	0	0	$c_0$
0	0	0	$c_1$
$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$

Hình 1. Mô tả tiêu chuẩn chọn khối.

Trong đó, vùng màu xanh là khối hiện tại cần xem xét tính phẳng, vùng màu vàng là các điểm lân cận được dùng để lập công thức đánh giá độ phẳng như sau:

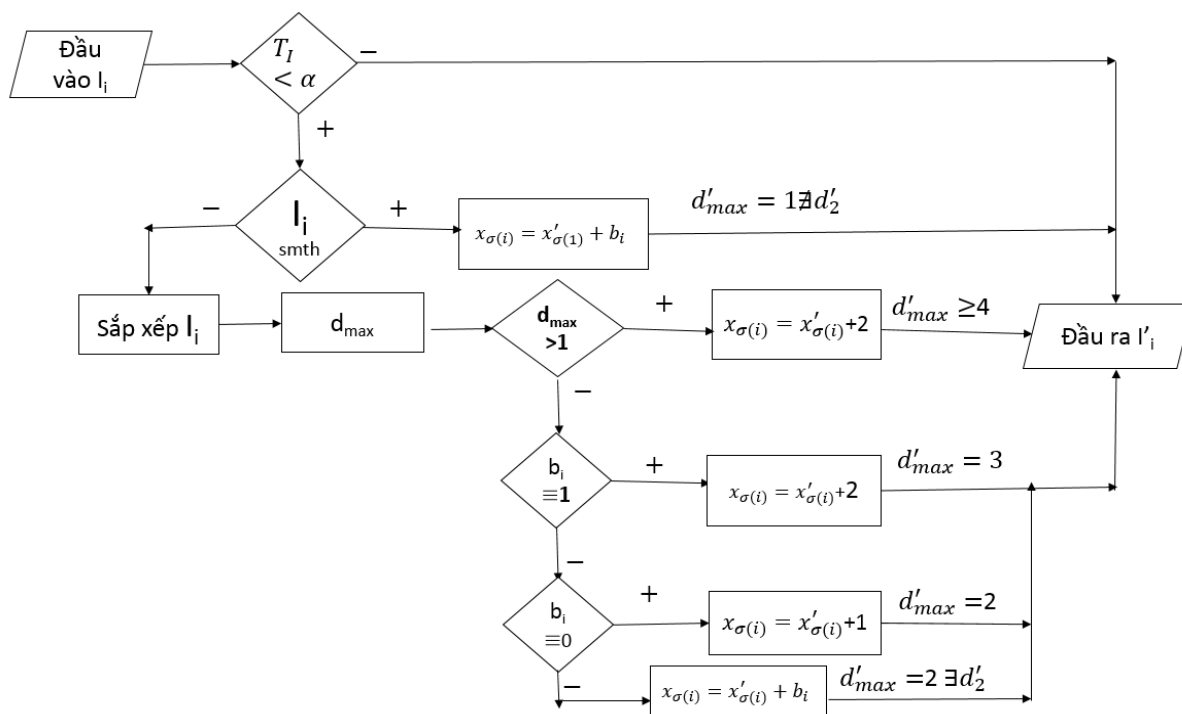
$$T(I_i) = \frac{1}{l} \sqrt{\sum_{i=1}^l (c_i - s)^2} \quad (2)$$

Trong đó,  $s = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l c_i$ ,  $l$  là số điểm ảnh dùng để đánh giá độ phẳng. Trong ví dụ trên thì  $l=6$  tương ứng với các điểm ảnh có màu vàng.

Với mỗi ảnh và lượng thông tin cho trước, ta cần lập để xác định điều kiện để khối nào được chọn cho việc nhúng tin. Giả sử quá trình lập dừng ở giá trị  $\alpha$ , nghĩa là  $T(I_i) \leq \alpha$  thì khối  $I_i$  sẽ được sử dụng để nhúng tin.

### 3.2 Thuật toán nhúng tin trên một khối ảnh

Cho trước khối ảnh  $I_i$  và  $\alpha$  đã được xác định ở mục 3.1, quá trình nhúng dữ liệu trên một khối ảnh có thể mô tả như hình dưới đây:



Hình 2. Quá trình nhúng tin trên một khối ảnh.

Nếu  $T(I_i) \geq \alpha$  ( $T$  được tính theo công thức 2) thì khối này giữ nguyên (bỏ qua) ngược lại thì xem xét các trường hợp sau:

Trường hợp 1: nếu khối  $I_i$  hoàn toàn phẳng kí hiệu bởi  $I_i smth$ , nghĩa là tất cả các giá trị điểm ảnh của khối bằng nhau thì nhúng  $m \times n - 1$  bit theo công thức:

Nếu  $x_{\sigma(1)} = 255$  thì  $x'_{\sigma(i)} = x_{\sigma(1)} - b_i$  ngược lại  $x'_{\sigma(i)} = x_{\sigma(1)} + b_i$ , với  $i = 2, \dots, m \times n$

Trường hợp 2: nếu khối  $I_i$  không hoàn toàn phẳng thì thực hiện các bước sau:

Bước 1: Sắp xếp  $I_i$  theo thứ tự tăng dần kí hiệu là  $(x_{\sigma(1)}, x_{\sigma(2)}, \dots, x_{\sigma(m \times n)})$ . Giả sử dãy có  $K$  giá trị lớn nhất.

Bước 2: Tính sai số dự báo lớn nhất  $d_{max}$  theo công thức  $d_{max} = x_{\sigma(m \times n)} - x_{\sigma(m \times n - K)}$

Trường hợp 2-1: nếu  $d_{max} > 1$ , dữ liệu không được nhúng và các điểm ảnh tăng lên 2 đơn vị.

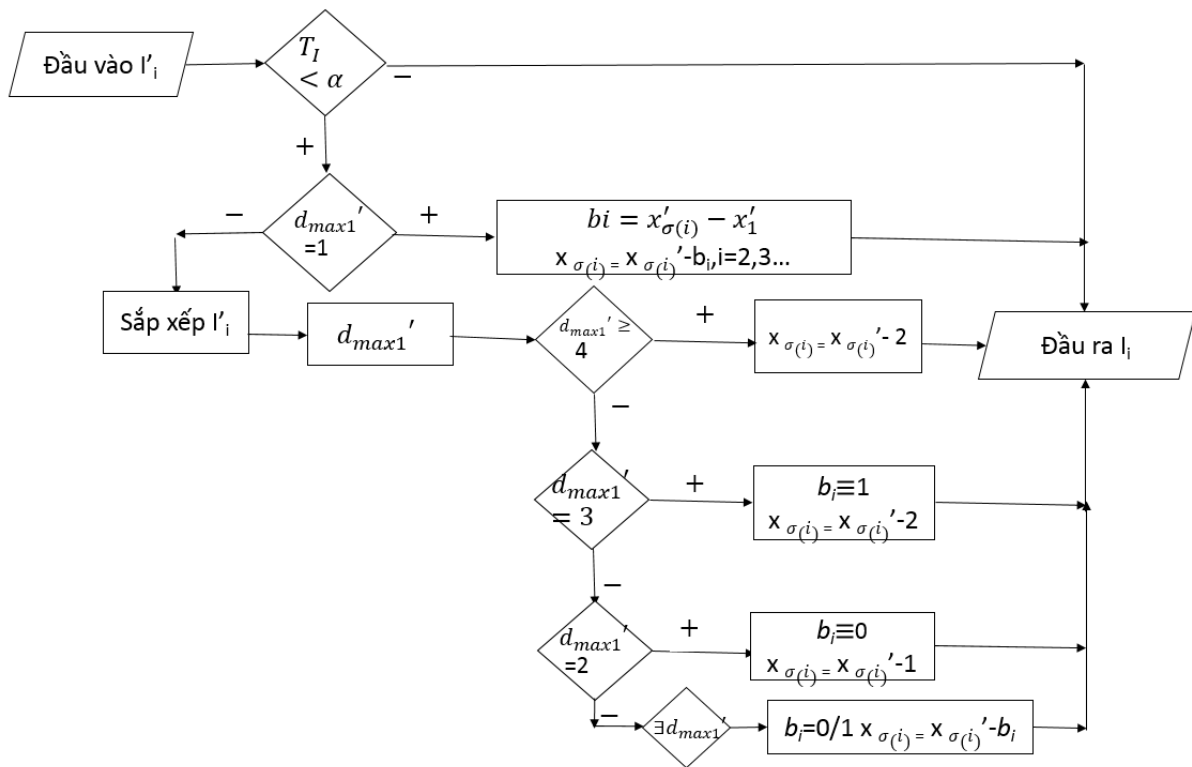
$$x'_{\sigma(i)} = x_{\sigma(i)} + 2, i = m \times n - K + 1, \dots, m \times n$$

Trường hợp 2-2: nếu  $d_{max} = 1$

Trường hợp 2-2-1: nếu  $b_i \equiv 1, i = 1 \dots K$  thì  $x'_{\sigma(i)} = x_{\sigma(i)} + 2, i = m \times n - K + 1, \dots, m \times n$   
 Trường hợp 2-2-2: nếu  $b_i \equiv 0, i = 1 \dots K$  thì  $x'_{\sigma(i)} = x_{\sigma(i)} + 1, i = m \times n - K + 1, \dots, m \times n$   
 Trường hợp 2-2-3: nếu  $b_i = 0|1, i = 1 \dots K$  thì  $x'_{\sigma(i)} = x_{\sigma(i)} + b_i, i = m \times n - K + 1, \dots, m \times n$

### 3.3 Thuật toán khôi phục tin trên một khối ảnh

Hình 3 dưới đây mô tả quá trình khôi phục dữ liệu và một khối con của ảnh gốc.



Hình 3. Quá trình khôi phục thông tin trên một khối ảnh.

Đầu tiên, ảnh chứa tin được chia thành các khối không giao nhau kích thước  $m \times n$ . Dưới các phần tử của khối thành một dãy kí hiệu là  $I_i' = (x_1', x_2', \dots, x_{m \times n}')$ . Nếu  $T(I_i') \geq \alpha$  thì khối này giữ nguyên (bỏ qua), ngược lại thì sắp xếp các phần tử của dãy theo thứ tự tăng dần để nhận được dãy  $(x_{\sigma(1)}', x_{\sigma(2)}', \dots, x_{\sigma(m \times n)}')$ ,  $T(I_i')$  được tính theo công thức (1). Tiếp theo tính:

$$d_{max1}' = x'_{\sigma(m \times n - R + 1)} - x'_{\sigma(m \times n - R)}$$

$$d_{max2}' = x'_{\sigma(m \times n - R - S + 1)} - x'_{\sigma(m \times n - R - S)}$$

Với  $R$  và  $S$  lần lượt là số giá trị điểm ảnh lớn nhất và số điểm ảnh lớn thứ nhì của dãy  $(x_{\sigma(1)}', x_{\sigma(2)}', \dots, x_{\sigma(m \times n)}')$  với  $R + S = K$ .

Xét các trường hợp sau:

Trường hợp 1:  $d_{max1}' \geq 4$  chứng tỏ khối này không chứa tin, các điểm ảnh cần khôi phục theo công thức:

$$x_{\sigma(i)} = x'_{\sigma(i)} - 2$$

Trường hợp 2:  $d_{max1}' = 3$  dữ liệu và ảnh được khôi phục theo công thức dưới đây (tương ứng với trường hợp 2.1 của quá trình nhúng):

$$b_i \equiv 1, x_{\sigma(i)} = x'_{\sigma(i)} - 2, i = m \times n - K + 1, \dots, m \times n$$

Trường hợp 3:  $d_{max1}' = 2$  dữ liệu và ảnh được khôi phục theo công thức sau tương ứng với trường hợp 2.2 của quá trình nhúng):

$$b_i \equiv 0, x'_{\sigma(i)} = x_{\sigma(i)} - 2, i = m \times n - K + 1, \dots, m \times n$$

Trường hợp 4:  $d_{max1}' = 1$

Nếu không tồn tại  $d_{max2}'$  (tương ứng trường hợp 1 của quá trình nhúng) thì dữ liệu và ảnh được khôi phục theo công thức:

$$b_i = x'_{\sigma(i)} - x_{\sigma(1)}', x'_{\sigma(i)} = x_{\sigma(i)} - b_i, i = 2, \dots, m \times n$$

Nếu  $d_{max2}' = 1$  (tương ứng trường hợp 2.2.3 của quá trình nhúng) thì dữ liệu và ảnh được khôi phục theo công thức:

$$\text{Nếu } x'_{\sigma(i)} = \begin{cases} x'_{\sigma(m \times n)} & \text{thì } b_j = 1, x_{\sigma(i)} = x'_i - 1 \\ x'_{\sigma(m \times n - K)}, & \text{thì } b_j = 0, x_{\sigma(i)} = x'_{\sigma(i)} \end{cases}$$

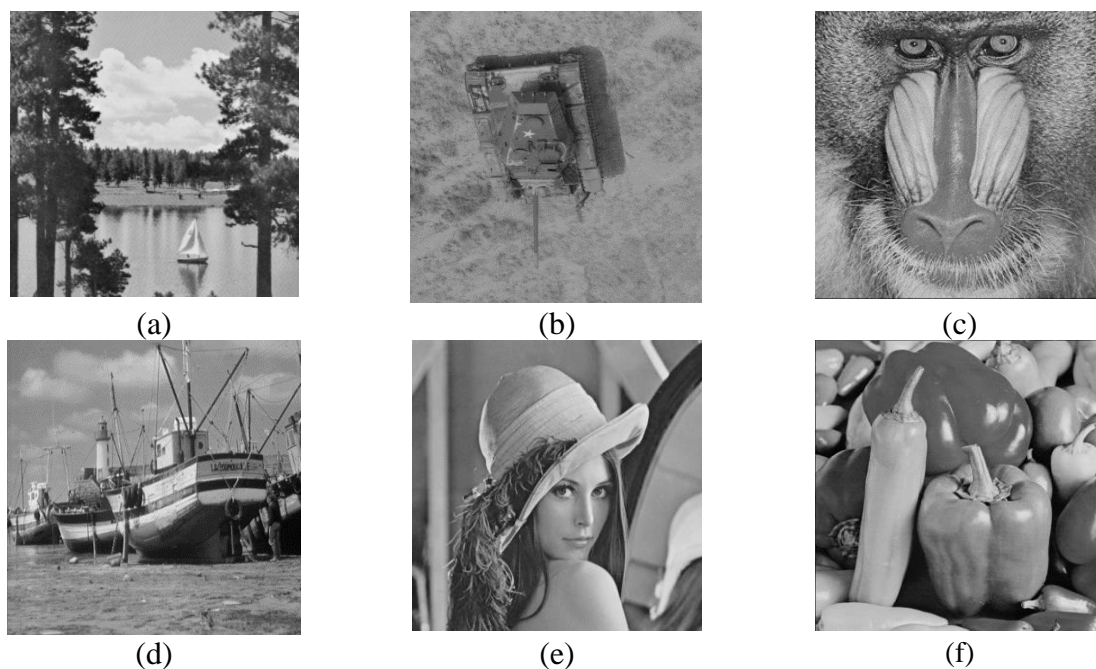
Trong đó  $i = 1, \dots, m \times n, j = 1, \dots, K$

Bằng việc khôi phục từng phần thông tin bí mật và ảnh gốc trên mỗi khối ta sẽ phục hồi được nguyên vẹn thông tin bí mật đã giấu cũng như ảnh ban đầu.

#### 4. THỬ NGHIỆM

Chúng tôi sử dụng các ảnh xám chuẩn có kích thước 512×512 như hình 4 dưới đây làm thử nghiệm trên môi trường matlab 2016. Thử nghiệm được tiến hành để so sánh về khả năng nhúng và chất lượng ảnh của lược đồ đề xuất với các lược đồ [11] gọi là lược đồ PVO, lược đồ [13] gọi là PVOK và lược đồ [14] kí hiệu là lược đồ GePVOK.





Hình 4. Các ảnh dùng trong thử nghiệm.

Kết quả thử nghiệm được thể hiện ở các bảng dưới đây. Bảng 1 và 2 thể hiện kết quả so sánh về khả năng nhúng, bảng 3, 4 là kết quả của việc đánh giá chất lượng ảnh.

Bảng 1. So sánh về khả năng nhúng với khối con kích thước 2×2.

Ảnh	PVO	PVOK	GePVOK	Lược đồ đề xuất
(a)	27440	27440	28903	31361
(b)	33995	33995	34400	42669
(c)	13939	13939	14489	14822
(d)	32739	32739	33293	39549
(e)	40305	40305	43105	47728
(f)	32376	32376	34798	36455
Trung bình	30132	30132	31498	35430

Bảng 2. So sánh về khả năng nhúng với khối con kích thước 3×3.

Ảnh	PVO	PVOK	GePVOK	Lược đồ đề xuất
(a)	12325	16202	21214	21573
(b)	15540	22380	32035	32881
(c)	7507	8564	9741	9741
(d)	13461	18881	26943	27540
(e)	16910	23702	32744	33033
(f)	14978	19450	25001	25046
Trung bình	13453	18196	24613	24969

Bảng 1 và 2 cho thấy lược đồ đề xuất có khả năng nhúng cao hơn lược đồ GePVOK, vượt trội hơn hẳn so với lược đồ PVO và PVOK.

Phân tiếp theo, chúng tôi thử nghiệm để so sánh chất lượng ảnh của phương pháp đề xuất với các phương pháp liên quan. Quá trình thử nghiệm được tiến hành với khối con có kích thước 2×2 và lượng thông tin nhúng vào lần lượt là 10000 và 20000 bit. Kết quả được lưu trữ ở Bảng 3 và 4 dưới đây.

Bảng 3. So sánh về chất lượng ảnh khi nhúng 10000 bit khối con 2×2.

Ảnh	PVO	PVOK	GePVOK	[15]	Lược đồ đề xuất
(a)	55.79658	54.8107	55.52489	53.2038	56.45985
(b)	55.56853	54.1111	54.71527	51.2332	54.59705
(c)	51.66858	50.7637	52.21383	50.89232	52.1688
(d)	58.68093	56.8370	57.03986	53.04577	57.33961
(e)	57.43661	55.9442	56.59269	53.84745	57.14938
(f)	55.99933	54.0728	56.40851	53.34709	56.48519
Trung bình	55.85843	54.2325	55.41584	52.59494	55.69998

Bảng 4. So sánh về chất lượng ảnh khi nhúng 20000 bit khối con 2×2.

Ảnh	PVO	PVOK	GePVOK	[15]	Lược đồ đề xuất
(a)	52.65999	5.162.403	52.21272	50.30416	53.27155
(b)	53.37087	5.217.375	52.63704	48.99972	53.16301
(d)	53.10048	5.407.311	53.05997	49.75953	54.14975
(e)	57.54353	5.680.805	57.5566	53.8409	57.18767
(f)	56.45941	5.414.128	56.25524	53.09395	56.11154
Trung bình	54.11808	5.311.900	53.74351	50.88478	54.12259

Từ các Bảng 3 và 4 cho thấy, lược đồ đề xuất có chất lượng ảnh tương đương với phương pháp PVO, GePVOK và tốt hơn phương pháp PVOK cũng như lược đồ [15]-mở rộng của GePVOK. Như vậy lược đồ đề xuất là một cải tiến của GePVOK cho chất lượng ảnh tốt mà khả năng nhúng cao hơn lược đồ các lược đồ có cùng phương pháp như PVO, PVOK và GePVOK.

## 5. KẾT LUẬN

Giấu tin nói chung cũng như giấu tin thuận nghịch nói riêng đã đang và sẽ còn chủ đề được nghiên cứu bởi khả năng ứng dụng của nó trong hầu hết các lĩnh vực của cuộc sống. Bài báo này đã mở rộng giấu tin thuận nghịch dựa theo kỹ thuật mới nhất hiện nay trong lĩnh vực giấu tin thuận nghịch dựa trên sự sắp xếp giá trị điểm ảnh PVO. Việc lựa chọn khối thỏa mãn tính phẳng theo bài báo đề xuất để nhúng tin đã nâng cao được chất lượng của ảnh chứa tin. Thử nghiệm cho thấy lược đồ đề xuất có hiệu quả tốt đặc biệt cải thiện đáng kể về chất lượng ảnh so với các lược đồ liên quan. Kết quả này là tiền đề tốt để xây dựng ứng dụng cho việc thực tính toàn vẹn của ảnh số.

## LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường đại học Giao thông vận tải trong đề tài mã số T2020-CN01.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. J. Cox, L. Miller, A. Boom, J. Fridrich, T. Kaller, Digital watermarking and steganography, Elsevier, 2008.
- [2]. J. Fridrich, M. Goljan, R. Du, Lossless data embedding--new paradigm in digital watermarking, EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2002 (2002) 185–196. <https://doi.org/10.1155/S1110865702000537>
- [3]. J. Tian, Reversible data embedding using a difference expansion, IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol, 8 (2003) 890–896. <http://doi.org/10.1109/TCSVT.2003.815962>
- [4]. A.M. Alattar, Reversible Watermarking Using the Difference Expansion of A Generalized Integer, IEEE transactions on image processing, 8 (2004) 1147–1156. <http://doi.org/10.1109/TIP.2004.828418>
- [5]. G. Xuan, C. Yang, Y. Zhen, Y.Q. Shi, Z. Ni, Reversible Data Hiding Using Integer Wavelet Transform and Companding Technique, Lecture Notes in Computer Science book series, 3304 (2004) 115-124. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-31805-7\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-540-31805-7_10)
- [6]. F. Peng, X. Li, B. Yang, Adaptive reversible data hiding scheme based on integer transform, Signal Processing, 92 (2012) 54-62. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2011.06.006>
- [7]. D.M. Thodi, J.J. Rodriguez, Expansion Embedding Techniques for Reversible Watermarking, IEEE Trans. Image Process, 16 (2007) 721 - 730. <http://doi.org/10.1109/TIP.2006.891046>
- [8]. X. Li, B. Li, B. Yang, T. Zeng, General framework to histogram shifting based reversible data hiding, IEEE Trans. Image Process, 22 (2013) 2181–2191. <http://doi.org/10.1109/TIP.2013.2246179>
- [9]. W. Hong, T.S. Chen, C.W. Shiu, Reversible data hiding for high quality images using modification of prediction errors, J.Syst.Softw, 82 (2009) 1833–1842). <https://doi.org/10.1016/j.jss.2009.05.051>
- [10]. D. Coltuc, Improved embedding for prediction-based reversible watermarking, IEEE Trans. Inf. Forensic Secur, 6 (2011) 873–882. <http://doi.org/10.1109/TIFS.2011.2145372>
- [11]. X. Li, J. Li, B. Li, B. Yang, High fidelity reversible data hiding scheme based on pixel value ordering and prediction error expansion, Signal Process, 93 (2013) 198–205. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2012.07.025>
- [12]. F. Peng, X. Li, and B. Yang, Improved PVO-based reversible data hiding, Digital Signal Processing, 25 (2014) 255–265. <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2013.11.002>
- [13]. X. Qu, H.J. Kim, Pixel-based pixel value ordering predictor for high-fidelity reversible data hiding, Signal Process 111 (2015) 249–260. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2015.01.002>
- [14]. J. J. Li, Y.H. Wu, C. F. Lee and C. C. Chang, Generalized PVO-K Embedding Technique for Reversible Data Hiding, International Journal of Network Security, 20 (2018) 65-77. [http://doi.org/10.6633/IJNS.201801.20\(1\).08](http://doi.org/10.6633/IJNS.201801.20(1).08)
- [15]. L.Q. Hoa, C. T. Luyen, N. K. Sao and P. V. At, An Improved Reversible Watermarking Based on Pixel Value Ordering and Prediction Error Expansion, Lecture Notes in Computer Science book series, 12034 (2020) 582-592. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-42058-1\\_49](https://doi.org/10.1007/978-3-030-42058-1_49)