

TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA
KHOA ĐIỆN TỬ VIỄN THÔNG

BÁO CÁO CUỐI KỲ
KỸ NĂNG NGHIÊN CỨU KHOA HỌC

Đề tài: Nghiên cứu ứng dụng công nghệ xử lý hình ảnh
truyền thông số dựa trên phương pháp biến đổi Wavelet

Sinh viên thực hiện: NGUYỄN TRỌNG NHÂN
NGUYỄN VĂN QUÝ
Lớp: 22KTMT1
Nhóm: 22.44
Giảng viên: TS. VÕ DUY PHÚC

Tháng 5 năm 2024

I. SỰ CẦN THIẾT CỦA ĐỀ TÀI

Với sự phát triển của công nghệ thông tin, con người ngày càng phụ thuộc vào mạng để tiếp cận thông tin, và hơn 80% thông tin trên mạng được thay thế bằng công nghệ đa phương tiện, mà hình ảnh là đại diện tiêu biểu. Vì vậy, nghiên cứu về công nghệ xử lý hình ảnh là rất quan trọng, nhưng phần lớn các nghiên cứu hiện nay chỉ tập trung vào một khía cạnh cụ thể. Kết quả nghiên cứu về mô hình hóa thống nhất cho nhiều khía cạnh của công nghệ xử lý hình ảnh vẫn còn hiếm. Do đó, bài báo này thực hiện mô hình hóa thống nhất cho các quá trình như khử nhiễu, thủy văn số (watermarking), mã hóa và giải mã, cũng như nén hình ảnh trong công nghệ xử lý hình ảnh, sử dụng biến đổi wavelet làm phương pháp để mô phỏng 300 bức ảnh từ đời sống thực. Kết quả cho thấy mô hình hóa thống nhất đã đạt được kết quả tốt ở tất cả các khía cạnh của xử lý hình ảnh.

II. MỤC ĐÍCH NGHIÊN CỨU

Mục tiêu của nghiên cứu là xây dựng một mô hình thống nhất dựa trên biến đổi wavelet để xử lý hình ảnh số, bao gồm các bước: khử nhiễu, thủy văn số, mã hóa, giải mã và nén hình ảnh. Cụ thể, nghiên cứu sử dụng biến đổi wavelet để:

- Phân tích và xử lý hình ảnh ở các dải tần số khác nhau, đảm bảo giữ được chi tiết hình ảnh trong quá trình khử nhiễu.
- Nhúng và trích xuất thủy văn số mà không làm ảnh hưởng đến chất lượng hình ảnh gốc.
- Mã hóa hình ảnh để tăng tính bảo mật, đảm bảo hình ảnh mã hóa có tính ngẫu nhiên cao.
- Nén hình ảnh để giảm dung lượng lưu trữ và tăng hiệu quả truyền tải, đồng thời duy trì khung hình chính của hình ảnh.

Nghiên cứu tiến hành mô phỏng trên 300 bức ảnh đời thường để đánh giá hiệu quả của mô hình thống nhất này trong các ứng dụng xử lý hình ảnh khác nhau.

III. ĐỐI TƯỢNG VÀ PHẠM VI NGHIÊN CỨU

1. Đối tượng nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu bao gồm các kỹ thuật xử lý hình ảnh số, tập trung vào việc ứng dụng biến đổi wavelet (Wavelet Transform - WT) để thực hiện các tác vụ như khử nhiễu (denoising), nhúng thủy văn số (digital watermarking), mã hóa và giải mã hình ảnh (image encryption and decryption), và nén hình ảnh (image compression). Cụ thể, nghiên cứu xây dựng một mô hình thống nhất sử dụng biến đổi wavelet để xử lý đồng thời các khía cạnh này trên hình ảnh số.

2. Phạm vi nghiên cứu

Dữ liệu nghiên cứu: Nghiên cứu sử dụng 300 bức ảnh đời thường, được chụp bằng điện thoại Huawei Mate 10, với kích thước 1440x1920 pixel, độ phân giải 96 dpi, độ sâu bit 24, và không sử dụng chế độ flash. Các bức ảnh này không bao gồm ảnh đặc biệt, đảm bảo tính đại diện cho các tình huống thực tế.

Môi trường mô phỏng: Hệ thống mô phỏng được thực hiện trên máy tính chạy hệ điều hành Windows 10, sử dụng phần mềm MATLAB 2014B.

Phương pháp và tham số: Biến đổi wavelet được áp dụng với ba tầng phân rã (three-layer wavelet decomposition), sử dụng cơ sở wavelet Daubechies (dbN) với bậc $N=3$. Các tham số này được chọn để đảm bảo tính mượt mà, khả năng định vị tần số tốt, và hiệu quả phân chia dải tần.

Phương pháp đánh giá: Hiệu quả của mô hình được đánh giá thông qua các chỉ số như sai số bình phương trung bình chuẩn hóa (Normalized Mean Square Error), hàm tương quan chéo chuẩn hóa (Normalized Cross-Correlation), tỷ số tín hiệu trên nhiễu đỉnh (Peak Signal-to-Noise Ratio), entropy thông tin (Information Entropy), và tương quan (Correlation).

Các khía cạnh xử lý hình ảnh: Nghiên cứu tập trung vào bốn khía cạnh chính:

a. Khử nhiễu:

Khái niệm: Quá trình loại bỏ các nhiễu (noise) không mong muốn ra khỏi ảnh để cải thiện chất lượng ảnh mà vẫn giữ được các chi tiết quan trọng.

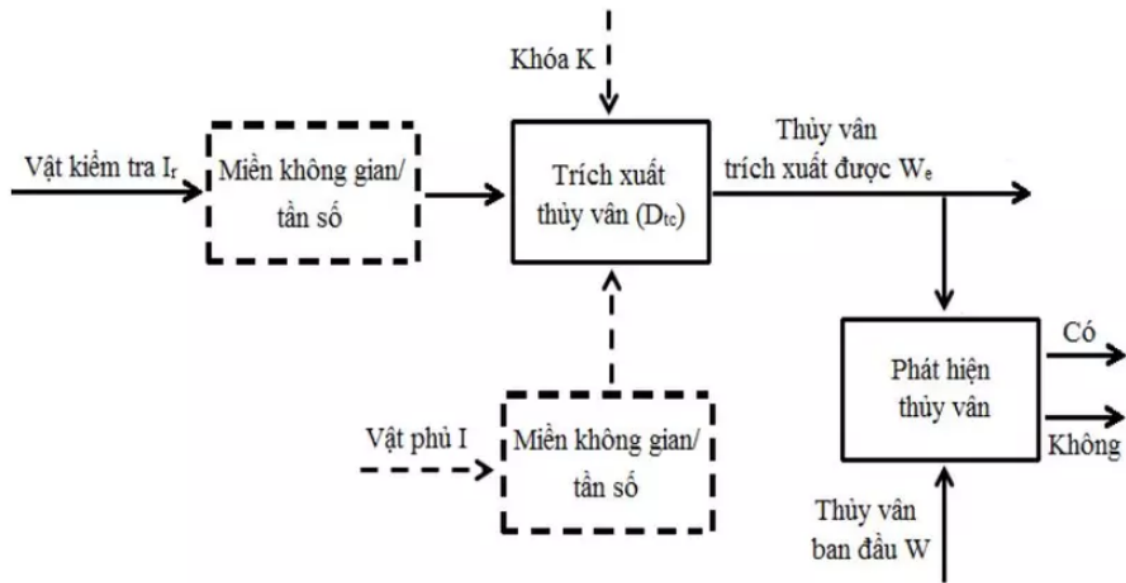
Phân loại: Nhiễu Gaussian, Nhiễu muối tiêu, Nhiễu Poisson, ...



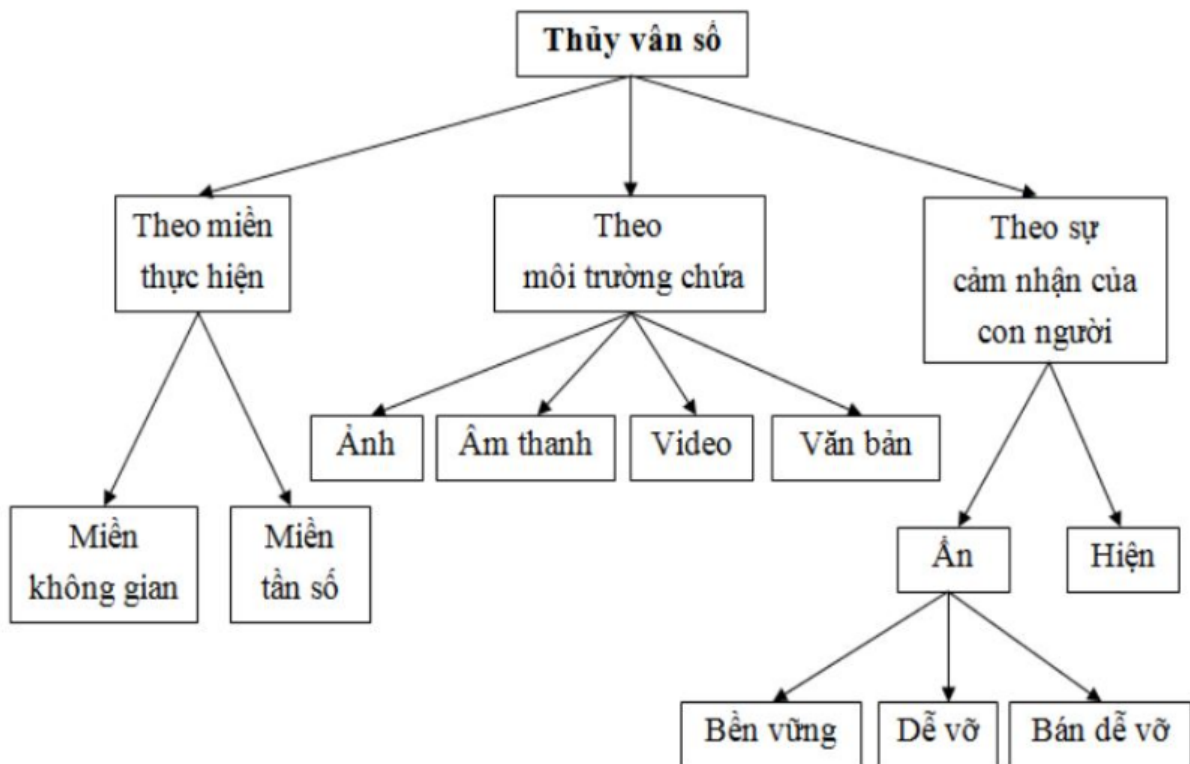
Hình 1: Ảnh bị nhiễu muối tiêu

Các phương pháp khử nhiễu:

- **Lọc trung bình:** Có khả năng triệt tiêu nhiễu nhưng gây mờ do quá trình lấy trung bình.
 - **Lọc trung vị:** Thay giá trị một pixel bằng trung vị các pixel xung quanh nó, đặc biệt hiệu quả với nhiễu muối tiêu.
 - **Lọc Wiener:** Vùng đó nhiễu nhiều thì làm mượt mạnh hơn, ít nhiễu thì giữ nguyên chi tiết, tự động điều chỉnh mức độ lọc dựa vào độ nhiễu và độ biến thiên của ảnh.
- b. **Thủy văn số:** Quá trình nhúng dữ liệu (hay được gọi là thủy văn) vào một đối tượng đa phương tiện nhằm xác thực nguồn gốc hay chủ sở hữu của đối tượng đó.



Hình 2: Lược đồ phát hiện/trích xuất thủy vân



Hình 3: Phân loại thủy vân số

c. **Mã hóa và giải mã:** Quá trình chuyển đổi hình ảnh 2D thành dữ liệu 1D để mã hóa bằng các thuật toán thông thường.

Ví dụ:

- **Z Wen:** Sử dụng chuỗi hỗn loạn để xáo trộn và mã hóa hình ảnh, đảm bảo hiệu quả và an toàn.

- **Y Wang:** Đề xuất mã hóa hình ảnh quang học bằng ảnh ba chiều (CGH), sử dụng xáo trộn pixel và biến đổi Fourier nhị phân.
 - ...
- d. **Nén hình ảnh:** Quá trình giảm thông tin dư thừa trong dữ liệu hình ảnh số để lưu trữ và truyền tải hiệu quả hơn, với công nghệ đã phát triển trưởng thành nhờ nghiên cứu sâu rộng.
- Ví dụ:*

- **Run-Length Encoding (RLE):** Nén chuỗi các pixel giống nhau bằng cách ghi lại giá trị và số lần lặp.
- **Huffman Coding:** Dựa trên tần suất xuất hiện của các giá trị pixel để tạo mã ngắn cho giá trị phổ biến và mã dài cho giá trị ít gặp.
- **Lempel-Ziv-Welch (LZW):** Tạo từ điển các chuỗi lặp và mã hóa chúng.
- ...

IV. NỘI DUNG NGHIÊN CỨU

1. Phương pháp biến đổi wavelet

Biến đổi wavelet (Wavelet Transform - WT): là một phương pháp xử lý tín hiệu số phát triển từ biến đổi Fourier, có ưu điểm vượt trội nhờ khả năng phân tích tín hiệu theo cả thời gian và tần số. Phương pháp này phân chia tín hiệu thành các dải tần số thấp và cao, giúp tập trung vào các đặc trưng quan trọng. Vì tín hiệu hình ảnh là tín hiệu hai chiều, khi sử dụng biến đổi wavelet để phân tích hình ảnh, cần phải tổng quát hóa biến đổi wavelet thành biến đổi wavelet hai chiều.

Phương pháp biến đổi wavelet có thể được biểu diễn như sau:

$$\text{CWT}(a, b, c) = \iint f(x, y) \psi \left(\frac{x-b}{a}, \frac{y-c}{a} \right) dx dy \frac{1}{|a|} \quad (1)$$

Trong đó, $\psi(t)$ là wavelet mẹ, a là yếu tố tỷ lệ, và b, c là các yếu tố dịch chuyển; giả sử tín hiệu hình ảnh được biểu diễn bởi $f(x, y)$.

Hàm wavelet hai chiều có thể viết lại dưới dạng:

$$\Psi_{a,b,c}(x, y) = \psi \left(\frac{x-b}{a}, \frac{y-c}{a} \right) / a \quad (2)$$

2. Phương pháp đánh giá wavelet

2.1. Sai số bình phương trung bình đã chuẩn hóa (NMSE)

Sai số bình phương trung bình đã chuẩn hóa (NMSE) được dùng để đo lường sự khác biệt giữa ảnh gốc và ảnh sau khi xử lý. Công thức tính như sau:

$$M = \frac{\sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} (X(i, j) - X'(i, j))^2}{\sum_{i=1}^{N_1} X(i, j)} \quad (3)$$

Trong đó:

- $X(i, j)$: Giá trị pixel tại vị trí (i, j) trong ảnh gốc.
- $X'(i, j)$: Giá trị pixel tại vị trí (i, j) trong ảnh sau khi xử lý.
- N_1, N_2 : Kích thước ảnh theo hàng và cột.

Tỉ số là tổng bình phương sai lệch giữa từng pixel trong ảnh gốc và ảnh sau khi xử lý, phản ánh mức độ khác biệt về cường độ sáng. Mẫu số chuẩn số là tổng bình phương các giá trị pixel của ảnh gốc, giúp chuẩn hóa sai số để so sánh giữa các ảnh có độ sáng khác nhau.

2.2. Hàm tương quan chéo đã chuẩn hóa (NCC)

Hàm tương quan chéo đã chuẩn hóa (NCC) đánh giá mức độ tương đồng giữa hai ảnh:

$$NC(i, j) = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N T(m, n) \cdot S^{ij}(m, n)}{\sqrt{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N T^2(m, n) \cdot \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (S^{ij}(m, n))^2}} \quad (4)$$

Trong đó:

- $T(m, n)$: Pixel tại vị trí (m, n) trong ảnh mẫu (template).
- $S^{ij}(m, n)$: Pixel tại vị trí tương ứng trong vùng con tại vị trí (i, j) của ảnh gốc.
- M, N : Kích thước của ảnh mẫu.

Công thức chuẩn hóa giúp chống lại sự thay đổi độ sáng:

$$NCC = \frac{\sum_{(x,y) \in W} [I_1(x, y) - \bar{I}_1][I_2(x, y) - \bar{I}_2]}{\sqrt{\sum_{(x,y) \in W} [I_1(x, y) - \bar{I}_1]^2 \cdot \sum_{(x,y) \in W} [I_2(x, y) - \bar{I}_2]^2}} \quad (5)$$

Trong đó:

- $I_1(x, y), I_2(x, y)$: Pixel tại vị trí (x, y) của ảnh mẫu và vùng con ảnh gốc.
- \bar{I}_1, \bar{I}_2 : Trung bình các pixel tương ứng.
- W : Vùng template.

2.3. Tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu đỉnh (PSNR)

Tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu đỉnh (PSNR) đo chất lượng tái tạo tín hiệu, được xác định thông qua sai số bình phương trung bình (MSE):

$$MSE = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} ||I(i, j) - K(i, j)||^2 \quad (6)$$

PSNR được tính:

$$PSNR = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{MAX^2}{MSE} \right) \quad (7)$$

Trong đó:

- MAX : Giá trị pixel lớn nhất (ví dụ: 255 cho ảnh 8-bit xám).
- $I(i, j)$: Pixel ảnh gốc.
- $K(i, j)$: Pixel ảnh đã xử lý hoặc bị nhiễu.

PSNR càng cao thì ảnh tái tạo càng giống ảnh gốc, đơn vị là dB (decibel).

Bảng 1: Thang đánh giá chất lượng theo PSNR

PSNR (dB)	Chất lượng
< 20	Kém (nhiều nhiễu hay mất nhiều chi tiết)
20 – 30	Trung bình (có ít nhiễu, vẫn chấp nhận được)
30 – 40	Tốt
> 40	Rất tốt (nhiều hầu như mất khó phát hiện)

2.4. Lượng tin Entropy

Entropy đo mức độ ngẫu nhiên hoặc độ phức tạp của ảnh:

$$H(X) = - \sum_{i=1}^n p(X_i) \cdot \log_2 p(X_i) \quad (8)$$

Trong đó:

- n : Số mức xám trong ảnh (ví dụ: 256 với ảnh 8-bit).
- $p(X_i)$: Xác suất xuất hiện của mức xám X_i .

Entropy cao khi ảnh có pixel phân bố đều, chứa nhiều mức xám khác nhau; entropy thấp khi ảnh đồng nhất (ví dụ: toàn màu đen).

2.5. Tương quan mã hóa

Hệ số tương quan giữa ảnh gốc x và ảnh mã hóa y :

$$\rho(x, y) = \frac{\text{cov}(x, y)}{\sqrt{D(x)} \cdot \sqrt{D(y)}} \quad (9)$$

Trong đó:

$$\text{cov}(x, y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \quad (10)$$

$$D(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2, \quad D(y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (11)$$

Trong đó:

- x_i, y_i : Giá trị pixel tại vị trí thứ i trong ảnh gốc và ảnh mã hóa.
- \bar{x}, \bar{y} : Giá trị trung bình của ảnh gốc và ảnh mã hóa.
- $D(x), D(y)$: Phương sai của ảnh gốc và ảnh mã hóa.
- n : Tổng số điểm ảnh.

Bảng 2: Ý nghĩa của hiệp phương sai $\text{cov}(x, y)$

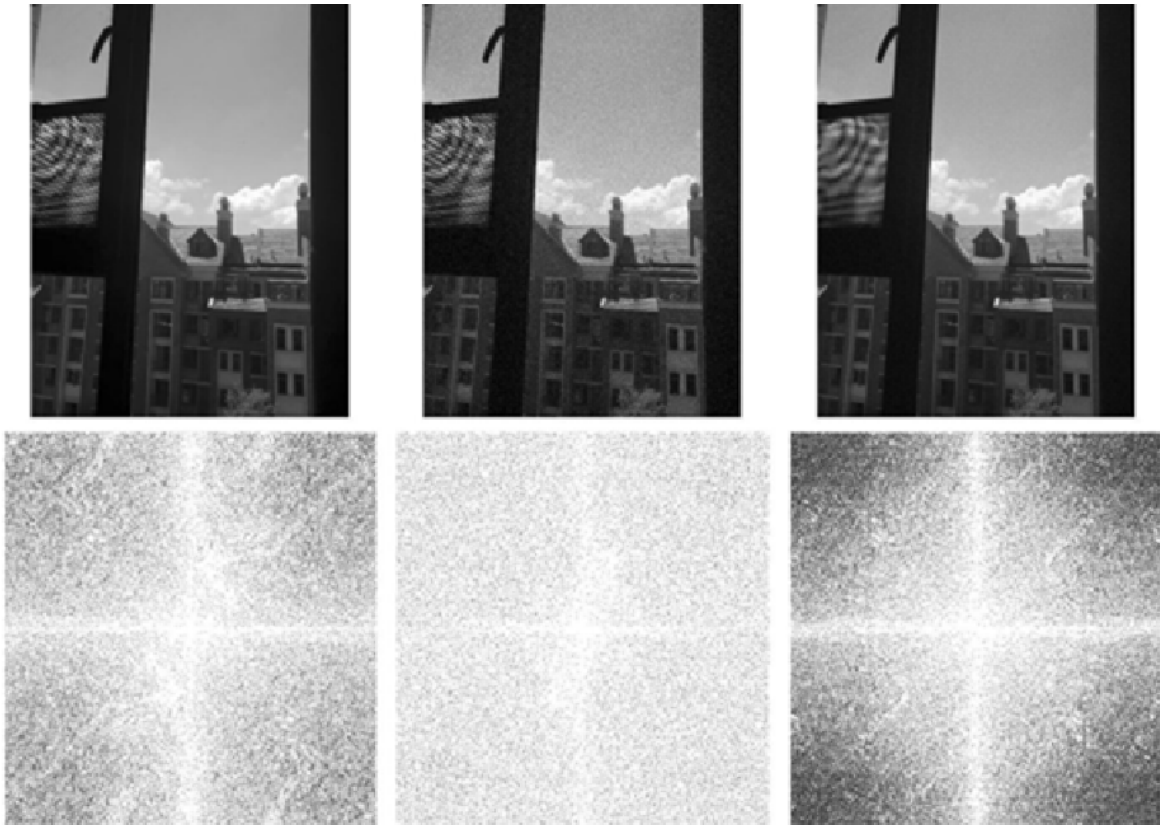
Kết quả $\text{cov}(x, y)$	Ý nghĩa
$\text{cov} > 0$	Hai tập dữ liệu có xu hướng biến đổi cùng chiều
$\text{cov} < 0$	Hai tập dữ liệu có xu hướng biến đổi ngược chiều
$\text{cov} \approx 0$	Hai tập dữ liệu không liên quan nhau

Hệ số tương quan $\rho(x, y) \approx 0$ cho thấy ảnh mã hóa khác biệt lớn so với ảnh gốc, đảm bảo tính bảo mật.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Kết quả 1: Lọc hình ảnh sử dụng biến đổi wavelet

Trong quá trình ghi, truyền tải, lưu trữ và xử lý hình ảnh, tín hiệu hình ảnh có thể bị nhiễu nhiều dưới dạng các điểm ảnh cô lập, ảnh hưởng chất lượng hiển thị. Phương pháp biến đổi wavelet được sử dụng để lọc nhiễu trắng Gaussian (mức nhiễu 20%) thêm vào ảnh gốc. Sau khi lọc, dải tần số chính của ảnh được khôi phục, với sai số bình phương trung bình chuẩn hóa là 0.0071, cho thấy phương pháp bảo vệ tốt chi tiết hình ảnh.



Hình 4: So sánh kết quả khử nhiễu của ảnh (trái: ảnh gốc, giữa: ảnh nhiễu Gaussian, phải: ảnh sau khi lọc bằng wavelet)

3.2. Kết quả 2: Mã hóa hình mờ kỹ thuật số dựa trên biến đổi wavelet

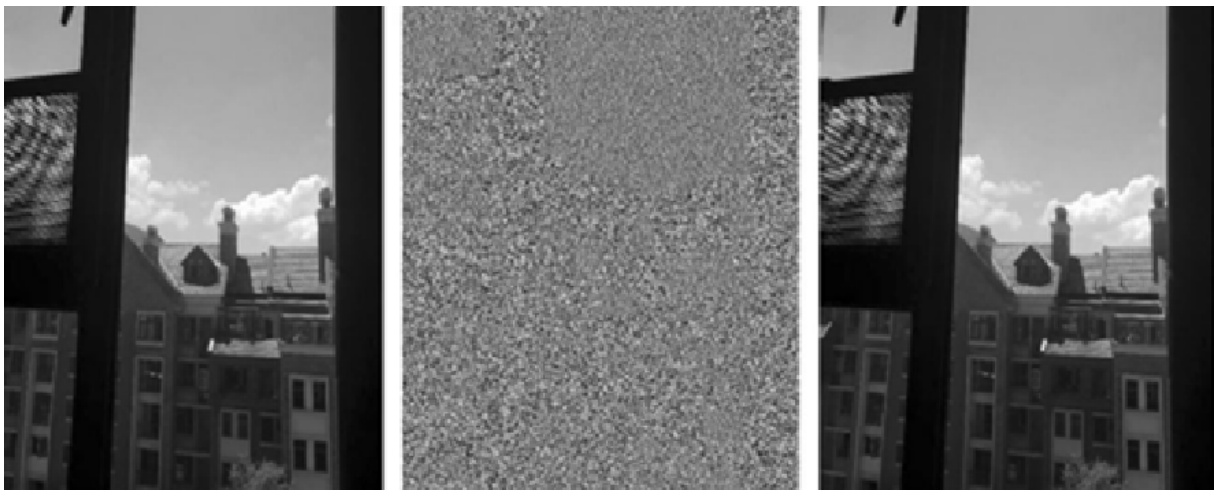
Quá trình nhúng thủy vân bằng biến đổi wavelet không ảnh hưởng cấu trúc ảnh gốc, ngay cả khi thêm nhiễu muối tiêu 40%. Hệ số tương quan giữa ảnh gốc và ảnh chứa thủy vân đạt 0.9871, với PSNR của ảnh gốc là 33.5 dB, cho thấy chất lượng ảnh được duy trì tốt.



Hình 5: Quá trình mã hóa thủy vân (trái: ảnh gốc, giữa: ảnh nhiễu muối tiêu, phải: ảnh chứa thủy vân)

3.3. Kết quả 3: Mã hóa hình ảnh dựa trên biến đổi wavelet

Phương pháp mã hóa bằng biến đổi wavelet tạo ra ảnh mã hóa không tương quan với ảnh gốc, với entropy thông tin đạt 7.88 (gần tín hiệu ngẫu nhiên). Entropy của ảnh gốc là 3.05, ảnh giải mã là 3.07, cho thấy quá trình mã hóa tăng tính bảo mật mà không làm mất thông tin.



Hình 6: Quá trình mã hóa và giải mã (trái: ảnh gốc, giữa: ảnh mã hóa, phải: ảnh giải mã)

3.4. Kết quả 4: Nén hình ảnh

Nén hình ảnh giảm dư thừa dữ liệu không gian, thời gian và phổ. Kết quả nén hai lần cho thấy kích thước giảm từ 2,764,800 byte (ảnh gốc) xuống 703,009 byte (nén lần 1, giảm 74.5%) và 182,161 byte (nén lần 2, giảm thêm 74.1%). Khung chính của ảnh được giữ nguyên, dù độ sắc nét giảm.



Hình 7: So sánh trước và sau nén (trái: ảnh gốc, giữa: nén lần 1, phải: nén lần 2)

Bảng 3: Thuộc tính hình ảnh sau khi nén

Loại ảnh	Kích thước	Dung lượng (Bytes)
Ảnh gốc	1920 × 1440	2,764,800
Nén lần 1	967 × 727	703,009
Nén lần 2	491 × 371	182,161

V. Ý NGHĨA KHOA HỌC VÀ THỰC TIỄN CỦA ĐỀ TÀI

1. Ý nghĩa khoa học

Biến đổi wavelet là công cụ mạnh mẽ trong xử lý ảnh, với các đóng góp khoa học:

- **Phân tích đa tỉ lệ:** Cho phép xử lý chi tiết ở nhiều mức độ phân giải, hữu ích trong khử nhiễu, nén ảnh.
- **Nén ảnh:** Được ứng dụng trong chuẩn JPEG2000, đạt tỷ lệ nén cao mà vẫn giữ chi tiết.
- **Lọc nhiễu:** Tách biệt nhiễu và tín hiệu, cải thiện chất lượng ảnh trong điều kiện ánh sáng kém.
- **Xử lý ảnh đa chiều:** Áp dụng trong ảnh y tế (MRI, CT) và nhận diện hình ảnh phức tạp.

2. Ý nghĩa thực tiễn

Công nghệ wavelet có ứng dụng thực tiễn rộng rãi:

- **Lọc nhiễu:** Cải thiện chất lượng ảnh y tế, giám sát.
- **Nén ảnh:** Giảm dung lượng lưu trữ và truyền tải, như chuẩn JPEG2000.
- **Thủy văn số:** Bảo vệ bản quyền ảnh mà không làm giảm chất lượng.
- **Phát hiện biên:** Hỗ trợ nhận diện khuôn mặt, phân tích ảnh y tế.
- **Mã hóa:** Tăng bảo mật cho dữ liệu nhạy cảm trong quân sự, tài chính.

VI. KẾT LUẬN

Với sự phát triển của công nghệ thông tin, hình ảnh là phương tiện quan trọng để thu thập và truyền tải thông tin. Công nghệ xử lý hình ảnh số, bắt nguồn từ những năm 1920, giúp con người hiểu thế giới chính xác hơn thông qua tăng cường hình ảnh. Mặc dù mắt người nhận diện mạnh mẽ, nhưng công nghệ xử lý ảnh làm rõ những hình ảnh mờ hoặc không thể thấy.

Nghiên cứu công nghệ xử lý ảnh ngày càng chuyên sâu, nhưng cần một mô hình thống nhất để đáp ứng yêu cầu hệ thống. Bài báo này sử dụng biến đổi wavelet để xây dựng mô hình thống nhất, mô phỏng qua

khử nhiễu, thủy văn số, mã hóa, và nén ảnh. Kết quả cho thấy mô hình đạt hiệu quả cao, thúc đẩy ứng dụng công nghệ xử lý hình ảnh trong nhiều lĩnh vực.

Tài liệu tham khảo

- [1] Zhang, H. W. (2016). *The research and implementation of image denoising method based on Matlab*. Journal of Daqing Normal University, 36(3), 1–4.
- [2] Hou, J. H., Tian, J. W., Liu, J. (2007). *Analysis of the errors in locally adaptive wavelet domain Wiener filter and image denoising*. Acta Photonica Sinica, 36(1), 188–191.
- [3] Lebrun, M. (2012). *An analysis and implementation of the BM3D image denoising method*. Image Processing On Line, 2(25), 175–213.
- [4] Fathi, A., Naghsh-Nilchi, A. R. (2012). *Efficient image denoising method based on a new adaptive wavelet packet thresholding function*. IEEE Transactions on Image Processing, 21(9), 3981.
- [5] Zhang, X., Feng, X., Wang, W., et al. (2013). *Gradient-based Wiener filter for image denoising*. Computer and Electrical Engineering, 39(3), 934–944.
- [6] Chen, T., Ma, K. K., Chen, L. H. (1999). *Tri-state median filter for image denoising*. IEEE Transactions on Image Processing, 8(12), 1834.
- [7] Rahman, S. M. M., Hasan, M. K. (2003). *Wavelet-domain iterative center weighted median filter for image denoising*. Signal Processing, 83(5), 1001–1012.
- [8] Eng, H. L., Ma, K. K. (2000). *Noise adaptive soft-switching median filter for image denoising*. Proceedings of ICASSP, 4, 2175–2178.
- [9] Chang, S. G., Yu, B., Vetterli, M. (2000). *Adaptive wavelet thresholding for image denoising and compression*. IEEE Transactions on Image Processing, 9(9), 1532.
- [10] Mihcak, M. K., Kozintsev, I., Ramchandran, K., et al. (1999). *Low-complexity image denoising based on statistical modeling of wavelet coefficients*. IEEE Signal Processing Letters, 6(12), 300–303.
- [11] Wu, J. H., Lin, F. Z. (2004). *Image authentication based on digital watermarking*. Chinese Journal of Computers, 9, 1153–1161.
- [12] Wakatani, A. (2002). *Digital watermarking for ROI medical images by using compressed signature image*. Proceedings of HICSS, IEEE, 2043–2048.
- [13] Paquet, A. H., Ward, R. K., Pitas, I. (2003). *Wavelet packets-based digital watermarking for image verification and authentication*. Signal Processing, 83(10), 2117–2132.
- [14] Wen, Z., Taoshen, L. I., Zhang, Z. (2005). *An image encryption technology based on chaotic sequences*. Computer Engineering, 31(10), 130–132.
- [15] Wang, Y. Y., Wang, Y. R., Wang, Y., et al. (2007). *Optical image encryption based on binary Fourier transform CGH and pixel scrambling*. Optics Lasers in Engineering, 45(7), 761–765.
- [16] Zhang, X. Y., Wang, C., Li, S. M., et al. (2008). *Image encryption technology on two-dimensional cellular automata*. Journal of Optoelectronics Laser, 19(2), 242–245.
- [17] Lewis, A. S., Knowles, G. (2002). *Image compression using the 2-D wavelet transform*. IEEE Transactions on Image Processing, 1(2), 244–250.
- [18] Devore, R. A., Jawerth, B., Lucier, B. J. (1992). *Image compression through wavelet transform coding*. IEEE Transactions on Information Theory, 38(2), 719–746.
- [19] Buccigrossi, R. W., Simoncelli, E. P. (1999). *Image compression via joint statistical characterization in the wavelet domain*. IEEE Transactions on Image Processing, 8(12), 1688–1701.
- [20] Cruzroa, A. A., Ovalle, J. E. A., Madabhushi, A., et al. (2013). *A deep learning architecture for image representation and cancer detection*. MICCAI, 16, 403–410.
- [21] Mohanty, S. P., Hughes, D. P., Salathé, M. (2016). *Using deep learning for image-based plant disease detection*. Frontiers in Plant Science, 7, 1419.

- [22] Sahiner, B., Chan, H., Wei, D., et al. (1996). *Image feature selection by a genetic algorithm*. Medical Physics, 23(10), 1671.
- [23] Bhanu, B., Lee, S., Ming, J. (2002). *Adaptive image segmentation using a genetic algorithm*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 25(12), 1543–1567.
- [24] Egusa, Y., Akahori, H., Morimura, A., et al. (1995). *An application of fuzzy set theory for an electronic video camera image stabilizer*. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 3(3), 351–356.
- [25] Hasikin, K., Isa, N. A. M. (2012). *Enhancement of the low contrast image using fuzzy set theory*. Proceedings of UKSim, 371–376.
- [26] Yang, P., Li, Q. (2014). *Wavelet transform-based feature extraction for ultrasonic flaw signal classification*. Neural Computing Applications, 24(3–4), 817–826.
- [27] Lama, R. K., Choi, M.-R., Kwon, G.-R. (2016). *Image interpolation for high-resolution display using complex dual-tree wavelet and HMM*. Multimedia Tools and Applications, 75(23), 16487–16498.
- [28] Bài báo gốc: <https://jivp-urasipjournals.springeropen.com/articles/10.1186/s13640-018-0383-6>