

BỘ THÔNG TIN VÀ TRUYỀN THÔNG
HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG



TRẦN VŨ KIÊN

NGHIÊN CỨU THIẾT KẾ MA TRẬN
VÀ CẢI TIẾN THUẬT TOÁN
KHÔI PHỤC TÍN HIỆU ĐƯỢC LẤY MẪU NÉN

Chuyên ngành: Kỹ thuật điện tử

Mã số: 9.52.02.03

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

Công trình hoàn thành tại:

HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG

Người hướng dẫn khoa học:

1. TS Nguyễn Ngọc Minh

2. TS Nguyễn Lê Cường

Phản biện 1:

Phản biện 2:

Phản biện 3:

Luận án được bảo vệ trước hội đồng chấm luận án cấp Học viện họp tại:

HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG

vào hồi:

Có thể tìm hiểu luận án tại:

1. Thư viện Quốc gia Việt Nam

2. Thư viện Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông

CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ CỦA TÁC GIẢ

- [J1] Tran Vu Kien, Nguyen Ngoc Minh, Nguyen Le Cuong, “A Development toward Matching Pursuit Algorithm Aims To Reduce Calculation Mass in the Process of the Compressed Sampling and Errors in the Signal Recovery Process”, *Journal of Science & Technology* 120 (2017) 072-077
- [J2] Kien. T.V, An. B.L, Quynh. L.C, “Secure Separate Bit Plane Image Processing for Distributed Video Surveillance System (DVSS/DVC)”, *IJCSCMC*, Vol. 9, Issue. 9, September 2020, pg.61 - 72
- [J3] Trần Vũ Kiên, Hoàng Văn Lợi, Nguyễn Lê Cường, “Ứng dụng kỹ thuật lấy mẫu nén trong việc thu tín hiệu vô tuyến để phát hiện máy bay không người lái siêu nhẹ”, *Tạp chí Nghiên cứu KH&CN quân sự*, Số Đặc san Ra đả, 8 - 2021, ISSN 1859 - 1403.
- [J4] Trần Vũ Kiên, Đỗ Anh Tú, Nguyễn Hải Quân, Nguyễn Lê Cường, “Một phương pháp ứng dụng mẫu nén và học máy để phát hiện Flycam trong môi trường có chòng lẫn với tín hiệu WiFi”, *Tạp chí Nghiên cứu KH&CN quân sự*, Số 82, 10 - 2022, ISSN 1859 - 1403.
- [C1] Cuong Nguyen Le, Kien Tran Vu and Quynh Le Chi, “On The Desired Properties Of Linear Feedback Shift Register (LFSR) Based High-Speed PN-Sequence-Generator”, *ICTIS* 2020.

MỞ ĐẦU

Định lý lấy mẫu của Nyquist-Shannon phát biểu rằng để không mất thông tin và có thể khôi phục lại hoàn toàn tín hiệu thì phải lấy mẫu tín hiệu với tần số lấy mẫu cao hơn ít nhất hai lần băng thông của tín hiệu. Trên thực tế, nguyên tắc này làm nền tảng cho gần như tất cả các phương thức chuyển đổi tín hiệu được sử dụng trong các thiết bị điện tử âm thanh và hình ảnh, thiết bị hình ảnh y tế, máy thu radio. Trong nhiều ứng dụng như trong ảnh số và âm thanh số, tốc độ lấy mẫu Nyquist là cao và thu được quá nhiều mẫu, do đó cần phải có quá trình nén tín hiệu để có thể phù hợp với việc lưu trữ, xử lý hoặc truyền đi xa.

Trong những năm gần đây, lĩnh vực viễn thông và công nghệ thông tin phát triển một cách nhanh chóng, lượng thông tin được trao đổi ngày càng nhiều dẫn đến hạ tầng viễn thông và công nghệ thông tin luôn phải đổi mới và nâng cấp để có thể đáp ứng những nhu cầu trao đổi thông tin của người dùng. Ngoài ra, trong lĩnh vực y tế việc lấy mẫu nén cũng được quan tâm nghiên cứu và cho nhiều kết quả khả quan. Các nghiên cứu gần đây cho thấy lấy mẫu nén (CS) đang được coi như một ứng cử viên hứa hẹn để giải quyết các vấn đề trên.

Các nghiên cứu hiện nay tập trung vào việc thiết kế ma trận lấy mẫu nén và phát triển thuật toán khôi phục lại tín hiệu từ các mẫu nén một cách hiệu quả. Các ma trận trong CS phải thỏa mãn tính chất giới hạn đẳng trị RIP, yêu cầu số hàng của ma trận lấy mẫu nhỏ, sai số khôi phục và thời gian thực hiện nhỏ. Việc xác định một ma trận như vậy thỏa mãn tính chất RIP là rất khó khăn. Để giải quyết vấn đề này các nghiên cứu hiện nay tập trung vào thiết kế các ma trận xác định. Các ưu điểm của ma trận xác định là: có cấu trúc xác định, quá trình lấy mẫu đơn giản, có yêu cầu về lưu trữ nhỏ.

Bên cạnh việc thiết kế ma trận lấy mẫu nén thì một vấn đề quan trọng nữa là xây dựng các thuật toán khôi phục tín hiệu được lấy mẫu nén. Hầu hết các nghiên cứu hiện nay tập trung vào xây dựng các thuật toán có cấu trúc ổn định, độ phức tạp tính toán thấp và nâng cao độ chính xác của tín hiệu được khôi phục. Trong số đó, các thuật toán khôi phục tham lam dựa trên thuật toán gốc là thuật toán đuoối khớp (MP) được sử dụng rộng rãi vì tính đơn giản và hiệu quả.

Với mục đích kết hợp các ưu điểm của ma trận xác định và thuật toán tham lam trong việc thực hiện nhanh, lưu trữ ít phù hợp với các ứng dụng yêu cầu thời gian thực, độ phức tạp phân cứng thấp, nghiên cứu sinh đã lựa chọn đề tài: ***"Nghiên cứu thiết kế ma trận và cải tiến thuật toán khôi***

phục tín hiệu được lấy mẫu nén" cho luận án nghiên cứu của mình.

Ý nghĩa khoa học của luận án là đề xuất mô hình lấy mẫu nén với ma trận xác định được thiết kế cùng với thuật toán khôi phục được cải tiến, xây dựng chương trình tính toán và mô phỏng để đánh giá hiệu năng của mô hình lấy mẫu nén đề xuất. Mô hình lấy mẫu nén được đề xuất trong luận án có tính khả thi khi ứng dụng vào thực tế.

Mục tiêu đầu tiên của luận án là đề xuất được một ma trận lấy mẫu nén thỏa mãn tiêu chí giới hạn đẳng trị RIP, có tính bảo mật cao đối với tín hiệu cần lấy mẫu, khả thi khi triển khai trên các hệ thống điện tử số. Mục tiêu thứ 2 là cải tiến một thuật toán khôi phục đảm bảo độ chính xác và các yêu cầu về thời gian tính toán. Mục tiêu thứ 3 là xây dựng phần mềm, công cụ để tiến hành phân tích đánh giá ma trận và thuật toán được đề xuất thông qua mô phỏng.

Phương pháp nghiên cứu của luận án là sử dụng lý thuyết thông tin, đại số tuyến tính và các công cụ toán học để thiết kế một ma trận lấy mẫu nén xác định, phân tích mô hình toán học của thuật toán gốc MP để đưa ra thuật toán cải tiến DRMP. Xây dựng chương trình mô phỏng sử dụng các công cụ và thư viện ngôn ngữ lập trình Python theo kịch bản của mô hình lấy mẫu nén được đề xuất. Trên cơ sở đó, đánh giá được ưu và nhược điểm của ma trận lấy mẫu nén và thuật toán cải tiến được đề xuất trong luận án.

Luận án được bố cục gồm 4 chương với các nội dung sau:

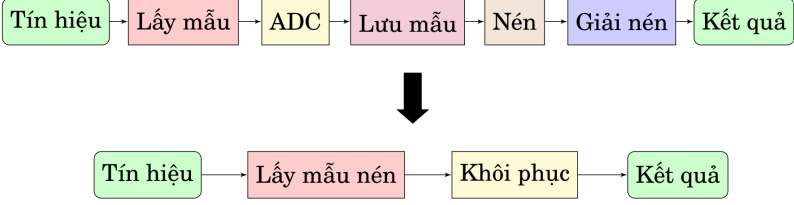
- Chương 1. Tổng qua về lấy mẫu nén.
- Chương 2. Thiết kế ma trận lấy mẫu nén xác định.
- Chương 3. Đề xuất thuật toán khôi phục tín hiệu được lấy mẫu nén DRMP.
- Chương 4. Đề xuất mô hình lấy mẫu nén.

CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN VỀ LẤY MẪU NÉN

1.1. Mô hình lấy mẫu nén

Lấy mẫu nén là một phương pháp thu nhận và xử lý tín hiệu tiên tiến được đề xuất bởi Candes và Donoho. Đối với phương pháp lấy mẫu truyền thống, tín hiệu được lấy mẫu bằng với tốc độ Nyquist, trong khi đó với phương pháp lấy mẫu nén, tín hiệu được lấy mẫu dưới tốc độ Nyquist như minh họa trong hình 1.1.

Mô hình toán của CS được thể hiện trong sau: một tín hiệu rời rạc giả định $x_{N \times 1} \in R^N$ được biến đổi thành $y_{M \times 1} \in R^M$ bởi ma trận $\Phi_{M \times N}$. Quá trình lấy mẫu nén có thể được biểu diễn như sau:



Hình 1.1: Lấy mẫu truyền thống và lấy mẫu nén

$$y = \Phi x, \quad (1.1)$$

trong đó $M < N$, và Φ được gọi là ma trận lấy mẫu. Từ biểu thức (1.1) tín hiệu $x_{N \times 1}$ được nén thành tín hiệu $y_{M \times 1}$ và không thể tìm lại được x từ biểu thức (1.1) bởi số ẩn nhiều hơn số phương trình. Điều kiện tiên quyết để có thể tìm được x là x phải thưa hoặc x thưa trên một số cơ sở trực giao, nghĩa là,

$$x = \Psi s, \quad (1.2)$$

trong đó Ψ là một ma trận trực giao có kích thước $N \times N$. Từ biểu thức (1.1) và (1.2) có

$$y = \Phi x = \Phi \Psi s = \Theta s, \quad (1.3)$$

ở đây, $\Phi \Psi$ là ma trận lấy mẫu nén. Để khôi phục x từ y , ma trận lấy mẫu $\Phi \Psi$ phải thỏa mãn tính chất giới hạn đẳng trị RIP. Hằng số RIP δ_k bậc k đối với ma trận Θ là

$$(1 - \delta_k) \|s\|_2 \leq \|\Theta s\|_2 \leq (1 + \delta_k) \|s\|_2, \quad (1.4)$$

trong đó $\delta_k \in (0, 1)$. Quá trình khôi phục lại tín hiệu thưa được lấy mẫu nén có thể biểu diễn như sau

$$\min_{\hat{s}} \|\hat{s}\|_{\ell_1} \quad \text{trong đó} \quad y = \Theta \hat{s}, \quad (1.5)$$

việc khôi phục lại tín hiệu được lấy mẫu nén là một bài toán tối ưu hóa lồi.

1.1.1. Tín hiệu thưa

Về mặt toán học, có thể gọi tín hiệu x là K -sparse (x có độ thưa K) khi nó có nhiều nhất K phần tử khác 0, tức là $\|x\|_0 \leq K$. Có

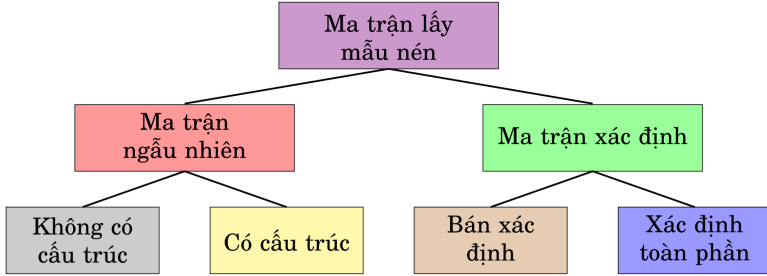
$$\sum_K = \{x : \|x\|_0 \leq K\}, \quad (1.6)$$

là biểu thị tập hợp tất cả các tín hiệu có K -sparse. Tín hiệu trong thực tế thông thường không có biểu diễn thưa trong hệ cơ sở của nó nhưng có thể biểu diễn thông qua các vector thưa của một hệ cơ sở Ψ . Trong trường hợp này, x vẫn được xem là K -sparse, và có thể biểu diễn x dưới dạng $x = \Psi s$ trong đó $\|s\|_0 \leq K$.

1.1.2. Ma trận lấy mẫu nén

Lấy mẫu nén bao gồm ba quá trình chính, biểu diễn tín hiệu thưa, lấy mẫu tín hiệu dựa trên ma trận lấy mẫu, khôi phục tín hiệu được lấy mẫu nén. Ma trận lấy mẫu đóng vai trò quan trọng đến độ chính xác và thời gian xử lý

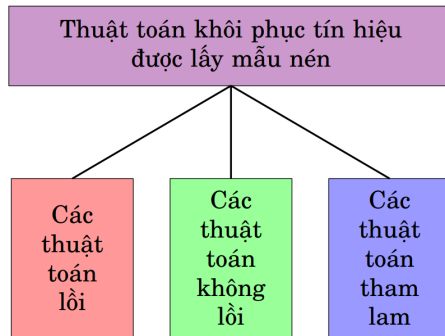
của quá trình khôi phục lại tín hiệu được lấy mẫu nén. Trong thập kỷ qua, các nghiên cứu về ma trận lấy mẫu nén đã được công bố và có thể phân thành 2 nhóm chính là ma trận ngẫu nhiên và ma trận xác định như được liệt kê trong hình 1.2.



Hình 1.2: Phân loại ma trận lấy mẫu nén

1.1.3. Thuật toán khôi phục

Vấn đề khôi phục tín hiệu được lấy mẫu nén là tìm các phương pháp để giải quyết bài toán hệ phương trình tuyến tính với số ẩn nhiều hơn số phương trình trong biểu thức (1.3). Điều kiện cần và đủ để giải quyết bài toán này là tín hiệu lấy mẫu phải đủ thưa và ma trận lấy mẫu thỏa mãn tính chất RIP. Trong những năm gần đây một số các thuật toán đã được đề xuất trong đó có thể phân loại thành 3 nhóm chính như được thể hiện trong hình 1.3.



Hình 1.3: Phân loại thuật toán khôi phục

Luận án này tập trung nghiên cứu các thuật toán tham lam do tính phổ biến và tính khả thi cao khi ứng dụng vào trong thực tế.

1.2. Hiệu năng của mô hình lấy mẫu nén

Hiệu năng là vấn đề rất quan trọng để đánh giá hiệu quả của một mô hình. Có rất nhiều các tham số để đánh giá hiệu năng của mô hình lấy mẫu

nén. Trong đó các tham số thường sử dụng như thời gian thực hiện là khoảng thời gian được tính từ khi bắt đầu lấy mẫu đến khi khôi phục thành công, độ phức tạp tính toán, tỉ số nén, lỗi khôi phục. Tuy nhiên, việc lựa chọn tham số nào để đánh giá tùy thuộc vào đặc điểm và ứng dụng của từng hệ thống. Trong luận án, với mô hình lấy mẫu nén dựa trên ma trận được thiết kế và thuật toán được cải tiến, các tham số được sử dụng là thời gian thực hiện, hệ số tương quan và sai số trung bình tuyệt đối đối với tín hiệu mô phỏng 1 chiều. Đối với tín hiệu mô phỏng là ảnh 2 chiều luận án sử dụng tham số thời gian thực hiện, tham số PSNR và tham số MSE để đánh giá hiệu năng của mô hình.

1.3. Các công trình nghiên cứu liên quan

Các hướng nghiên cứu chính hiện nay về lĩnh vực lấy mẫu nén bao gồm:

- Nghiên cứu thiết kế ma trận lấy mẫu nén nhằm nâng cao hiệu suất nén, hỗ trợ quá trình tính toán, khôi phục lại tín hiệu thưa.
- Nghiên cứu thuật toán khôi phục tín hiệu được lấy mẫu nén để giảm sai số khôi phục, giảm độ phức tạp tính toán và tăng tốc độ của thuật toán.
- Nghiên cứu áp dụng kỹ thuật lấy mẫu nén cho những ứng dụng cụ thể.

1.3.1. Các nghiên cứu về thiết kế ma trận xác định

1.3.2. Các nghiên cứu về thuật toán tham lam

1.4. Nhận xét các công trình nghiên cứu liên quan và hướng nghiên cứu của luận án

1.4.1. Nhận xét về công trình nghiên cứu liên quan

Qua tìm hiểu khảo sát và phân tích ở trên, nghiên cứu sinh nhận thấy vẫn còn một số vấn đề chưa được đề cập đến trong các nghiên cứu trước đây cụ thể như sau:

Các nghiên cứu về thiết kế các ma trận phù hợp với phần cứng và phương pháp tạo ra ma trận lấy mẫu với tốc độ cao để tích hợp cho các ứng dụng thực tế còn hạn chế.

Các nghiên cứu trước đây chưa chú trọng nhiều đến đánh giá khả năng bảo mật của ma trận lấy mẫu nén.

Các nghiên cứu về ma trận lấy mẫu và thuật toán khôi phục chủ yếu là các nghiên cứu mang tính phổ quát do đó đối với các ứng dụng cụ thể không đạt được hiệu năng tối đa.

1.4.2. Hướng nghiên cứu của luận án

Trên cơ sở ý nghĩa khoa học, tính cấp thiết của đề tài và dựa trên các kết

quả phân tích về hạn chế của các nghiên cứu liên quan, các hướng nghiên cứu trong luận án gồm:

- Đề xuất ma trận lấy mẫu nén xác định BPNSM được thiết kế dựa trên các chuỗi phi tuyến giả ngẫu nhiên. Trong đó ma trận lấy mẫu này có thể khả thi khi thực hiện trên phần cứng với tốc độ cao, nâng cao tính bảo mật của tín hiệu cần lấy mẫu.

- Đề xuất thuật toán khôi phục DRMP dựa trên cải tiến thuật toán tham lam MP. Thuật toán cải tiến có độ phức tạp tính toán thấp hơn so với thuật toán gốc và lỗi khôi phục giảm sau mỗi bước lặp trong quá trình khôi phục.

- Đánh giá, so sánh hiệu năng của mô hình lấy mẫu nén dựa trên ma trận lấy mẫu nén BPNSM và thuật toán khôi phục DRMP thông qua ví dụ mô phỏng.

1.5. Tổng kết chương

Nội dung chương 1 trình bày tổng quan về mô hình lấy mẫu nén, các phần tử trong mô hình, các tham số để đánh giá hiệu quả của mô hình. Khảo sát, đánh giá, phân tích các ưu nhược điểm đến từ các công trình nghiên cứu liên quan đến thiết kế ma trận lấy mẫu nén xác định và xây dựng thuật toán khôi phục tham lam trong lĩnh vực lấy mẫu nén. Qua quá trình phân tích, đánh giá các công trình nghiên cứu đó, luận án đưa ra một số hạn chế còn tồn tại của các nghiên cứu trước đây. Trên cơ sở các hạn chế này, hướng nghiên cứu của luận án là đề xuất một ma trận lấy mẫu nén xác định BPNSM với các phần tử được tạo thành từ các chuỗi giả ngẫu nhiên phi tuyến nhằm tăng tốc độ và tăng mức độ bảo mật trong quá trình lấy mẫu. Đồng thời luận án cũng đề xuất một thuật toán DRMP dựa trên việc cải tiến thuật toán tham lam gốc MP nhằm giảm độ phức tạp tính toán và giảm số lỗi ở mỗi bước trong quá trình khôi phục lại tín hiệu được lấy mẫu nén.

CHƯƠNG 2: THIẾT KẾ MA TRẬN LẤY MẪU NÉN XÁC ĐỊNH

2.1. Mở đầu

Lấy mẫu nén bao gồm ba quá trình chính: biểu diễn tín hiệu thưa, mã hóa tuyến tính, và giải mã phi tuyến hoặc khôi phục tín hiệu nén. Trong quá trình lấy mẫu nén, một ma trận lấy mẫu được sử dụng để lấy mẫu các thành phần của tín hiệu. Sự lựa chọn ma trận lấy mẫu có tác động quan trọng đến độ chính xác và thời gian xử lý đối với quá trình khôi phục. Do đó, việc thiết kế một ma trận lấy mẫu phù hợp có tầm quan trọng thiết yếu trong lấy mẫu nén.

2.2. Tiêu chí thiết kế ma trận lấy mẫu nén

Vấn đề đặt ra đối với ma trận lấy mẫu nén là ma trận phải được thiết kế như thế nào để đảm bảo rằng có thể thu thập đầy đủ thông tin trong tín hiệu x . Tiếp theo, ma trận lấy mẫu nén phải đảm bảo cho quá trình khôi phục lại chính xác tín hiệu x từ các mẫu nén y . Trong hầu hết các nghiên cứu chỉ tiêu RIP đối với ma trận lấy mẫu nén được sử dụng như một điều kiện để đảm bảo cho khả năng khôi phục lại chính xác tín hiệu thưa ban đầu.

Ma trận lấy mẫu nén tổng quát Φ thỏa mãn tính chất giới hạn đẳng trị RIP có độ phức tạp tính toán lớn. Do đó, việc thiết kế ma trận lấy mẫu nén xác định thỏa mãn tiêu chí RIP là một bài toán khó. Để các ma trận lấy mẫu nén có thể khả thi khi ứng dụng trong thực tế tính chất không kết hợp (*incoherent*) được đề xuất.

Tính chất không kết hợp của ma trận Φ , ký hiệu là $\mu(\Phi)$, được định nghĩa là giá trị tuyệt đối lớn nhất của tích vô hướng giữa hai cột bất kỳ ϕ_i, ϕ_j của ma trận Φ và được trình bày như sau:

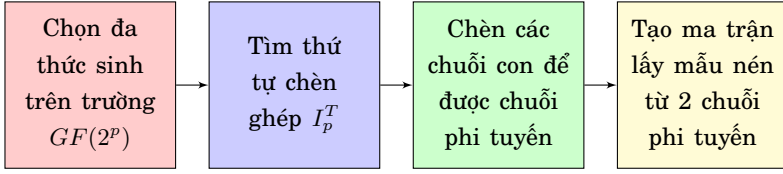
$$\mu(\Phi) = \max_{1 \leq i < j \leq N} \frac{|\langle \phi_i, \phi_j \rangle|}{\|\phi_i\|_2 \|\phi_j\|_2}. \quad (2.1)$$

Trong luận án ma trận lấy mẫu nén xác định sẽ được thiết kế với việc sử dụng tính chất không kết hợp để đảm bảo cho quá trình lấy mẫu và khôi phục lại tín hiệu.

2.3. Thiết kế ma trận lấy mẫu nén

Trong luận án này, ma trận lấy mẫu nén xác định gọi là BPNSM được xây dựng dựa trên các chuỗi giả ngẫu nhiên theo các bước như trong hình 2.1. Các cột của ma trận lấy mẫu được tạo thành từ các chuỗi phi tuyến giả ngẫu nhiên. Chuỗi phi tuyến giả ngẫu nhiên đầu tiên được tạo thành bằng việc sử dụng các công cụ toán học trên trường hữu hạn như thanh ghi dịch LFSR để tạo ra một chuỗi giả ngẫu nhiên tuyến tính. Sau đó, thông qua việc sử dụng biến đổi D và hàm Vết để xác định thứ tự pha lồng ghép I_p^T , tiếp theo sẽ thực hiện việc thay thế các chuỗi con vào chuỗi tuyến tính. Các cột còn lại của ma trận được tạo thành bằng cách dịch vòng chuỗi PN phi tuyến ban đầu, sau đó sắp xếp và tổ hợp tất cả các chuỗi PN với nhau dưới dạng các vector cột, cuối cùng thu được ma trận BPNSM.

Ma trận trong luận án được thiết kế dựa trên một chuỗi PN phi tuyến và có sai số bình phương trung bình tái thiết (MSE) gần với giá trị tối ưu, thỏa mãn tính chất không kết hợp. Do đó, ma trận lấy mẫu nén đảm bảo cho quá trình khôi phục tín hiệu một cách chính xác, bên cạnh đó việc tạo ra ma trận một cách nhanh chóng cũng làm giảm thời gian của quá trình lấy mẫu, đặc biệt khi thực hiện trên các hệ thống phần cứng số như FPGA.



Hình 2.1: Các bước xây dựng ma trận BPNSM

2.4. Lý thuyết trường hữu hạn

2.4.1. Cấu trúc $GF(p^n)$

2.4.2. Thanh ghi dịch phản hồi tuyến tính

2.4.3. Biến đổi D

2.4.4. Hàm Vết

2.5. Chuỗi trái phổ PN phi tuyến lồng ghép

Để nâng cao xác suất thỏa mãn tính chất giới hạn đẳng trị RIP về mặt lý thuyết giữa các cột của ma trận BPNSM phải có giá trị tương quan nhỏ. Chuỗi trái phổ PN phi tuyến lồng ghép có tính tương quan hoàn toàn phù hợp với điều kiện trên và tốt hơn nhiều so với các chuỗi PN truyền thống.

2.5.1. Phân hoạch chuỗi lớn

2.5.2. Đánh giá chuỗi PN giả ngẫu nhiên lồng ghép phi tuyến

a. Hàm tự tương quan của chuỗi phi tuyến

b. Độ phức tạp của chuỗi phi tuyến

Ngoài tính chất tự tương quan tốt, độ phức tạp tuyến tính của chuỗi phi tuyến tăng lên rất nhiều lần so với chuỗi tuyến tính. Tính chất này đảm bảo tính bảo mật dữ liệu khi thực hiện lấy mẫu nén với ma trận được tạo thành từ các chuỗi phi tuyến.

2.6. Xây dựng ma trận xác định BPNSM

Các ma trận BPNSM được đề xuất thuộc lớp ma trận xác định toàn phần có kích thước $(2^n - 1) \times 2^{n+1}$ với các phần tử mang giá trị $\{0, 1\}$, trong đó $n \geq 3$. Quá trình xây dựng ma trận BPNSM được trình bày như sau:

- Bước 1: Lựa chọn đa thức sinh $g_1(d)$, tìm thứ tự lồng ghép I_p^T bằng việc tính toán hàm Vết ánh xạ từ $GF(2^n)$ xuống $GF(2^m)$. Để tạo được chuỗi phi tuyến, giữ nguyên thứ tự lồng ghép I_p^T và thay thế chuỗi con bằng các chuỗi con khác tương ứng, chuỗi nhị phân phi tuyến giả ngẫu nhiên $\{b_n\}$ thu được có chiều dài $2^n - 1$. Dịch vòng chuỗi $\{b_n\}$ ta có 2^n các chuỗi phi tuyến giả ngẫu nhiên xác định. Đặt các chuỗi đó là vector cột của ma trận Φ_1 , thu được một

ma trận Φ_1 có kích thước $(2^n - 1) \times 2^n$, ma trận được biểu diễn như sau:

$$\Phi_1 = \begin{bmatrix} b_0^0 & b_0^1 & \cdots & b_0^{2^n-1} \\ b_1^0 & b_1^1 & \cdots & b_1^{2^n-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{2^n-2}^0 & b_{2^n-2}^1 & \cdots & b_{2^n-2}^{2^n-1} \end{bmatrix}. \quad (2.2)$$

• Bước 2: Tương tự như vậy, việc tạo ra chuỗi giả ngẫu nhiên thứ 2 được thực hiện bằng việc lựa chọn một đa thức sinh $g_2(d)$ khác trong trường $GF(2^n)$. Lặp lại quy trình của Bước 1 được chuỗi $\{d_n\}$ có chiều dài $2^n - 1$ tương ứng thu được ma trận $\Phi_2 \in \mathbb{R}^{(2^n-1) \times 2^n}$. Ma trận Φ_2 có dạng như sau:

$$\Phi_2 = \begin{bmatrix} d_0^0 & d_0^1 & \cdots & d_0^{2^n-1} \\ d_1^0 & d_1^1 & \cdots & d_1^{2^n-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{2^n-2}^0 & d_{2^n-2}^1 & \cdots & d_{2^n-2}^{2^n-1} \end{bmatrix}. \quad (2.3)$$

• Bước 3: Ghép hai ma trận $\Phi_1 \in \mathbb{R}^{(2^n-1) \times 2^n}$ và $\Phi_2 \in \mathbb{R}^{(2^n-1) \times 2^n}$ dưới dạng mở rộng thêm cột để thu được ma trận BPNSM Φ có kích thước $(2^n - 1) \times 2^{n+1}$. Ma trận lấy mẫu nén BPNSM có dạng sau:

$$\begin{aligned} \Phi &= [\Phi_1 | \Phi_2] \\ &= \left[\begin{array}{cccc|cccc} b_0^0 & b_0^1 & \cdots & b_0^{2^n-1} & d_0^0 & d_0^1 & \cdots & d_0^{2^n-1} \\ b_1^0 & b_1^1 & \cdots & b_1^{2^n-1} & d_1^0 & d_1^1 & \cdots & d_1^{2^n-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{2^n-2}^0 & b_{2^n-2}^1 & \cdots & b_{2^n-2}^{2^n-1} & d_{2^n-2}^0 & d_{2^n-2}^1 & \cdots & d_{2^n-2}^{2^n-1} \end{array} \right]. \quad (2.4) \end{aligned}$$

Từ quá trình xây dựng ma trận lấy mẫu nén, có thể thấy rằng các ma trận BPNSM có tốc độ lấy mẫu $(2^n - 1)/2^{n+1} \approx 0,5$ lần so với tốc độ Nyquist và tốc độ này có thể điều chỉnh bằng cách thay đổi cách ghép nối các ma trận thành phần để phù hợp với tín hiệu đầu vào. Ma trận BPNSM $\Phi \in \mathbb{R}^{(2^n-1) \times 2^{n+1}}$ bao gồm hai ma trận con $\Phi_1 \in \mathbb{R}^{(2^n-1) \times 2^n}$ và $\Phi_2 \in \mathbb{R}^{(2^n-1) \times 2^n}$ trong đó mỗi ma trận tương ứng với một họ chuỗi phi tuyến giả ngẫu nhiên.

2.7. Tính chất không kết hợp của ma trận BPNSM

Tính chất không kết hợp của ma trận $\mu(\Phi)$ được tính đối với trường hợp n chẵn:

$$\mu(\Phi) = \frac{1 + 2^{n/2+1}}{2^n - 1}, \quad (2.5)$$

và đối với trường hợp n lẻ

$$\mu(\Phi) = \frac{1 + 2^{(n+1)/2}}{2^n - 1}. \quad (2.6)$$

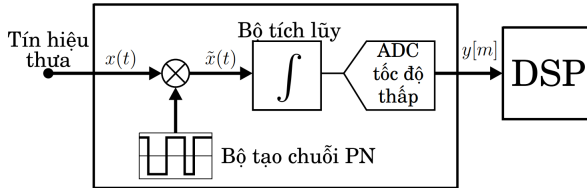
Giá trị không kết hợp được sử dụng để đánh giá sự đảm bảo cho quá trình lấy mẫu nén và khôi phục tín hiệu của ma trận BPNSM và được so sánh với giá trị không kết hợp của các ma trận khác.

2.8. So sánh đánh giá ma trận BPNSM

Để đánh giá hiệu quả của ma trận được thiết kế tính chất không kết hợp của các ma trận lấy mẫu nén thường được so sánh với tính chất không kết hợp của ma trận Gauss và ma trận Bernoulli. Trong luận án cũng đánh giá hiệu quả của ma trận xác định BPNSM được tạo thành từ các chuỗi giả ngẫu nhiên trên trường hữu hạn dựa trên tính chất không kết hợp và so sánh tính chất không kết hợp của nó với ma trận lấy mẫu nén cùng kích thước với các phần tử được tạo thành theo phân bố Gauss và phân bố Bernoulli.

2.9. Thực hiện ma trận lấy mẫu nén trên phần cứng

Trong phần này luận án giới thiệu một kỹ thuật thực hiện quá trình lấy mẫu nén áp dụng trên phần cứng. Hệ thống thực hiện được bằng cách nhân tín hiệu thưa với một chuỗi giả ngẫu nhiên tốc độ cao để trải tín hiệu trên toàn bộ phổ của chuỗi giả ngẫu nhiên như mô tả trong hình 2.2.

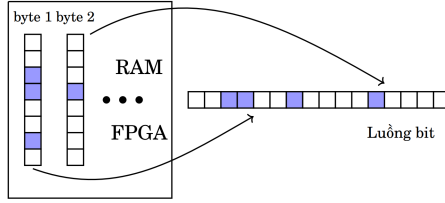


Hình 2.2: Mô hình lấy mẫu nén bằng rộng sử dụng ADC tốc độ thấp

Trong sơ đồ hình 2.2 ma trận BPNSM Φ được tạo ra từ *Bộ tạo chuỗi PN* và *Bộ tích lũy*, khi đó bộ tạo chuỗi phi tuyến giả ngẫu nhiên sẽ đưa các giá trị trong vector hàng của ma trận Φ lên luồng bit để thực hiện phép nhân với tín hiệu $x(t)$. Mặc dù bộ tạo chuỗi ngẫu nhiên hoạt động với tốc độ bằng hoặc cao hơn tốc độ Nyquist, nhưng bộ ADC lại hoạt động với tốc độ thấp hơn.

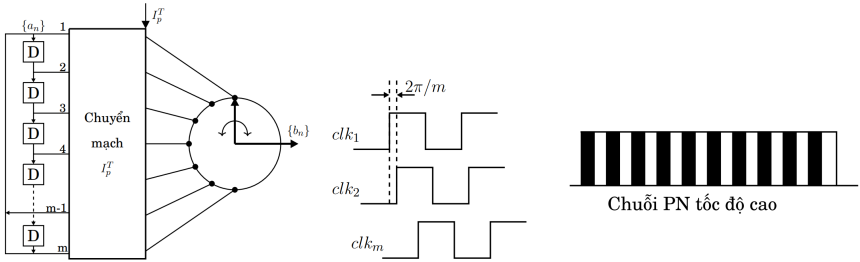
Việc tạo ma trận lấy mẫu có thể đạt được tốc độ rất cao bằng việc thực hiện trên một phần cứng FPGA đơn giản. Ma trận sau khi được xây dựng được lưu trữ dưới dạng các byte dữ liệu trong bộ nhớ Flash của FPGA. Trong quá trình lấy mẫu, dữ liệu trong bộ nhớ được đọc bởi một xung đồng hồ tốc độ thấp và đưa lên trên luồng dựa theo cơ chế tra bảng (Look up Table). Sau đó, chuỗi byte được chuyển đổi thành chuỗi bit bằng cách sử dụng mạch song song nối tiếp như mô tả trong hình 2.3.

Sau khi đọc mẫu từ trong bộ nhớ để có thể nâng cao tốc độ của luồng bit trong luận án cũng đề xuất sử dụng một bộ chuyển mạch cơ khí với m tiếp



Hình 2.3: Mô hình chuyển đổi từ byte trong bộ nhớ thành luồng bit

điểm như hình 2.4. Khi đó với tần số của các đầu ra song song là F sẽ tạo được một luồng bit nối tiếp với tần số mF .



Hình 2.4: Mô hình tạo chuỗi PN tốc độ cao

Chuỗi giả ngẫu nhiên này được sử dụng để tạo ra ma trận lấy mẫu nén. Với mô hình phần cứng đã trình bày ma trận lấy mẫu nén sẽ được tạo ra với thời gian rất ngắn giúp cho tốc độ lấy mẫu nén có thể được nâng cao một cách dễ dàng.

2.10. Tổng kết chương

Từ những phân tích và đánh giá trên có thể nhận thấy rằng ma trận lấy mẫu nén được biến đổi từ các chuỗi giả ngẫu nhiên trên trường hữu hạn có một số đặc điểm sau đây:

- Ma trận BPNSM có thể được xây dựng từ một số các đa thức thuộc trường hữu hạn nên chỉ cần lưu trữ đa thức sinh thay vì toàn bộ giá trị của ma trận.
- Ma trận BPNSM được đề xuất cần ít tài nguyên hơn cho quá trình tính toán, thu thập và phục hồi lại tín hiệu gốc. Để thu thập và khôi phục lại tín hiệu thưa, các phép toán số học của BPNSM chỉ gồm phép cộng và trừ.
- Việc triển khai ma trận BPNSM đơn giản nhờ các cấu trúc LFSR, do đó nó rất khả thi khi áp dụng trên phần cứng.
- Ma trận lấy mẫu nén BPNSM có hạn chế là không thể được tạo ra với kích thước tùy ý.

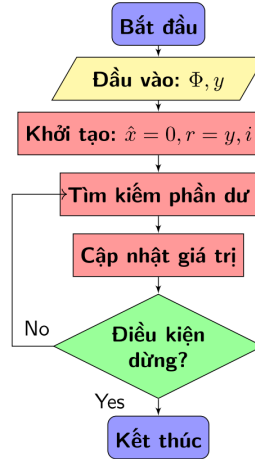
CHƯƠNG 3: ĐỀ XUẤT THUẬT TOÁN KHÔI PHỤC TÍN HIỆU ĐƯỢC LẤY MẪU NÉN DRMP

3.1. Chỉ tiêu đánh giá thuật toán khôi phục

Một số chỉ tiêu đánh giá quan trọng được liệt kê như sau: tỉ số nén, lỗi khôi phục, tốc độ, tương quan và hiệp phương sai, độ phức tạp.

3.2. Các thuật toán lặp lại tham lam

Các thuật toán lặp lại tham lam được sử dụng rộng rãi trong các ứng dụng lấy mẫu nén do chúng có độ phức tạp tính toán thấp và khả năng khôi phục nhanh. Các thuật toán loại này thực hiện quá trình khôi phục lại tín hiệu gốc qua từng bước lặp đến khi thỏa mãn điều kiện dừng. Các thuật toán tham lam có lưu đồ thuật toán gần tương đương nhau và được thể hiện như trong hình 3.1. Trong luận án khảo sát một số dạng thuật toán tham lam được cải tiến từ thuật toán MP và trình bày thuật toán cải tiến DRMP dựa trên thuật toán MP.



Hình 3.1: Lưu đồ thuật toán tham lam

3.2.1. Thuật toán đuổi khớp - MP

3.2.2. Thuật toán đuổi khớp trực giao - OMP

3.2.3. Thuật toán lấy mẫu nén đuổi khớp - CoSaMP

3.3. Thuật toán cải tiến DRMP

Trong thuật toán đuổi khớp tại các bước tìm kiếm phần dư và cập nhật giá trị, thuật toán này cần phải tìm một tập hợp con Γ của các vector cột trong tập ma trận lấy mẫu D mà thỏa mãn điều kiện tích vô hướng của một vector đối với tập mở rộng D_{Γ} có giá trị cực đại. Tập con này thường khó tính toán, đặc biệt khi kích thước của D lớn. Lý do là cần phải tìm kiếm tất cả sự kết hợp có thể có các tập con của D để có thể tìm ra một lựa chọn tốt nhất. Hơn thế nữa thuật toán đuổi khớp không khai thác cấu trúc và đặc điểm của tập D .

Trên thực tế, để khắc phục những hạn chế trên cần chú ý đến các tính chất đặc biệt của tập D . Ví dụ, khi D là một ma trận trực giao, Γ có thể được chọn đơn giản bởi điều kiện đẳng trị dựa trên không gian được mở rộng bởi tất cả các cột của D và chọn $2k$ cột lớn nhất dựa trên điều kiện đẳng trị này.

Ngoài ra, khi thực hiện khôi phục ma trận cấp thấp, U là ma trận và Γ có thể là được tính bằng cách lấy các giá trị kỳ dị (SVD) của U và lựa chọn các vector kỳ dị có độ lớn $2k$ về bên trái và phải mà liên quan lớn nhất đến điểm giá trị kỳ dị $2k$. Trong phần tiếp theo, luận án đề xuất thuật toán cải tiến từ thuật toán gốc MP gọi là DRMP, thuật toán cải tiến này giảm khối lượng tính toán và giảm lỗi xảy ra ở mỗi bước trong quá trình khôi phục tín hiệu được lấy mẫu nén trên cơ sở xem xét một số điều kiện đặc biệt đối với tập D .

3.3.1. Xây dựng thuật toán DRMP

Thuật toán DRMP được xây dựng với các bước gần như tương đương với thuật toán đuối khớp MP. Để thuật toán DRMP hội tụ cần phải có điều kiện đối với tập D . Giả sử rằng D là hữu hạn và D thỏa mãn tính chất giới hạn đẳng trị RIP:

$$(1 - \delta_k) \|\alpha\|_2^2 \leq \|D\alpha\|_2^2 \leq (1 + \delta_k) \|\alpha\|_2^2, \quad (3.1)$$

với mỗi vectơ α tại k . Trong trường hợp D là ma trận trực giao với kích thước là $n \times n$, thì thuật toán DRMP sẽ tương đương với thuật toán gốc MP.

Sự khác biệt giữa hai thuật toán là ở bước tìm kiếm phần dư và cập nhật giá trị. Tại bước tìm kiếm không gian mở rộng Γ xây dựng từ D được tính thông qua việc lấy biến đổi *gradient* của hàm mất mát ở mỗi lần lặp và chọn không gian con theo hướng tối đa hóa giá trị của biến đổi *gradient*. Tại bước cập nhật định chuẩn $\ell_2 - norm$ được sử dụng trên không gian mở rộng $C_{D\Gamma}$ thay cho việc tính tích vô hướng của toàn bộ các cột trong ma trận lấy mẫu nén như đối với thuật toán MP.

Bảng ?? trình bày sự cải tiến của thuật toán DRMP so với thuật toán MP tại các bước tìm kiếm và cập nhật.

3.3.2. Hiệu năng của thuật toán DRMP

Để đánh giá hiệu quả của thuật toán DRMP trong phần này xây dựng một mô hình toán học với tham số là giá trị lỗi khôi phục của thuật toán xảy ra tại mỗi lần lặp. Gọi \hat{x} là tín hiệu khôi phục và $\lambda(\hat{x}) \triangleq \max_i |\langle \nabla \ell(\hat{x}), d_i \rangle|$ là giá trị lỗi của tín hiệu khôi phục trung gian trong mỗi bước của thuật toán, lỗi ước lượng ở bước $(t + 1)$ được ràng buộc bởi:

$$\|x^{t+1} - \hat{x}\|_2 \leq \gamma \|x^t - \hat{x}\|_2 + \lambda(\hat{x}) \sqrt{k} \left(\frac{\sqrt{2} + 1}{\rho_{4k}^-} + \frac{3}{2\sqrt{\rho_{4k}^- \rho_{4k}^+}} \right), \quad (3.2)$$

trong đó, γ là tỉ số suy giảm sau các bước và

$$\gamma \triangleq \sqrt{2 \frac{1 + \delta}{(1 - \delta)^2} \frac{\rho_k^+ ((1 + \delta) \rho_{2k}^+ - (1 - \delta) \rho_{2k}^-)}{(\rho_{4k}^-)^2}}. \quad (3.3)$$

Bảng 3.1: Bảng so sánh thuật toán cải tiến và thuật toán gốc MP

	MP	DRMP
Điều kiện đầu vào	Không tính đến điều kiện của ma trận lấy mẫu	Ma trận lấy mẫu phải thỏa mãn điều kiện giới hạn đẳng trị RIP
Bước tìm kiếm	$\lambda_k = \arg \max_k \frac{\langle r_{k-1}, \phi_{\lambda_k} \rangle}{\ \phi_{\lambda_k}\ _2}$ <p>Thuật toán MP tìm kiếm các thành phần của tín hiệu từ các cột của ma trận lấy mẫu giữa trên tương quan lớn nhất với vector mẫu nén.</p>	$u = \nabla \ell(x^t)$ $\Gamma = \operatorname{argmax}_{\Omega} \{ \ P_{D_{\Omega}} u\ _2 : \Omega \leq 2k \}$ $b = \operatorname{argmin}_x \ell(x) \text{ với } x \in C_{D_{\Gamma}}$ <p>Tìm kiếm không gian mở rộng Γ xây dựng từ D được tính thông qua việc lấy biến đổi <i>gradient</i> của hàm mất mát ở mỗi lần lặp và chọn không gian con theo hướng tối đa hóa giá trị của biến đổi <i>gradient</i>.</p>
Bước cập nhật	$r_k = r_{k-1} - \frac{\langle r_{k-1}, \phi_{\lambda_k} \rangle}{\ \phi_{\lambda_k}\ _2^2} \phi_{\lambda_k}$ $\hat{x}_{\lambda_k} = \hat{x}_{\lambda_k} + \langle r_{k-1}, \phi_{\lambda_k} \rangle \phi_{\lambda_k}$ <p>Giá trị phần dư tìm được sẽ được cộng vào tín hiệu khôi phục trung gian, đồng thời phần dư mới cũng được cập nhật ở bước này.</p>	$\Lambda = \operatorname{argmax}_{\Omega} \{ \ P_{D_{\Omega}} b\ _2 : \Omega \leq k \}$ $\hat{\Gamma} = \Gamma \cup \Lambda$ $x^t = P_{D_{\hat{\Gamma}}} b$ <p>Sử dụng định chuẩn ℓ_2-norm trên không gian mở rộng $C_{D_{\hat{\Gamma}}}$ thay cho việc tính tích vô hướng của toàn bộ các cột trong ma trận lấy mẫu nén như đối với thuật toán MP.</p>

Có thể nhận xét rằng với điều kiện tập D là hữu hạn và thỏa mãn tính chất giới hạn đẳng trị RIP, thuật toán DRMP sẽ giảm dần lỗi trong mỗi một bước lặp của quá trình khôi phục tín hiệu được lấy mẫu nén.

3.4. Tổng kết chương

Trong chương này đã trình bày một thuật toán cải tiến dựa trên thuật toán đuổi khớp MP để khôi phục các tín hiệu được lấy mẫu nén. Sự khác biệt giữa hai thuật toán là ở bước tìm kiếm phần dư và bước cập nhật giá trị. So với thuật toán đuổi khớp MP thuật toán cải tiến DRMP có các đặc điểm sau:

- Thuật toán cải tiến DRMP đơn giản hơn, trong bước tìm kiếm phần dư thay vì phải tìm kiếm trên toàn bộ không gian ma trận lấy mẫu nén thuật toán DRMP chỉ tìm kiếm trong một không gian con theo hướng tích vô hướng *gradient* lớn nhất.

- Thuật toán cải tiến DRMP được chứng minh có giá trị lỗi giảm sau mỗi bước lặp của quá trình khôi phục, tính chất này giúp cho thuật toán hội tụ

nhanh hơn dẫn đến nó có thể thực hiện nhanh hơn so với thuật toán gốc MP.

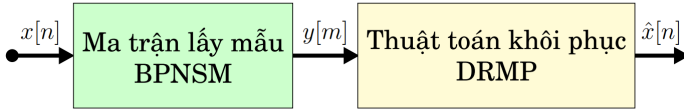
- Thuật toán cải tiến DRMP có hạn chế là nó chỉ hiệu quả khi ma trận lấy mẫu nén thỏa điều kiện giới hạn đẳng trị RIP. Nếu điều kiện này không thỏa mãn thuật toán sẽ tương đương với thuật toán gốc.

Trong chương 4 luận án sẽ thực hiện đánh giá so sánh hiệu năng của thuật toán DRMP với thuật toán gốc MP và thuật toán OMP với tín hiệu được lấy mẫu nén sử dụng ma trận BPNSM, ma trận Gauss và ma trận Bernoulli.

CHƯƠNG 4: ĐỀ XUẤT MÔ HÌNH LẤY MẪU NÉN

4.1. Mở đầu

Trong luận án đề xuất mô hình lấy mẫu nén sử dụng ma trận lấy mẫu BPNSM và thuật toán cải tiến DRMP, được biểu diễn trong hình 4.1. Thuật toán DRMP được đề xuất trong luận án có độ phức tạp tính toán thấp hơn và sai số giảm sau mỗi một bước lặp so với thuật toán gốc MP với điều kiện ma trận lấy mẫu đầu vào phải thỏa mãn tính chất RIP (được thể hiện thông qua tính chất không kết hợp). Trong luận án ma trận BPNSM đã được chứng minh có tính chất không kết hợp nhờ đó mô hình đề xuất có tính khả thi.



Hình 4.1: Mô hình lấy mẫu nén đề xuất

Để đánh giá hiệu quả của mô hình luận án thực hiện mô phỏng, so sánh hiệu quả khi sử dụng 3 ma trận Gauss, Bernoulli, BPNSM với thuật toán DRMP và 3 thuật toán MP, OMP, DRMP với cùng một ma trận BPNSM. Các tiêu chí được sử dụng để đánh giá hiệu quả của ma trận và thuật toán đối với tín hiệu 1 chiều gồm: thời gian thực hiện, hệ số tương quan, sai số trung bình tuyệt đối MAE. Đối với tín hiệu 2 chiều sử dụng các tham số: thời gian thực hiện, sai số trung bình bình phương MSE, tham số PSNR.

4.2. Mô phỏng đánh giá mô hình với tín hiệu 1 chiều

Để mô phỏng và đánh giá hiệu năng của mô hình lấy mẫu nén đề xuất, luận án sử dụng tín hiệu đầu vào là tín hiệu vô tuyến được lấy mẫu từ Flycam DJI Mavic 2 được cấu hình điều khiển ở dải tần 2.4 GHz.

Bộ điều khiển giao tiếp với Flycam sử dụng kỹ thuật trải phổ nhảy tần với độ rộng 1.4 MHz một kênh tần số. Ở thời điểm t , chỉ một vài kênh M đang được sử dụng do đó $M \ll N$. Do đó tín hiệu là thưa trong miền tần số.

4.2.1. Ma trận lấy mẫu tín hiệu 1 chiều

Ma trận lấy mẫu BPNSM có kích thước $(2^n - 1) \times 2^{n+1}$ được tạo từ các chuỗi PN lồng ghép phi tuyến có đa thức sinh trên trường $g(2^n)$ với $n = 10$.

Chọn đa thức sinh thứ nhất: $g(d) = 1 + d^3 + d^{10}$ trên trường $GF(2^{10})$ ánh xạ $GF(2^{10})$ xuống $GF(2^5) = 1 + d^2 + d^5$.

Để có chuỗi phi tuyến, giữ nguyên thứ tự I_p^T và thay thế các chuỗi con bằng các chuỗi con khác tương ứng.

Sau khi tạo được chuỗi PN phi tuyến bậc 10 từ qui trình trên được ma trận Φ_1 . Tương tự với các bước trên nhưng với đa thức $g(d) = 1 + d + d^3 + d^4 + d^{10}$ trên trường $GF(2^{10})$ và ánh xạ xuống $GF(2^5) = 1 + d^3 + d^5$ xây dựng được ma trận Φ_2 và tổ hợp 2 ma trận Φ_1 và Φ_2 lại với nhau thu được ma trận lấy mẫu nén Φ . Ma trận này có kích thước $[1023 \times 2048]$ và được sử dụng để lấy mẫu tín hiệu vô tuyến.

4.2.2. Khôi phục tín hiệu 1 chiều

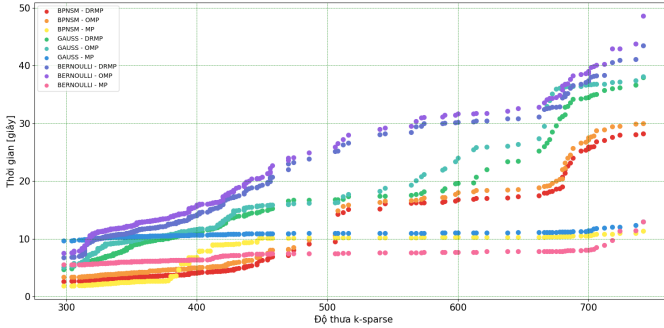
Để đánh giá hiệu quả của mô hình lấy mẫu nén đề xuất luận án tiến hành thực nghiệm với các kịch bản sau.

- Sử dụng các thuật toán DRMP, OMP và MP kết hợp với 3 ma trận lấy mẫu nén BPNSM, Gauss, Bernoulli có tỉ số $SNR \geq 20dB$ và tín hiệu gốc cộng thêm nhiễu có tỉ số $SNR \geq 15dB$ để mô phỏng hiệu quả của mô hình trong trường hợp tín hiệu có SNR thấp.

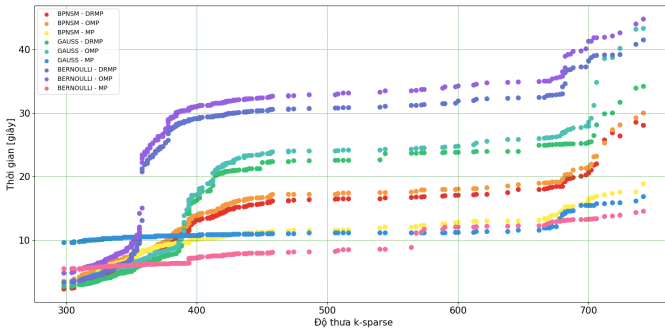
Ma trận lấy mẫu BPNSM có kích thước $[1023 \times 2048]$. Tín hiệu vô tuyến được chia thành các đoạn có độ dài tương ứng là 2048, hệ số nén trong mô hình này là ≈ 0.5 .

Trong thực nghiệm này 289 mẫu tín hiệu có kích thước 1×2048 được chọn lọc từ các mẫu tín hiệu vô tuyến và được sắp xếp lại với giá trị $K - sparse$ tăng dần. Giá trị $K - sparse$ của tín hiệu vô tuyến này không thay đổi tuyến tính mà phân bố trong dải từ 300 – 740. Dưới đây là một số kết quả khi thực hiện mô hình lấy mẫu nén trên máy tính ASUS Core I5 Ram 8G với Python 3.9.

Hình 4.2 là đồ thị dạng điểm biểu diễn thời gian thực hiện của quá trình lấy mẫu nén và khôi phục lại tín hiệu vô tuyến với 3 thuật toán DRMP, OMP, MP và 3 ma trận tương ứng là BPNSM, Gauss và Bernoulli. Trục hoành của đồ thị biểu diễn các giá trị về độ thưa của 289 mẫu và được sắp xếp theo giá trị độ thưa tăng dần. Trong đó có thể nhận thấy thuật toán DRMP và thuật toán OMP gần như tương đương khi kết hợp với cùng một loại ma trận. Thời gian thực hiện khi kết hợp ma trận BPNSM với 2 thuật toán DRMP và OMP nhỏ hơn khi kết hợp với 2 ma trận Gauss và Bernoulli. Trường hợp thuật toán MP khi kết hợp với cả 3 ma trận đều có thời gian thực hiện nhanh nhưng không



Hình 4.2: Thời gian thực hiện trong trường hợp không cộng nhiễu

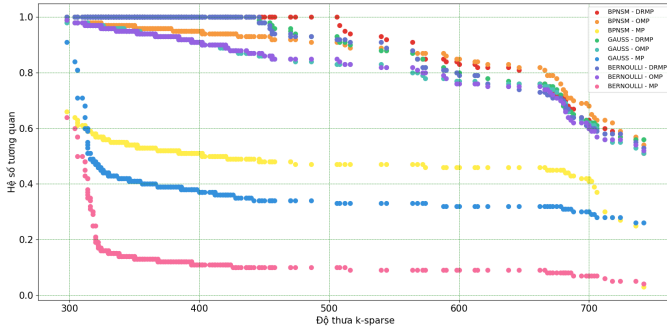


Hình 4.3: Thời gian thực hiện trong trường hợp cộng nhiễu

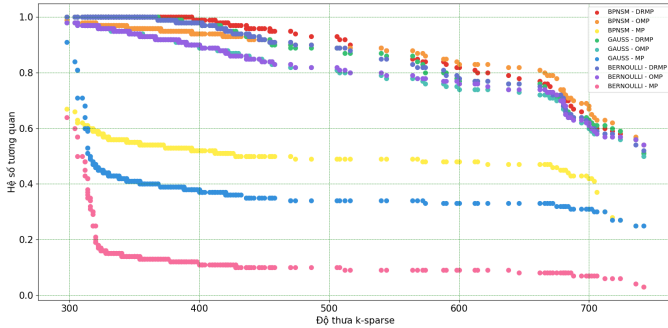
thể hiện rằng thuật toán này có hiệu quả cao. Thuật toán MP có thời gian khôi phục nhanh nhưng các chỉ tiêu về hệ số tương quan và sai số trung bình tuyệt đối MAE đều kém.

Hình 4.3 biểu diễn thời gian thực hiện trong trường hợp có cộng nhiễu vào tín hiệu gốc. Các nhận định cũng tương tự trong trường hợp không cộng nhiễu nhưng khi độ thưa $K - sparse > 350$ thời gian tăng nhanh đột biến.

Hình 4.4 biểu diễn hệ số tương quan của tín hiệu sau khôi phục với tín hiệu gốc được lấy mẫu nén. Trong trường hợp tín hiệu gốc không cộng nhiễu thuật toán DRMP kết hợp với ma trận BPNSM có hệ số tương quan tốt nhất trong tất cả các trường hợp. Khi độ thưa $K - sparse$ của tín hiệu vượt quá 500 hệ số tương quan trong trường hợp kết hợp thuật toán DRMP và ma trận BPNSM bắt đầu giảm. Thuật toán DRMP kết hợp với 2 ma trận Gauss và Bernoulli cũng cho hệ số tương quan tốt nhưng giá trị tương quan bắt đầu giảm với độ thưa $K - sparse > 450$. Tín hiệu khôi phục bằng thuật toán MP có hệ số tương quan thấp đối với cả 3 ma trận, trong đó việc kết hợp thuật



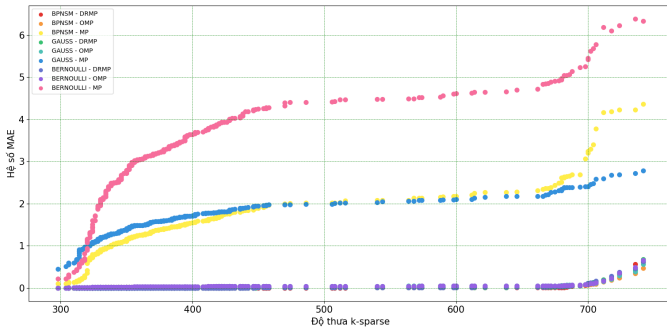
Hình 4.4: Hệ số tương quan trong trường hợp không đồng nhiễu



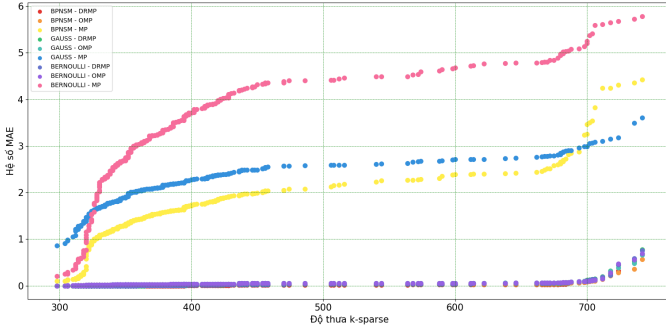
Hình 4.5: Hệ số tương quan trong trường hợp đồng nhiễu

toán MP với ma trận Bernoulli cho kết quả kém nhất.

Hình 4.5 biểu diễn hệ số tương quan của tín hiệu sau khôi phục với tín hiệu gốc trong trường hợp đồng nhiễu vào tín hiệu gốc. Các nhận định cũng tương tự trong trường hợp không đồng nhiễu nhưng hệ số tương quan bắt đầu giảm với độ thưa $K - sparse < 400$.



Hình 4.6: Hệ số MAE trong trường hợp không đồng nhiễu



Hình 4.7: Hệ số MAE trong trường hợp cộng nhiễu

Hình 4.6 biểu diễn sai số trung bình tuyệt đối MAE của tín hiệu được khôi phục sử dụng thuật toán của 3 thuật toán và 3 ma trận so với tín hiệu gốc. Sai số MAE khi sử dụng thuật toán MP là cao nhất trong các thuật toán và đặc biệt cao trong trường hợp thuật toán MP kết hợp với ma trận Bernoulli. Sai số trung bình tuyệt đối tăng khi độ thưa của tín hiệu được lấy mẫu nén tăng. Hình 4.7 biểu diễn sai số trung bình tuyệt đối MAE trong trường hợp cộng nhiễu vào tín hiệu gốc cũng cho các nhận xét tương tự trong trường hợp không cộng nhiễu nhưng hệ số MAE lớn hơn trong tất cả các trường hợp. Hai thuật toán DRMP và OMP cho sai số MAE gần như tương đương nhau trong cả 2 trường hợp không cộng nhiễu và có cộng nhiễu vào tín hiệu gốc.

Từ các thực nghiệm trên, có thể thấy rằng, đối với cả hai trường hợp không cộng nhiễu và có cộng nhiễu vào tín hiệu gốc ma trận BPNSM được đề xuất cung cấp độ chính xác tái tạo tốt hơn so với ma trận Gauss và Bernoulli.

Thuật toán DRMP được đề xuất cho độ chính xác tốt hơn nhiều so với thuật toán gốc MP và là tốt nhất trong trường hợp kết hợp giữa thuật toán DRMP và ma trận lấy mẫu BPNSM.

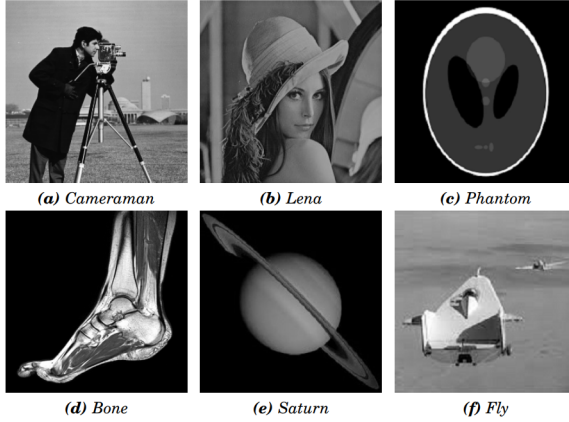
4.3. Mô phỏng đánh giá mô hình với tín hiệu 2 chiều

4.3.1. Ma trận lấy mẫu ảnh số

Trong kịch bản thử nghiệm đối với lấy mẫu nén ảnh số luận án thực hiện với các bức ảnh đa cấp xám 8 bit có kích thước 512×512 như trong hình 4.8. Ma trận lấy mẫu BPNSM được tạo thành từ 2 đa thức sinh bậc 9 là $g(d) = 1 + d + d^3 + d^4 + d^9$ và $g(d) = 1 + d + d^2 + d^7 + d^9$ trên trường $GF(2^9)$. Ma trận BPNSM thu được với kích thước 511×1024 được sử dụng để làm ma trận lấy mẫu.

4.3.2. Khôi phục lại ảnh gốc

Các bức ảnh được chia thành các khối ảnh 32×32 sau đó thực hiện biến



Hình 4.8: Ảnh thử nghiệm

đổi DCT trước khi thực hiện việc lấy mẫu nén. Quá trình lấy mẫu nén cũng được thực hiện với 2 trường hợp là có cộng nhiễu vào tín hiệu ảnh gốc và không cộng nhiễu đối với tín hiệu ảnh. Các giá trị điển hình cho tham số PSNR đối với ảnh 8 bit khi nén bị tổn hao là từ 30 đến 50dB. Mô phỏng trong luận án thực hiện việc đánh giá ảnh hưởng của nhiễu tới mô hình bằng việc thay đổi giá trị nhiễu σ trong dải $[0 \div 1]$ và thu được kết quả thay đổi của tham số PSNR. Kết quả giá trị PSNR ≈ 30 dB với $\sigma = 0.2$. Do đó tham số nhiễu $\sigma = 0.2$ và trường hợp không có nhiễu tại $\sigma = 0$ được sử dụng để đánh giá so sánh giữa các ma trận và thuật toán.

Trong thực nghiệm này luận án áp dụng 3 thuật toán khôi phục là MP, OMP, và thuật toán DRMP thực hiện quá trình khôi phục lại tín hiệu ảnh được lấy mẫu nén bởi ma trận BPNSM. Để đánh giá hiệu suất của hình ảnh được khôi phục, luận án sử dụng các tham số đánh giá thị giác là PSNR, MSE và thời gian thực hiện.

Dưới đây là một số kết quả thực nghiệm khi thực hiện mô phỏng mô hình lấy mẫu nén trên máy tính ASUS Core I5 Ram 8G.

Bảng 4.1: Bảng PSNR(dB) trong trường hợp không cộng nhiễu

Ảnh test	MP			OMP			DRMP		
	Gauss	Bernoulli	BPNSM	Gauss	Bernoulli	BPNSM	Gauss	Bernoulli	BPNSM
Cameraman	6.56	2.68	5.72	28.91	29.32	36.56	31.29	30.30	35.90
Lena	8.86	5.88	8.37	36.56	33.98	37.45	34.73	33.01	36.16
Phantom	13.95	6.45	12.75	32.51	33.62	37.08	34.89	36.38	41.36
Bone	9.59	3.61	9.35	29.72	29.28	32.73	30.40	30.03	36.69
Saturn	14.03	11.47	13.09	42.43	42.92	45.21	41.59	42.07	41.09
Fly	6.25	4.30	5.05	29.72	29.28	32.73	39.80	41.63	38.84

Bảng 4.2: Bảng MSE trong trường hợp không cộng nhiễu

Ảnh test	MP			OMP			DRMP		
	Gauss	Bernoulli	BPNSM	Gauss	Bernoulli	BPNSM	Gauss	Bernoulli	BPNSM
Cameraman	0.89	1.40	0.99	0.07	0.07	0.04	0.05	0.06	0.03
Lena	0.94	1.32	0.99	0.05	0.05	0.04	0.05	0.06	0.04
Phantom	0.84	2	0.97	0.10	0.09	0.06	0.08	0.06	0.04
Bone	0.94	1.87	0.97	0.09	0.10	0.07	0.09	0.09	0.04
Saturn	0.89	1.19	0.99	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04
Fly	0.87	1.09	0.99	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02

Bảng 4.3: Bảng thời gian xử lý trong trường hợp không cộng nhiễu

Ảnh test	MP			OMP			DRMP		
	Gauss	Bernoulli	BPNSM	Gauss	Bernoulli	BPNSM	Gauss	Bernoulli	BPNSM
Cameraman	54.22	86.86	83.83	2.48	4.35	2.34	2.99	6.89	1.59
Lena	53.77	94.56	91.73	2.43	4.686	2.32	2.28	6.14	1.15
Phantom	26.48	21.37	19.20	4.39	6.445	4.49	1.21	2.22	0.71
Bone	24.8	45.25	47.34	3.41	5.586	3.29	2.60	5.35	1.37
Saturn	22.17	36.10	37.82	3.52	6.635	3.47	0.82	1.8	0.42
Fly	53.11	104.98	81.36	2.48	6.42	2.40	1.56	3.94	0.62

Từ dữ liệu các bảng 4.1, 4.2, 4.3 nhận thấy rằng:

- Trong 3 thuật toán được lựa chọn để thực hiện khôi phục lại tín hiệu là ảnh đa cấp xám được lấy mẫu nén thì thuật toán MP có hiệu quả kém nhất. Thuật toán MP cho sai số lớn và thời gian xử lý lâu nhất so với 2 thuật toán còn lại.

- Giữa thuật toán OMP và thuật toán DRMP có thể nhận xét gần như tương đương nhau về thời gian xử lý cũng như tham số PSNR khi sử dụng ma trận lấy mẫu là ma trận Gauss và Bernoulli.

- Khi kết hợp thuật toán DRMP với ma trận lấy mẫu BPNSM có thể nhận thấy cả thông số về thời gian và thông số về độ sai lệch MSE đều giảm rõ rệt. Hiệu quả này cũng đúng khi khôi phục tín hiệu được lấy mẫu nén bằng ma trận BPNSM sử dụng thuật toán OMP.

Để đánh giá khả năng lấy mẫu nén ảnh số dưới tác động của nhiễu. Trong phần tiếp theo luận án tiến hành thực nghiệm với 3 thuật toán khôi phục là MP, OMP và DRMP, đối với tín hiệu ảnh có nhiễu được lấy mẫu sử dụng cả 3 ma trận Gauss, Bernoulli và BPNSM.

Từ dữ liệu các bảng 4.4, 4.5, 4.6 nhận thấy rằng:

- Trong 3 ma trận lấy mẫu khi tín hiệu được cộng nhiễu thì ma trận Gauss có hiệu quả kém nhất. Ma trận BPNSM có hiệu quả tốt nhất dựa trên 2 bảng 4.4, 4.5.

- Trong trường hợp cộng thêm nhiễu thuật toán MP cũng cho kết quả kém nhất trong 3 thuật toán cả về thời gian thực hiện, sai số trung bình tuyệt đối

Bảng 4.4: Bảng PSNR(dB) trong trường hợp cộng nhiễu

Ảnh test	MP			OMP			DRMP		
	Gauss	Bernoulli	BPNSM	Gauss	Bernoulli	BPNSM	Gauss	Bernoulli	BPNSM
Cameraman	6.89	5.77	5.77	16.80	24.35	30.68	19.67	25.39	33.37
Lena	9.54	8.4	8.4	16.96	25.21	32.58	20.22	27.22	34.10
Phantom	13.67	12.32	12.3	16.92	25.47	32.30	20.78	28.28	35.88
Bone	10.32	9.16	9.15	16.60	24.25	30.45	19.77	25.28	33.87
Saturn	13.67	12.62	12.62	17.13	25.84	33.60	21.40	29.74	36.22
Fly	6.28	5.17	5.17	17.21	25.89	33.68	21.03	29.08	35.45

Bảng 4.5: Bảng MSE trong trường hợp cộng nhiễu

Ảnh test	MP			OMP			DRMP		
	Gauss	Bernoulli	BPNSM	Gauss	Bernoulli	BPNSM	Gauss	Bernoulli	BPNSM
Cameraman	0.86	0.98	0.98	0.27	0.12	0.06	0.2	0.10	0.04
Lena	0.86	0.98	0.99	0.37	0.14	0.06	0.25	0.11	0.05
Phantom	0.87	1.02	1.02	0.60	0.22	0.10	0.38	0.16	0.07
Bone	0.86	0.98	0.99	0.42	0.17	0.09	0.29	0.15	0.06
Saturn	0.93	1.04	1.05	0.62	0.23	0.09	0.38	0.15	0.07
Fly	0.86	0.98	0.98	0.25	0.09	0.04	0.16	0.06	0.03

Bảng 4.6: Bảng thời gian xử lý trong trường hợp cộng nhiễu (giây)

Ảnh test	MP			OMP			DRMP		
	Gauss	Bernoulli	BPNSM	Gauss	Bernoulli	BPNSM	Gauss	Bernoulli	BPNSM
Cameraman	50.92	89.18	83.71	2.54	4.34	2.43	2.87	3.48	2.85
Lena	51.16	93.73	123.48	2.57	4.28	2.31	4.57	3.17	2.40
Phantom	51.43	85.20	84.10	2.55	5.43	2.48	2.06	2.13	1.55
Bone	50.73	81.36	93.14	2.52	5.26	2.43	2.44	4.99	2.44
Saturn	52.20	164.9	93.93	2.56	4.77	2.49	2.14	4.20	1.29
Fly	52.48	88.26	165.6	2.53	5.66	2.63	1.65	4.87	1.77

MSE và tham số PSNR. Giữa thuật toán OMP và thuật toán DRMP có thể nhận thấy thuật toán DRMP có các chỉ tiêu khôi phục tốt hơn trong trường hợp tín hiệu được cộng thêm nhiễu.

- Thời gian thực hiện của 2 thuật toán OMP và DRMP gần như tương đương nhau trong trường hợp cộng nhiễu. Khi so sánh thời gian thực hiện quá trình lấy mẫu nén với 3 ma trận Gauss, Bernoulli và ma trận BPNSM kết hợp với thuật toán DRMP thì thời gian thực hiện giữa ma trận Gauss và ma trận BPNSM là tương đương nhau, thời gian thực hiện với ma trận ma trận Bernoulli là lâu nhất.

4.4. Ứng dụng mô hình lấy mẫu nén đề xuất

Từ các phân tích, mô phỏng đánh giá đối với mô hình lấy mẫu nén được đề xuất, để xem xét đến khả năng ứng dụng của mô hình lấy mẫu nén trong thực tế luận án cũng trình bày hai ứng dụng sử dụng lấy mẫu nén, ứng dụng thứ nhất là thu tín hiệu vô tuyến phát ra từ flycam và ứng dụng còn lại là lấy mẫu ảnh trong hệ thống camera giám sát.

4.4.1. Ứng dụng trong cảm nhận phổ băng rộng

4.4.2. Ứng dụng lấy mẫu nén ảnh số

4.5. Tổng kết chương

Từ các thực nghiệm với tín hiệu vô tuyến và tín hiệu ảnh được trình bày có thể nhận xét:

- Ma trận xác định BPNSM có hiệu quả rõ rệt khi được so sánh với ma trận Gauss và ma trận Bernoulli. Sử dụng ma trận này hiệu quả cả về mặt thời gian và độ chính xác trong quá trình khôi phục lại tín hiệu.

- Thuật toán DRMP có thời gian xử lý gần như tương đương với thuật toán OMP nhưng cho kết quả có độ chính xác cao hơn và khả năng chống nhiễu tốt hơn so với thuật toán OMP và MP.

- Thuật toán DRMP được cải tiến từ thuật toán gốc MP và có hiệu quả tốt hơn so với thuật toán gốc MP cả về độ chính xác và thời gian thực hiện.

- Thuật toán gốc MP có thời gian khôi phục lớn do khối lượng tính toán lớn, lỗi khôi phục cao nhất là đối với các tín hiệu có giá trị $K - sparse$ cao và tỉ số SNR thấp.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Nội dung luận án đã đạt được mục tiêu đề ra là nghiên cứu đề xuất một mô hình lấy mẫu nén gồm ma trận lấy mẫu nén xác định khả thi khi thực hiện với các hệ thống điện tử số, thuật toán khôi phục tín hiệu được lấy mẫu nén cải tiến từ thuật toán gốc MP. Các kết quả nghiên cứu được trình bày chi tiết trong luận án với bố cục gồm bốn chương: Chương 1 trình bày tổng quan về lấy mẫu nén, Chương 2 thiết kế ma trận lấy mẫu nén xác định BPNSM, Chương 3 trình bày thuật toán cải tiến DRMP, Chương 4 đề xuất mô hình lấy mẫu nén và mô phỏng, đánh giá. Các kết quả đóng góp mới về khoa học của luận án có thể phân thành ba nhóm như sau:

1. Đề xuất phương pháp xây dựng ma trận lấy mẫu nén BPNSM.

Đề xuất một kỹ thuật xây dựng ma trận lấy mẫu nén BPNSM với các phần tử được tạo thành từ các chuỗi nhị phân phi tuyến. Các nghiên cứu trước đây chưa tập trung vào tính bảo mật và các kỹ thuật thực hiện ma trận trên phần cứng với tốc độ cao. Việc tạo ra ma trận từ các dãy phi tuyến giả ngẫu nhiên làm cho ma trận lấy mẫu nén có tính bảo mật cao, kỹ thuật tạo ra ma trận từ phần cứng FPGA kết hợp với hệ thống chuyển mạch giúp giảm thời gian tạo ra ma trận, giảm độ phức tạp phần cứng khi thực hiện lấy mẫu nén. Ma trận BPNSM được tạo ra từ các đa thức sinh trên trường Galois nên yêu cầu về lưu trữ thấp, trong các ứng dụng truyền thông thay vì truyền đi giá trị toàn bộ

các phần tử trong ma trận thì đối với ma trận BPNSM chỉ cần truyền đi đa thức sinh để tạo ra ma trận đó.

2. Đề xuất thuật toán cải tiến DRMP dựa trên thuật toán gốc MP.

Đề xuất thuật toán cải tiến DRMP dựa trên thuật toán gốc MP. Thuật toán DRMP cải tiến so với thuật toán MP ở bước tìm kiếm phần dư và cập nhật giá trị trong mỗi một bước lặp. Các thành phần của tín hiệu được tìm kiếm từ không gian con của ma trận lấy mẫu nén thông qua hướng tối đa hóa biến đổi *gradient* của hàm mục tiêu thay vì việc tính tích vô hướng của tất cả các cột trong ma trận lấy mẫu như đối với thuật toán gốc MP. Thông qua các phân tích đánh giá về mặt toán học và mô phỏng thực nghiệm, thuật toán DRMP được đề xuất có lỗi trong quá trình khôi phục giảm dần sau mỗi lần lặp, quá trình tính toán ở mỗi bước lặp đơn giản hơn so với thuật toán gốc MP trong trường hợp ma trận lấy mẫu thỏa mãn điều kiện giới hạn đẳng trị RIP.

3. Đề xuất mô hình lấy mẫu nén gồm ma trận BPNSM và thuật toán cải tiến DRMP, so sánh đánh giá hiệu năng của mô hình đề xuất.

Từ ma trận BPNSM và thuật toán cải tiến DRMP luận án đã đề xuất mô hình lấy mẫu nén sử dụng 2 phần tử này. Hiệu năng của mô hình đề xuất được kiểm chứng thông qua mô phỏng với các nguồn tín hiệu đầu vào phổ biến trong thực tế gồm tín hiệu vô tuyến và tín hiệu ảnh đa cấp xám. Tính khả thi của mô hình được trình bày thông qua 2 ứng dụng là lấy mẫu nén tín hiệu vô tuyến từ Flycam và lấy mẫu nén hình ảnh trong hệ thống camera giám sát.

Kết quả nghiên cứu trong luận án phù hợp với những kết quả được trình bày trong phần thực nghiệm, đây cũng là định hướng để có thể mở rộng các nghiên cứu về sau. Hướng nghiên cứu tiếp theo của luận án sẽ tập trung vào lấy mẫu nén thích nghi để nâng cao hiệu quả cho quá trình tính toán và lưu trữ và sử dụng các công cụ học máy, trí tuệ nhân tạo để tối ưu hóa ma trận lấy mẫu.

