

**BỘ KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ  
HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG**

---



**HOÀNG ANH ĐỨC**

**NGHIÊN CỨU BỘ TÁCH SÓNG VÀ GIẢI MÃ SỬA LỖI VỚI  
BỘ ĐIỀU CHẾ XẾP CHỖNG CHO HỆ THỐNG MIMO CỠ  
LỚN SỬ DỤNG BỘ ADC PHÂN GIẢI THẤP**

NGÀNH : KỸ THUẬT VIỄN THÔNG  
MÃ SỐ: 9.52.02.08

**TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT**

HÀ NỘI - 2026

Công trình được hoàn thành tại:

**HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG**

Người hướng dẫn khoa học:

**PGS.TS. Nguyễn Trung Hiếu**

**PGS.TS. Lê Nhật Thăng**

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**

Km10, Đường Nguyễn Trãi, Quận Hà Đông, Hà Nội

Vào hồi: **giờ 00', ngày tháng năm**

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**

# MỞ ĐẦU

## GIỚI THIỆU

Từ đầu thập niên 2020, cùng với sự triển khai của 5G và định hướng phát triển 6G nhằm đáp ứng nhu cầu kết nối ngày càng cao với tốc độ lớn, độ trễ thấp, độ tin cậy cao và khả năng tích hợp trí tuệ nhân tạo, hệ thống MIMO quy mô lớn đã trở thành nền tảng quan trọng nhờ khả năng nâng cao hiệu quả sử dụng phổ và chất lượng liên kết. Tuy nhiên, việc triển khai MIMO quy mô lớn gặp nhiều thách thức về tiêu thụ năng lượng và độ phức tạp phần cứng, trong đó việc sử dụng ADC độ phân giải thấp được xem là giải pháp tiềm năng để giảm công suất và tăng khả năng mở rộng hệ thống. Đồng thời, mã Protograph LDPC kết hợp với các kỹ thuật điều chế bậc cao, đặc biệt là điều chế xếp chồng, cho thấy tiềm năng cải thiện hiệu năng phổ và độ tin cậy truyền dẫn, nhưng hiện vẫn thiếu các nghiên cứu toàn diện về sự kết hợp này trong hệ thống MIMO quy mô lớn sử dụng ADC độ phân giải thấp, dù đây là hướng tiếp cận hứa hẹn trong môi trường bị giới hạn bởi lượng tử hóa.

## MỤC TIÊU CỦA LUẬN ÁN

### **Mục tiêu chung:**

Luận án hướng tới việc khảo sát và phân tích khả năng kết hợp giữa điều chế xếp chồng và mã P-LDPC trong các hệ thống MIMO quy mô lớn sử dụng bộ chuyển đổi ADC độ phân giải thấp.

### **Mục tiêu cụ thể:**

*Thứ nhất*, nghiên cứu mô hình tích hợp điều chế xếp chồng M-QAM với mã P-LDPC trong hệ thống thông tin vô tuyến MIMO cỡ lớn sử dụng các bộ ADC độ phân giải thấp. Trên cơ sở đó, luận án đánh giá hiệu năng toàn diện của hệ thống, bao gồm khả năng chống lỗi, độ hội tụ giải mã và hiệu quả phổ trong điều kiện lượng tử hóa thô, nhằm làm rõ tiềm năng ứng dụng của phương pháp này trong các hệ thống không dây thế hệ mới.

*Thứ hai*, nghiên cứu đề xuất thuật PEXIT cải tiến để phân tích và dự đoán ngưỡng giải mã nhằm cải thiện hiệu năng của hệ thống thông tin vô tuyến MIMO cỡ lớn sử dụng các bộ ADC độ phân giải hỗn hợp tại phía thu, hướng tới tối ưu hóa hiệu năng BER và tiêu thụ năng lượng.

## PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Luận án tập trung phân tích bài toán và xây dựng mô hình toán học phù hợp với bản chất của hệ thống, sau đó kiểm chứng mô hình thông qua các mô phỏng trên máy tính nhằm đánh giá độ chính xác và khả năng áp dụng thực tiễn. Trên cơ sở các mô hình xác suất – thống kê chuẩn, kênh truyền và nhiễu hệ thống được mô tả bằng các mô hình ngẫu nhiên phù hợp, qua đó làm nền tảng cho việc phân tích và đề xuất giải pháp nâng cao hiệu năng hệ thống.

Bên cạnh phân tích lý thuyết, luận án phát triển hệ thống mô phỏng bằng ngôn ngữ C++ và sử dụng phương pháp Monte-Carlo để đánh giá hiệu năng trong các kịch bản gần với điều kiện vận hành thực tế. Cách tiếp cận này cho phép kiểm chứng sự phù hợp giữa kết quả lý thuyết và mô phỏng, đồng thời đánh giá tính ổn định và hiệu quả của giải pháp đề xuất dưới nhiều cấu hình và chế độ hoạt động khác nhau.

## CÁC ĐÓNG GÓP CỦA LUẬN ÁN

Luận án có hai đóng góp chính đó là:

**Đóng góp thứ nhất của luận án** là đề xuất mô hình tích hợp điều chế xếp chồng M-QAM với mã P-LDPC trong hệ thống LS-MIMO sử dụng ADC độ phân giải thấp, đồng thời đánh giá toàn diện hiệu năng hệ thống trong điều kiện lượng tử hóa thô. Cách tiếp cận này khai thác hiệu quả phổ của điều chế xếp chồng kết hợp với khả năng sửa lỗi mạnh của mã P-LDPC nhằm cải thiện độ tin cậy truyền dẫn. Trên cơ sở đó, luận án phát triển kiến trúc tách sóng tín hiệu mới có độ phức tạp thấp, dựa trên ánh xạ xếp chồng và lan truyền thông tin trên đồ thị Tanner, giúp chuyển bài toán tách sóng từ dạng toàn cục sang các phép tính cục bộ và đạt độ phức tạp bậc hai. Kết quả cũng cho thấy sơ đồ điều chế xếp chồng với trọng số bằng nhau đạt hiệu năng lỗi bit tốt hơn so với sơ đồ khoảng cách đều trong các hệ thống sử dụng lượng tử hóa thô.

**Đóng góp thứ hai của luận án** là đề xuất thuật toán P-EXIT cải tiến nhằm phân tích và dự đoán ngưỡng giải mã cho hệ thống LS-MIMO sử dụng cấu hình ADC độ phân giải hỗn hợp tại phía thu. Giải pháp này cho phép cân bằng giữa hiệu năng và mức tiêu thụ năng lượng bằng cách kết hợp linh hoạt các ADC độ phân giải cao và thấp, đồng thời duy trì hiệu năng phát hiện và giải mã gần với hệ thống truyền thống. Các kết quả mô phỏng

trên nhiều cấu hình MIMO khác nhau đã xác nhận rõ ràng hiệu quả và tính khả thi của thuật toán đề xuất.

## **BỘ CỤC CỦA LUẬN ÁN**

### **Chương 1: Tổng quan về hệ thống MIMO cỡ lớn kết hợp bộ ADC độ phân giải thấp sử dụng mã P-LDPC.**

Chương 1 cung cấp nền tảng lý thuyết và bối cảnh nghiên cứu cho việc tối ưu hiệu năng các hệ thống MIMO dung lượng lớn, nhấn mạnh vai trò của ADC độ phân giải thấp, các kỹ thuật điều chế hiện đại và mã hóa kênh P-LDPC trong việc cân bằng giữa hiệu năng, độ phức tạp và tiêu thụ năng lượng.

### **Chương 2: Phân tích và đánh giá hiệu năng của điều chế xếp chồng M-QAM mã hóa P-LDPC cho hệ thống MIMO cỡ lớn với bộ ADC độ phân giải thấp.**

Chương này nghiên cứu và đánh giá hiệu năng của sơ đồ điều chế xếp chồng trong hệ thống MIMO cỡ lớn sử dụng mã P-LDPC và ADC độ phân giải thấp, nhằm nâng cao hiệu quả truyền dẫn đồng thời kiểm soát độ phức tạp xử lý tại bộ thu. Luận án đề xuất kiến trúc xử lý cho phép kết hợp tách sóng và giải mã dựa trên đồ thị Tanner với độ phức tạp thấp, đồng thời phát triển thuật toán P-EXIT để phân tích và dự đoán hiệu năng, qua đó làm rõ tiềm năng cải thiện tốc độ truyền và tiết kiệm năng lượng của điều chế xếp chồng, cũng như tạo nền tảng cho các thiết kế và mở rộng hệ thống trong các kịch bản không dây thế hệ tiếp theo.

### **Chương 3: Đề xuất thuật toán đánh giá hiệu năng của hệ thống thông tin vô tuyến MIMO cỡ lớn sử dụng ADC độ phân giải hỗn hợp.**

Chương 3 tập trung giải quyết bài toán tiết kiệm năng lượng cho bộ thu LS-MIMO bằng cách đề xuất kiến trúc mới kết hợp ADC độ phân giải hỗn hợp, điều chế xếp chồng và mã P-LDPC, cùng với bộ tách sóng dựa trên đồ thị hai lớp và bộ giải mã LDPC tùy chỉnh nhằm nâng cao hiệu năng trong điều kiện lượng tử hóa thô. Bên cạnh đó, luận án phát triển thuật toán P-EXIT cải tiến để phân tích và dự đoán ngưỡng giải mã, đánh giá hiệu quả tiết kiệm công suất của sơ đồ điều chế xếp chồng EW so với ED trên nhiều cấu hình MIMO.

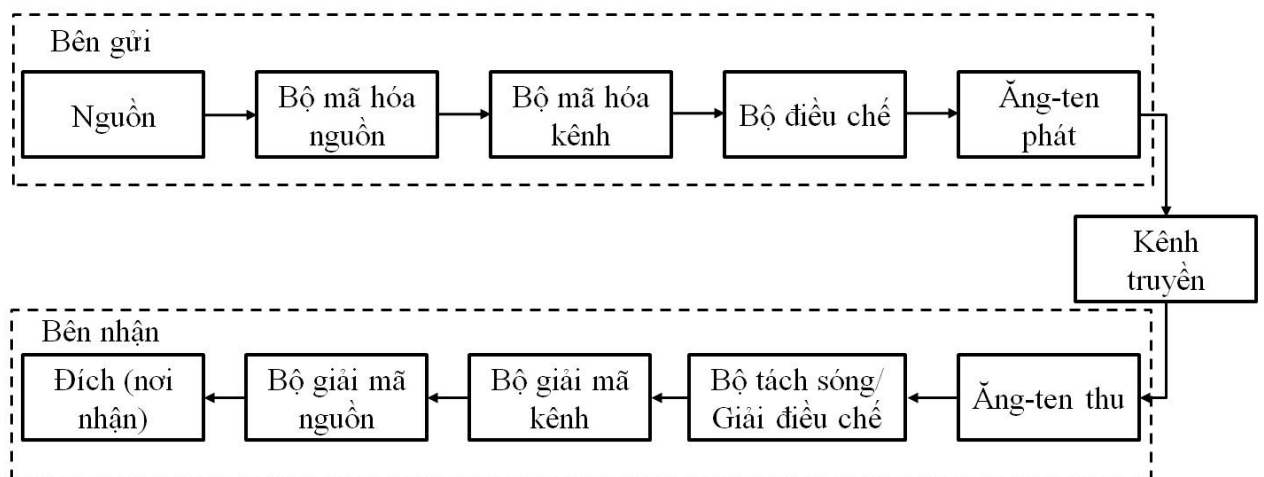
Phần cuối cùng của luận án chính là một số kết luận và định hướng phát triển nghiên cứu tiếp theo.

# CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ HỆ THỐNG MIMO CỠ LỚN KẾT HỢP BỘ ADC ĐỘ PHÂN GIẢI THẤP SỬ DỤNG MÃ P-LDPC

Mô hình máy thu và máy phát trong các mạng không dây thế hệ mới

Hệ thống truyền thông số

Hình 1.1 trình bày các khối cơ bản của một hệ thống truyền thông số.



Hình 1.1. Các thành phần cơ bản của hệ thống truyền thông số

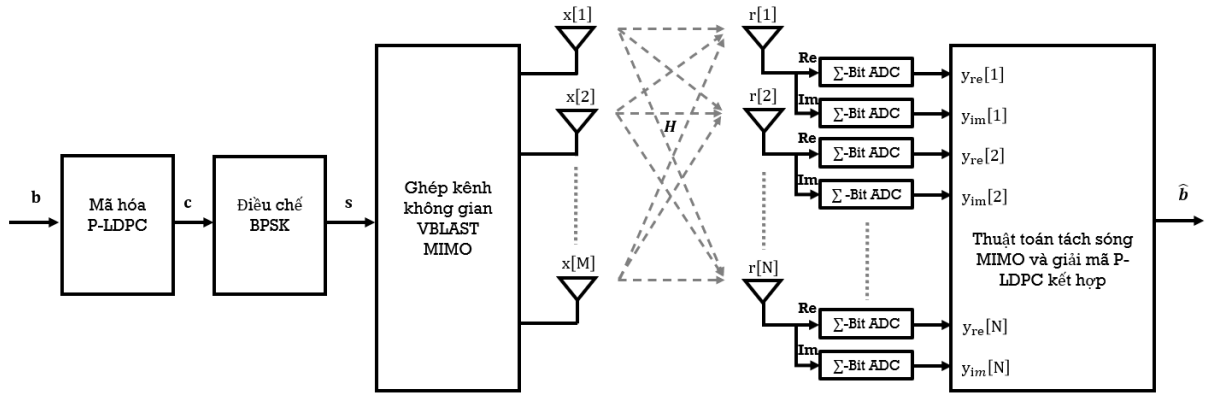
Hệ thống MIMO với ADC độ phân giải thấp

Mô hình hệ thống MIMO

Kênh MIMO được mô hình bằng toán học như sau:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{H}\mathbf{X} + \mathbf{Z} \quad (1.1)$$

Trong đó,  $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_m]^T$  là tín hiệu MIMO được truyền đi với các phân tử thuộc miền giá trị của bộ điều chế pha nhị phân.  $E_s = E(|x|^2)$  là năng lượng tín hiệu trung bình được chuẩn hóa về 1.  $H \in \mathbb{C}^{N_r \times N_t}$  là ma trận hệ số kênh chứa các thành phần  $h[n, m]$  tại hàng  $n$  và cột  $m$  của ma trận  $H$ .



Hình 1.2. Mô hình tổng quan hệ thống thông tin MIMO mã hóa

### Công suất tiêu thụ của bộ ADC

Trong khuôn khổ luận án, NCS sử dụng mô hình ADC tốc độ Nyquist (Nyquist-rate ADC) để tính toán công suất tiêu thụ. Kết quả là, giá trị  $P_{ADC}$  có thể được tính như sau:

$$P_{ADC} \approx \frac{3V_{dd}^2 L_{min} (2B + f_{cor})}{10^{-0.1525b + 4.838}} \quad (1.2)$$

Trong đó:

- +  $V_{dd}$  là nguồn cung cấp.
- +  $L_{min}$  là độ dài kênh tối thiểu cho công nghệ CMOS đã được đưa ra.
- +  $B$  là băng thông của tín hiệu ban đầu.
- +  $f_{cor}$  là tần số góc của nhiễu  $1/f$  [128].
- +  $b$  là số bit lượng tử hóa.

Tất cả các tham số đó được xác định cụ thể trong tài liệu với  $V_{dd} = 3V$ ,  $L_{min} = 0.5 \mu m$ ,  $B = 20 \text{ MHz}$ ,  $f_{cor} = 1 \text{ MHz}$ .

Công suất ADC tăng phi tuyến theo số bit, xấp xỉ theo hệ số  $10^{-0.1525b}$ , tức là cứ tăng 1 bit thì công suất tăng khoảng 1.42 lần. Khi băng thông lớn (20 MHz), mức tiêu thụ mạch ADC có thể đạt đến hàng trăm mW ở 8 bit, điều này giải thích vì sao hệ thống LS-MIMO thường dùng ADC độ phân giải thấp (1–5 bit) để tiết kiệm năng lượng.

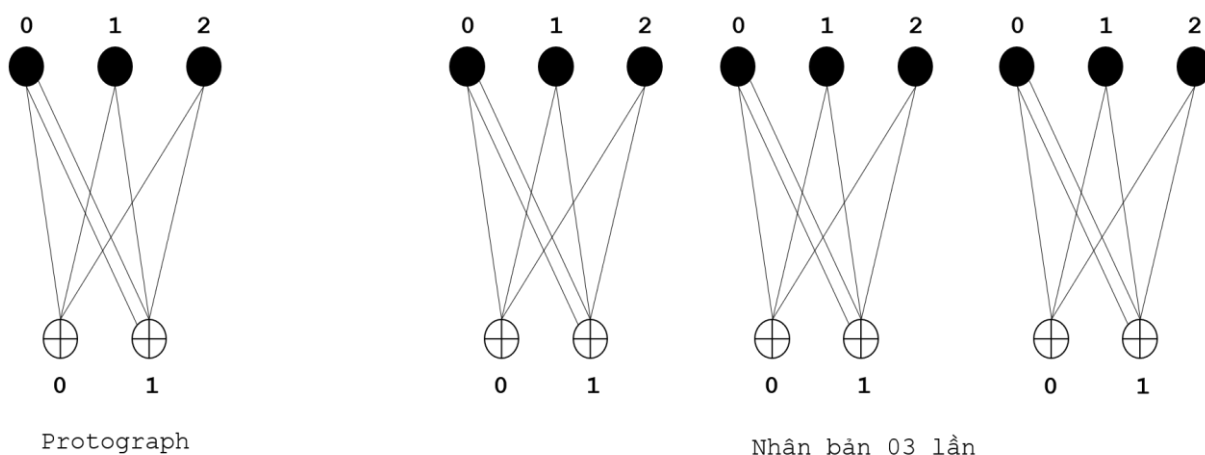
Bảng 1.1: Công suất tiêu thụ điện năng cho các mức độ phân giải ADC tốc độ Nyquist khác nhau

Độ phân giải	Công suất tiêu thụ (mW)
ADC 1 bit	11.42
ADC 2 bit	16.22
ADC 3 bit	23.05
ADC 4 bit	32.74
ADC 5 bit	46.52
ADC 8 bit	133.39

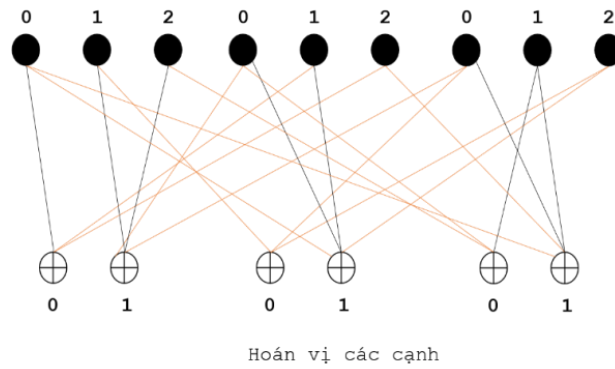
### Mã sửa lỗi Protograph LDPC

#### Mã Protograph LDPC

Một mã P-LDPC thực chất là một dạng mã LDPC được tạo ra từ việc mở rộng một protograph ban đầu thông qua quá trình sao chép và hoán vị có cấu trúc. Cụ thể, protograph gốc được sao chép  $N$  lần để tạo thành  $N$  bản giống hệt nhau. Sau đó, các cạnh tương ứng giữa các nút biên và nút kiểm tra trong từng bản sao sẽ được hoán vị theo cùng một quy tắc, dựa trên cấu trúc của các cạnh trong protograph gốc. Nhờ đó, ta thu được một đồ thị Tanner quy mô lớn hơn, biểu diễn mã LDPC dẫn xuất từ protograph.

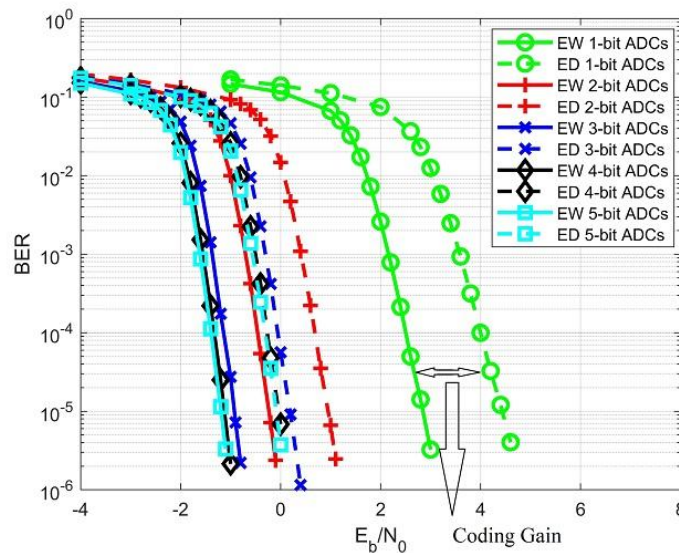


Hình 1.3. Nhân bản số lượng protograph



Hình 1.4. Hoán vị các cạnh sau nhân bản

### Phân tích kết quả hiệu năng của mã P-LDPC



Hình 1.5. Đánh giá hiệu năng dựa trên độ lợi mã hóa đạt được

Hình 1.5 trình bày một phần kết quả thu được trong nghiên cứu của luận án, thể hiện độ lợi mã hóa thông qua đường cong BER theo SNR đối với mã P-LDPC có tỷ lệ mã  $R = 1/2$ .

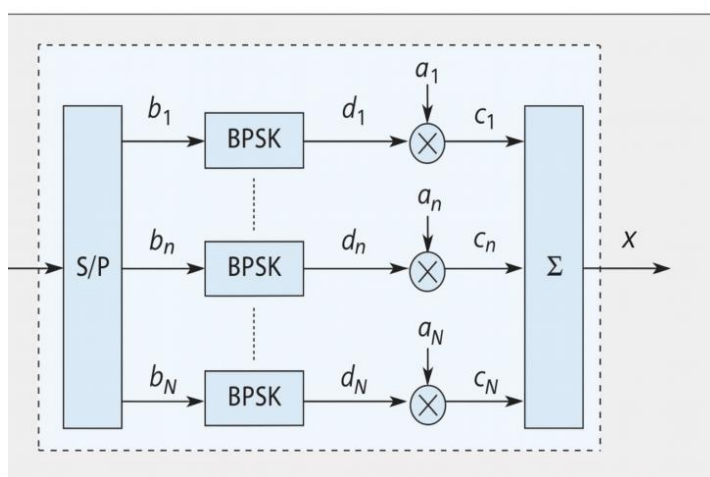
### Bộ điều chế bậc cao dùng phương pháp điều chế xếp chồng

Điều chế xếp chồng tín hiệu (Superposition Modulation) là một sơ đồ điều chế không song ánh, trong đó nhiều ký hiệu nhị phân đối xứng được kết hợp tuyến tính với nhau thông qua các hệ số trọng số cụ thể.

## Nguyên lý của điều chế xếp chồng

Điều chế xếp chồng tín hiệu là kỹ thuật điều chế phi song ánh, trong đó nhiều chuỗi dữ liệu được kết hợp tuyến tính thành các ký hiệu truyền, giúp tăng hiệu quả phổ nhưng có thể gây mơ hồ trong quá trình tách sóng khi sử dụng các trọng số bằng nhau. Mặc dù đặc tính này có thể làm giảm khả năng phân biệt tín hiệu, nó lại mang đến lợi ích về hiệu quả năng lượng và có thể cải thiện khoảng cách giữa các điểm chòm sao trong một số trường hợp.

## Tính chất của điều chế xếp chồng



Hình 1.6. Sơ đồ khối của bộ điều chế xếp chồng

Với SM trong một chiều tín hiệu, hiệu năng chỉ phụ thuộc vào cách phân bổ công suất hay chính là trọng số  $a_n$ . Hai kiểu phân bổ công suất sẽ được phân tích trong phần tiếp theo gồm:

- Phân bổ công suất khoảng cách bằng nhau
- Phân bổ công suất trọng số bằng nhau

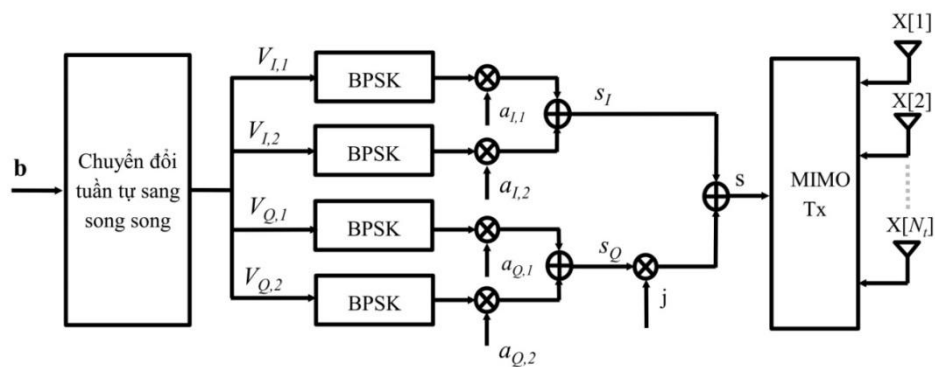
## Kết luận chương 1

Chương 1 trình bày nền tảng lý thuyết và bối cảnh ứng dụng của việc tối ưu hiệu năng trong các hệ thống MIMO dung lượng lớn, nhấn mạnh vai trò của ADC độ phân giải thấp, các kỹ thuật điều chế hiện đại và mã hóa kênh P-LDPC trong việc nâng cao hiệu quả sử dụng phổ, độ tin cậy và hiệu quả năng lượng cho các mạng không dây thế hệ mới.

## CHƯƠNG 2. PHÂN TÍCH VÀ ĐÁNH GIÁ HIỆU NĂNG CỦA ĐIỀU CHẾ XẾP CHỒNG M-QAM MÃ HÓA P-LDPC CHO HỆ THỐNG MIMO CỠ LỚN VỚI BỘ ADC ĐỘ PHÂN GIẢI THẤP

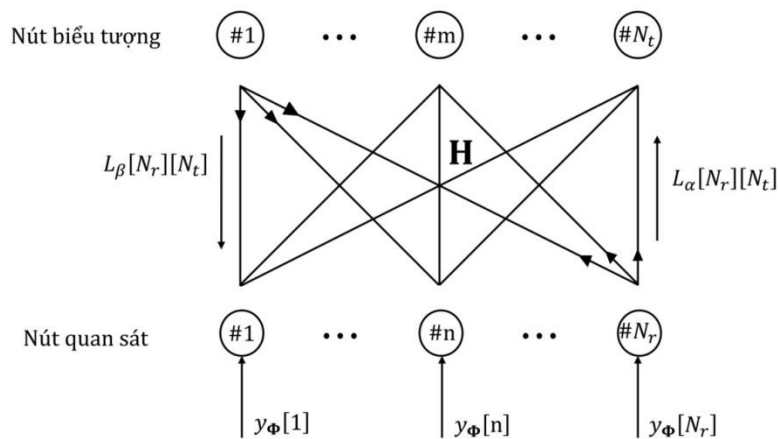
### Mô hình hệ thống không dây không mã hóa

Xét hệ thống truyền thông không dây không mã hóa sử dụng sơ đồ LS-MIMO với  $N_t$  ăng-ten phát và  $N_r$  ăng-ten thu trong đó áp dụng điều chế xếp chồng 16-QAM nhằm nâng cao hiệu quả băng thông (xem Hình 2.1).



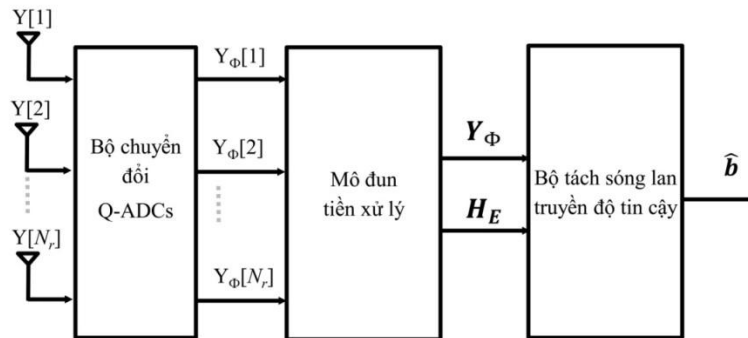
Hình 2.1. Sơ đồ khối của bộ phát trong hệ thống truyền thông MIMO không mã hóa với ADC có độ phân giải thấp

### Bộ tách sóng MIMO lan truyền độ tin cậy dựa trên đồ thị Tanner



Hình 2.2. Đồ thị Tanner cho quá trình tách sóng tín hiệu MIMO sử dụng thuật toán lan truyền độ tin cậy

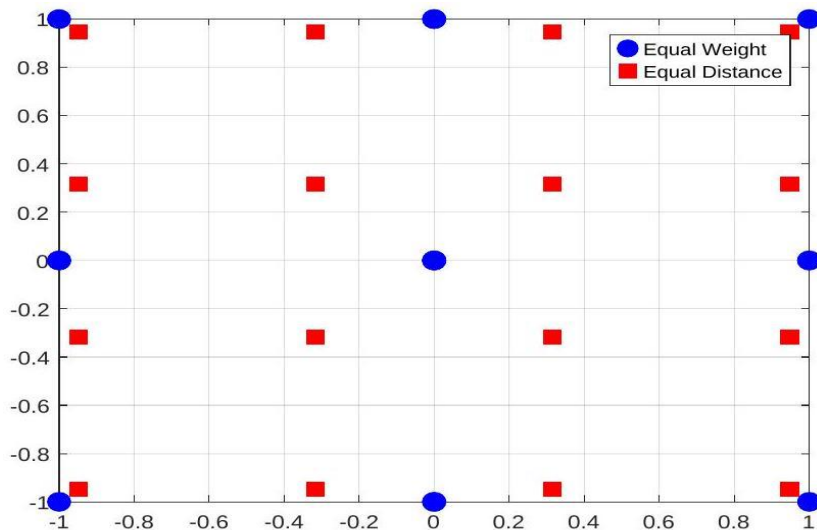
## Bộ tách sóng mô hình hệ thống MIMO 16-QAM không mã hóa



Hình 2.3. Bộ tách sóng lan truyền độ tin cậy

Trong mục này, luận án phát triển các biểu thức toán học cho phép chuyển đổi mô hình kênh của hệ thống điều chế 16-QAM sang một dạng biểu diễn tương đương dựa trên các ký hiệu BPSK.

### Kết quả mô phỏng



Hình 2.4. Khoảng cách bằng nhau (ED) so với trọng số bằng nhau (EW) của điều chế 16-QAM

Hình 2.4 minh họa một trường hợp đặc trưng trong đó các điểm lân cận của chòm sao điều chế được bố trí với khoảng cách bằng nhau, NCS gọi đây là sơ đồ điều chế ED. Đối

với sơ đồ điều chế EW, thay vì duy trì khoảng cách cố định giữa các điểm, mỗi bit được gán cùng một hệ số trọng số, dẫn tới cấu trúc chồng lớp đặc thù của tín hiệu.

Bảng 2.2 trình bày chi tiết tập hệ số xếp chồng tương ứng cho cả hai phương pháp điều chế, qua đó cho thấy sự khác biệt về mặt tổ chức tín hiệu dẫn đến các đặc tính giải điều chế và hiệu năng khác nhau trong hệ thống.

Bảng 2.1: Các hệ số xếp chồng cho điều chế 16-QAM

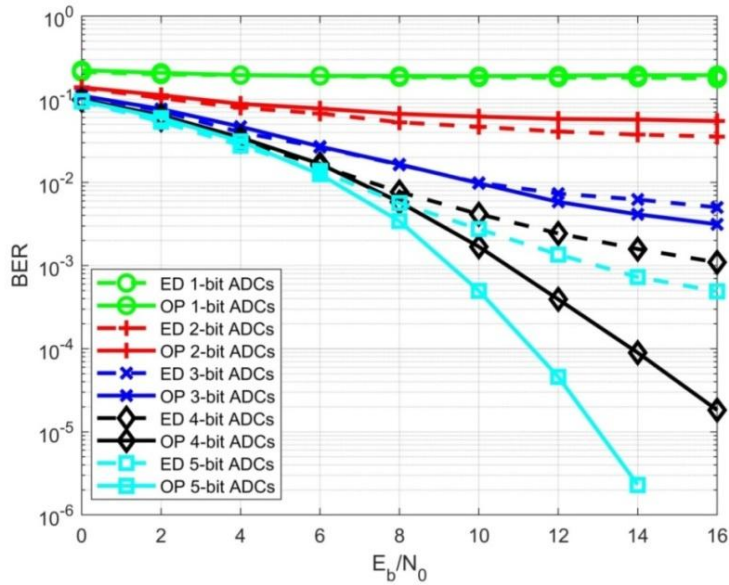
Sơ đồ điều chế	$a_1$	$a_2$
Điều chế ED	0.632	0.316
Điều chế EW	0.5	0.5

Do đó, ở trường hợp hệ thống không mã hóa luận án thực hiện mô phỏng với các trường hợp các hệ số trọng số điều chế xếp chồng ED  $a_1 = 0.629$  và  $a_2 = 0.311$  và hệ số trọng số tối ưu cho trường hợp điều chế xếp chồng không mã hóa 4-ASK được chọn như Bảng 2.3 ở dưới. Hệ số trọng số tối ưu cho điều chế xếp chồng không mã hóa 4-ASK là bộ số  $(a_1, a_2)$  thỏa mãn  $a_1^2 + a_2^2 = 0.5$  giúp xác suất lỗi đạt giá trị nhỏ nhất tại một cấu hình MIMO, SNR và mức ADC cụ thể. Giá trị tối ưu bộ  $(a_1, a_2)$  phụ thuộc vào độ phân giải ADC, tức mỗi mức ADC có một bộ hệ số tối ưu riêng.

Bảng 2.2: Hệ số trọng số tối ưu độ phân giải ADC điều chế xếp chồng không mã hóa

Độ phân giải	$a_1$	$a_2$
ADC 1 bit	0.175	0.684
ADC 2 bit	0.207	0.675
ADC 3 bit	0.224	0.948
ADC 4 bit	0.219	0.670
ADC 5 bit	0.170	0.686

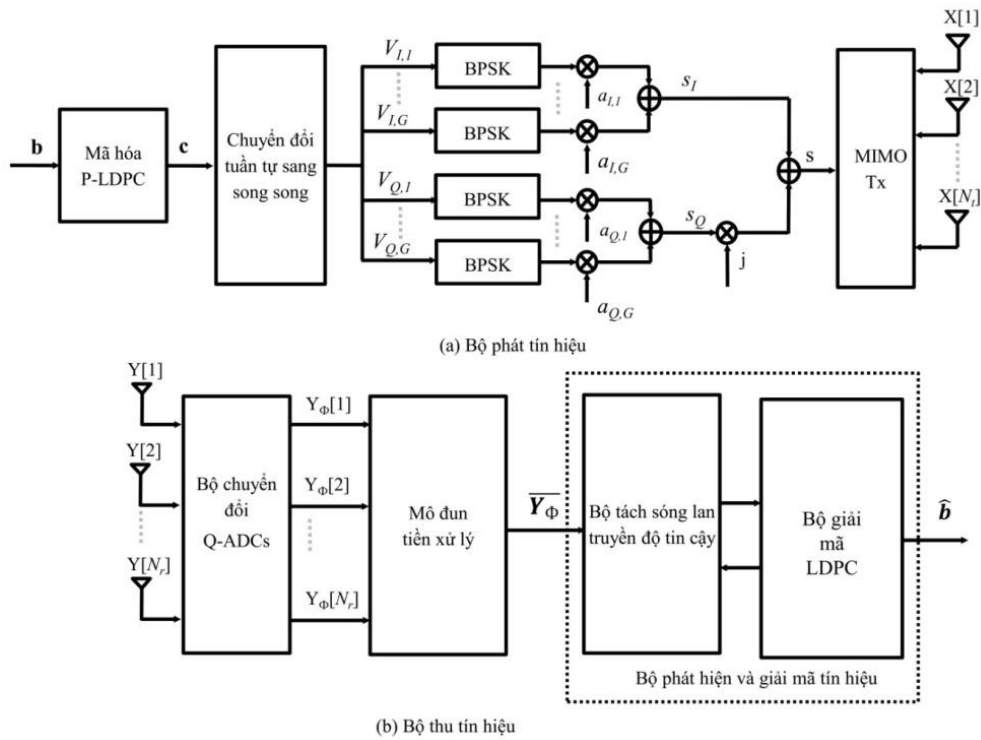
Hình 2.5 thể hiện hiệu năng tỉ lệ lỗi bit (BER) của hai kiến trúc phân bố công suất tín hiệu hệ số trọng số điều chế xếp chồng ED và hệ số trọng số tối ưu cho trường hợp điều chế xếp chồng không mã hóa 4-ASK.



Hình 2.5. Hiệu năng BER: Hệ thống LS-MIMO  $10 \times 60$ , 16-QAM không mã hóa

### Hệ thống MIMO cỡ lớn mã hóa P-LDPC

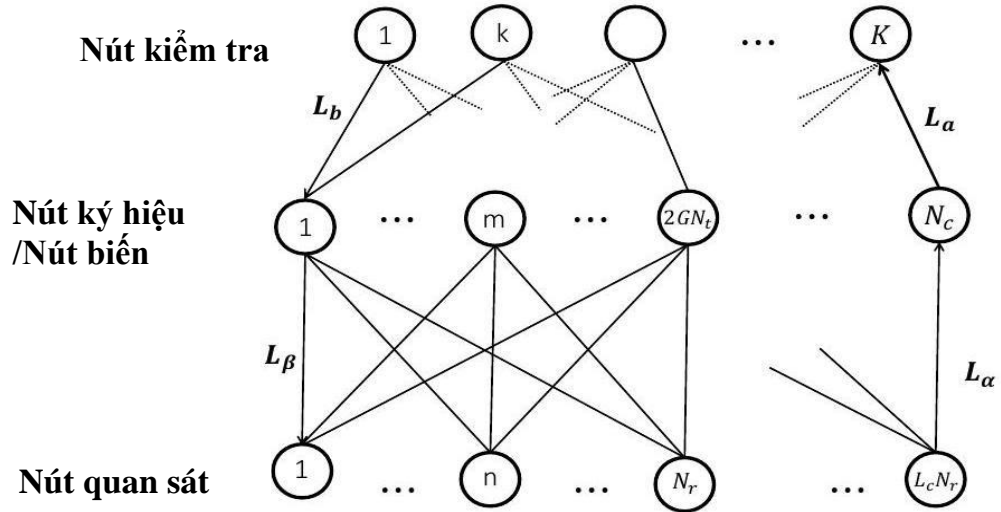
Mô hình hệ thống được sử dụng trong chương này được mô tả chi tiết trong Hình 2.8.



Hình 2.6. Sơ đồ khối của bộ thu phát trong hệ thống truyền thông MIMO mã hóa P-LDPC điều chế  $M$ -QAM với ADC có độ phân giải thấp.

## Tách sóng và giải mã kết hợp trong hệ thống MIMO

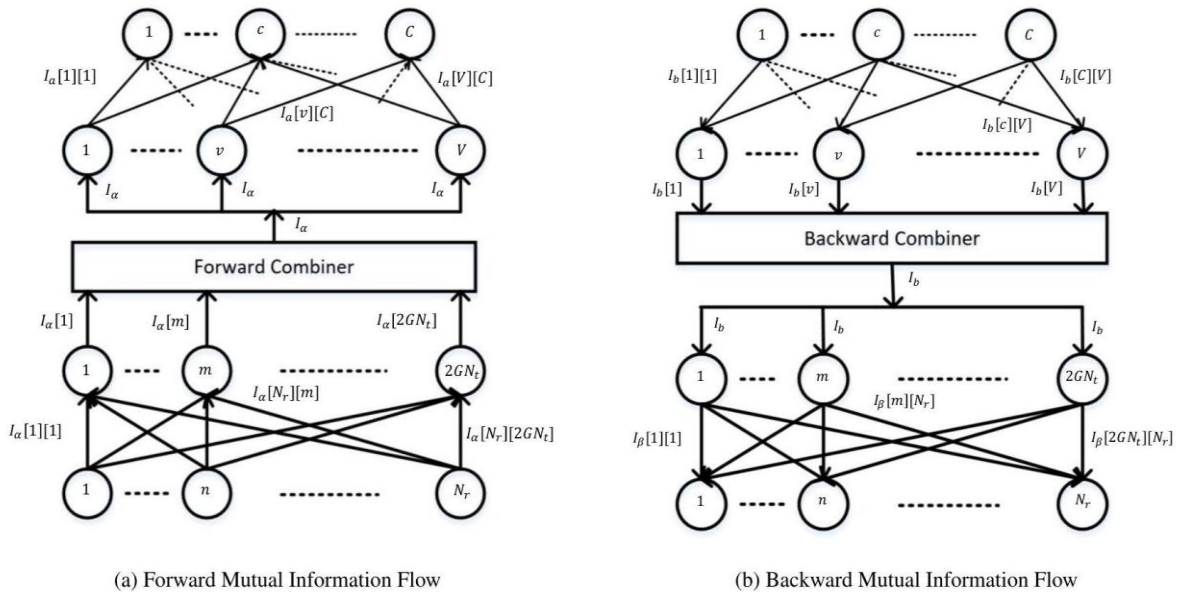
Để minh họa thuật toán kết hợp tách sóng và giải mã, luận án sử dụng đồ thị hai lớp, được hiển thị trong Hình 2.7.



Hình 2.7. Đồ thị hai lớp cho bộ kết hợp tách sóng và giải mã của máy thu

## Đồ thị hai lớp MIMO và Protograph LDPC kết hợp

Biểu đồ protograph kết hợp giữa MIMO và LDPC được minh họa trong Hình 2.8, thể hiện một phiên bản thu nhỏ của biểu đồ hai lớp được trình bày trong Hình 2.7.



(a) Forward Mutual Information Flow

(b) Backward Mutual Information Flow

Hình 2.8. Tách sóng tín hiệu MIMO kết hợp và bộ giải mã P-LDPC

## Đánh giá hiệu năng hệ thống truyền thông điều chế xếp chồng mã hóa P-LDPC

Trong bản tóm tắt này, luận án sử dụng thuật toán PEXIT được đề xuất để đánh giá hiệu năng của ba mã P-LDPC đã được thiết kế trước đó cho các kênh AWGN và kênh fading với các trường hợp điều chế bậc cao 16-QAM. Các protograph tương ứng được biểu diễn trong các ma trận (2.82).

Bảng 2.3: Ngưỡng giải mã lặp: Mã P-LDPC  $6 \times 3$  (2.82), MIMO  $10 \times 40$ ,  $10 \times 60$ ,  $10 \times 80$ , 16-QAM

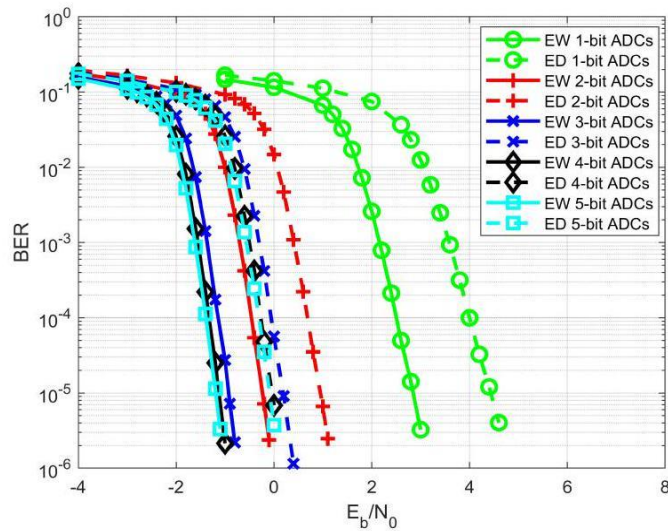
Độ phân giải ADC	Cấu hình MIMO	Điều chế EW (dB)	Điều chế ED (dB)	Độ lợi hiệu năng (dB)
ADC 1 bit	MIMO $10 \times 40$	0.26	1.46	1.2
	MIMO $10 \times 60$	-1.81	-0.69	1.12
	MIMO $10 \times 80$	-3.21	-2.12	1.09
ADC 2 bit	MIMO $10 \times 40$	-1.84	-0.82	1.02
	MIMO $10 \times 60$	-3.69	-2.83	1.01
	MIMO $10 \times 80$	-4.98	-3.97	1.01
ADC 3 bit	MIMO $10 \times 40$	-2.35	-1.37	0.98
	MIMO $10 \times 60$	-4.16	-3.17	0.99
	MIMO $10 \times 80$	-5.44	-4.44	1.00
ADC 4 bit	MIMO $10 \times 40$	-2.50	-1.52	0.98
	MIMO $10 \times 60$	-4.30	-3.31	0.99
	MIMO $10 \times 80$	-5.57	-4.58	0.99
ADC 5 bit	MIMO $10 \times 40$	-2.53	-1.55	0.98
	MIMO $10 \times 60$	-4.33	-3.34	0.99
	MIMO $10 \times 80$	-5.59	-4.61	0.98

Trong bước đầu, luận án tiến hành đánh giá hiệu năng của hai mã P-LDPC (2.82) và trong kịch bản mỗi ký hiệu điều chế mang bốn bit thông tin — hai bit cho thành phần đồng pha (I) và hai bit cho thành phần vuông pha (Q). Cấu trúc này tương ứng với sơ đồ điều chế 16-QAM thông thường, trong đó mỗi điểm chòm sao biểu thị tổ hợp của bốn bit dữ liệu.

$$\mathbf{B}_{6 \times 3} = \begin{bmatrix} 3 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 2 & 1 & 2 & 2 & 1 & 0 \\ 3 & 2 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.82)$$

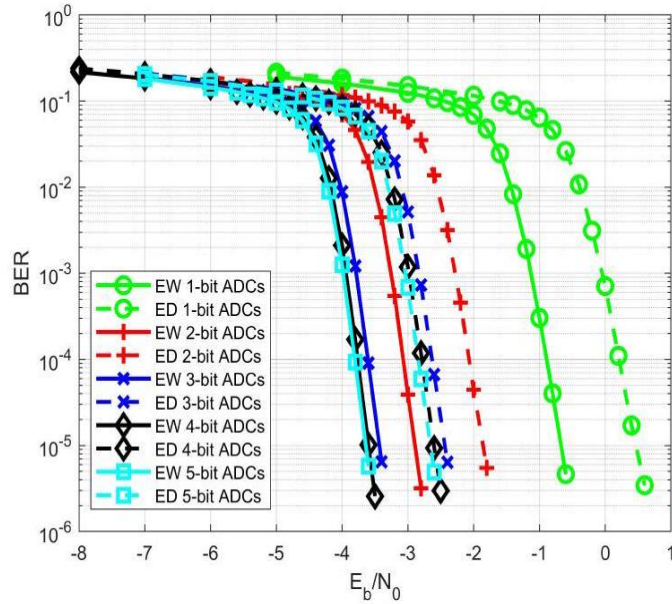
### Mô phỏng hệ thống

Trong phần này, luận án tiến hành phân tích và mô phỏng hiệu năng của các mã P-LDPC trong các cấu hình hệ thống LS-MIMO khác nhau, nhằm đánh giá tác động của điều chế xếp chồng tín hiệu và ADC độ phân giải thấp đến hiệu quả truyền thông. Bộ điều chế được sử dụng là 16-QAM, đại diện cho nhóm điều chế bậc cao thường áp dụng trong các hệ thống truyền thông thế hệ mới.

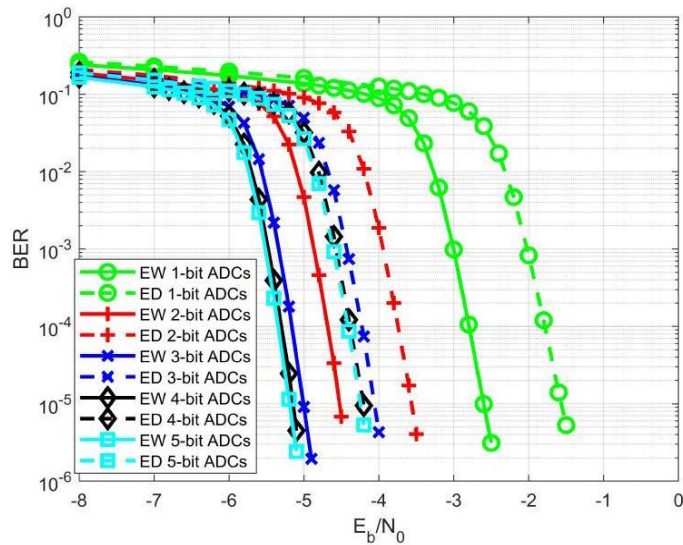


Hình 2.9. Hiệu năng BER: Mã P-LDPC  $6 \times 3$  (2.82), Độ dài mã 2400 bit, MIMO  $10 \times 40$ , 16-QAM, ADC 1-5 bit.

Kết quả mô phỏng cho thấy sơ đồ điều chế xếp chồng EW luôn đạt hiệu năng BER tốt hơn sơ đồ ED trong cấu hình MIMO  $10 \times 40$ , đặc biệt rõ rệt khi sử dụng ADC độ phân giải thấp, với mức cải thiện khoảng 1,5 dB ở ADC 1 bit. Khi độ phân giải ADC tăng lên 2 bit, hiệu năng hệ thống được cải thiện đáng kể và khoảng cách giữa hai sơ đồ thu hẹp lại, dù EW vẫn duy trì lợi thế. Với ADC từ 3 đến 5 bit, mức cải thiện hiệu năng trở nên không đáng kể và sự khác biệt giữa hai sơ đồ gần như biến mất, phù hợp chặt chẽ với các dự đoán ngưỡng giải mã lặp. Xu hướng này cũng được quan sát nhất quán trên các cấu hình MIMO thay đổi từ  $10 \times 40$  sang  $10 \times 60$  và  $10 \times 80$ , qua đó xác nhận độ tin cậy của phương pháp P-EXIT trong việc dự đoán và đánh giá hiệu năng hệ thống theo độ phân giải ADC.



Hình 2.4. Hiệu năng BER: Mã P-LDPC  $6 \times 3$  (2.82), Độ dài mã 2400 bit, MIMO  $10 \times 60$ , 16-QAM, ADC 1-5 bit.



Hình 2.5. Hiệu năng BER: Mã P-LDPC  $6 \times 3$  (2.82), Độ dài mã 2400 bit, MIMO  $10 \times 80$ , 16-QAM, ADC 1-5 bit.

## Kết luận chương 2

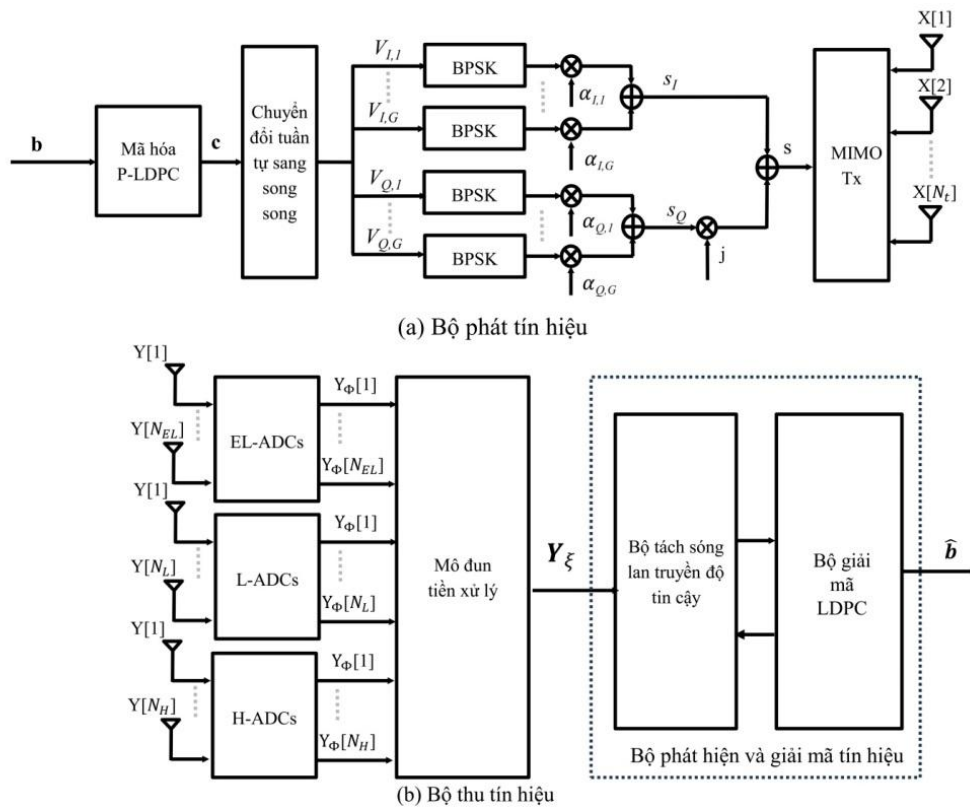
Chương này nghiên cứu và đánh giá hiệu năng của sơ đồ điều chế xếp chồng trong hệ thống MIMO cỡ lớn sử dụng mã P-LDPC và ADC độ phân giải thấp, với mục tiêu nâng cao hiệu quả truyền dẫn và giảm tiêu thụ năng lượng.

### CHƯƠNG 3. THUẬT TOÁN TÁCH SÓNG VÀ GIẢI MÃ P-LDPC CHO HỆ THỐNG MIMO CỠ LỚN VỚI BỘ ADC CÓ ĐỘ PHÂN GIẢI HỖN HỢP

#### Hệ thống MIMO cỡ lớn mã hóa

Luận án đề xuất kiến trúc Mixed-ADC kép và ba cấp cho hệ thống LS-MIMO, trong đó mảng ăng-ten thu được phân chia theo các mức độ phân giải khác nhau: 1 bit (cực thấp), 2 bit (thấp) và 5 bit (cao) nhằm cân bằng giữa hiệu năng và tiêu thụ năng lượng, đồng thời phát triển bộ thu dựa trên thuật toán truyền thông điệp kết hợp tách sóng đồ thị hai lớp và giải mã P-LDPC cho điều chế xếp chồng bậc cao.

#### Mô hình hệ thống



Hình 3.1. Sơ đồ khối của bộ thu-phát trong hệ thống thông tin MIMO được mã hóa bằng P-LDPC với bộ ADC độ phân giải hỗn hợp ba cấp

(a) Bộ phát sử dụng sơ đồ điều chế xếp chồng tín hiệu bậc cao nhằm tăng hiệu quả sử dụng băng thông.

(b) Bộ thu có ba nhóm bộ ADC độ phân giải thấp nhằm giảm tiêu thụ điện năng.

## Thuật toán PEXIT đề xuất cho các hệ thống thông tin LS-MIMO với kiến trúc bộ Mixed-ADC ba cấp

Thuật toán PEXIT được đề xuất được xây dựng bằng cách tích hợp các hàm thông tin tương hỗ từ các tiêu mục trước với các tham số của một cấu hình MIMO cụ thể, bao gồm: số lượng ăng-ten truyền và nhận  $N_t \times N_r$ , kích thước ma trận proto  $\mathbf{B}$  có kích thước  $N_Q \times N_P$ , tham số kênh  $E_b/N_0$ , và các mức phân giải của các bộ chuyển đổi Mixed-ADC ba cấp độ, cụ thể là  $Q_{EL}$ ,  $Q_L$ , và  $Q_H$ . Thuật toán PEXIT cho hệ thống LS-MIMO với kiến trúc Mixed-ADC ba cấp độ thu được được trình bày như sau:

### - **Bước 0: Khởi tạo**

- Lựa chọn kích thước ma trận cơ sở  $\mathbf{B}$
- Tính toán tỉ lệ mã:  $R_c = \frac{N_P - N_Q}{\sum_{np=1}^{N_P P_P}}$
- Tính toán công suất nhiễu  $N_0 = \frac{N_t}{R(E_b/N_0)}$
- Lấy các giá trị của  $\varphi_{EL}$ ,  $\varphi_L$  và  $\varphi_H$  từ Bảng 1 tương ứng với các mức độ phân giải  $Q_{EL}$ ,  $Q_L$  và  $Q_H$  của chúng.
- Thiết lập giá trị ban đầu cho  $I_{\beta_{EL}} = 0$ ,  $I_{\beta_L} = 0$  và  $I_{\beta_H} = 0$
- Tạo ra  $3 \times F$  ma trận hiện thực kênh LS-MIMO  $\{\mathbf{H}_{\xi,1}, \mathbf{H}_{\xi,2}, \dots, \mathbf{H}_{\xi,F}\}$ ,  $\xi \in \{EL, L, H\}$ , tuân theo phân bố Rayleigh.

### - **Bước 1: Tiền xử lý**

- Hình thành ma trận  $\mathbf{a}_I$  và  $\mathbf{a}_Q$
- Với mỗi  $f = 1, 2, \dots, F$  tính toán ma trận kênh tương ứng:  $H_{\xi,f}$

### - **Bước 2: Cập nhật thông tin từ nút giám sát tới nút biến**

- Cho  $f = 1, 2, \dots, F$
- Cho  $m = 1, 2, \dots, N_{\bar{\xi},t}$  và  $n_{\bar{\xi}} = 1, 2, \dots, N_{\bar{\xi}}$ ,  $\xi \in \{EL, L, H\}$
- Tính  $\sigma_{\beta_{\bar{\xi}}} = J^{-1}(I_{\beta_{\bar{\xi}}})$
- Khởi tạo  $\beta_{\xi,f}[m, n_{\xi}] \sim \mathcal{N}\left(\pm \frac{\sigma_{\beta_{\xi}}^2}{2}, \sigma_{\beta_{\xi}}^2\right)$
- Ước lượng xấp xỉ thông tin mềm cho  $\hat{V}_f[m, n_{\xi}] = \tanh\left(\frac{\beta_{\xi,f}[m, n_{\xi}]}{2}\right)$
- Tính giá trị trung bình của  $I_{\alpha,f}$  trên tất cả các kênh sửa lỗi

$$I_\alpha[m] = \frac{1}{F} \sum_{f=1}^F I_{\alpha,f}[m], \forall m = 1, 2, \dots, N_{\xi,t}$$

- Cho  $n_p = 1, 2, \dots, N_p$ , thực hiện tính  $I_\gamma[n_p]$  qua biểu thức

$$I_\alpha[n_p] = P_p \left( \frac{1}{N_{\xi,t}} \sum_{m=1}^{N_{\xi,t}} I_\alpha[m] \right)$$

Lưu ý rằng nếu nút biên thứ  $n_p$  là nút đục lỗ thì giá trị  $P_p = 0$  và ngược lại thì  $P_p = 1$ .

- **Bước 3: Cập nhật thông tin từ nút biên tới nút kiểm tra**

- Cho  $n_p = 1, 2, \dots, N_p$  và  $n_q = 1, 2, \dots, N_q$ , thực hiện tính giá trị  $I_a[n_p, n_q]$

- Nếu  $\mathbf{B}[n_p, n_q] \neq 0$ , thực hiện tính  $I_a[n_p, n_q]$  sử dụng biểu thức (3.38)

- Nếu  $\mathbf{B}[n_p, n_q] = 0$ , gán giá trị  $I_a[n_p, n_q] = 0$

- **Bước 4: Cập nhật thông tin từ nút kiểm tra tới nút biên**

- Cho  $n_q = 1, 2, \dots, N_q$  và  $n_p = 1, 2, \dots, N_p$  thực hiện tính giá trị  $I_b[n_q, n_p]$

- Nếu  $\mathbf{B}[n_q, n_p] \neq 0$ , thực hiện tính giá trị  $I_b[n_q, n_p]$  sử dụng biểu thức (3.40)

- Nếu  $\mathbf{B}[n_q, n_p] = 0$ , gán giá trị  $I_b[n_q, n_p] = 0$

- **Bước 5: Cập nhật thông tin từ nút ký hiệu tới nút giám sát**

- Cho  $f = 1, 2, \dots, F$

- Cho  $m = 1, 2, \dots, N_{\xi,t}$  và  $n_{EL} = 1, 2, \dots, N_{EL}$ , thực hiện tính giá trị  $I_{\beta_{EL,f}}[m, n_{EL}]$ ,  $I_{\beta_{L,f}}[m, n_L]$ ,  $I_{\beta_{H,f}}[m, n_H]$

- Cho  $m = 1, 2, \dots, N_{\xi,t}$  và  $n_{EL} = 1, 2, \dots, N_{EL}$ , thực hiện tính giá trị  $I_{\beta_L}[m, n_{EL}]$  sử dụng biểu thức:

$$I_{\beta_{EL}}[m, n_{EL}] = \frac{1}{F} \sum_{f=1}^F I_{\beta_{EL,f}}[m, n_{EL}]$$

- Tính giá trị  $I_{\beta_L}[m, n_L]$ ,  $I_{\beta_H}[m, n_H]$  tương tự

- **Bước 6: Tính thông tin tương hỗ APP-LLR**

- Cho  $n_p = 1, 2, \dots, N_p$ , thực hiện tính giá trị  $I_\Gamma[n_p]$  sử dụng biểu thức (3.52)

- **Bước 7: Kiểm tra giá trị  $I_\Gamma[n_p]$  và lặp lại Bước 2 – Bước 7 cho đến khi**

$$I_\Gamma[n_p] = 1, \forall n_p = 1, 2, \dots, N_p$$

Thuật toán PEXIT được đề xuất đạt đến trạng thái hội tụ khi giá trị  $E_b/N_0$  đã vượt qua ngưỡng nhất định. Do đó, ngưỡng  $(E_b/N_0)^*$  được định nghĩa là giá trị nhỏ nhất của  $E_b/N_0$  mà tại đó thông tin tương hỗ giữa các thông điệp APP-LLR và các bit mã hóa tương ứng hội tụ đến giá trị 1.

### Phân tích hiệu năng lý thuyết

Trong phần này, luận án sử dụng thuật toán Mixed-ADC LS-MIMO PEXIT được đề xuất ở phần trước để tính toán ngưỡng giải mã lặp của một số mã P-LDPC cụ thể: một mã được thiết kế cho kênh LS-MIMO. Các ma trận proto của các mã này được trình bày trong (3.47).

$$\mathbf{B}_{6 \times 3} = \begin{bmatrix} 3 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 2 & 1 & 2 & 2 & 1 & 0 \\ 3 & 2 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.47)$$

Bảng 3.1: So sánh hiệu năng BER độ phân giải của ADC: Code  $6 \times 3$  MIMO  $10 \times 40$ : Dual ADC ( $N_L = 35, N_H = 5$ ), Triple Mixed ADCs ( $N_{EL} = 25, N_L = 10, N_H = 5$ )

Độ phân giải	Điều chế ED (dB)	Điều chế EW (dB)	Độ lợi hiệu năng (dB)
ADC 1 bit đơn	1.34	0.15	1.19
ADC hỗn hợp kép	0.77	-0.34	1.11
ADC hỗn hợp 3 cấp	0.19	-0.88	1.07
ADC 5 bit đơn	-1.57	-2.54	0.97

Bảng 3.2: So sánh hiệu năng BER các độ phân giải của ADC: Code  $6 \times 3$  MIMO  $10 \times 60$ : Dual ADC ( $N_L = 40, N_H = 20$ ), Triple Mixed ADCs ( $N_{EL} = 40, N_L = 10, N_H = 10$ )

Độ phân giải	Điều chế ED (dB)	Điều chế EW (dB)	Độ lợi hiệu năng (dB)
ADC 1 bit đơn	-0.79	-1.91	1.12
ADC hỗn hợp kép	-1.39	-2.46	1.07
ADC hỗn hợp 3 cấp	-1.72	-2.77	1.05
ADC 5 bit đơn	-3.35	-4.34	0.99

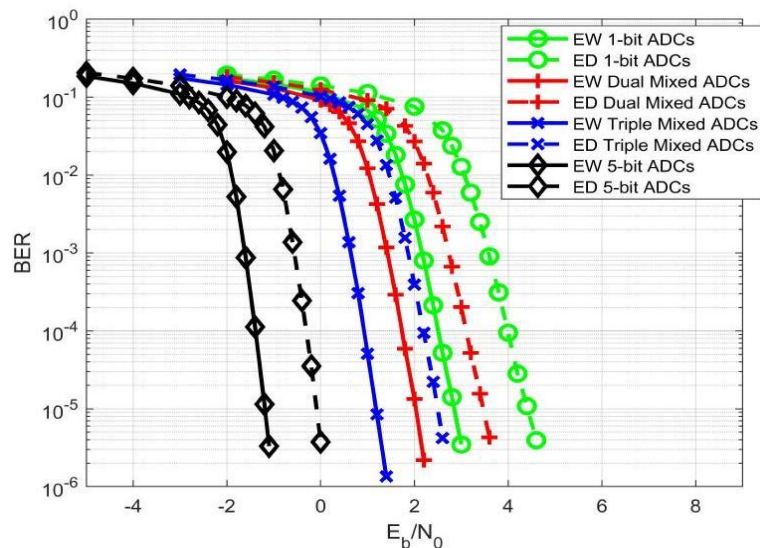
Bảng 3.3: So sánh hiệu năng BER các độ phân giải của ADC: Code  $6 \times 3$  MIMO  $10 \times 80$ : Dual ADC ( $N_L = 60, N_H = 20$ ), Triple Mixed ADCs ( $N_{EL} = 60, N_L = 10, N_H = 10$ )

Độ phân giải	Điều chế ED (dB)	Điều chế EW (dB)	Độ lợi hiệu năng (dB)
ADC 1 bit đơn	-2.22	-3.30	1.08
ADC hỗn hợp kép	-2.63	-3.69	1.06
ADC hỗn hợp 3 cấp	-2.87	-3.92	1.05
ADC 5 bit đơn	-4.62	-5.61	0.99

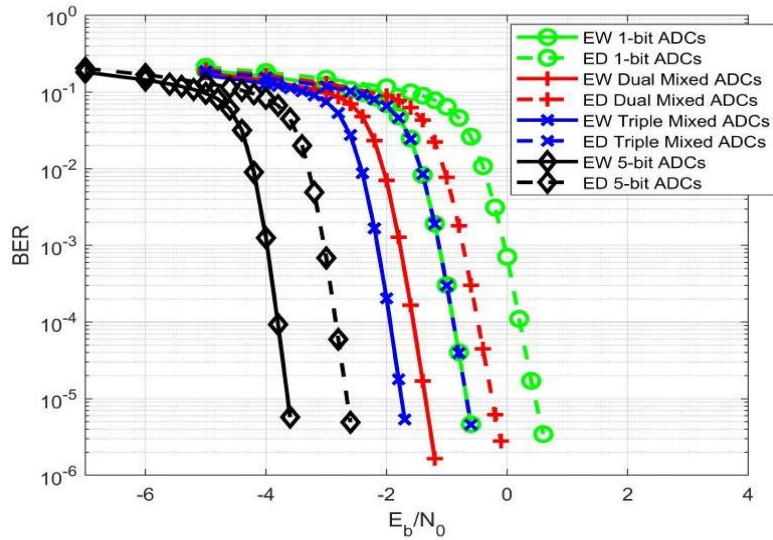
Trong bản tóm tắt này, NCS xét một hệ thống MIMO  $10 \times 40$ ,  $10 \times 60$ ,  $10 \times 80$  với cấu trúc mã  $6 \times 3$  và khảo sát bốn chế độ độ phân giải khác nhau. Bảng 3.1, 3.2, 3.3 nêu bật những lợi thế tương đối của các cấu hình này về ngưỡng giải mã, so sánh giữa hai phương pháp điều chế xếp chồng: ED và EW.

### Kết quả mô phỏng

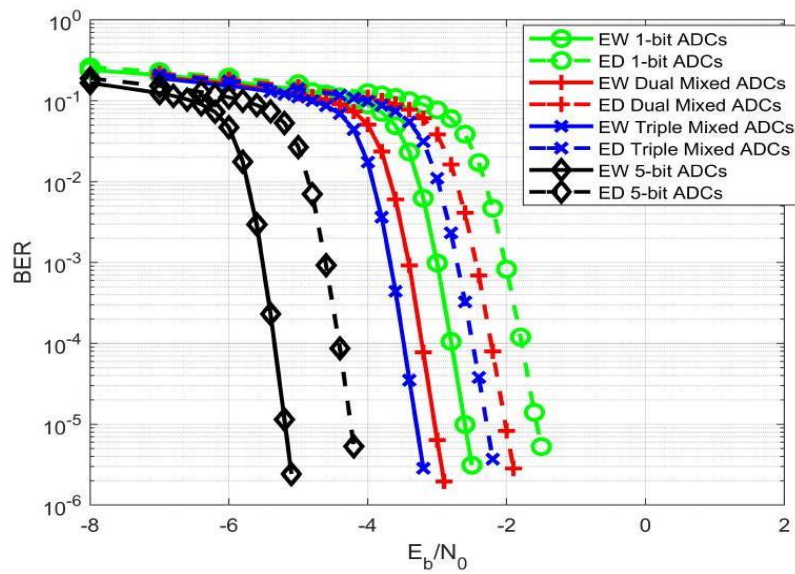
NCS thực hiện mô phỏng trên máy tính để thu được kết quả nhằm kiểm chứng các ngưỡng giải mã lý thuyết đã được báo cáo trong phần trước. Nhìn chung, cấu hình mô phỏng tương tự như phần trước, bao gồm ba cấu hình MIMO:  $10 \times 40$ ,  $10 \times 60$  và  $10 \times 80$ , cùng với hai mã P-LDPC đã được thiết kế từ trước.



Hình 3.2. Hiệu năng BER: Kích thước mã P-LDPC  $6 \times 3$  (3.47), Độ dài mã 2400 bits, MIMO  $10 \times 40$ , 16-QAM, 1-5 bit ADCs



Hình 3.3. Hiệu năng BER: Kích thước mã P-LDPC  $6 \times 3$  (3.47), Độ dài mã 2400 bits, MIMO  $10 \times 60$ , 16-QAM, 1-5 bit ADCs



Hình 3.4. Hiệu năng BER: Kích thước mã P-LDPC  $6 \times 3$  (3.47), Độ dài mã 2400 bits, MIMO  $10 \times 80$ , 16-QAM, 1-5 bit ADCs

### Kết luận chương 3

Chương này tập trung giải quyết bài toán tiết kiệm năng lượng cho bộ thu LS-MIMO bằng cách đề xuất kiến trúc mới kết hợp ADC độ phân giải hỗn hợp, điều chế xếp chồng và mã P-LDPC, cùng với bộ tách sóng dựa trên đồ thị hai lớp và bộ giải mã LDPC tùy chỉnh nhằm nâng cao hiệu năng trong điều kiện lượng tử hóa thô.

## KẾT LUẬN

Mục đích của luận án này là nghiên cứu việc tích hợp điều chế xếp chồng với mã hóa P-LDPC trong các hệ thống MIMO quy mô lớn với bộ chuyển đổi ADC có độ phân giải thấp và hỗn hợp.

### Những đóng góp chính

Những đóng góp chính trong luận án này gồm:

*Thứ nhất:* Luận án đề xuất mô hình tích hợp điều chế xếp chồng M-QAM với mã P-LDPC cho hệ thống MIMO cỡ lớn sử dụng ADC độ phân giải thấp và tiến hành đánh giá toàn diện hiệu năng trong điều kiện lượng tử hóa thô. Kết quả phân tích và mô phỏng cho thấy sơ đồ điều chế xếp chồng với trọng số bằng nhau đạt hiệu năng BER vượt trội so với sơ đồ khoảng cách đều, qua đó khẳng định tính hiệu quả của việc kết hợp điều chế xếp chồng và mã P-LDPC nhằm nâng cao độ tin cậy và hiệu quả truyền dẫn trong các hệ thống vô tuyến có ràng buộc phần cứng.

*Thứ hai:* Luận án đề xuất thuật toán P-EXIT cải tiến để phân tích và dự đoán ngưỡng giải mã cho hệ thống MIMO cỡ lớn sử dụng ADC độ phân giải hỗn hợp tại phía thu, qua đó cân bằng hiệu quả giữa tiêu thụ năng lượng và hiệu năng BER. Kết quả phân tích lý thuyết và mô phỏng trên nhiều cấu hình MIMO cho thấy thuật toán hoạt động ổn định, đồng thời xác nhận rằng kiến trúc ADC hỗn hợp mang lại hiệu năng vượt trội so với các cấu hình ADC đồng nhất, góp phần nâng cao hiệu quả tổng thể của hệ thống.

Mặc dù đạt được những kết quả tích cực, luận án vẫn còn một số hạn chế cần tiếp tục nghiên cứu, bao gồm việc tối ưu tỷ lệ phân bố giữa các ăng-ten sử dụng ADC độ phân giải cao và thấp, thiết kế mã P-LDPC phù hợp với cấu hình Mixed-ADC, cũng như xác định tỷ lệ tối ưu giữa số lượng ăng-ten phát và thu trong hệ thống MIMO cỡ lớn. Trên cơ sở đó, các hướng nghiên cứu tương lai được đề xuất tập trung vào tối ưu hóa đánh đổi giữa hiệu quả năng lượng và hiệu quả phổ, thiết kế mã P-LDPC thích ứng với nhiều mức lượng tử hóa ADC, và phân tích có hệ thống ảnh hưởng của cấu hình MIMO dưới điều kiện lượng tử hóa thô, qua đó mở ra các hướng phát triển tiềm năng cho các hệ thống truyền thông không dây thế hệ mới với ràng buộc phần cứng nghiêm ngặt.

## DANH MỤC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ ĐÃ ĐƯA VÀO LUẬN ÁN

- [CT1] H. T. Nguyen, **D. A. Hoang**, H. T. Bui, H. N. Dang and T. V. Nguyen, "Large-Scale MIMO Communications With Low-Resolution ADCs Using 16-ary QAM and Protograph LDPC Codes," *2022 IEEE Ninth International Conference on Communications and Electronics (ICCE), Nha Trang, Vietnam, 2022*, pp. 43-47, doi: 10.1109/ICCE55644.2022.9852075.
- [CT2] **D. A. Hoang**, T. V. Nguyen, T. L. Nhat and H. T. Nguyen, "Low-Complexity Large-Scale MIMO Detector with 16-Ary QAM Superposition Constellations," *2022 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC), Ha Noi, Vietnam, 2022*, pp. 194-199, doi: 10.1109/ATC55345.2022.9943015.
- [CT3] H. T. Nguyen, **D. A. Hoang**, H. D. Ngoc and T. Le Nhat, "On Design of Tanner-Graph Detector For Triple Mixed-ADC Large-Scale MIMO Systems," *2022 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC), Ha Noi, Vietnam, 2022*, pp. 1-6, doi: 10.1109/ATC55345.2022.9943014.
- [CT4] **D. A. Hoang**, H. T. Nguyen and T. N. Le, "Performance Analysis of Superposition M-ary QAM Modulation in Coded Protograph LDPC MIMO Communication Systems With Low-Resolution ADCs," *in IEEE Access, vol. 13*, pp. 107410-107428, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3581775.
- [CT5] **D. A. Hoang**, T. N. Le and H. T. Nguyen, "Protograph LDPC-Coded Superposition Modulation for MIMO Channels with Triple Mixed-ADC Architectures," *REV Journal on Electronics and Communications, Vol. 15, No. 4, Oct-Dec, 2025*, <http://dx.doi.org/10.21553/rev-jec.416>
- [CT6] T. Le Nhat and **D. A. Hoang**, "Performance Analysis of Coded MIMO Systems Using Superposition 64-Ary Constellation with Protograph LDPC and Low-Resolution ADCs," *2025 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC), Hanoi, Vietnam, 2025*, pp. 1-6, doi: 10.1109/ATC67618.2025.11268568.