

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



VŨ ĐỨC HIỆU

NGHIÊN CỨU GIẢI PHÁP MÃ HÓA P-LDPC NÂNG CAO HIỆU NĂNG
CỦA HỆ THỐNG MIMO CỠ LỚN

CHUYÊN NGÀNH: KỸ THUẬT VIỄN THÔNG

Mã số: 62.52.02.08

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

HÀ NỘI - 2021

Công trình được hoàn thành tại:

HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG

Người hướng dẫn khoa học:

1. TS. NGUYỄN VĂN THỦY

2. PGS.TS NGUYỄN HÒNG QUANG

Phản biện 1:

Phản biện 2:

Phản biện 3:

Luận án sẽ được bảo vệ trước hội đồng chấm luận án tại:

HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG

Vào hồi:....giờ....ngày....tháng....năm 2021

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

Lý do nghiên cứu

Với xu hướng phát triển của mạng viễn thông như hiện nay thì nhu cầu về tốc độ truyền dẫn sẽ không ngừng gia tăng để đáp ứng các dịch vụ thời gian thực và dịch vụ yêu cầu băng thông cao trong mạng vô tuyến di động.

Nếu tốc độ truyền dẫn tối đa của 4G là 100Mbps, thì người ta đang kỳ vọng tốc độ tối đa của 5G lên đến 20 Gb/s và lớn hơn 1 Tb/s đối với mạng 6G. Bên cạnh đó, trễ xử lý tín hiệu (latency) cũng đặt ra yêu cầu khắt khe hơn đối với mạng vô tuyến di động trong tương lai. Ví dụ như mạng 4G yêu cầu độ trễ xử lý 10 ms thì mạng 5G yêu cầu độ trễ xử lý giảm xuống còn 1 ms. Đặc biệt, mạng 6G yêu cầu độ trễ ở mức 10-100 μ s.

Những yêu cầu về tốc độ và độ trễ xử lý kéo theo sự thay đổi lớn ở giao diện vô tuyến của mạng không dây thế hệ mới. Nếu như công nghệ đa đầu vào đa đầu ra (MIMO) và mã sửa lỗi kênh Turbo được sử dụng trong mạng 4G thì hệ thống MIMO cỡ lớn (Massive/Large-Scale MIMO – với số ăng-ten lên đến hàng trăm) và mã LDPC/ Polar Codes được đề xuất cho mạng 5G. Đối với mạng 6G, công nghệ đa đầu vào đa đầu ra vẫn tiếp tục là một trong những công nghệ lõi và người ta đề xuất sử dụng hệ thống MIMO cực lớn (“super-massive MIMO) để có thể cung cấp tốc độ truyền dẫn lên đến Tb/s.

Những thay đổi mới về công nghệ vô tuyến như đã nói ở trên đòi hỏi phải có những nghiên cứu đề xuất những thuật toán mới cũng như để cải tiến các thuật toán xử lý tín hiệu hiện tại sao cho việc truyền dẫn trên kênh vô tuyến được hiệu quả - tiết kiệm năng lượng pin hoặc tăng dung lượng kênh. Tuy vậy, các nghiên cứu về việc kết hợp giữa mã Protograph LDPC với kênh MIMO cỡ lớn sử dụng bộ chuyển đổi ADC có độ phân giải thấp chưa được các nhà nghiên cứu trong nước và thế giới thực hiện. Vì vậy, NCS lựa chọn chủ đề này làm nghiên cứu trong luận án của mình.

Mục tiêu nghiên cứu

Những phân tích ở trên cho thấy hệ thống MIMO đóng một vai trò quan trọng trong hệ thống thông tin di động. Tuy nhiên thách thức chính đối với hệ thống MIMO là năng lượng tiêu thụ ở modul vô tuyến do sử dụng nhiều bộ chuyển đổi ADC có độ phân giải cao và độ phức tạp trong việc tách sóng và giải mã tín hiệu. Vì vậy mục tiêu nghiên cứu của luận án là nghiên cứu cải thiện hiệu năng của hệ thống MIMO cỡ lớn.

Nội dung nghiên cứu

Với mục tiêu nghiên cứu ở trên, phần nội dung nghiên cứu của Luận án tập trung vào các nội dung sau:

- Tìm giải pháp tách sóng tín hiệu MIMO cỡ lớn có độ phức tạp thấp và hoạt động của thuật toán hiệu quả khi kết hợp với mã Protograph LDPC. Việc lựa chọn mã Protograph LDPC trong luận án này vì đây là họ mã con của mã LDPC có hiệu năng tiệm cận với dung lượng của Shannon và độ phức tạp của việc thiết kế và tạo mã đơn giản hơn. Loại mã này đã được đề xuất sử dụng trong các hệ thống vô tuyến thực tế.
- Đề xuất thuật toán thiết kế mã kênh Protograph LDPC cho kênh MIMO cỡ lớn.

- Đề xuất công cụ đánh giá và phân tích hiệu năng của các mã sử dụng trong hệ thống MIMO cỡ lớn với bộ chuyển đổi tương tự số (ADC) có độ phân giải thấp.

Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

Luận án nghiên cứu mô hình kênh truyền dẫn MIMO cỡ lớn điểm – điểm sử dụng mô hình kênh thống kê (Kênh pha đỉnh Rayleigh) giúp cho việc xây dựng các biểu thức toán học được thuận lợi để từ đó có những phân tích lý thuyết chặt chẽ.

Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài nghiên cứu

Việc nghiên cứu mô hình truyền dẫn sử dụng các mã tiệm cận dung lượng kênh như mã Protograph LDPC cho kênh MIMO cỡ lớn với bộ chuyển đổi ADC có độ phân giải thấp chưa được nghiên cứu nhiều ở cả trong nước và thế giới. Vì vậy những đề xuất giải pháp cho việc tách sóng tín hiệu cũng như quy trình thiết kế mã và đánh giá hiệu năng của kênh truyền dẫn sẽ tạo nền tảng cơ bản cho việc nghiên cứu mô hình truyền dẫn phức tạp hơn trong mạng thông tin di động tế bào thực tế.

Ý nghĩa thực tiễn của nghiên cứu này là những quy trình thiết kế cũng như đánh giá hiệu năng sẽ giúp những nhà thiết kế tuyến truyền dẫn di động tìm ra mã Protograph LDPC và độ phân giải của bộ chuyển đổi ADC tối ưu với kênh truyền dẫn vô tuyến cụ thể.

Phương pháp nghiên cứu

- Thiết lập mô hình toán học: Để có được một giải pháp xử lý tín hiệu tổng quát, những nghiên cứu trong luận án sử dụng phương pháp mô hình hóa các thành phần trên tuyến truyền dẫn bằng các mô hình toán học thống kê. Cụ thể: Mô hình quá trình biến đổi hệ số/độ lợi kênh truyền bằng một biến ngẫu nhiên theo phân bố Rayleigh. Nhiều đầu vào tại máy thu do hệ số nhiệt của các linh kiện điện tử bằng nhiễu Gauss trắng cộng. Tổng nhiễu của các luồng tín hiệu được mô hình bằng nhiễu Gauss trắng cộng dựa trên định luật số lớn trong thống kê. Ảnh hưởng của quá trình lượng tử cũng được mô hình hóa bằng hệ số suy giảm tín hiệu và nhiễu cộng. Tất cả những mô hình toán học đó đã được áp dụng trong các nghiên cứu của những nhà khoa học trên thế giới khi nghiên cứu các giải pháp xử lý tín hiệu lớp vật lý của giao diện vô tuyến.

- Mô phỏng máy tính để kiểm nghiệm các kết quả phân tích toán học: Các mô phỏng máy tính được thực hiện để kiểm định lại những phân tích lý thuyết.

Cấu trúc luận án

Ngoài phần mở đầu và phần kết luận, kiến nghị, Luận án được chia thành 4 chương với bố cục như sau:

Chương 1 giới thiệu tổng quan về mô hình thông tin số, mô hình kênh MIMO và mã tiệm cận dung lượng kênh của Shannon Protograph LDPC. Chương 2 trình bày thuật toán tách sóng tín hiệu MIMO cỡ lớn dựa trên giản đồ Tanner và truyền lan độ tin cậy. Chương 3 trình bày quy trình thiết kế mã Protograph LDPC cho kênh MIMO cỡ lớn dùng giản đồ Tanner kép. Chương 4 trình bày quy trình đánh giá hiệu năng của hệ thống thông tin MIMO cỡ lớn với bộ chuyển đổi ADC có độ phân giải thấp. Phần kết luận tổng kết lại những đóng góp của luận án cũng như hướng phát triển tiếp theo của đề tài truyền dẫn MIMO cỡ lớn với bộ ADC có độ phân giải thấp.

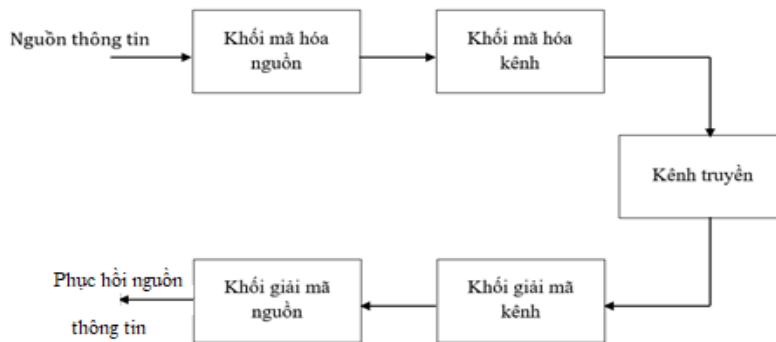
CHƯƠNG 1

TỔNG QUAN VỀ KÊNH TRUYỀN DẪN MIMO VÀ MÃ PROTOGRAPH LDPC

Tóm tắt : Nội dung của chương trình bày tổng quan về hệ thống thông tin số, kênh truyền dẫn MIMO và về mã Protograph LDPC. Phần cuối của chương 1 đề cập đến các vấn đề nghiên cứu trước đây trong và ngoài nước và đề xuất hướng nghiên cứu, phạm vi nghiên cứu và phương thức tiếp cận của luận án.

1.1. Hệ thống thông tin số

Phần này giới thiệu tổng quan về mô hình hệ thống thông tin kết nối điểm-điểm được trình bày ở Hình 1.1.



Hình 1.1. Mô hình truyền thông tin điểm-điểm.

Hệ thống bao gồm hai khối chức năng chính là khối mã hóa/giải mã nguồn, mã hóa/giải mã kênh.

Khối chức năng mã hóa nguồn dùng để loại bỏ những thông tin dư thừa trong nguồn tín hiệu càng nhiều càng tốt để tiết kiệm băng thông truyền dẫn của kênh truyền dẫn để tăng hiệu quả sử dụng kênh.

Ý tưởng chung của một bộ mã hóa kênh đó là bên cạnh việc truyền thông tin nguồn đi, chúng ta phải truyền thêm một số bit dư thừa giúp phía thu phát hiện hoặc/và sửa lỗi gây ra bởi nhiễu của kênh truyền dẫn.

1.2. Mã kiểm tra chẵn lẻ mật độ thấp (Low-Density Parity Check Codes LDPC)

Mã LDPC là một mã khối (block code) mà ma trận kiểm tra chẵn lẻ của nó có mật độ số 1 rất thấp (low-density). Mật độ số 1 thấp giúp giảm độ phức tạp của thuật toán giải mã vòng lặp (iterative decoding algorithm).

Để mã hóa thì các bit thông tin $\mathbf{b} = [b_{b_1}, b_{b_2}, \dots, b_{K_c}]$ được mã hóa bởi một ma trận sinh \mathbf{G}_c để tạo ra từ mã \mathbf{c} như sau:

$$\mathbf{c} = \mathbf{b} \mathbf{G}_c \quad (1.9)$$

Mối quan hệ giữa ma trận sinh G_c và ma trận kiểm tra chẵn lẻ H_c như sau:

$$G_c H_c^T = \mathbf{0} \quad (1.10)$$

Để giải mã LDPC dùng thuật toán tổng – tích. Đây là một thuật toán truyền thông tin quyết định mềm sử dụng giản đồ Tanner.

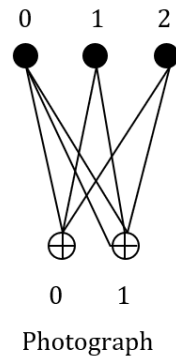
1.3. Mã Protograph LDPC

Phần này trình bày mã Protograph LDPC, mã Protograph LDPC là một tập con của họ mã LDPC thường được biểu diễn bằng một ma trận cơ sở hoặc bằng giản đồ nhỏ gọi là Protograph. Protograph có hai loại nút, đó là các nút kiểm tra và các nút biến. Các nút kiểm tra và các nút biến được nối với nhau tạo thành các cạnh trên giản đồ Protograph. Ưu điểm nổi bật của mã Protograph LDPC là chúng ta chỉ cần phải tối ưu Protograph với kích thước nhỏ sau đó chúng ta thực hiện sao chép và hoán vị để đạt được các từ mã có độ dài theo ý muốn.

Ví dụ, một mã protograph LDPC với tỷ lệ mã $R = \frac{1}{3}$ ($P = 3, S = 2$) có ma trận cơ sở như sau

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.23)$$

trong đó, số hàng của ma trận cơ sở là số nút kiểm tra của protograph và số cột là số nút biến (variable). Phần tử của ma trận $B(s, p)$ là số cạnh nối từ nút kiểm tra thứ s đến nút biến thứ p . Đối với protograph thì một nút kiểm tra có thể có nhiều cạnh nối đến cùng một nút biến - kết nối song song. Mã protograph LDPC được biểu diễn bằng giản đồ gọi là protograph như sau



Hình 1.7. Protograph của ma trận cơ sở (1.23).

Như trình bày ở Hình 1.7, protograph có hai loại nút, đó là các nút kiểm tra (vòng tròn với dấu cộng) và các nút biến (vòng tròn được phủ kín màu đen). Các nút kiểm tra và các nút biến được nối với nhau tạo thành các cạnh trên giản đồ protograph.

1.4. Hệ thống đa đầu vào đa đầu ra (Multiple-Input Multiple-Output)

Phần này trình bày mô hình hệ thống đa đầu vào đa đầu ra (MIMO). Nghĩa là phía phát chúng ta sử dụng nhiều ăng ten và phía thu cũng sử dụng nhiều ăng ten với ý tưởng là tăng dung lượng kênh bên cạnh việc tăng công suất phát để tăng tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu hoặc tăng hệ số sử dụng kênh thông qua việc tăng băng thông truyền dẫn.

Khi tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu đủ lớn, dung lượng kênh MIMO được ước tính như sau

$$C \approx \min(M, N) \log_2 \bar{\gamma}.$$

Nghĩa là, dung lượng kênh MIMO tăng tỷ lệ tuyến tính với số ăng-ten phát/thu. Và thực tế khi triển khai mạng 5G của Viettel cũng đã chứng minh điều này.

1.5. Các nghiên cứu liên quan đến đề tài luận án

Phần này giới thiệu về các vấn đề đang được nghiên cứu đối với tách sóng tín hiệu MIMO cỡ lớn. Các nghiên cứu về mã Protograph LDPC cũng như sử dụng các bộ chuyển đổi ADC có độ phân giải thấp trong kênh MIMO cỡ lớn.

Khảo sát cho thấy hầu hết các nghiên cứu đều dùng thuật toán thông thường (tức là thuật toán được thiết kế cho một số ít ăng ten Tx/Rx và dựa trên một số mô hình truyền thống) để cải thiện hiệu năng. Khi số lượng ăng ten tăng từ hàng chục đến hàng trăm đối với hệ thống MIMO cỡ lớn và thậm chí hàng nghìn đối với hệ thống MIMO cực lớn đề xuất trong 6G thì tách sóng tín hiệu MIMO là một trong những thách thức về kỹ thuật. Mã hóa kênh LDPC mặc dù đã được chứng minh là có khả năng sửa lỗi mạnh mẽ và cấu trúc bộ mã độ phức tạp thấp hơn mã Turbo và được đề xuất sử dụng trong 5G nhưng với độ dài từ mã lớn thì phần nào vẫn còn độ phức tạp nhất định. Ở giao diện vô tuyến cao tần của máy thu, có một số nghiên cứu sử dụng các bộ chuyển đổi ADC có độ phân giải thấp nhưng cũng chưa có nghiên cứu kết hợp với phương pháp tách sóng cho hệ thống MIMO cỡ lớn.

Nhận thấy các vấn đề cũng như các tồn tại trong các nghiên cứu trên, trong luận án này đề xuất các giải pháp mới nhằm nâng cao hiệu năng cho hệ thống MIMO cỡ lớn.

1.6. Kết luận chương

Chương này đã trình bày những kiến thức cơ bản về mô hình thông tin số điểm - điểm mà ở đó các mã tiệm cận giới hạn Shannon được trình bày. Cách tạo mã và giải mã LDPC trên giản đồ Tanner được trình bày cụ thể. Những kiến thức này sau đó được áp dụng cho họ mã Protograph LDPC sử dụng trong những chương tiếp theo của luận án. Những công trình nghiên cứu chính liên quan đến luận án bao gồm mã hóa kênh Protograph LDPC, tách sóng tín hiệu MIMO cỡ lớn và bộ chuyển đổi ADC có độ phân giải thấp được sử dụng ở khối cao tần của máy thu.

CHƯƠNG 2

TÁCH SÓNG TÍN HIỆU CHO KÊNH MIMO CỖ LỚN DỰA TRÊN THUẬT TOÁN LAN TRUYỀN TIN CẬY

Tóm tắt: Chương này nghiên cứu bộ tách sóng tín hiệu MIMO cỡ lớn sử dụng bộ ADC có độ phân giải thấp dựa trên kỹ thuật truyền lan độ tin cậy (Belief Propagation) trên trên giản đồ Tanner. Nghiên cứu bao gồm việc thiết lập các biểu thức toán học để tính các bản tin mềm để xây dựng bộ tách sóng vòng lặp (iterative detector). Kết quả nghiên cứu trong chương này sẽ là nền tảng để xây dựng nghiên cứu của Chương 3 và Chương 4 của luận án này.

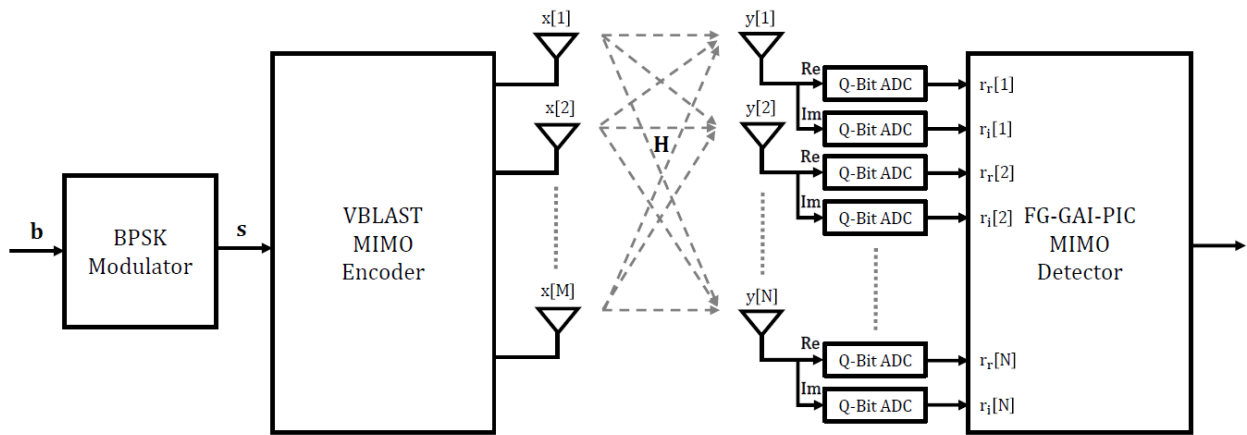
2.1 Mô hình kênh LS-MIMO với bộ chuyển đổi ADC có độ phân giải thấp ở phía thu

Phần này sử dụng mô hình hệ thống truyền dẫn LS-MIMO không sử dụng mã hóa kênh với M ăng ten phát và N ăng ten thu như Hình 2.1

Mô hình toán học của tín hiệu thu được viết theo công thức sau

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{w}$$

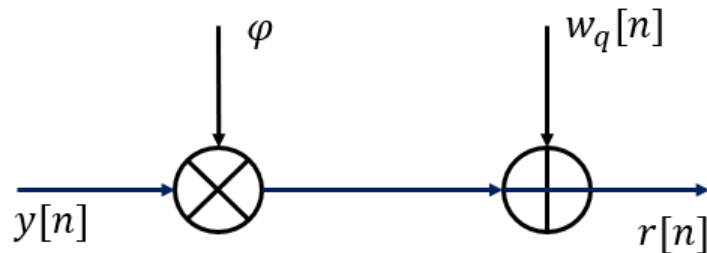
(2.1)



Hình 2.1. Mô hình kênh LS-MIMO với bộ chuyển đổi ADC có độ phân giải thấp.

Trong các hệ thống LS-MIMO, tín hiệu RF tại mỗi ăng ten thu được lượng tử hóa bằng hai bộ ADC có độ phân giải thấp (ở hai kênh, kênh đồng pha và kênh trực giao). Những nghiên cứu trong luận án này sử dụng bộ lượng tử vô hướng đồng nhất Q -bit với $Q = 2, 3, 4, 5$. Khi sử dụng bộ lượng tử ADC trên, luận án sử dụng mô hình nhiều lượng tử như mô tả ở Hình 2. 2 để biểu thị mối quan hệ giữa tín hiệu đầu ra với tín hiệu đầu vào bộ lượng tử.

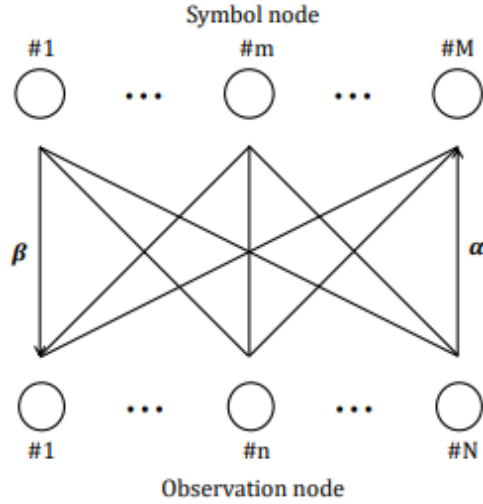
2.7)



Hình 2.2. Mô hình nhiều lượng tử cộng (AQNM).

2.2 Thuật toán tách sóng tín hiệu dựa trên thuật toán lan truyền độ tin cậy

Phần này trình bày thuật toán tách sóng tín hiệu MIMO cỡ lớn dựa trên giản đồ Tanner bằng phương pháp lan truyền độ tin cậy.



Hình 2.3. Giản đồ Tanner tách sóng tín hiệu LS-MIMO dựa trên BP

Hình 2.3 là giản đồ Tanner tách sóng tín hiệu LS-MIMO dựa trên việc truyền lan độ tin cậy giữa các nút qua các cạnh của giản đồ. Trong giản đồ này có hai loại nút: nút quan sát chính là các ăng ten thu (ON) và nút ký hiệu chính là ăng ten phát (SN). Mỗi nút ON sẽ có N kết nối đến M nút SN. Điều này là do đặc tính quảng bá của truyền sóng vô tuyến trên kênh LS-MIMO, đó là tín hiệu phát đi từ 1 ăng ten sẽ được thu nhận bởi nhiều ăng ten trong vùng phủ sóng của ăng ten đó. Tuy nhiên, cường độ kết nối bị thay đổi ngẫu nhiên theo thời gian và theo độ lợi kênh giữa nút ON và nút SN. Vì thế giản đồ tách sóng tín hiệu LS-MIMO được gọi là giản đồ kết nối đầy đủ.

Trong phần này, thuật toán của bộ tách sóng LS-MIMO dựa trên BP sử dụng giản đồ Tanner như trình bày ở Hình 2.3 được nghiên cứu. Trong Hình 2.3 các bản tin $\alpha[n][m]$ và $\beta[m][n]$ được truyền qua lại giữa nút ON thứ n và nút SN thứ m . Quá trình trao đổi thông tin tách sóng dựa trên phương pháp BP được trình bày cụ thể dưới đây.

2.2.1 Cập nhật thông tin tại nút quan sát ON

Tại nút quan sát ON thứ n , các ký hiệu truyền đi được tách sóng và thông tin thêm vào được truyền đến các nút ký hiệu SN.

Thông tin được truyền từ nút quan sát ON thứ n đến nút ký hiệu SN thứ m là hàm loga LLR và được tính bằng công thức sau:

$$\begin{aligned}\alpha[n][m] &= \ln \frac{\Pr(\hat{r}[n][m] | \mathbf{H}, x[m] = +1)}{\Pr(\hat{r}[n][m] | \mathbf{H}, x[m] = -1)} \\ &= \frac{4\varphi}{\Psi[n][m]} \Re(h^*[n][m] \hat{r}[n][m]).\end{aligned}\quad (2.17)$$

Quá trình ở nút quan sát ON thứ n được kết thúc bằng cách truyền $\alpha[n][m]$ tới nút ký hiệu SN thứ m .

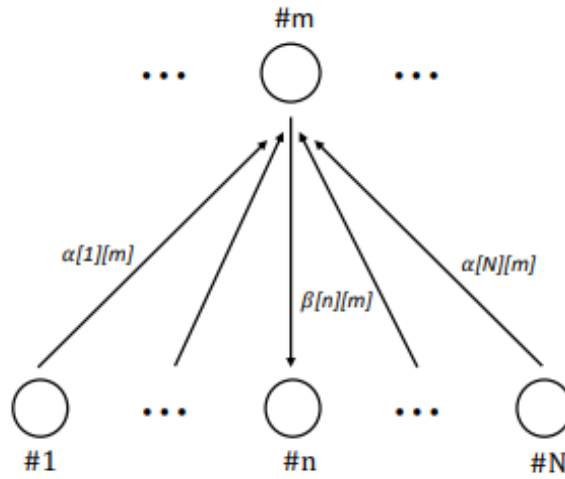
2.2.2 Cập nhật thông tin ở nút ký hiệu SN

Nhiệm vụ chính của nút ký hiệu SN thứ m là tính toán xác suất hậu nghiệm của ký hiệu $x[m]$ với các thông tin nhận được từ các nút quan sát ON. Xác suất hậu nghiệm LLR $\Gamma[m]$ của ký hiệu $x[m]$ có được bằng cách tính tổng tất cả các E-LLR nhận được từ các nút quan sát ON như sau

$$\Gamma[m] = \sum_{n \in N} \alpha[n][m]. \quad (2.18)$$

Bước tiếp theo là tính toán thông tin EI truyền từ nút ký hiệu SN thứ m sang nút quan sát ON thứ n có sử dụng xác suất hậu nghiệm LLR, $\Gamma[m]$. Thông tin bên ngoài bao gồm thông tin do nút ON cung cấp không bao gồm nút thứ n để tránh lặp lại thông tin như mô tả ở Hình 2.5. Bản tin từ nút ký hiệu SN thứ m sang nút quan sát ON thứ n được tính như sau

$$\beta[m][n] = \Gamma[m] - \alpha[n][m] \quad (2.19)$$



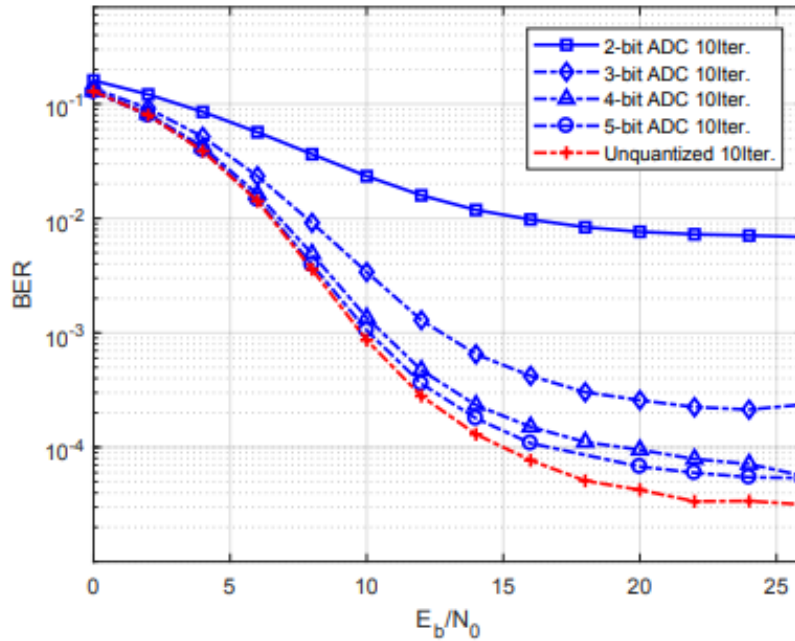
Hình 2.5. Cập nhật thông tin ở nút ký hiệu SN

Các bản tin được truyền lặp đi lặp lại giữa các nút SN và các nút ON. Sau mỗi lần lặp, độ tin cậy của ký hiệu được tăng lên. Vào cuối quá trình lặp ký hiệu $\hat{x}[m]$ được ước tính như sau

$$\hat{x}[m] = \text{sign}(\Gamma[m]) \quad (2.21)$$

2.3 Kết quả mô phỏng

Phần này trình bày kết quả mô phỏng bằng máy tính để đánh giá hiệu năng của bộ tách sóng tín hiệu dựa trên BP với một số cấu hình MIMO và bộ ADC có độ phân giải thấp khác nhau. Kết quả mô phỏng ở hình 2.7 cho chúng ta thấy khi tăng độ phân giải của bộ chuyển đổi ADC thì hiệu năng BER sẽ tăng lên. Và đặc biệt là chỉ cần 4 hoặc 5 bit ADC là có thể đạt hiệu năng của hệ thống với bộ ADC phân giải cao.



Hình 2.7. Hiệu năng BER: LS-MIMO 10×10 , 2-bit ADC đến 5-bit ADC, $\varepsilon = 0,2$.

Các kết quả mô phỏng khác trong chương 2 cho thấy hiệu năng của hệ thống được cải thiện khi số vòng lặp tăng lên (từ 1 đến 10). Bộ tách sóng dựa trên BP được đề xuất cho hiệu năng tốt hơn bộ tách sóng tuyến tính MMSE. So với hệ thống LS-MIMO độ phân giải cao, hệ thống LS-MIMO với bộ ADC 3-bit có hiệu năng thấp hơn nhiều. Đặc biệt ở $\text{BER} = 10^{-3}$, chênh lệch giữa hiệu năng của hệ thống với 3-bit ADC và hệ thống có độ phân giải cao là 2,5dB.

Kết quả nghiên cứu này cho thấy có thể sử dụng bộ ADC 4-bit hoặc bộ ADC 5-bit để giảm độ phức tạp và mức tiêu thụ năng lượng của quá trình xử lý tín hiệu RF mà chỉ chịu tổn thất hiệu năng không đáng kể.

2.4 Kết luận chương

Bộ tách sóng dựa trên BP cho các hệ thống LS-MIMO sử dụng bộ ADC độ phân giải thấp được nghiên cứu thông qua ứng dụng thuật toán truyền tin BP trên giản đồ Tanner. Sử dụng mô hình nhiễu lượng tử hóa cộng, mô hình toán học của việc cập nhật thông tin tại các nút quan sát và xây dựng bộ tách sóng dựa trên BP cho các hệ thống LS-MIMO sử dụng bộ ADC có độ phân giải thấp được đề xuất. Dựa vào nghiên cứu hiệu năng của bộ tách sóng BP, chúng ta có thể sử dụng bộ ADC 4-bit hoặc bộ ADC 5-bit trong các hệ thống LS-MIMO để cắt giảm mức tiêu thụ điện năng và chi phí phần cứng cho mô-đun RF mà chỉ giảm một phần nhỏ hiệu năng.

Kết quả nghiên cứu thuật toán giải mã PB dựa trên giản đồ Tanner là nền móng để nghiên cứu việc kết hợp giản đồ tách sóng tín hiệu LS-MIMO và giản đồ giải mã kênh thành một giản đồ 2 lớp để từ đó hình thành thuật toán tìm kiếm các mã Protograph LDPC có ý nghĩa quan trọng. Nội dung này sẽ được trình bày trong chương kế tiếp của đề án.

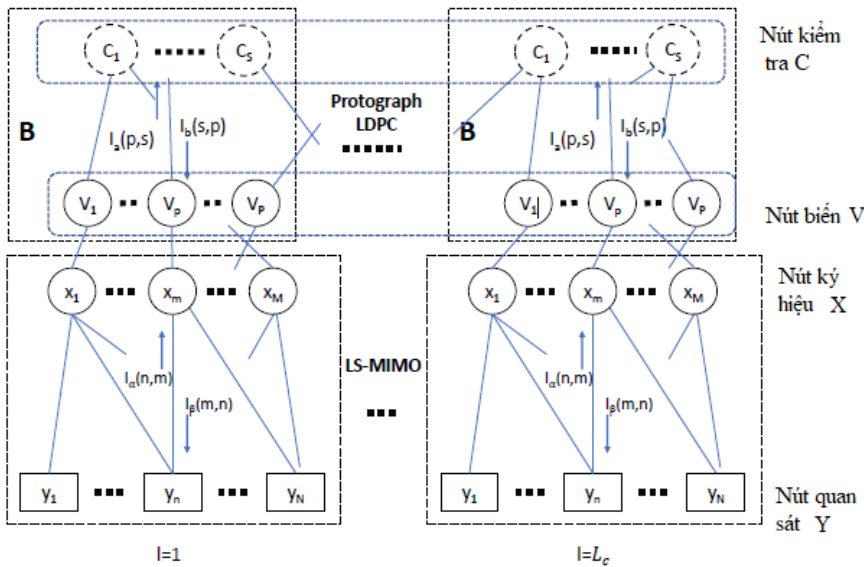
CHƯƠNG 3

THIẾT KẾ MÃ PROTOGRAPH LDPC CHO KÊNH LS-MIMO

Tóm tắt: Chương này nghiên cứu xây dựng thuật toán giải đồ truyền thông tin bên ngoài protograph (PEXIT) cho các hệ thống LS-MIMO, được gọi là thuật toán LS-MIMO-PEXIT. Thuật toán được xây dựng dựa trên các hàm thông tin tương hỗ của các bản tin được truyền trên giản đồ kép – giản đồ kết hợp tách sóng MIMO và giải mã LDPC. Dựa trên thuật toán LS-MIMO-PEXIT kết hợp với quy trình thiết kế 2 bước để tìm các mã Protograph LDPC mới tối ưu cho kênh LS-MIMO.

3.1. Thuật toán LS-MIMO-PEXIT

Ý tưởng đằng sau thuật toán LS-MIMO-PEXIT là phân tích các hàm thông tin tương hỗ của các bản tin truyền qua biểu đồ hai lớp. Thuật toán LS-MIMO-PEXIT có thể được sử dụng như một công cụ tốt để đánh giá xem một mã LDPC hoạt động tốt hơn mã khác hay không, bằng cách đánh giá các ngưỡng giải mã lặp của chúng được mô tả trong hình 3.2.



Hình 3.2. Biểu đồ hai lớp cho tách sóng tín hiệu LS-MIMO và giải mã Protograph LDPC.

Trong hình trên bốn loại thông tin truyền qua biểu đồ hai lớp là: $I_\alpha[n, m]$, $I_\alpha[p, s]$, $I_b[s, p]$, $I_\beta[m, n]$. Để tính toán những thông tin tương hỗ này, luận án sử dụng hàm $J(\cdot)$ và $J^{-1}(\cdot)$.

Thuật toán LS-MIMO-PEXIT với đầu vào là một ma trận cơ sở \mathbf{B} , một cấu hình MIMO cụ thể và số vòng lặp cực đại $Iter_{max}$ và đầu ra là ngưỡng giải mã. Thuật toán được đề xuất như sau.

Bước 0. Bắt đầu với một tỉ số tín hiệu trên nhiễu $\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_t$ và $I_\beta = 0$.

Bước 1. Tạo F ma trận kênh truyền của \mathbf{H} : $\mathbf{H}_f, f = 1, 2, \dots, F$. Tính $\sigma_\beta = J^{-1}(I_\beta)$ theo (3.8).

Tạo $\beta[m, n] \sim \mathcal{N}\left(\frac{\sigma_\beta^2}{2}, \sigma_\beta^2\right), \forall m = 1, 2, \dots, M, \forall n = 1, 2, \dots, N$. Sử dụng $\beta[n, m]$, ước lượng ký hiệu mềm $\hat{x}[n, m]$ được tính trong Công thức 4.4.

Bước 2. Với một ma trận kênh truyền cho trước $\mathbf{H}_f, f = 1, 2, \dots, F$, tính $I_{\alpha, f}[n, m]$

$$I_{\alpha, f}[n, m] = J(\sigma_{\alpha[n, m], f}), \quad (3.9)$$

với $\sigma_{\alpha[n, m], f} = \sqrt{\frac{|h_f[n, m]|^2}{\Psi_f[n, m]}}$ ($\Psi_f[n, m]$ từ Công thức 3.6. $I_{\alpha}[n, m]$ là trung bình của Q phiên bản kênh truyền, $I_{\alpha}[n, m] = \frac{1}{F} \sum_{f=1}^F I_{\alpha, f}[n, m]$).

Bước 3. Tính $I_{\alpha}[p, s]$

$$I_{\alpha}[p, s] = J\left(\sqrt{\sigma_{\alpha[p]}^2 + \sigma_{b[p]}^2}\right), \quad (3.10)$$

trong đó $\sigma_{b[p]}^2 = \sum_{r \in \mathcal{N}_c(p) \setminus s} \mathbf{B}[r, p][J^{-1}(I_b[r, p])]^2$, $\sigma_{\alpha[p]}^2 = \sum_{n \in \mathcal{N}_o(p)} [J^{-1}(I_{\alpha}[n, p])]^2$ trong đó $\mathcal{N}_c(p)$ là tập các nút kiểm tra kết nối với nút biến thứ p ; $\mathcal{N}_o(p)$ là tập các nút quan sát kết nối với nút thứ p . $\mathbf{B}[r, p]$ là phần tử thứ $[r, p]$ của ma trận nhỏ \mathbf{B} .

Bước 4. Tính $I_b[s, p]$

$$I_b[s, p] = J\left(\sqrt{\sum_{r \in \mathcal{N}_v(s) \setminus p} \mathbf{B}[s, r][J^{-1}(1 - I_{\alpha}[r, s])]^2}\right). \quad (3.11)$$

trong đó $\mathcal{N}_v(s)$ là tập các nút kết nối tới nút kiểm tra thứ s .

Bước 5. Tính $I_{\beta}[m, n]$

$$I_{\beta}[m, n] = J\left(\sqrt{\sigma_{\alpha[m]}^2 + \sigma_{b[m]}^2}\right), \quad (3.12)$$

với $\sigma_{b[m]}^2 = \sum_{r \in \mathcal{N}_c(m)} \mathbf{B}[r, m][J^{-1}(I_b[r, m])]^2$ và $\sigma_{\alpha[m]}^2 = \sum_{n \in \mathcal{N}_o(m) \setminus n} [J^{-1}(I_{\alpha}[n, m])]^2$.

Bước 6. Tính tổng thông tin tương hỗ từ hai lớp kết nối với nhau tại nút biến thứ p , $I_{APP}[p]$

$$I_{APP}[p] = J\left(\sqrt{\sigma_{\alpha[p]}^2 + \sigma_{b[p]}^2}\right), \quad (3.13)$$

với $\sigma_{b[p]}^2 = \sum_{r \in \mathcal{N}_c(p)} \mathbf{B}[r, p][J^{-1}(I_b[r, p])]^2$ và $\sigma_{\alpha[p]}^2 = \sum_{n \in \mathcal{N}_o(p)} [J^{-1}(I_{\alpha}[n, p])]^2$.

Bước 7. Lặp lại các bước từ 1 đến 6 cho đến số lần lặp cực đại hoặc thỏa điều kiện dừng $I_{APP}[p] = 1, \forall p = 1, 2, \dots, P$. Ngưỡng giải mã lặp là tỉ số $\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_t$ cực tiểu thỏa $I_{APP}[p] = 1, \forall p = 1, 2, \dots, P$, với một số lần lặp giải mã cực đại cho trước.

Thuật toán LS-MIMO-PEXIT ở trên sẽ được sử dụng để tính các ngưỡng giải mã lặp, $\eta(\mathbf{B}, M, N, Iter_{max})$, trong bài toán tối ưu ma trận cỡ nhỏ trong phần sau. Lưu ý rằng ngưỡng giải mã lặp càng thấp, hiệu năng mã càng tốt vì ngưỡng giải mã lặp được xác định là chất lượng kênh truyền tối thiểu, chất lượng này hỗ trợ giải mã lặp độ tin cậy của các mã LDPC lớn tiệm cận được xây dựng từ ma trận nhỏ với một số lượng lần lặp giải mã tối đa nhất định qua đồ thị chung.

3.2. Thiết kế mã Protograph LDPC cho kênh LS-MIMO

Thiết kế mã Protograph LDPC liên quan đến việc tìm kiếm ma trận kích cỡ nhỏ \mathbf{B} có ngưỡng giải mã thấp nhất trong khi duy trì đặc tính tăng khoảng cách tối thiểu tuyến tính. Do đó, thiết kế mã Protograph LDPC có thể được công thức hóa như một bài toán tối ưu hóa như sau

$$\begin{aligned} & \min_{\mathbf{B} \in \mathcal{B}_{Z^+}} \eta(\mathbf{B}, N, M, \text{Iter}_{max}) \\ \text{s. t. } & f_c(\mathbf{B}) \leq 0 \quad \text{for } c = 1, 2, \dots, Co, \end{aligned} \quad (3.14)$$

trong đó \mathcal{B}_{Z^+} biểu thị một tập hợp tất cả các ma trận có các phần tử không âm. Đầu ra của hàm tối ưu, $\eta(\mathbf{B}, M, N, \text{Iter}_{max})$, là giá trị ngưỡng giải mã thấp. Hơn nữa, hàm tối ưu đạt được bằng cách áp dụng thuật toán LS-MIMO-PEXIT với tập hợp các ràng buộc theo hướng dẫn thiết kế mã Protograph LDPC.

Trong nghiên cứu này, luận án sử dụng ma trận \mathbf{B} gồm 3 hàng và 6 cột, dẫn đến tỷ lệ mã 1/2.

$$\mathbf{B}_{\frac{1}{2}} = \left(\begin{array}{cccccc} e_{1,1} & e_{1,2} & e_{1,3} & e_{1,4} & 0 & 1 \\ e_{2,1} & e_{2,2} & e_{2,3} & e_{2,4} & 1 & 0 \\ e_{3,1} & e_{3,2} & e_{3,3} & e_{3,4} & 1 & 0 \end{array} \right)_{3 \times 6}, \quad (3.15)$$

Hai cột cuối cùng được chọn trước theo hướng dẫn thiết kế về số lượng của các nút biến bậc một và các nút biến bậc 2.

Để thiết kế các mã Protograph LDPC mới có tỷ lệ mã hóa mã hóa cao hơn, ví dụ $\frac{2}{3}, \frac{3}{4}, \frac{4}{5}$, một kỹ thuật mở rộng được sử dụng để giảm không gian tìm kiếm khả thi ngay cả khi kích thước của ma trận cơ sở tăng lên. Cụ thể, cấu trúc của ma trận cơ sở cho các tỷ lệ mã hóa cao, $R = \frac{n+1}{n+2}, \forall n = 1, 2, \dots$ có cấu trúc sau:

$$\mathbf{B}_{\frac{n+1}{n+2}} = \left(\begin{array}{ccc|c} e_{1,1} & e_{1,2} & e_{1,3} & \mathbf{B}_{\frac{n}{n+1}} \\ e_{2,1} & e_{2,2} & e_{2,3} & \\ e_{3,1} & e_{3,2} & e_{3,3} & \end{array} \right)_{3 \times (6+3n)}, \quad (3.17)$$

và các ràng buộc tương ứng của chúng cho bài toán tối ưu.

3.3. Hiệu năng các mã Protograph LDPC đề xuất cho các kênh LS-MIMO

Trong phần này kịch bản nghiên cứu là tìm kiếm mã protograph LDPC cho kênh MIMO cỡ lớn với $\text{Iter}_{max} = 20$ và $M = 10, N = 10$ (tức là cấu hình LS-MIMO 10×10) trong luận án cũng nghiên cứu với $\text{Iter}_{max} = 50$. Các ma trận cơ sở tối ưu cho tỷ lệ mã hóa 1/2, 2/3, 3/4 được trình bày ở dưới đây

$$\mathbf{B}_{\frac{1}{2}}^{20iter} = \left(\begin{array}{cccccc} 3 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 2 & 1 & 2 & 2 & 1 & 0 \\ 3 & 2 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{array} \right)_{3 \times 6}, \quad (3.19)$$

$$\mathbf{B}_{\frac{2}{3}}^{20iter} = \left(\begin{array}{ccc|c} 3 & 0 & 0 & \mathbf{B}_{\frac{1}{2}}^{20iter} \\ 2 & 3 & 0 & \\ 3 & 0 & 2 & \end{array} \right)_{3 \times 9}, \quad (3.20)$$

$$\mathbf{B}_{3/4}^{20iter} = \left(\begin{array}{ccc|c} 3 & 0 & 0 & \mathbf{B}_{2/3}^{20iter} \\ 2 & 2 & 2 & \\ 1 & 1 & 1 & \end{array} \right)_{3 \times 12}, \quad (3.21)$$

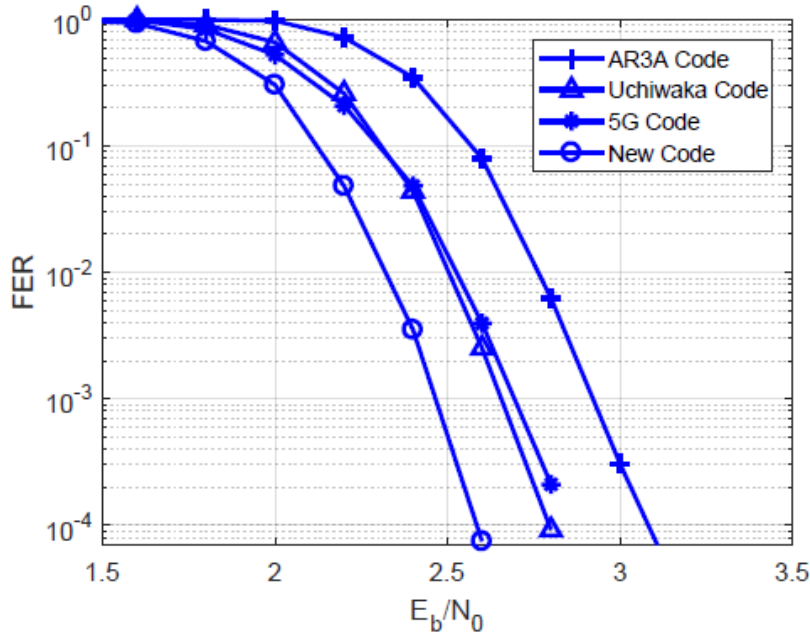
Nghiên cứu này chọn hai mã Protograph LDPC thiết kế trước đó cho kênh AWGN để so sánh với mã mới thiết kế trong chương này. Đó là mã AR3A (mã đục lỗ) và mã Uchiwaka (mã không đục lỗ).

Bảng 3.3 trình bày các ngưỡng giải mã lặp của mã Protograph LDPC được đề xuất và mã tham chiếu cho cấu hình LS-MIMO 40×40 , 40×100 và 100×100 . Dựa trên dữ liệu đưa ra trong Bảng 3.3 và mã Protograph LDPC được đề xuất cũng hoạt động tốt hơn các họ mã khác trong tất cả các cấu hình LS-MIMO và trong cả hai trường hợp ràng buộc lặp (tức là $Iter_{max} = 20$ lần lặp và $Iter_{max} = 50$ lần lặp).

Bảng 3.3. Ngưỡng giải mã (E_b/N_o dB), 20 lần lặp) cho các cấu hình LS-MIMO khác nhau.

LS-MIMO	Tỷ lệ mã	Mã mới	Mã Uchikawa	Mã AR3A
40×40	$R = 1/2$	1,705	1,832	1,992
40×40	$R = 2/3$	2,322	2,423	2,488
40×40	$R = 3/4$	2,783	2,877	2,908
40×100	$R = 1/2$	-2,511	-2,413	-2,109
40×100	$R = 2/3$	-1,959	-1,905	-1,704
40×100	$R = 3/4$	-1,499	-1,467	-1,313
100×100	$R = 1/2$	1,823	1,951	2,081
100×100	$R = 2/3$	2,364	2,466	2,512
100×100	$R = 3/4$	2,781	2,878	2,892

Để xác minh lại kết quả tính toán ở trên, nghiên cứu đã thực hiện mô phỏng bằng máy tính. Kết quả mô phỏng cho cấu hình LS-MIMO 100×100 ở hình 3.7 và các hình kết quả mô phỏng trong chương 3 đã xác minh kết quả phân tích.



Hình 3.7. Hiệu năng FER: tốc độ mã hóa $R = 1/2$, độ dài khối thông tin 2400 bit, 20 lần lặp, 100×100 LS-MIMO.

Đặc biệt, các mã Protograph LDPC được đề xuất đạt được độ lợi mã hóa **0,2 dB** so với mã Uchikawa và độ lợi mã hóa **0,4 dB** so với Mã AR3A tại $\mathbf{FER} = 10^{-4}$ (gần giống như độ lợi mã hóa của cấu hình MIMO 10×10). Quan sát này có nghĩa là hiệu năng của các mã Protograph LDPC được đề xuất không thay đổi đáng kể khi cấu hình MIMO thay đổi.

3.4. Kết luận chương

Trong nghiên cứu trong chương này đã đề xuất thuật toán LS-MIMO-PEXIT để không chỉ đánh giá hiệu năng của mã Protograph LDPC có sẵn mà còn dùng để thiết kế mã Protograph LDPC mới cho các kênh LS-MIMO. Kết quả phân tích lý thuyết và mô phỏng đã chứng minh tính hữu dụng của thuật toán đề xuất. Các mã Protograph LDPC mới mang lại độ lợi mã hóa từ 0,2 dB đến 0,4 dB so với các Protograph LDPC đã thiết kế cho kênh AWGN. Độ lợi mã hóa là đáng kể, đặc biệt là đối với hệ thống truyền thông không dây tốc độ cao, nơi tốc độ dữ liệu lên đến Gbps và nguồn điện của pin hoạt động thiết bị bị giới hạn nghiêm ngặt.

CHƯƠNG 4

PHÂN TÍCH HIỆU NĂNG CỦA HỆ THỐNG LS-MIMO VỚI BỘ ADC CÓ ĐỘ PHÂN GIẢI THẤP

Tóm tắt: Mục đích của nghiên cứu này là đưa ra một thuật toán thống nhất để phân tích tác động của các bộ ADC có độ phân giải thấp lên hiệu năng của mã Protograph LDPC trong các hệ thống LS-MIMO thực tế. Lý do là tất cả các công cụ phân tích trước đây để đánh giá mã Protograph LDPC đều không tính đến ảnh hưởng của nhiễu lượng tử hóa của các bộ ADC có độ phân giải thấp và thực tế là nhiễu lượng tử hóa phụ thuộc vào độ lợi kênh pha đỉnh.

Để mô tả thuật toán tách sóng và giải mã kết hợp, chúng ta sử dụng biểu đồ hai lớp kết hợp tách sóng MIMO và giải mã P-LDPC như Hình 4.4.

4.1. Mô hình kênh thông tin LS-MIMO với bộ ADC có độ phân giải thấp

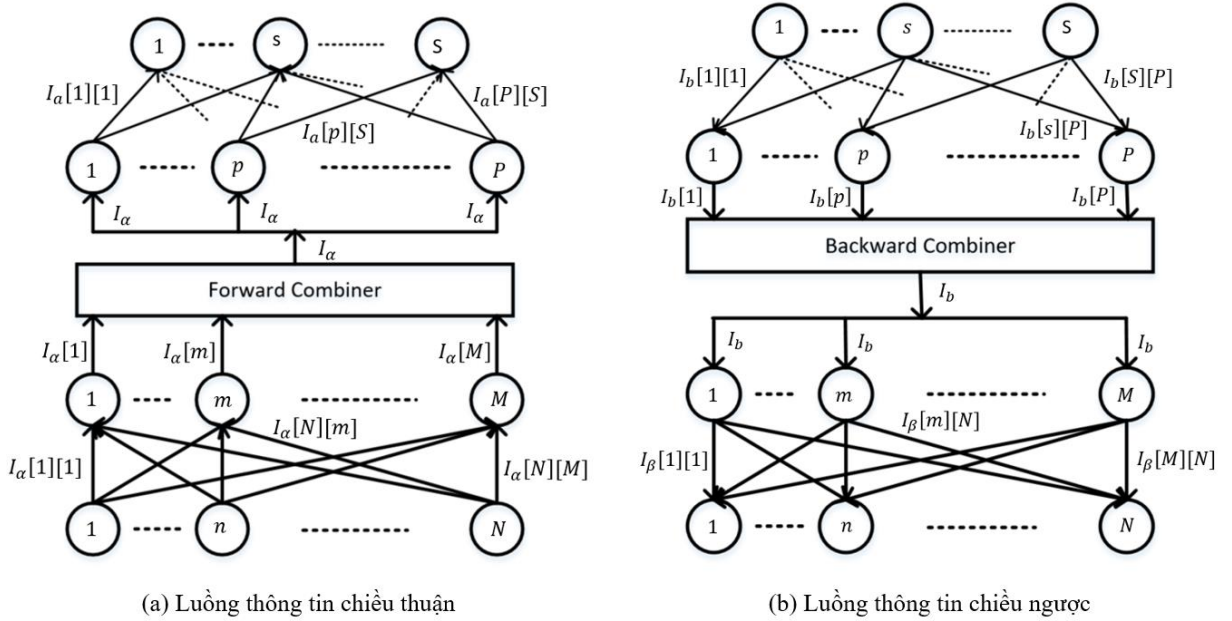
Mô hình kênh sử dụng trong chương này cũng tương tự như mô hình kênh sử dụng trong chương 2 chỉ khác là có sử dụng bộ mã hóa kênh P-LDPC.

4.2. MIMO-LDPC Protograph liên hợp

Protograph MIMO-LDPC kết hợp được mô tả trong Hình 4.4. Để thuận tiện cho việc phân tích luồng thông tin bên dưới, chúng ta tách các nút biên và các nút ký hiệu thành hai thực thể và chúng được liên kết bởi một bộ kết hợp chuyển tiếp cho luồng thông tin chuyển tiếp và bộ kết hợp ngược lại cho luồng thông tin ngược tương ứng.

Phần giản đồ MIMO của MIMO-LDPC Protograph kết hợp có N nút quan sát, M nút ký hiệu và các cạnh $M \times N$. Phần giản đồ LDPC của Protograph MIMO-LDPC kết hợp có P nút biến, S nút kiểm tra và một tập hợp các cạnh kết nối các nút biến và kiểm tra với nhau. Kết nối cạnh được xác định bằng ma trận cơ sở B có kích thước $S \times P$. Phần tử $B[s,p]$ cho biết số lượng các cạnh song song kết nối nút kiểm tra thứ s với nút biến thứ p .

Trong thuật toán tách sóng và giải mã kết hợp, có năm loại thông tin tương hỗ chính được truyền qua biểu đồ như sau: $I_\alpha[n, m]$, $I_\alpha[p, s]$, $I_b[s, p]$, $I_\beta[m, n]$, $I_\Gamma[p]$.



Hình. 4.4. Protograph MIMO-LDPC liên hợp.

4.2 Thuật toán PEXIT đề xuất

Thuật toán PEXIT được đề xuất có được bằng cách áp dụng các hàm thông tin tương hỗ ở phần trên với các tham số của cấu hình MIMO đã cho, $M \times N$, và kích thước của ma trận cơ sở B , $S \times P$, và tham số kênh $\frac{E_b}{N_0}$ và độ phân giải của ADC, Q . Thuật toán LS-MIMOPEXIT được mô tả dưới đây:

Bước 0: Khởi tạo

- Tính tỷ lệ mã $R = \frac{P-S}{\sum_{p=1}^P P_p}$.
- Tính $N_0 = \frac{M}{R \left(\frac{E_b}{N_0} \right)}$.
- Tính $\varphi = 1 - 3 \times 2^{-2Q}$.
- Thiết lập $I_\beta = 0$.
- Tạo ma trận thực hiện kênh F LS-MIMO $\mathbf{H1}; \mathbf{H2}; \dots; \mathbf{HF}$.

Bước 1: Cập nhật nút quan sát và nút biến

- Cho $f = 1, 2, \dots, F$.
- Cho $m = 1, 2, \dots, M$ and $n = 1, 2, \dots, N$.
- * Tính $\sigma_\beta = J^{-1}(I_\beta)$.
- * Tạo $\beta_f[m, n] \sim \mathcal{N}\left(\pm \frac{\sigma_\beta^2}{2}, \sigma_\beta^2\right)$.
- * Ước lượng thông tin mềm $\hat{x}_f[m, n] = \tanh\left(\frac{\beta_f[m, n]}{2}\right)$.
- * Tính $\Psi_f[n, m]$

$$\Psi_f[n, m] = \varphi^2 \sum_{\substack{t=1, \\ t \neq m}}^M |h_f[n, t]|^2 (1 - |\hat{x}_f[t, n]|^2) + \varphi^2 N_0 + \varphi(1 - \varphi) \left(\sum_{m=1}^M |h_f[n, m]|^2 + N_0 \right)$$

- Cho $m = 1, 2, \dots, M$.

- * Tính $I_{\alpha, f}[m]$

$$I_{\alpha, f}[m] = J \left(\sqrt{\sum_{n=1}^N \frac{8\varphi^2 |h_f[n, m]|^2}{\Psi_f[n, m]}} \right)$$

- Tính trung bình của $I_{\alpha, f}$ trên tất cả các phiên bản kênh truyền

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

- Cho $p = 1, 2, \dots, P$, tính $I_\alpha[p]$

$$I_\alpha[p] = P_p \left(\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M I_\alpha[m] \right).$$

Lưu ý rằng nếu nút biến p bị hỏng, thì $P_p = 0$.

Bước 2: Cập nhật nút biến đến nút kiểm tra

- Cho $p = 1, 2, \dots, P$ và $s = 1, 2, \dots, S$, tính $I_\alpha[p, s]$
- nếu $\mathbf{B}[p, s] \neq 0$

$$I_\alpha[p, s] = J \left(\sqrt{\sum_{t \in \mathcal{N}_c(p) \setminus s} \mathbf{B}[t, p] [J^{-1}(I_b[t, p])]^2 + \sigma_\alpha^2[p]} \right)$$

Với

$$\sigma_\alpha[p] = J^{-1}(I_\alpha[p]).$$

- Nếu $\mathbf{B}[p, s] = 0, I_\alpha[p, s] = 0$.

Bước 3: Cập nhật nút kiểm tra đến biến

- Cho $s = 1, 2, \dots, S$ và $p = 1, 2, \dots, P$
- nếu $\mathbf{B}[p, s] \neq 0$

$$I_b[s, p] = 1 - J \left(\sqrt{\sum_{t \in \mathcal{N}_b(s) \setminus p} \mathbf{B}[q, t] [J^{-1}(1 - I_\alpha[t, q])]^2} \right)$$

- Nếu $\mathbf{B}[p, s] = 0$, thì $I_b[s, p] = 0$.

Bước 4: Cập nhật nút ký hiệu đến nút quan sát

- Cho $f = 1, 2, \dots, F$.
- Cho $m = 1, 2, \dots, M$ và $n = 1, 2, \dots, N$.

$$I_{\beta, f}[m, n] = J \left(\sqrt{\sigma_{\alpha_f^*}^2[m] + \sigma_b^2} \right)$$

Với

$$\sigma_{\alpha_f^*}^2[m] = \sum_{t \in \mathcal{N}_o(m) \setminus n} \frac{8\varphi^2 |h_f[t, m]|^2}{\Psi_f[t, m]}$$

Và

$$\sigma_b = J^{-1}(I_b) = J^{-1} \left(\frac{\sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^S I_b[s, p]}{\sum_{p=1}^P P[p]} \right)$$

- Cho $m = 1, 2, \dots, M$ và $n = 1, 2, \dots, N$

$$I_\beta[n, m] = \frac{1}{F} \sum_{f=1}^F I_{\beta, f}[n, m]$$

Bước 5: Tính thông tin tương hỗ APP-LLR

- Cho $p = 1, 2, \dots, P$

$$I_{\Gamma}[p] = J \left(\sqrt{\sigma_{\alpha}^2[p] + \sum_{s=1}^S \mathbf{B}[s, p] [J^{-1}(I_b[s, p])]^2} \right)$$

Với

$$\sigma_{\alpha}[p] = J^{-1}(I_{\alpha}[p])$$

Bước 6: Lặp lại bước 1 – Bước 6 cho đến khi $I_{\Gamma}[p] = 1, \forall p = 1, 2, \dots, P$.

Thuật toán PEXIT được đề xuất hội tụ khi $\frac{E_b}{N_0}$ được chọn vượt quá ngưỡng. Do đó, ngưỡng $\frac{E_b}{N_0}$ là giá trị thấp nhất mà thông tin tương hỗ giữa các thông tin APP-LLR và các bit từ mã tương ứng hội tụ đến 1. Như có thể thấy, thuật toán PEXIT được đề xuất cho các bộ ADC có độ phân giải thấp khác nhau từ thuật toán PEXIT thông thường trong tất cả các bước, ngoại trừ Bước 3. Cụ thể, tác động của các bộ ADC có độ phân giải thấp được tính đến (trong bước 1 và 4) để tính toán các hàm thông tin tương hỗ. Trong phần sau, chúng tôi khai thác thuật toán PEXIT được đề xuất để phân tích hiệu năng của các hệ thống truyền thông LS-MIMO với các ADC có độ phân giải thấp.

4.3. Phân tích hiệu năng của các mã protograph LDPC phổ biến

Phần này sử dụng thuật toán PEXIT được đề xuất trong Phần 4.2 để phân tích hiệu năng của các mã Protograph LDPC có sẵn cho các hệ thống LS-MIMO. Cụ thể, bốn mã Protograph LDPC có ma trận cơ sở được đưa ra trong (4.36) - (4.39) được lựa chọn.

$$\mathbf{B}_{AR3A} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 2 & 1 & 1 \end{pmatrix}_{3 \times 5} \quad (4.36)$$

$$\mathbf{B}_{NND} = \begin{pmatrix} 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 3 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 2 & 2 & 1 & 2 & 1 \\ 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \end{pmatrix}_{4 \times 7} \quad (4.37)$$

$$\mathbf{B}_{UCHI} = \begin{pmatrix} 3 & 3 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 3 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 3 & 2 & 1 & 0 & 0 & 2 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 2 & 2 & 2 & 0 & 2 & 1 \end{pmatrix}_{4 \times 8} \quad (4.38)$$

$$\mathbf{B}_{NTH} = \begin{pmatrix} 3 & 3 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 3 & 2 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 3 & 1 & 0 & 1 & 2 & 1 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & 2 & 2 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}_{4 \times 8} \quad (4.39)$$

Trong nghiên cứu này, độ phân giải của ADC được giới hạn từ 2-bit đến 5-bit. Sử dụng thuật toán PEXIT được đề xuất ở trên tính các ngưỡng giải mã lặp cho bốn mã được chọn với các độ phân giải ADC và cấu hình LS-MIMO khác nhau. Cụ thể, Bảng 4.1 trình bày kết quả phân tích cho các kênh LS-MIMO 10×10 . Nghiên cứu này sử dụng một số lượng nhỏ các lần lặp phù hợp cho các hệ thống có độ trễ thấp và độ phức tạp thấp. Kết quả với số lần lặp cao hơn cũng được báo cáo trong luận án.

Bảng 4.1. Ngưỡng giải mã lặp: MIMO 10×10 , 10 lần lặp, tỷ lệ mã là $1/2$.

	Mã NND	Mã AR3A	Mã UCHI	Mã NTH
2-bit ADC	4,83	4,03	3,62	3,41
3-bit ADC	4,11	3,40	3,04	2,86
4-bit ADC	3,95	3,26	2,90	2,74
5-bit ADC	3,91	3,22	2,87	2,70
Unquantized	3,91	3,22	2,86	2,70

Kết quả ngưỡng giải mã lặp cho thấy mã NND có hiệu năng kém hơn mã AR3A trong tất cả các trường hợp thử nghiệm của độ phân giải ADC. Lưu ý rằng ngưỡng giải mã lặp là SNR kênh tối thiểu được yêu cầu sao cho bộ giải mã giải mã tín hiệu nhiễu với lỗi nhỏ tùy ý. Do đó, ngưỡng giải mã lặp càng thấp, mã Protograph LDPC càng tốt. Quan sát bảng trên cho thấy họ mã đục lỗ có hiệu năng kém hơn họ mã không đục lỗ ở tất cả các độ phân giải của bộ chuyển đổi ADC. Đặc biệt với bộ chuyển đổi ADC 5 bit chúng ta có ngưỡng giải mã lặp bằng với ngưỡng giải mã của hệ thống sử dụng các bộ ADC có độ phân giải cao.

Trong luận án cũng tính các ngưỡng giải mã cho cấu hình LS-MIMO 100×100 và cũng cho kết quả tương tự.

Khi chúng ta cố định cấu hình LS-MIMO 10×10 và mã AR3A với tỷ lệ mã $1/2$ và thay đổi số vòng lặp. Kết quả tính toán ngưỡng giải mã lặp của mã AR3A được đưa ra trong bảng 4.4.

Bảng 4.4. Ngưỡng giải mã (E_b/N_o dB): Cấu hình MIMO 10×10 , mã AR3A với tỷ lệ mã là $1/2$, 5 - 50 lần lặp.

	5-Ite	10-Ite	15-Ite	50-Ite
2-bit ADC	6,82	4,03	3,12	2,02
3-bit ADC	5,74	3,40	2,61	1,64
4-bit ADC	5,49	3,26	2,49	1,55
5-bit ADC	5,44	3,22	2,46	1,53
Unquantized	5,42	3,22	2,45	1,53

Quan sát bảng 4.4 chúng ta thấy hiệu năng thay đổi khi chúng ta tăng số vòng lặp hoặc độ phân giải của bộ chuyển đổi ADC.

Trong luận án cũng xem xét ngưỡng giải mã cho trường hợp chúng ta thay đổi số ăng ten thu và độ phân giải của các bộ chuyển đổi ADC của mã AR3A với tỷ lệ mã $1/2$ và 10 lần lặp. Kết quả tính toán ở bảng 4.5.

Bảng 4.5. Ngưỡng giải mã (E_b/N_o dB): Mã AR3A, tỷ lệ mã $1/2$, 10 lần lặp, cấu hình LS-MIMO $10 \times 10 - 10 \times 80$.

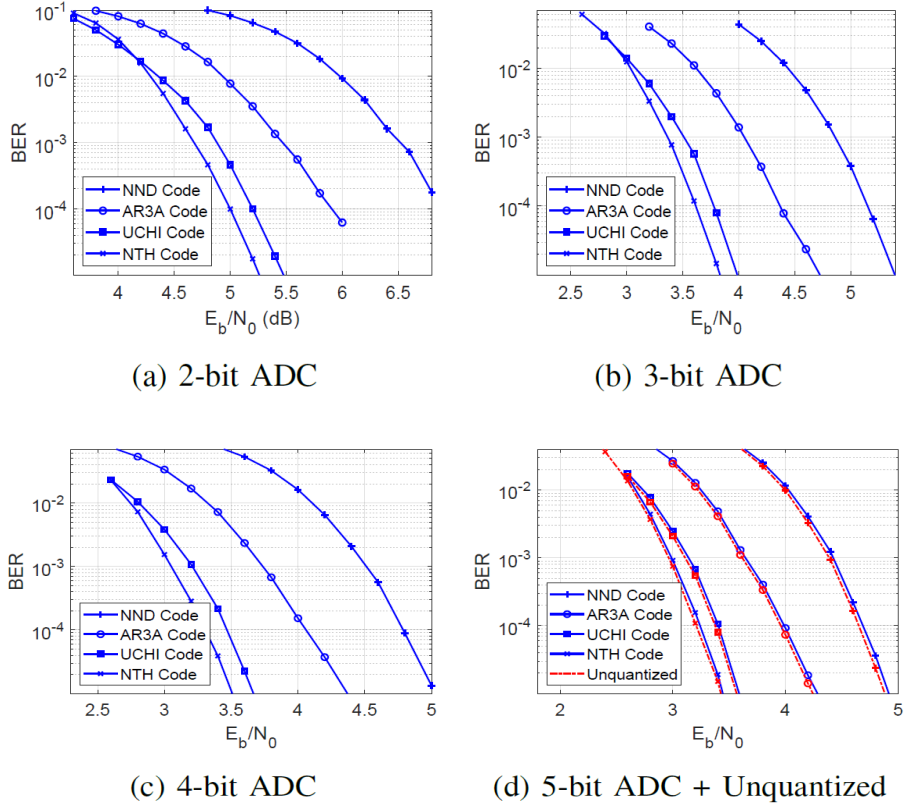
	10 × 10	10 × 20	10 × 30	10 × 40	10 × 50	10 × 60	10 × 70	10 × 80
2-bit ADC	4,03	0,01	-2,03	-3,40	-4,44	-5,27	-5,96	-6,55
3-bit ADC	3,40	-0,25	-2,20	-3,53	-4,54	-5,35	-6,03	-6,61
4-bit ADC	3,26	-0,31	-2,24	-3,56	-4,56	-5,37	-6,05	-6,63
5-bit ADC	3,22	-0,33	-2,25	-3,57	-4,57	-5,38	-6,05	-6,63
Unquantized	3,22	-0,33	-2,25	-3,57	-4,57	-5,38	-6,05	-6,63

Quan sát bảng 4.5 bên trên chúng ta thấy ngưỡng giải mã giảm khi số lượng ăng ten thu tăng lên. Và đặc biệt các ngưỡng của ADC 3 bit và 4 bit rất gần với ngưỡng của ADC có độ phân giải cao.

Trong luận án cũng nghiên cứu hiệu năng của mã Protograph LDPC khi tỷ lệ mã thay đổi.

4.4. Kết quả mô phỏng

Phần này trình bày các kết quả mô phỏng để xác thực kết quả phân tích ở trên và cung cấp thông tin về tác động của các bộ ADC có độ phân giải thấp đến hiệu năng của các hệ thống truyền thông LS-MIMO. Kết quả mô phỏng trong hình 4.5 và các hình kết quả mô phỏng trong chương 4 đã xác minh các kết quả phân tích trong các bảng.



Hình 4.5. So sánh BER: MIMO 10×10 , 10 lần lặp, tỷ lệ mã $R = 1/2$, độ dài 9600 bit.

Chúng ta thấy rằng các kết quả mô phỏng phù hợp với các kết quả phân tích trong Phần 4.3. Đặc biệt, như đã phân tích ở trên, mã NND có hiệu năng kém nhất trong số bốn mã được chọn ở tất cả các mức độ phân giải ADC. Ngoài ra, khoảng cách hiệu năng giữa mã NND và mã AR3A là lớn nhất. Ngưỡng giải mã lập nhỏ của mã UCHI và mã NTH được hiểu là một khoảng cách nhỏ trong các đường cong BER.

Có một sự chênh lệch rất nhỏ về ngưỡng giải mã lập của bộ ADC 5-bit và bộ ADC có độ phân giải cao như trong Bảng 4.1. Các kết quả mô phỏng xác nhận kết quả phân tích này. Chúng ta thấy rằng các đường cong BER của cả bốn mã tại ADC 5-bit và độ phân giải cao rất gần với cả hai cấu hình LS-MIMO 10×10 và 100×100 .

4.5. Kết luận chương

Một phiên bản mới của thuật toán LS-MIMO-PEXIT cho các hệ thống truyền thông LS-MIMO với các bộ ADC có độ phân giải thấp được phát triển trong chương này. Thuật toán LS-MIMO-PEXIT mới đề xuất này có thể dự đoán hiệu năng của các mã Protograph LDPC theo các tham số đầu vào khác nhau, bao gồm cấu hình LS-MIMO, tỷ lệ mã, số lần lặp tối đa và cấu trúc mã. Nghiên cứu cho thấy hiệu năng của hệ thống giảm nhỏ khi sử dụng độ phân giải ADC 3-bit hoặc 4-bit so với hệ thống sử dụng bộ ADC độ phân giải cao. Hiệu năng của hệ thống ADC 5-bit tương đương với ADC độ phân giải cao trong tất cả các trường hợp thử nghiệm. Nghiên cứu này chứng minh rằng trong hệ thống truyền dẫn với các bộ mã hóa kênh cụ thể và các cấu hình MIMO khác nhau thì các bộ ADC có độ phân giải thấp là một giải pháp rất tiềm năng cho kênh MIMO cỡ lớn trong các mạng thông tin di động trong tương lai như 5G hoặc 6G để tiết kiệm giá thành phần cứng và năng lượng tiêu thụ của máy thu.

KẾT LUẬN

Các kết quả nghiên cứu chính của luận án bao gồm các nội dung sau đây:

- Nghiên cứu xây dựng thuật toán tách sóng tín hiệu dùng giản đồ Tanner để giảm độ phức tạp cho kênh LS-MIMO với bộ chuyển đổi tương tự số ADC có độ phân giải thấp. Kết quả mô phỏng chỉ ra rằng việc sử dụng bộ ADC có độ phân giải 4-bit hoặc 5-bit sẽ gần như không làm ảnh hưởng đến hiệu năng hoạt động của bộ tách sóng tín hiệu MIMO dùng thuật toán truyền lan thông tin.

- Xây dựng giản đồ Tanner kép để mô hình hóa sự tương tác thông tin giữa bộ tách sóng tín hiệu và bộ giải mã LDPC. Giản đồ kép này là công cụ để tìm kiếm mã Protograph LDPC giành cho kênh LS-MIMO với số ăng-ten lớn và số vòng lặp giải mã hạn chế. Những mã được tìm kiếm trong luận án này cho thấy việc thiết kế lại mã Protograph LDPC cho kênh LS-MIMO mang lại lợi ích về hiệu năng hơn là sử dụng các mã đã được thiết kế trước đó cho kênh AWGN.

- Cũng dùng giản đồ kép này, luận án xây dựng quy trình đánh giá và so sánh hiệu năng của nhiều mã Protograph LDPC được thiết kế cho kênh AWGN cho trường hợp của kênh MIMO. Khi số ăng-ten được tăng lên ở kênh MIMO thì bộ chuyển đổi tương tự số có độ phân giải thấp được đề xuất trong nhiều nghiên cứu gần đây. Luận án đã thực hiện việc đánh giá ảnh hưởng nhiều lượng tử do độ phân giải thấp của bộ ADC đến hiệu năng của hệ thống truyền dẫn điểm-điểm. Kết quả phân tích toán học dựa trên giản đồ Tanner kép và kết quả mô phỏng đã tìm ra rằng khoảng cách giữa hệ thống dùng bộ ADC có độ phân giải cao và hệ thống có bộ ADC có độ phân giải 4-bit hoặc 5-bit là không đáng kể. Kết quả này cho thấy đề xuất sử dụng bộ ADC có độ phân giải thấp trong các hệ thống di động trong tương lai là hoàn toàn khả thi và có nhiều triển vọng – để tiết kiệm năng lượng xử lý cao tần và giá thành phần cứng.

CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ CỦA TÁC GIẢ

- [1]. Hieu D. Vu, T. V. Nguyen, T. B. T. Do and H. T. Nguyen, "Belief Propagation Detection For Large-Scale MIMO Systems With Low-Resolution ADCs," *2019 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC)*, Hanoi, Vietnam, 2019, pp. 68-73, doi: 10.1109/ATC.2019.8924512.
- [2]. Hieu D. Vu, T. V. Nguyen and H. T. Nguyen, "Protograph LPDC Coded Large-Scale MIMO Communications with Low-Resolution ADCs," *2019 25th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC)*, Ho Chi Minh City, Vietnam, 2019, pp. 286-291, doi: 10.1109/APCC47188.2019.9026536.
- [3]. Hieu D. Vu, Thuy V. Nguyen, Diep N. Nguyen, Hieu T. Nguyen, "On Design of Protograph LDPC Codes for Large-Scale MIMO Systems", *Access IEEE*, vol. 8, pp. 46017-46029, 2020.
- [4]. Thuy V. Nguyen, H. D. Vu, D. N. Nguyen and H. T. Nguyen, "Performance Analysis of Protograph LDPC Codes Over Large-Scale MIMO Channels With Low-Resolution ADCs," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 145145-145160, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2944567.