

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



ĐẶNG NGỌC HÙNG

NGHIÊN CỨU THUẬT TOÁN TÁCH SÓNG VÀ GIẢI MÃ P-LPDC CHO HỆ THỐNG THÔNG TIN MIMO CỠ LỚN VỚI BỘ ADC ĐỘ PHÂN GIẢI THẤP

CHUYÊN NGÀNH: HỆ THỐNG THÔNG TIN

Mã số: 9.48.01.04

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

HÀ NỘI - 2022

Công trình được hoàn thành tại:

HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG

Người hướng dẫn khoa học:

1. PGS.TS. NGUYỄN VĂN THỦY

2. PGS.TS NGUYỄN TRUNG HIẾU

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 2022

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

Trong mạng không dây thế hệ mới, hàng tỷ thiết bị được khai thác để cung cấp kết nối cho các dịch vụ đòi hỏi tốc độ cao và độ trễ thấp. Theo thống kê, lưu lượng dữ liệu mạng di động đã tăng 46% trong khoảng thời gian từ quý 1 năm 2020 đến quý 1 năm 2021, đạt khoảng 66 ExaByte. Có thể thấy, nhu cầu về tốc độ truyền dẫn sẽ không ngừng gia tăng để đáp ứng các dịch vụ yêu cầu băng thông cao.

Sẽ không thể đạt được mục tiêu trên nếu chỉ dựa vào kiến trúc và cơ sở hạ tầng của mạng 4G hiện tại và việc tăng quy mô công suất phát. Điều này đòi hỏi cần có những thay đổi về công nghệ nhằm đáp ứng các yêu cầu về tốc độ và độ trễ xử lý trong mạng không dây thế hệ mới. Gần đây, công nghệ đa đầu vào đa đầu ra (MIMO) đã được ứng dụng thành công trong các mạng di động hay mạng không dây thế hệ thứ năm (5G), cũng như trong các mạng cảm biến không dây tiết kiệm năng lượng. Việc trang bị hàng chục đến hàng trăm ăng ten ở phía phát và phía thu giúp các hệ thống MIMO, gọi là hệ thống MIMO cỡ lớn (LS-MIMO) có thể cải thiện đáng kể tốc độ truyền dữ liệu và tăng hiệu suất phổ. Tuy nhiên việc khôi phục dữ liệu được mã hóa từ các tín hiệu nhận được bởi số lượng lớn ăng ten phát đòi hỏi một lượng tính toán rất lớn ở phía thu, cụ thể là thành phần tách sóng của máy thu MIMO. Hơn nữa, việc sử dụng một số lượng lớn ăng ten trong các hệ thống MIMO cỡ lớn cũng mang đến thách thức về hiệu quả năng lượng (EE). Trong đó, các bộ chuyển đổi tín hiệu tương tự sang tín hiệu số (ADC) là thành phần chiếm phần lớn tổng mức điện năng tiêu thụ của hệ thống. Hiện nay, mức tiêu thụ điện năng phổ biến của các bộ ADC độ phân giải cao (cụ thể là 8-12 bit) trong các hệ thống thương mại tốc độ cao (với tốc độ lấy mẫu ≥ 20 GSamples/s) là khoảng 500 mW. Nếu tính trên một hệ thống MIMO cỡ lớn với 256 ăng ten thu và 512 bộ ADC, thì tổng công suất tiêu thụ của các bộ ADC này lên tới 256 W. Điều này là không khả thi để áp dụng trong các hệ thống thông tin MIMO cỡ lớn trong thực tế.

Bên cạnh đó, mã kiểm tra chẵn lẻ mật độ thấp (LDPC) là một công nghệ mã hóa kênh hiện đại, được sử dụng rộng rãi trong các hệ thống truyền thông khác nhau. Đã có nhiều hoạt động nghiên cứu liên quan đến việc phân tích và thiết kế các hệ thống MIMO sử dụng giải pháp mã hóa LDPC với các dạng cơ chế tách sóng và giải mã khác nhau. Đây được xem như là một cách tiếp cận tự nhiên để áp dụng mã LDPC có độ phức tạp giải mã thấp vào các hệ thống LS-MIMO nhằm cải thiện độ tin cậy đường truyền và tiết kiệm năng lượng.

Những thay đổi mới về công nghệ trong mạng không dây thế hệ mới, như đã phân tích ở trên, đòi hỏi cần có những nghiên cứu đưa ra các giải pháp cải thiện hiệu năng tính toán và tiết kiệm năng lượng cho hệ thống MIMO cỡ lớn sử dụng mã P-LDPC. Tuy vậy, theo các khảo sát ở trên, chưa có nghiên cứu chuyên sâu nào về thuật toán tách sóng MIMO và giải mã P-LDPC cho hệ thống thông tin MIMO cỡ lớn trong trường hợp sử dụng bộ chuyển đổi ADC có độ phân giải thấp từ 1 tới 2 bit. Do vậy, chủ đề này được lựa chọn là đề tài nghiên cứu của luận án.

Mục tiêu nghiên cứu

Mục đích của luận án này là nghiên cứu các giải pháp và thiết kế thuật toán tách sóng và giải mã P-LDPC nhằm cải thiện hiệu năng của hệ thống thông tin MIMO cỡ lớn với các bộ ADC độ phân giải thấp từ 1 tới 2 bit.

Nội dung nghiên cứu

Các nội dung nghiên cứu cụ thể của luận án được xác định gồm:

Thứ nhất, nghiên cứu giải pháp cải thiện hiệu năng bộ ADC đồng nhất độ phân giải thấp từ 1 tới 2 bit, giúp hoạt động hiệu quả cho hệ thống LS-MIMO; *Thứ hai*, nghiên cứu phương pháp thiết kế và đề xuất họ mã P-LDPC mới, phù hợp cho hệ thống thông tin LS-MIMO với bộ ADC đồng nhất độ phân giải thấp đề xuất ở trên; *Thứ ba*, nghiên cứu, đề xuất thuật toán tách sóng và giải mã cho hệ thống thông tin LS-MIMO sử dụng giải pháp mã P-LDPC với các bộ ADC có độ phân giải thấp khác nhau hay gọi là độ phân giải hỗn hợp.

Phạm vi nghiên cứu

Luận án nghiên cứu thuật toán tách sóng và giải mã P-LDPC cho hệ thống thông tin MIMO cỡ lớn với các bộ ADC độ phân giải thấp. Trong phạm vi luận án, số lượng ăng ten cỡ lớn được mô phỏng là từ 10 cho đến 100. Tuy vậy, các kết quả nghiên cứu có thể áp dụng cho các cấu hình MIMO với số lượng ăng ten tùy biến. Độ phân giải thấp được xem xét nghiên cứu là từ 1 cho tới 2 bit. Cuối cùng, các kết quả nghiên cứu trong luận án nhằm cải thiện hiệu quả năng lượng (EE) và hiệu suất phổ (SE), hai thước đo chính để đánh giá hiệu năng trong các hệ thống truyền thông không dây hiện đại.

Đối tượng nghiên cứu:

Luận án tập trung nghiên cứu ba thành phần chính, ảnh hưởng tới hiệu quả năng lượng và hiệu suất phổ trong mạng không dây thế hệ tương lai. Cụ thể gồm: 1) Bộ ADC độ phân giải rất thấp từ 1 tới 2 bit; 2) Giải pháp mã hóa P-LDPC có tỉ lệ mã thích ứng; 3) Thuật toán tách sóng và giải mã P-LDPC ở phía thu.

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

Công nghệ MIMO đang được phát triển và ứng dụng rộng rãi trong các mạng không dây hiện đại. Việc trang bị số lượng lớn ăng ten đòi hỏi một lượng tính toán lớn và sự tiêu hao năng lượng ở phía thu. Do vậy, cải thiện hiệu năng của hệ thống MIMO đang là thách thức và nhận được nhiều sự quan tâm của cộng đồng nghiên cứu khoa học trong và ngoài nước. Những đề xuất, giải pháp cải tiến bộ ADC độ phân giải thấp, mã P-LDPC và thuật toán tách sóng và giải mã cho hệ thống MIMO cỡ lớn là nền tảng cơ bản cho việc nghiên cứu, xây dựng các hệ thống truyền dẫn phức tạp, thực tế trong mạng thông tin di động tương lai.

Ngoài ý nghĩa cải thiện hiệu năng hệ thống MIMO cỡ lớn, thuật toán tách sóng và giải mã P-LDPC mới được đề xuất trong luận án còn cung cấp một công cụ, quy trình thiết kế và đánh giá hiệu năng hệ thống LS-MIMO với các bộ ADC độ phân giải hỗn hợp. Đây là một trong những đóng góp có ý nghĩa thực tiễn quan trọng của luận án.

Phương pháp nghiên cứu

Phương pháp tiếp cận giải quyết các vấn đề trong luận án này được thực hiện thông qua hai quá trình:

- *Quá trình thứ nhất*, thiết lập mô hình toán học. Các thành phần trong hệ thống thông tin hầu hết được mô hình hóa thông qua mô hình toán thống kê. Các mô hình toán học này được áp

dụng phổ biến trong các nghiên cứu của các nhà khoa học trên thế giới trong lĩnh vực xử lý và truyền thông tin.

- *Quá trình thứ hai*, xây dựng và chạy chương trình mô phỏng trên máy tính. Bước này được thực hiện bởi ngôn ngữ lập trình C++ nhằm kiểm chứng tính đúng đắn của các kết quả phân tích toán học. Để đảm bảo độ tin cậy, các mô phỏng được thực hiện dựa trên phương pháp Monte-Carlo. Đây là phương pháp phổ biến được sử dụng để đánh giá hiệu năng của các mô hình mạng, hệ thống thông tin, khi mà trong mô hình đó có nhiều biến có xác suất ngẫu nhiên.

Cấu trúc luận án

Ngoài phần mở đầu và phụ lục, Luận án được trình bày thành 4 chương với bố cục như sau:

Chương 1: Trình bày lý thuyết tổng quan trong nghiên cứu hiệu năng của hệ thống thông tin MIMO cỡ lớn. **Chương 2:** Nghiên cứu ảnh hưởng và thiết kế bộ ADC đồng nhất độ phân giải thấp từ 1 đến 2 bit cho các hệ thống MIMO cỡ lớn. **Chương 3:** Nghiên cứu giải pháp và thiết kế mã Protograph LDPC có tỉ lệ thích ứng cho hệ thống thông tin MIMO cỡ lớn với bộ ADC đồng nhất độ phân giải thấp 1 bit. **Chương 4:** Nghiên cứu và đề xuất thuật toán tách sóng MIMO và giải mã P-LDPC kết hợp cho hệ thống MIMO cỡ lớn với bộ chuyển đổi ADC có độ phân giải hỗn hợp. **Kết luận:** Trình bày những đóng góp của luận án cũng như hướng nghiên cứu tiềm năng trong tương lai của đề tài.

CHƯƠNG 1

TỔNG QUAN VỀ KÊNH TRUYỀN DẪN MIMO VÀ MÃ PROTOGRAPH LDPC

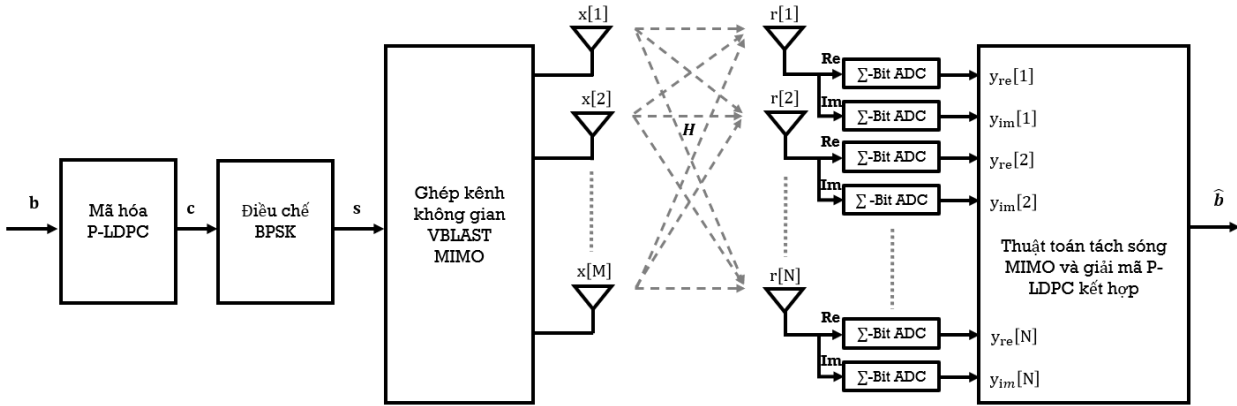
***Tóm tắt:** Công nghệ đa đầu vào đa đầu ra cỡ lớn (LS-MIMO) là một trong những kỹ thuật quan trọng cho phép triển khai mạng không dây thế hệ thứ 5 (5G). Do sở hữu một số lượng lớn các ăng-ten tại trạm cơ sở (BS), các hệ thống MIMO lớn có thể mang lại những cải thiện đáng kể về hiệu suất phổ (SE). Tuy nhiên, số lượng ăng-ten tăng lên làm tăng đáng kể mức tiêu thụ năng lượng trên mạch tần số vô tuyến (RF). Theo đó, một hướng nghiên cứu quan trọng là làm thế nào cải thiện hiệu quả năng lượng (EE) hay hiệu năng của hệ thống thông tin MIMO mà vẫn đảm bảo hiệu suất phổ và yêu cầu về độ trễ xử lý.*

Phần đầu của chương này trình bày các lý thuyết tổng quan về vấn đề hiệu năng của hệ thống thông tin MIMO cỡ lớn. Phần tiếp theo của chương trình bày ngắn gọn các đặc trưng và lý thuyết cơ sở về các đối tượng nghiên cứu chính của luận án. Trong phần cuối, các khảo sát và phân tích về các công trình nghiên cứu có liên quan trong và ngoài nước được xem xét để làm rõ các mục tiêu của luận án.

1.1. Công nghệ đa đầu vào đa đầu ra MIMO

Gần đây, sách trắng do Cisco phát hành đã khẳng định rằng mạng 4G hiện tại không thể đáp ứng nhu cầu dữ liệu không dây trong tương lai gần. Một trong những thách thức chính trong thiết kế hệ thống di động thế hệ tiếp theo (5G) nằm ở việc cải thiện hiệu quả năng lượng (EE) và hiệu suất phổ (SE).

Công nghệ MIMO đã được chuẩn hóa và thương mại hóa trong mạng 5G. Để cải thiện hơn nữa SE, kỹ thuật MIMO cỡ lớn (còn được gọi là hệ thống ăng ten quy mô lớn, MIMO rất lớn, siêu MIMO, MIMO đầy đủ kích thước) sử dụng số lượng ăng ten BS lớn hơn nhiều so với trong các hệ thống MIMO truyền thống và đã được coi là một trong những tính năng chính trong 5G. Cho đến nay, số lượng ăng ten nghiêm ngặt cho một hệ thống MIMO cỡ lớn vẫn chưa được xác định. Hơn nữa, để các kết quả so sánh là công bằng với các công trình nghiên cứu gần nhất, số lượng ăng ten trong các nghiên cứu của luận án được lựa chọn trong khoảng từ 10 cho đến 100, như đã được giới hạn ở trên. Mô hình hệ thống MIMO cỡ lớn tổng quan được xem xét trong luận án này được trình bày như ở Hình 1.1.

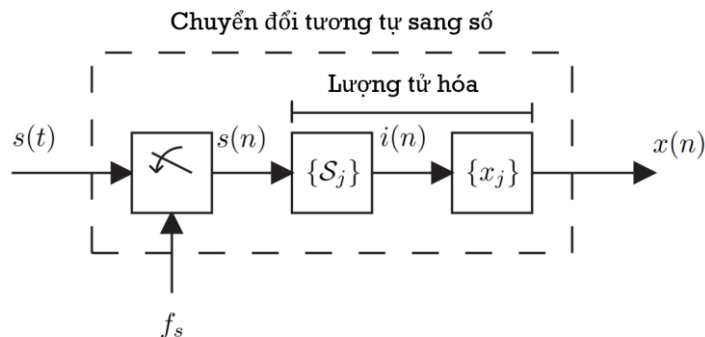


Hình 1.1. Mô hình tổng quan hệ thống thông tin MIMO mã hóa.

Các đối tượng nghiên cứu chính trong luận án được xem xét trong mô hình hệ thống gồm: 1) Bộ chuyển đổi tín hiệu tương tự sang số (ADC) độ phân giải thấp; 2) Khối chức năng mã hóa P-LDPC; Và 3) Thuật toán tách sóng MIMO và giải mã P-LDPC kết hợp ở phía thu.

1.2. Bộ chuyển đổi tín hiệu tương tự sang số (ADC)

Nội dung phần 1.2 trình bày hoạt động của bộ lượng tử hóa ADC, nhằm giải thích nguyên nhân sự ảnh hưởng nghiêm trọng của quá trình lượng tử hóa độ phân giải thấp đối với hiệu năng của các hệ thống MIMO cỡ lớn.



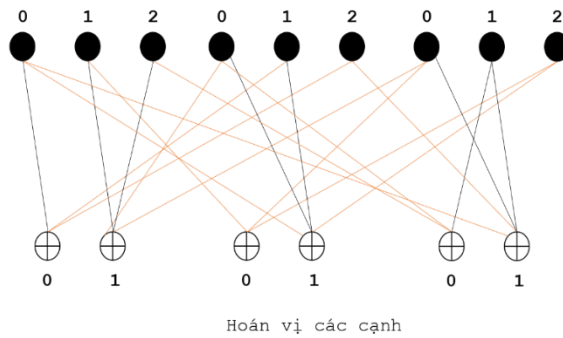
Hình 1.2. Mô hình bộ chuyển đổi ADC lý thuyết với quá trình lượng tử hóa hai giai đoạn

Nguyên lý hoạt động của một bộ chuyển đổi Σ -bit lý thuyết được trình bày trong Hình 1.2. Bộ chuyển đổi có tín hiệu đầu vào thời gian liên tục, được ký hiệu là $s(t)$. Tín hiệu này có thể giả định bất kỳ giá trị thực nào, có thể bị giới hạn trong miền hữu hạn, tức là $s(t)$ là liên tục cả về biên

độ và thời gian. Sau đó, chuyển đổi tương tự sang số là một lượng tử hóa theo thời gian và biên độ, sao cho mọi thời điểm nT_s , trong đó T_s là chu kỳ lấy mẫu và n là chỉ số mẫu (số nguyên), một đầu ra x_i được tạo ra từ một tập hữu hạn $\{x_j\}_{j=0}^{N_Q-1}$. Ở đây, $N_Q = 2^\Sigma$ là số mức lượng tử hóa với Σ là số bit của bộ lượng tử.

1.3. Mã Protograph LDPC

Các họ mã Protograph LPDC (P-LDPC) được ứng dụng rộng rãi trong một số tiêu chuẩn truyền thông ngày nay, chẳng hạn như IEEE 802.11n (WiFi), IEEE 802.16e (WiMAX), IEEE 802.15.3c (WPAN), 802.11ac (WiFi evolution) và IEEE 802.11ad (WiGig). Một mã protograph LDPC (tương đương một mã LDPC), là một đồ thị dẫn xuất lớn hơn được xây dựng dựa trên việc “nhân bản-và-hoán vị” trên một protograph ban đầu. Một ví dụ đơn giản của protograph ban đầu và hoạt động “nhân bản-và-hoán vị” với $N = 3$, được minh họa như Hình 1.6 dưới đây.



Hình 1.6. Thực hiện hoán vị các cạnh sau khi thực hiện nhân bản với $N = 3$

Quá trình thiết kế họ mã P-LDPC có tỉ lệ mã thích ứng trong nghiên cứu của luận án được thực hiện với các tham số gồm: 1) Ngưỡng (threshold) giải mã lặp, tác động đến hiệu năng vùng thác nước; 2) Thuộc tính khoảng cách tối thiểu tuyến, tác động đến hiệu năng vùng lỗi và ngăn hành vi lỗi sàn (error-floor); 3) Số lần lặp giải mã thấp có tác động độ phức tạp và độ trễ xử lý của hệ thống.

Để đánh giá hiệu năng của giải pháp mã P-LDPC nói riêng và hệ thống thông tin MIMO cỡ lớn nói chung, thông thường các nghiên cứu thực hiện bằng cách xem xét mức tín hiệu (SNR) cần thiết của hệ thống để đạt đến một xác suất lỗi giới hạn. Sự khác biệt này (được tính bằng đơn vị dB) thường được gọi là độ lợi mã hóa. Độ lợi mã hóa được xem là mức giảm của công suất tín hiệu trong các hệ thống được mã hóa ở một công suất nhiễu xác định, hay nói cách khác chính là sự cải thiện hiệu năng.

1.4. Các nghiên cứu liên quan

Phần nội dung 1.4 trình bày các khảo sát và phân tích về các công trình nghiên cứu gần nhất với các chủ đề của luận án, gồm: 1) Bộ ADC độ phân giải thấp giới hạn từ 1 đến 2 bit; 2) Giải pháp mã hóa P-LDPC và 3) Thuật toán tách sóng và giải mã ở phía thu.

1.4.1. Bộ ADC độ phân giải thấp (1 đến 2 bit)

Việc sử dụng nhiều cặp chuyển đổi tín hiệu tương tự sang tín hiệu số (ADC) không chỉ là vấn đề chi phí phần cứng mà còn là suy hao năng lượng. Điều này là do chi phí phần cứng, mức tiêu thụ năng lượng của các bộ ADC tăng trưởng tuyến tính với số lượng ăng ten và theo cấp số nhân với độ phân giải (số bit được sử dụng). Nhằm giải quyết thách thức này, một giải pháp tiềm năng là thay thế

các bộ ADC độ phân giải cao, tiêu tốn nhiều năng lượng bằng các bộ ADC độ phân giải thấp và tiêu tốn ít năng lượng.

Các nghiên cứu được khảo sát chỉ ra rằng ADC độ phân giải 1-bit và 2-bit cho hiệu quả năng lượng tốt nhất về công suất truyền qua kênh và công suất hao hụt bởi ADC tại ăng ten thu. Một số nghiên cứu sử dụng bộ lượng tử hóa vô hướng không đồng nhất, với các mức lượng tử hóa không bằng nhau và được tối ưu hóa dựa trên hàm mật độ xác suất của đầu vào. Bộ lượng tử hóa không đồng nhất được biết đến là cho hiệu năng tốt nhưng có độ phức tạp xử lý lớn hơn bởi các mức lượng tử Δ cần được tối ưu theo hàm phân phối mật độ xác suất (PDF) đầu vào. Một loại lượng tử hóa khác là bộ lượng tử hóa vô hướng đồng nhất. Với các mức lượng tử hóa bằng nhau, bộ lượng tử hóa vô hướng đồng nhất cho độ phức tạp xử lý thấp hơn nhưng có hiệu năng xử lý thấp hơn bộ lượng tử hóa không đồng nhất. Nhiều nghiên cứu đã áp dụng bộ lượng tử hóa vô hướng đồng nhất cho các hệ thống MIMO cỡ lớn với bộ ADC độ phân giải thấp. Tuy nhiên, một giới hạn cắt sẽ luôn được lựa chọn theo luật three-sigma bất kể độ phân giải của ADC. Điều này dẫn đến hiệu năng của các hệ thống MIMO quy mô lớn với ADC độ phân giải thấp sẽ bị suy giảm, đặc biệt là với trường hợp ADC 1-bit.

Xuất phát từ quan sát trên, chủ đề nghiên cứu đầu tiên của luận án là cải thiện sự suy giảm hiệu năng của hệ thống thông tin MIMO cỡ lớn khi triển khai các bộ ADC đồng nhất độ phân giải thấp từ 1 đến 2 bit. Theo đó, thông qua việc tìm kiếm một giới hạn cắt phù hợp cho mỗi mức độ phân giải của bộ ADC, một chiến lược để cân bằng biến dạng quá tải và biến dạng mềm được thực hiện, nhằm giảm biến dạng lượng tử hóa tổng thể. Để kiểm chứng, tốc độ tổng có thể đạt được đường lên của hệ thống MIMO-MU được sử dụng để so sánh giữa bộ ADC đồng nhất được đề xuất với các bộ ADC liên quan. Các kết quả nghiên cứu chủ đề này này được trình bày tại Chương 2 của luận án và đã được công bố trong công trình [CT3].

1.4.2. Mã P-LDPC có tỉ lệ mã thích ứng

Trong hầu hết các hệ thống truyền thông hiện đại, ví dụ như mạng thế hệ 5G, có những yêu cầu không đồng nhất về độ trễ, hiệu suất phổ và độ tin cậy. Các yêu cầu đa dạng này có thể được chuyển trực tiếp thành các yêu cầu cụ thể về tỉ lệ lỗi khung (FER) và tỉ lệ lỗi bit (BER) khi thiết kế mã. Để đáp ứng được các yêu cầu đa dạng về FER/ BER, một giải pháp thực tế là sử dụng các giải pháp mã hóa kênh khác nhau phù hợp cho các kịch bản dịch vụ khác nhau. Tương ứng với giải pháp này, cần một phương pháp thiết kế họ mã LDPC có tỉ lệ mã thích ứng dựa trên các protograph lồng nhau.

Mặc dù có rất nhiều nghiên cứu về ADC 1-bit cho các hệ thống MIMO cỡ lớn nhưng việc phân tích và tối ưu hóa hiệu năng cho chúng vẫn còn hạn chế. Đặc biệt là với các hệ thống truyền thông không dây được mã hóa bởi giải pháp mã hóa kênh P-LDPC và sử dụng công nghệ MIMO cỡ lớn. Hai giới hạn trong các nghiên cứu công trình có liên quan nhất với chủ đề này là: 1) Nghiên cứu chỉ xem xét giới hạn độ phân giải ADC từ 2-bit tới 5-bit; 2) Giới hạn cắt là cố định bằng cách sử dụng luật three-sigma.

Từ những phân tích trên, chủ đề nghiên cứu tiếp theo của luận án là tìm kiếm một giải pháp thiết kế họ mã P-LDPC có tỉ lệ mã thích ứng đáp ứng các yêu cầu về hiệu suất phổ mà vẫn đảm bảo hiệu quả năng lượng, phù hợp cho các hệ thống truyền thông không dây thế hệ mới. Hay nói cách khác, họ mã P-LDPC có tỉ lệ mã thích ứng được này giúp cải thiện hiệu năng của hệ thống thông tin MIMO

cỡ lớn với các bộ ADC độ phân giải thấp từ 1 đến 2 bit. Các kết quả nghiên cứu chủ đề này được trình bày trong Chương 3 và được công bố trong công trình [CT1], [CT2], [CT4] và [CT5].

1.4.3. Thuật toán tách sóng và giải mã phía thu

Khi số lượng ăng ten lên đến hàng chục hoặc hàng trăm, các thuật toán tách sóng MIMO thông thường như cưỡng bức (ZF), lọc không gian sai số bình phương trung bình tối thiểu (MSME), giải mã hình cầu và bộ tách sóng khả năng xảy ra tối đa (ML) có những giới hạn trong tính toán. Gần đây, thuật toán lan truyền độ tin cậy là một giải pháp hấp dẫn để giải quyết vấn đề độ phức tạp và cải thiện hiệu năng hệ thống bằng cách loại bỏ nhiễu giữa các luồng thông qua giải mã lặp và tách sóng MIMO kết hợp. Tuy nhiên, các nghiên cứu về thuật toán này chỉ được xem xét cho các hệ thống LS-MIMO trong đó toàn bộ các ăng ten thu được trang bị bộ ADC có cùng độ phân giải và giới hạn độ phân giải thấp là từ 3 tới 5 bit. Bên cạnh đó, một số nghiên cứu về hệ thống LS-MIMO sử dụng bộ ADC có độ phân giải hỗn hợp, chủ yếu mới dựa trên lý thuyết thông tin trong đó giả định mã là ngẫu nhiên với độ dài mã vô hạn.

Dựa trên quan sát này, chủ đề nghiên cứu tiếp theo của luận án là nghiên cứu, đề xuất thuật toán tách sóng và giải mã kết hợp cho hệ thống thông tin MIMO cỡ lớn với các bộ ADC độ phân giải hỗn hợp. Theo khảo sát, đây là chủ đề nghiên cứu mới, chưa có một nghiên cứu chuyên sâu nào trên thế giới thực hiện. Hơn thế nữa, thuật toán mới được đề xuất sẽ ứng dụng các kết quả nghiên cứu về bộ ADC đồng nhất độ phân giải thấp và mã P-LDPC mới được đề xuất trong các công trình nghiên cứu ở trên. Điều này hi vọng sẽ giúp cải thiện đáng kể hiệu năng của hệ thống MIMO cỡ lớn với ADC độ phân giải hỗn hợp. Kết quả nghiên cứu chủ đề này được trình bày trong Chương 4 của luận án và được công bố trong công trình nghiên cứu [CT6].

1.5. Kết luận chương

Chương 1 trình bày tổng quan về vấn đề hiệu năng của hệ thống thông tin MIMO cỡ lớn, một trong các công nghệ quan trọng được triển khai trong mạng không dây 5G. Các thành phần quan trọng, ảnh hưởng đến hiệu năng của hệ thống MIMO cỡ lớn như bộ ADC độ phân giải thấp, giải pháp mã P-LDPC được xem xét. Trong đó, các khái niệm cơ sở có liên quan, sẽ được sử dụng trong phần còn lại của luận án được trình bày. Phần cuối của chương tổng hợp các khảo sát, phân tích về các công trình nghiên cứu trong và ngoài nước có liên quan tới chủ đề của luận án. Từ đó, làm rõ và rút ra các chủ đề nghiên cứu chính của luận án, sẽ được trình bày chi tiết ở các chương tiếp theo.

CHƯƠNG 2

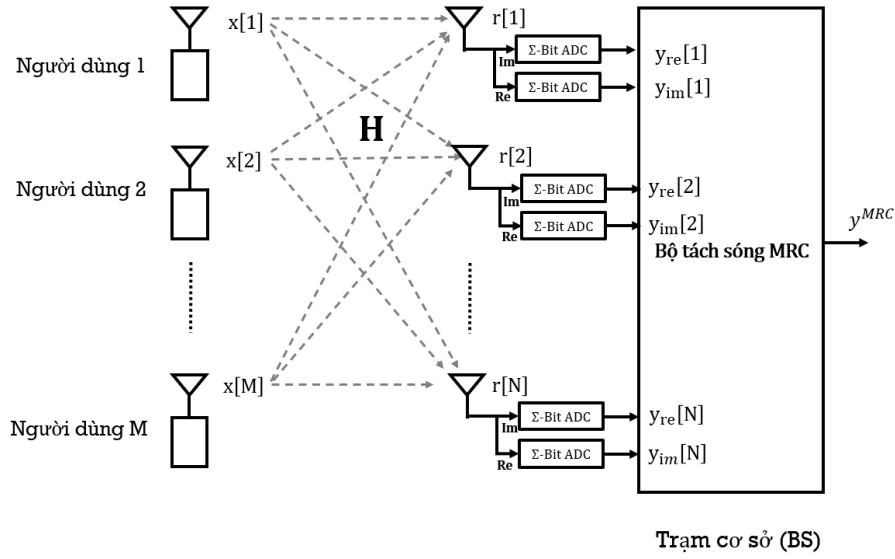
ĐỀ XUẤT BỘ ADC ĐỒNG NHẤT ĐỘ PHÂN GIẢI THẤP CHO HỆ THỐNG MIMO CỠ LỚN

Tóm tắt: Chương 2 nghiên cứu thiết kế bộ ADC đồng nhất độ phân giải thấp từ 1 đến 2 bit, cho hệ thống thông tin MIMO cỡ lớn. Khác với các nghiên cứu trước đây chỉ sử dụng giới hạn cắt theo luật three-sigma khi xây dựng bộ ADC đồng nhất với độ phân giải bất kỳ. Một biểu thức tính toán giới hạn mới được nghiên cứu, đề xuất và ứng dụng trong bộ ADC độ phân giải thấp 1 đến 2 bit, được gọi là bộ ADC đồng nhất tối ưu độ phân giải thấp. Các kết quả phân tích bằng lý thuyết và mô phỏng chỉ ra rằng việc sử dụng bộ ADC tối ưu độ phân giải thấp này có thể cải thiện đáng kể tốc độ tổng đường lên của hệ thống MIMO-MU. Cụ thể với trường hợp ADC 1 bit, sự cải thiện này là từ

5 đến 9 bits/s/Hz tương ứng với số lượng ăng ten trên trạm cơ sở là $N=50$ đến $N=500$. Hơn nữa, độ phân giải từ 1 đến 2 bit của bộ ADC được cho là có hiệu quả về năng lượng tốt nhất cho các hệ thống MIMO cỡ lớn. Như vậy, hiệu năng tổng thể của hệ thống MIMO có thể được cải thiện bằng cách sử dụng các bộ ADC tối ưu độ phân giải thấp được đề xuất này. Đóng góp của nghiên cứu trong chương này của luận án đã được công bố trong [CT3] và bộ ADC tối ưu độ phân giải thấp thiết kế trong chương này sẽ được sử dụng trong các công trình nghiên cứu tiếp theo, được trình bày trong phần sau của luận án này.

2.1 Mô hình hệ thống

Nội dung 2.1 trình bày mô hình hệ thống MIMO với M người dùng sử dụng ăng ten đơn kết nối với một trạm cơ sở được trang bị N ăng ten, được gọi là hệ thống MIMO-MU như Hình 2.1.



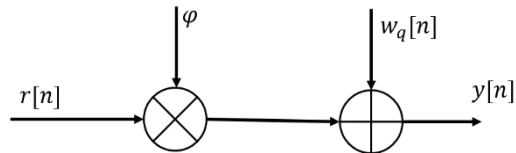
Hình 2.1. Mô hình hệ thống MIMO-MU.

Mô hình kênh cho hệ thống này được cho bởi biểu thức:

$$r = \sqrt{p_u} Hx + w \quad (2.1)$$

2.2 Bộ ADC độ phân giải thấp

Mô hình nhiễu lượng tử hóa cộng (AQNM) cung cấp một cách tiếp cận hiệu quả và đơn giản để phân tích ảnh hưởng của nhiễu lượng tử hóa đối với hiệu năng của hệ thống. Hiện nay, AQNM đã được áp dụng rộng rãi trong nhiều nghiên cứu để tìm hiểu hoạt động của ADC có độ phân giải thấp.



Hình 2.2. Mô hình nhiễu lượng tử hóa cộng (AQNM).

Xem xét mô hình hệ thống trong Hình 2.1 và giả sử rằng năng lượng là ngang nhau cho tất cả các người dùng cuối. Tại BS, sử dụng mô hình AQNM trong Hình 2.2, mô hình hóa tín hiệu nhận được r sau khi lượng tử hóa thành các tín hiệu đầu ra $y_q = [y_{q,1}, y_{q,2}, \dots, y_{q,M}]$ như sau:

$$y_q = \varphi r + w_q = \varphi \sqrt{p_u} Hx + \varphi w + w_q \quad (2.5)$$

Trong đó, hệ số φ có thể thu được bằng cách:

$$\varphi = 1 - \rho \quad (2.6)$$

Với ρ là nghịch đảo của tỉ lệ tín hiệu trên nhiễu lượng tử hóa (SQNR).

Trong trường hợp bộ lượng tử hóa vô hướng đồng nhất có độ phân giải cao, sử dụng quy tắc three-sigma (nghĩa là $L_{NQ} = 3\sigma$, với σ là độ lệch chuẩn của tín hiệu thu), chúng ta có thể tính được giá trị của ρ và φ như dưới đây:

$$\rho \approx \frac{3}{2^{2\Sigma}} \rightarrow \varphi \approx 1 - \frac{3}{2^{2\Sigma}} \quad (2.8)$$

Giá trị ρ của bộ lượng tử vô hướng đồng nhất sử dụng giới hạn cắt theo quy tắc three-sigma, với số bit $\Sigma \leq 5$ được minh họa trong Bảng 2.1 dưới đây.

Bảng 2.1. Giá trị của ρ tương ứng với các lượng tử hóa đồng nhất Σ bit

Σ	1	2	3	4	5
$\rho_{3\sigma}$	0,75	0,1875	0,0469	0,0117	0,0029

Trong trường hợp bộ lượng tử hóa vô hướng không đồng nhất, giá trị gần đúng của ρ có thể được tính theo công thức:

$$\rho \approx \frac{\pi\sqrt{3}}{2} 2^{-2\Sigma} \quad (2.9)$$

Giá trị ρ của bộ lượng tử vô hướng không đồng nhất được minh họa trong Bảng 2.2 dưới đây.

Bảng 2.2. Giá trị của ρ tương ứng với các lượng tử hóa không đồng nhất Σ bit

Σ	1	2	3	4	5
ρ	0,3634	0,1175	0,03454	0,009497	0,002499

2.3 Bộ tách sóng tín hiệu kết hợp tỉ lệ tối đa (MRC)

Nội dung 2.3 khai thác các bộ ADC vô hướng đồng nhất tối ưu sử dụng mô hình nhiễu lượng tử AQNM và bộ tách sóng MRC độ phức tạp thấp. Theo đó, tốc độ tổng đường lên của hệ thống MIMO-MU được ước lượng gần đúng bởi công thức:

$$R = \sum_{m=1}^M \log_2 \left(1 + \frac{p_u \varphi \Phi m(N+1)}{I_m} \right) \quad (2.13)$$

Với

$$I_m = p_u \varphi \sum_{i=1, i \neq m}^M \Phi_i + p_u (1 - \varphi) \left(\sum_{i=1}^M \Phi_i + \Phi_m \right) + 1 \quad (2.14)$$

Trong (2.13), biểu thức $p_u \varphi \Phi m(N+1)$ là năng lượng nhận được của người dùng thứ m thông qua N ăng ten gắn trên trạm cơ sở. Giá trị biểu thức này tỉ lệ thuận với với giá trị của φ , hay

nói cách khác giá trị φ càng cao thì bộ lượng tử hóa càng tốt. Trong khi đó, biểu thức I_m trong biểu thức (2.13) được tính như trong biểu thức (2.14), là tổng hợp của nhiều thông tin giữa các người dùng, nhiều lượng tử hóa và nhiều Gauss trắng cộng. Có thể thấy giá trị của φ càng lớn thì giá trị I_m càng nhỏ. Hai yếu tố này chỉ ra rằng giá trị tốc độ tổng đường lên đạt được có thể được cải thiện nếu hiệu năng của bộ lượng tử hóa φ cũng được tăng lên. Đây cũng là mục tiêu thiết kế của bộ lượng tử hóa tối ưu vô hướng đồng nhất trong tiếp theo đây.

2.4 Tối ưu hóa lượng tử đồng nhất

Trong phần 2.4, bộ lượng tử vô hướng đồng nhất cho ADC độ phân giải thấp được thiết kế để tối đa giá trị đại diện cho hiệu năng φ . Để giải quyết, giá trị cắt L_{N_Q} cần được tối ưu cho mỗi mức độ phân giải của ADC nhằm đảm bảo sự cân bằng giữa biến dạng tải và biến dạng mềm. Đối với tín hiệu tuân theo hàm phân phối chuẩn, giới hạn cắt tối ưu L_{N_Q} nằm trong giới hạn hai biên như dưới đây:

$$K^{-1} \left(\frac{1 + \varepsilon}{6N_Q} \right) < L_{N_Q} < K^{-1} \left(\frac{1 - \varepsilon}{6N_Q^2} \right) \quad (2.23)$$

Đặt

$$L_{N_Q}^l = K^{-1} \left(\frac{1 + \varepsilon}{6N_Q} \right) \quad (2.25)$$

và

$$L_{N_Q}^u = K^{-1} \left(\frac{1 - \varepsilon}{6N_Q^2} \right) \quad (2.26)$$

Trong đó, ε được lựa chọn là một giá trị nhỏ tùy ý và với mỗi cặp ε và N_Q , chúng ta tính toán biểu thức (2.25) và (2.26) để tương ứng tìm ra giá trị trả về của $L_{N_Q}^l$ và $L_{N_Q}^u$. Tại đây, quá trình tìm kiếm giá trị cắt tối ưu L_{N_Q} được thực hiện với nhiều cấu hình độ phân giải khác nhau. Cuối cùng, giá trị cắt tối ưu L_{N_Q} được đề xuất là điểm trung bình của giới hạn trên và giới hạn dưới trong (2.23) như sau:

$$L_{N_Q} = \frac{1}{2} \left(L_{N_Q}^l + L_{N_Q}^u \right) \quad (2.27)$$

Với lựa chọn $\varepsilon = 0.001$, thực hiện biểu thức (2.23) và (2.27), kết quả tính toán các giá trị L_{N_Q} tối ưu cho các mức độ phân giải khác nhau của ADC được trình bày trong Bảng 2.3 dưới đây.

Bảng 2.3. Giới hạn cắt tối ưu cho bộ lượng tử đồng nhất

Σ	1	2	3	4	5
N_Q	2	4	8	16	32
L_{N_Q}	1,669	2,0912	2,4613	2,7909	3,0285
SNR_s (dB)	4,27	9,19	14,29	19,33	24,31

Để đánh giá tác động của giới hạn cắt đến tốc độ tổng có thể đạt được của đường lên, giá trị hiệu năng φ được mô tả trong Bảng 2.4.

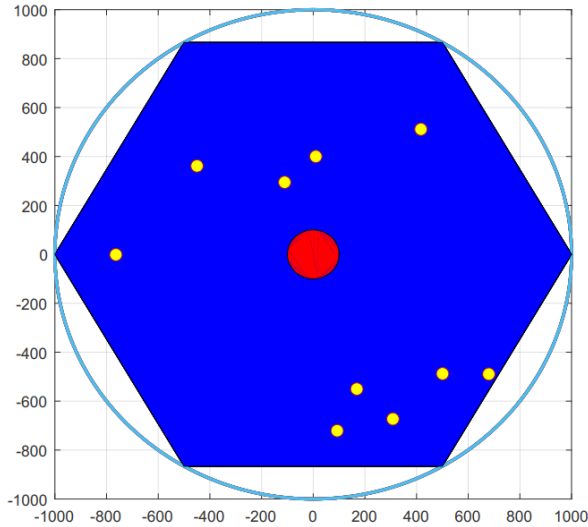
Bảng 2.4. So sánh hiệu năng (φ) giữa các bộ lượng tử hóa

Σ	1	2	3	4	5
Lượng tử hóa không đồng nhất	0,6366	0,8825	0,9654	0,9905	0,9975
Lượng tử hóa three-sigma	0,1371	0,8135	0,9518	0,9878	0,9966
Lượng tử hóa đồng nhất tối ưu	0,6261	0,8796	0,9628	0,9985	0,9963

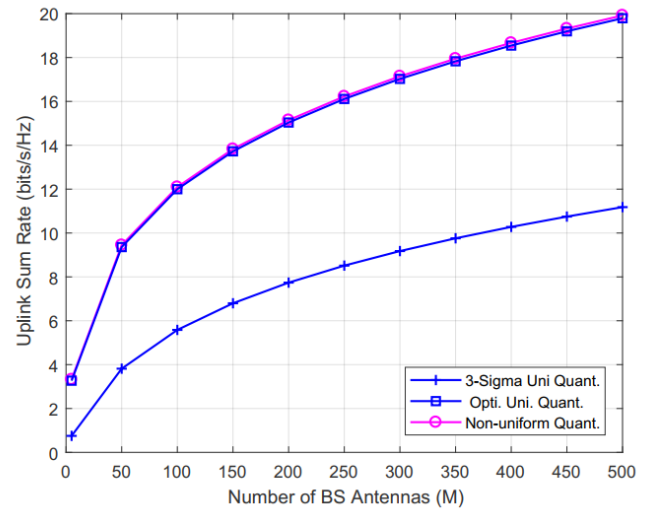
Quan sát giá trị φ , có thể thấy: 1) Bộ lượng tử hóa đồng nhất tối ưu đề xuất có hiệu năng tiệm cận với bộ lượng tử hóa không đồng nhất ở tất cả các mức độ phân giải và 2) Bộ lượng tử theo luật three-sigma thông thường là tối ưu khi mức độ phân giải là lớn hơn hoặc bằng 5 bit.

2.5 Mô phỏng và đánh giá

Phần này trình bày kết quả mô phỏng đánh giá tốc độ tổng đường lên cho một tế bào lục giác có bán kính $R_R = 1000\text{m}$. Sử dụng hàm phân phối đồng nhất để đặt $N = 10$ người dùng ngẫu nhiên vào trong tế bào, ngoại trừ khu vực trung tâm có bán kính $r_c = 100$ mét. Vị trí của tất cả $N = 10$ người dùng được hiển thị như trong Hình 2.3.

**Hình 2.3.** Vị trí người dùng trong cell với $N = 10$,

$R_R = 1000\text{m}$ và $r_c = 100\text{m}$

**Hình 2.5.** So sánh tốc độ tổng đường lên trường hợp

ADC 1-bit

Quan sát Hình 2.5, có thể thấy tốc độ tổng của bộ lượng tử đồng nhất three-sigma thấp hơn nhiều so với hai bộ lượng tử hóa còn lại. Hơn nữa, giá trị khoảng cách về tốc độ tổng đường lên càng trở nên lớn hơn khi tăng số lượng ăng ten trên trạm cơ sở. Cụ thể trường hợp ADC 1-bit, khoảng cách này tăng dần từ khoảng 2bits/s/Hz đến 9bits/s/Hz khi số ăng ten tăng tương ứng từ $N = 5$ đến $N = 500$.

Khi độ phân giải của ADC tăng lên 2 bit có thể thấy khoảng cách tốc độ tổng sụt giảm đáng kể, chỉ khoảng từ 1 tới 2bits/s/Hz . Khoảng cách này biến mất khi độ phân giải của ADC là 3 bit. Các quan sát này được minh họa chi tiết ở Hình 2.6 và Hình 2.7 trong luận án. Như vậy, độ lợi về hiệu suất phổ được thể hiện qua khoảng cách tốc độ tổng đường lên trong mô phỏng đã phản ánh sự tương đồng với các phân tích về khoảng cách của giá trị φ được trình bày trong Bảng 2.2 và 2.4.

2.6 Kết luận chương

Chương 2 trình bày về nghiên cứu tối ưu giới hạn cắt của bộ lượng tử hóa đồng nhất cho bộ ADC độ phân giải thấp và bộ T-ADC. Kết quả mô phỏng cho thấy bộ lượng tử hóa đồng nhất tối ưu đã cải thiện đáng kể hiệu suất phổ đường lên của các hệ thống MIMO-MU, đặc biệt là cho trường hợp ADC có độ phân giải 1 bit. Hơn thế nữa, giá trị hiệu suất phổ của bộ lượng tử hóa đồng nhất tối ưu xấp xỉ với bộ lượng tử không đồng nhất ở tất cả các mức độ phân giải của ADC. Bên cạnh đó, các kết quả mô phỏng cũng cho thấy rằng sự cải thiện hiệu suất phổ của bộ lượng tử hóa tối ưu tại ADC 1-bit và ADC 2-bit là rất đáng kể cho các hệ thống MIMO cỡ lớn vì hai độ phân giải này đã được chứng minh là cho hiệu quả năng lượng tốt nhất.

Kết quả mô phỏng trong nghiên cứu được của chương này được thu thập bằng cách sử dụng phương pháp phân tích theo lý thuyết cho mô hình hệ thống MIMO-MU. Nghĩa là, nghiên cứu giả định rằng mã hóa kênh là ngẫu nhiên và có độ dài khối thông tin là vô hạn. Do vậy, cần có một nghiên cứu nhằm kiểm chứng độ tin cậy của bộ ADC được đề xuất này trong các hệ thống truyền thông mã hóa MIMO có sử dụng các giải pháp mã kênh P-LDPC thực tế. Nội dung nghiên cứu này sẽ được trình bày chi tiết trong chương tiếp theo của luận án.

CHƯƠNG 3

THIẾT KẾ MÃ P-LDPC CHO HỆ THỐNG MIMO CỠ LỚN VỚI BỘ ADC ĐỘ PHÂN GIẢI THẤP

Tóm tắt: Nghiên cứu trong chương 2 được thực hiện với giả định rằng mã hóa kênh là ngẫu nhiên và có độ dài khối thông tin là vô hạn. Một câu hỏi được đặt ra là bộ ADC tối ưu được đề xuất có thể cải thiện hiệu năng tổng thể của hệ thống MIMO cỡ lớn, sử dụng các giải pháp mã hóa kênh P-LDPC thực tế hay không. Nội dung đầu của chương này tập trung trả lời câu hỏi trên, cho trường hợp hệ thống mã hóa MIMO cỡ lớn, với bộ ADC độ phân giải 1-bit tối ưu được đề xuất ở Chương 2 và giải pháp mã P-LDPC thực tế ở phía thu. Thuật toán tách sóng MIMO và giải mã P-LDPC kết hợp ở phía thu, được công bố trong công trình [CT2], được sử dụng để ước tính lỗi trên kênh. Các kết quả mô phỏng cho thấy hiệu năng vượt trội của bộ ADC tối ưu được đề xuất khi so sánh với bộ ADC độ phân giải thấp sử dụng luật three-sigma ở tất cả các cấu hình MIMO được lựa chọn. Điều này chỉ ra bộ ADC tối ưu độ phân giải thấp được đề xuất đem lại những cải thiện đáng kể hiệu năng tổng thể của hệ thống thông tin MIMO cỡ lớn, có sử dụng giải pháp mã P-LDPC thực tế. Kết quả nghiên cứu này được công bố trong [CT4].

Tuy nhiên, nghiên cứu cũng cho thấy, sự suy giảm hiệu năng của hệ thống ở tỉ lệ mã hóa cao và cấu hình MIMO thấp có thể do các mã protograph LDPC là chưa được tối ưu. Do vậy, phần cuối của chương tập trung trình bày về nghiên cứu, thiết kế các mã protograph có tỉ lệ mã thích ứng cho hệ thống MIMO cỡ lớn với bộ ADC độ phân giải 1 bit. Trong đó, phương pháp thiết kế mã P-LDPC có tỉ lệ mã thích ứng, đã được công bố trong công trình [CT1], được sử dụng để thiết kế mã P-LDPC tối ưu ở tỉ lệ mã $R = 1/2$ và $R = 2/3$ cho trường hợp MIMO cỡ lớn với bộ ADC độ phân giải 1 bit.

Các mã protograph LDPC mới được đề xuất mang lại độ lợi mã hóa từ 0,3 dB tới 0,7 dB so với các mã P-LDPC hiện đại được nghiên cứu gần nhất. Độ lợi mã hóa này là đáng kể về mặt hiệu năng, đặc biệt là đối với hệ thống truyền thông không dây tốc độ cao, nơi mà nguồn điện cung cấp

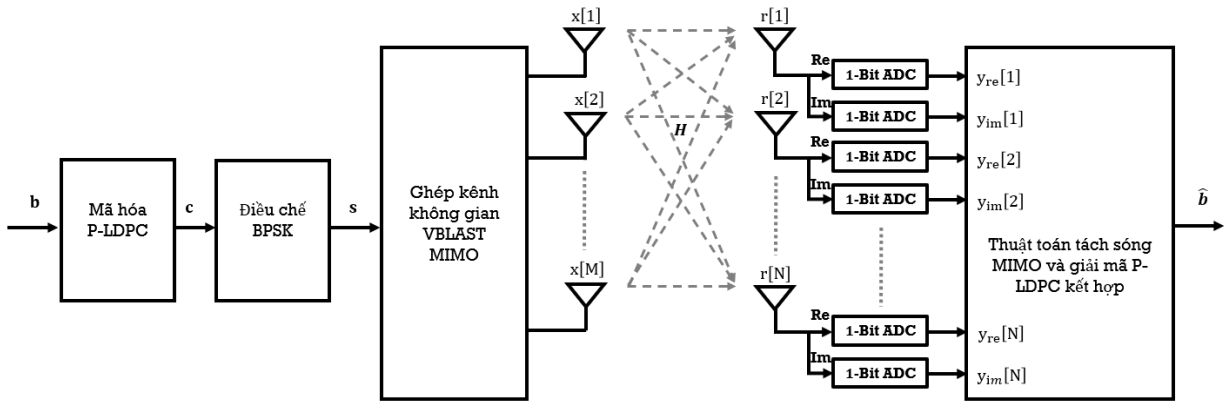
cho các thiết bị hoạt động bằng pin bị hạn chế một cách nghiêm ngặt. Các mã P-LDPC được đề xuất là đóng góp chính của chương này và được công bố trong [CT5].

3.1. Hiệu năng mã P-LDPC trong hệ thống thông tin MIMO cỡ lớn

Nội dung 3.1 trình bày về đánh giá hiệu năng tổng thể của hệ thống MIMO cỡ lớn sử dụng các giải pháp mã hóa kênh P-LDPC thực tế và bộ ADC đồng nhất được đề xuất trong công trình [CT3].

3.1.1 Mô hình hệ thống

Mô hình hệ thống truyền thông LS-MIMO sử dụng các mã P-LDPC thực hiện các phân tích hiệu năng và thiết kế mã P-LDPC trong các nội dung tiếp theo được trình bày trong Hình 3.1.



Hình 3.1. Mô hình kênh hệ thống truyền thông mã hóa LS-MIMO với bộ ADC 1-bit

3.1.2 Bộ ADC đồng nhất 1-bit tối ưu

Bộ lượng tử hóa trong mô hình hệ thống là bộ lượng tử hóa đồng nhất tối ưu độ phân giải thấp được trình bày trong Chương 2 và công trình [CT3]. Theo biểu thức (2.13), (2.14) giá trị của φ càng lớn thì hiệu năng của hệ thống truyền thông được mã hóa MIMO cỡ lớn càng tốt. Như vậy, để cải thiện hiệu năng của một hệ thống mã hóa MIMO cỡ lớn, người ta phải tối ưu để đạt giá trị cao hơn của φ cho một bộ ADC 1-bit cho trước bằng cách giảm nhiều lượng tử của bộ lượng tử hóa.

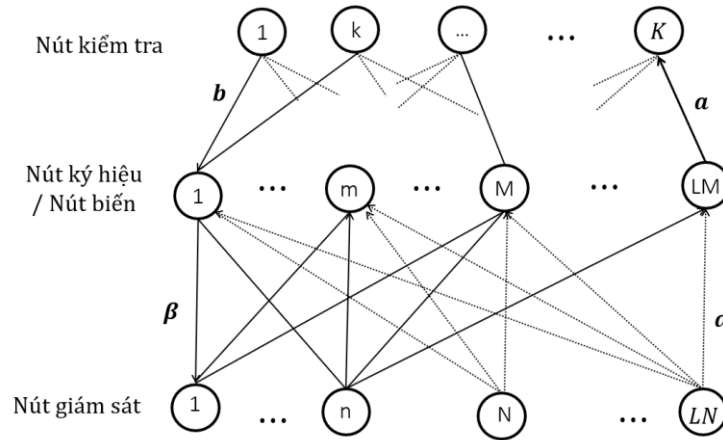
Bảng 3.1. Giới hạn cắt và giá trị φ của các bộ ADC 1-bit

	ADC đồng nhất three-sigma	ADC đồng nhất tối ưu	ADC không đồng nhất
L_{N_Q}	3	1,669	-
φ	0,1371	0,6261	0,6366

Bảng 3.1 cung cấp giá trị tối ưu của L_{N_Q} cho các loại ADC 1-bit và giá trị φ tương ứng. Có thể thấy là giá trị hiệu năng của ADC 1-bit được tối ưu là rất gần so với bộ lượng tử không đồng nhất, vốn phức tạp hơn bởi số lượng các mức khoảng lượng tử Δ cần được tối ưu theo hàm phân phối mật độ xác suất (PDF) đầu vào. Sự khác nhau của giá trị φ chỉ là 0,01 như trong Bảng 3.1 là một khoảng cách rất nhỏ.

3.1.3. Thuật toán tách sóng MIMO và giải mã P-LDPC kết hợp

Nội dung 3.1.3 trình bày về thuật toán tách sóng MIMO và giải mã kết hợp được sử dụng để đánh giá hiệu năng và thiết kế mã P-LDPC có tỉ lệ mã thích ứng cho hệ thống MIMO cỡ lớn với ADC đồng nhất tối ưu 1-bit ở phần sau.



Hình 3.2. Bộ thu lan truyền độ tin cậy hai lớp kết hợp

Thuật toán tách sóng và giải mã P-LDPC kết hợp được giải thích qua một sơ đồ hai lớp kết hợp như được minh họa trong Hình 3.2. Đường kết nối của nút biến và nút kiểm tra là được quy định bởi ma trận chẵn lẻ của mã LDPC. Trong một lần sử dụng kênh, N các nút giám sát và M các nút ký hiệu được liên kết đầy đủ để tạo nên một sơ đồ cho thành phần tách sóng MIMO. Nguyên tắc và chi tiết hoạt động của bộ thu giải mã và tách sóng kết hợp sử dụng thuật toán truyền độ tin cậy được trình bày trong Phần 3.1.3 của luận án.

3.1.4 Mô phỏng và đánh giá kết quả

Trong phần 3.1.4, thuật toán PEXIT cho các hệ thống MIMO cỡ lớn (LS-MIMO-PEXIT) được sử dụng để đánh giá sự cải thiện hiệu năng của bộ lượng tử hóa (ADC) đồng nhất tối ưu 1-bit.

a. *Ngưỡng giải mã lặp*: Để tính toán ngưỡng giải mã lặp, các mã P-LDPC gần nhất được tối ưu trước đây cho kênh LS-MIMO độ phân giải thấp được lựa chọn. Kết quả ngưỡng giải mã lặp cho tỉ lệ mã hóa $R = 1/2$ được trình bày trong Bảng 3.2.

Bảng 3.2. Ngưỡng giải mã lặp với tỉ lệ mã hóa $R = 1/2$

Cấu hình MIMO	Lượng tử hóa Three-sigma	Lượng tử hóa tối ưu
10×10	5,47	3,07
40×40	5,03	2,84
100×100	5,21	2,97

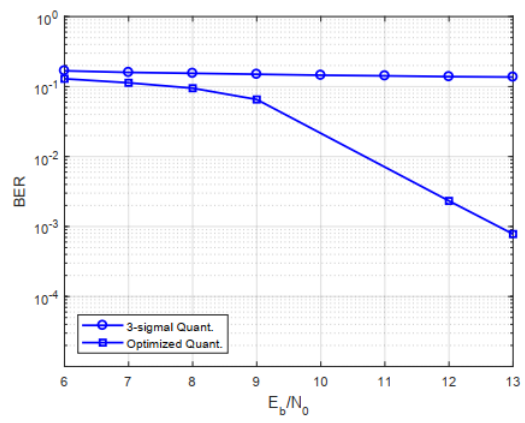
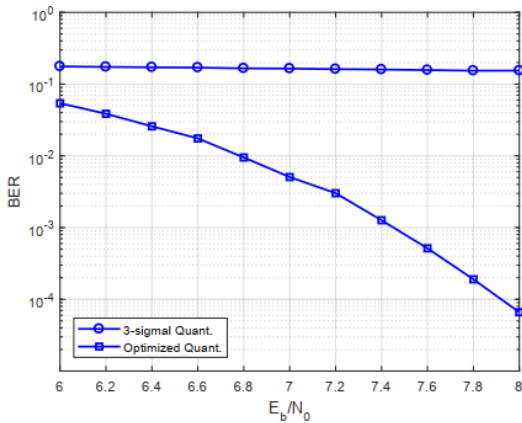
Như được kì vọng, các ngưỡng giải mã lặp khi sử dụng bộ lượng tử hóa tối ưu là thấp hơn đáng kể so với bộ lượng tử hóa three-sigma thông thường ở tất cả các cấu hình MIMO. Các kết quả tương tự cũng được quan sát thấy ở tỉ lệ mã hóa R lần lượt là $2/3$ và $3/4$, được trình bày chi tiết ở Bảng 3.3 và Bảng 3.4 trong luận án.

b. *Hiệu năng (BER)*: Mô phỏng được thực hiện sử dụng mô hình hệ thống được mô tả tại Hình 3.1 và các tham số mô phỏng được trình bày trong Bảng 3.5 dưới đây.

Bảng 3.5. Tham số mô phỏng đánh giá bộ lượng tử hóa tối ưu

STT	Tham số	Thiết lập
1	Cấu hình MIMO	10 × 10 40 × 40 100 × 100
2	Tỉ lệ mã	R12 R23 R34
3	Độ dài mã	2400 bit
4	Bộ ADC	Đồng nhất tối ưu 1-bit

Kết quả mô phỏng được trình bày trong Hình 3.3 - Hình 3.11 của luận án, có thể thấy đường cong tỉ lệ lỗi bit (BER) của bộ lượng tử tối ưu đề xuất thấp hơn nhiều so với bộ lượng tử three-sigma ở tất cả các mức công suất SNR.

**Hình 3.3.** Hiệu năng ở MIMO 10 x 10, R = 1/2**Hình 3.4.** Hiệu năng ở MIMO 10 x 10, R = 2/3

Hơn nữa, bộ lượng tử three-sigma có hiệu năng thấp ở tất cả các tỉ lệ mã hóa và cấu hình MIMO. Ngay cả khi số tăng lên đến 100, đường BER hiệu năng của bộ lượng tử three-sigma vẫn xảy ra hiện tượng lỗi sàn. Như vậy, giới hạn cắt là đặc biệt quan trọng với các bộ ADC 1-bit, như cũng được chứng minh từ các phân tích, nghiên cứu bằng lý thuyết trong Chương 2. Bên cạnh đó, các mã protograph LPDC nên được thiết kế lại hoặc tối ưu lại cho từng trường hợp cụ thể của ADC 1-bit để ngăn chặn sự suy giảm hiệu năng ở tỉ lệ mã hóa cao và cấu hình MIMO thấp. Nội dung tiếp theo trình bày nghiên cứu thiết kế họ mã protograph LDPC có tỉ lệ mã thích ứng cho hệ thống truyền thông mã hóa MIMO cỡ lớn với bộ ADC độ phân giải thấp 1 bit

3.2. Thiết kế mã P-LDPC có tỉ lệ mã thích ứng

Nội dung 3.2 trình bày phương pháp thiết kế họ mã P-LDPC có tỉ lệ mã thích ứng. Quá trình thiết kế các mã protograph có tỉ lệ thích ứng với độ dài khối thông tin cố định, gồm hai giai đoạn:

- *Giai đoạn thiết kế mã con:* Là giai đoạn thiết kế một mã con cơ sở có tỉ lệ mã hóa cao bằng kỹ thuật kéo dài mã (lengthening).
- *Giai đoạn thiết kế mã có tỉ lệ mã thích ứng:* Mã con tỉ lệ mã hóa cao được tìm thấy ở trên được sử dụng để thiết kế các protograph tỉ lệ mã hóa thấp hơn bằng cách thêm cùng một số lượng nút biên (cột) và nút kiểm tra (hàng).

3.2.1. Bài toán thiết kế mã P-LDPC

Việc thiết kế các mã protograph LDPC có thể được trình bày thông qua một bài toán tối ưu như sau:

$$\mathbf{B}_{\in B_{E^+}}^{min} \quad \xi(B, N, M, Iter_{max}) \quad (3.18)$$

$$f_r(B) \leq 0, \quad r = 1, 2, \dots, R$$

Với B_{E^+} là một tập tất cả các ma trận chứa các phần tử không âm, đầu ra của hàm chi phí $\xi(B, N, M, Iter_{max})$ là giá trị ngưỡng giải mã lặp cần tìm kiếm. Để bắt đầu, các ràng buộc trên cấu trúc của ma trận cơ sở \mathbf{B} khởi đầu ở tỉ lệ mã hóa là 1/2 được thiết lập.

$$\mathbf{B}_{1/2} = \begin{pmatrix} e_{1,1} & e_{1,2} & e_{1,3} & e_{1,4} & 0 & 1 \\ e_{2,1} & e_{2,2} & e_{2,3} & e_{2,4} & 1 & 1 \\ e_{3,1} & e_{3,2} & e_{3,3} & e_{3,4} & 1 & 0 \end{pmatrix}_{3 \times 6} \quad (3.19)$$

Cuối cùng, các ràng buộc tương ứng $f_r(B)$ của bài toán tối ưu cho ma trận $\mathbf{B}_{1/2}$ ở trên như biểu thức (3.20) dưới đây:

$$\left\{ \begin{array}{l} f_1(B_{1/2}) : e_{i,j} \geq 0, \quad \forall i = 1, 2, 3, \quad j = 1, \dots, 4 \\ f_2(B_{1/2}) : e_{i,j} \leq 3, \quad \forall i = 1, 2, 3, \quad j = 1, \dots, 4 \\ f_3(B_{1/2}) : (e_{1,1} + e_{2,1} + e_{3,1}) \leq 3 \\ f_4(B_{1/2}) : (e_{1,2} + e_{2,2} + e_{3,2}) \leq 3 \\ f_5(B_{1/2}) : (e_{1,3} + e_{2,3} + e_{3,3}) \leq 3 \\ f_6(B_{1/2}) : (e_{1,4} + e_{2,4} + e_{3,4}) \leq 2 \end{array} \right. \quad (3.20)$$

3.2.2. Thiết kế mã P-LDPC cho LS-MIMO với bộ ADC tối ưu 1-bit

Quá trình thiết kế được thực hiện với tham số: Số lần lặp tối đa $Iter_{max} = 50$, cấu hình MIMO 10×10 . Các ma trận cơ sở tối ưu của mã P-LDPC tỉ lệ mã hóa 1/2 và 2/3 được trình bày dưới đây:

$$\mathbf{B}_{1/2}^{50 iter} = \begin{pmatrix} 3 & 2 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 2 & 2 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 1 & 2 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}_{3 \times 6} \quad (3.21)$$

$$\mathbf{B}_{2/3}^{50 iter} = \begin{pmatrix} 2 & 0 & 2 & 3 & 2 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 2 & 2 & 2 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 2 & 1 & 2 & 1 & 2 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}_{3 \times 9} \quad (3.22)$$

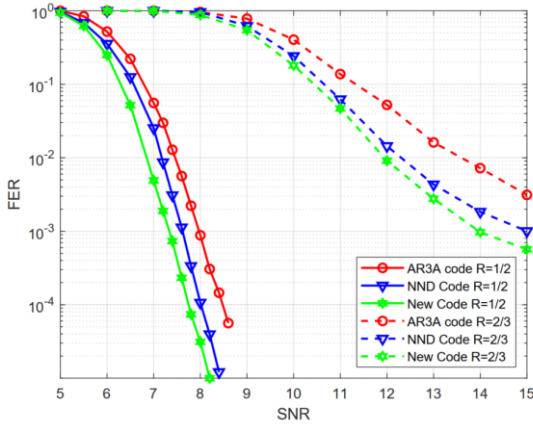
3.2.3. Mô phỏng và đánh giá kết quả

Mô phỏng được thực hiện với mô hình hệ thống được trình bày trong Hình 3.1 và các tham số mô phỏng được trình bày chi tiết trong Bảng 3.6.

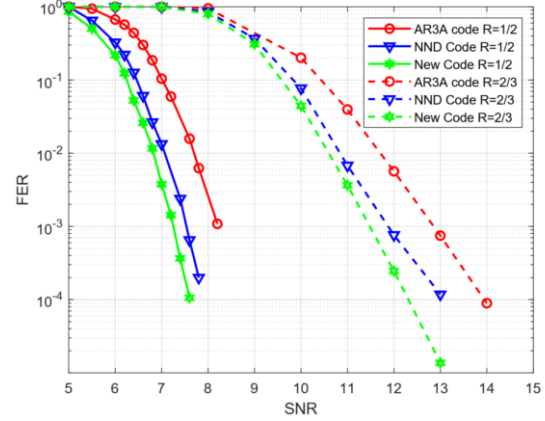
Bảng 3.6. Tham số mô phỏng đánh giá hiệu năng các mã P-LDPC đề xuất

STT	Tham số	Thiết lập
1	Cấu hình MIMO	10×10 100×100 10×40 10×100
2	Tỉ lệ mã	R12 R23
3	Độ dài mã	2400 bit
4	Bộ ADC	Đồng nhất tối ưu 1-bit
5	Mã P-LDPC	New Code ARA3 NND
6	Số lần lặp tách sóng và giải mã	50

Quan sát kết quả mô phỏng, có thể thấy rằng mã P-LDPC mới được đề xuất không có hiện tượng lỗi sàn ở $FER = 10^{-4}$. Thuộc tính này của các mã được đề xuất giúp chúng hữu ích cho hệ mạng không dây mới, nơi thường yêu cầu độ tin cậy rất cao. Hơn nữa, độ lợi mã hóa đạt được từ 0,3 dB tới 0,7 dB tại $FER = 10^{-4}$ khi so sánh ở tỉ lệ mã hóa $R = 1/2$. Ở tỉ lệ mã hóa cao hơn $R = 2/3$, độ lợi mã hóa là từ khoảng 0,5 dB tới 1,0 dB khi so sánh lần lượt với mã NND và mã AR3A. Độ lợi mã hóa này gần tương tự nhau ở các cấu hình MIMO 10×10 và 100×100 .



Hình 3.12. Hiệu năng FER ở cấu hình LS-MIMO 10×10



Hình 3.13. Hiệu năng ở cấu hình LS-MIMO 100×100

3.3. Kết luận chương

Phần đầu của chương 3 nghiên cứu và kiểm chứng độ tin cậy của bộ ADC tối ưu được đề xuất thông qua việc đánh giá hiệu năng của bộ ADC này ở độ phân giải 1-bit với bộ lượng tử three-sigma và bộ lượng tử vô hướng tối ưu. Kết quả mô phỏng xác minh rằng bộ ADC vô hướng tối ưu là hữu ích và đem lại những cải thiện đáng kể về hiệu năng cho hệ thống thông tin MIMO cỡ lớn. Bên cạnh đó, nên sử dụng một số lượng lớn ăng ten để làm giảm các tác động tiêu cực của nhiễu lượng tử, gây ra bởi độ phân giải thấp 1-bit của bộ ADC, đặc biệt là cho tỉ lệ mã hóa cao. Cuối cùng, xuất phát từ quan sát rằng hiệu năng của hệ thống suy giảm nghiêm trọng ở tỉ lệ mã cao và cấu hình MIMO thấp, nghiên cứu trong luận án đề xuất thiết kế lại các mã protograph LDPC có tỉ lệ mã thích ứng cho từng cấu hình cụ thể của ADC 1-bit trong các hệ thống thông tin mã hóa MIMO cỡ lớn.

Phần cuối của chương giải quyết khuyến nghị ở phần đầu về việc thiết kế lại các mã P-LDPC cho hệ thống LS-MIMO ADC 1-bit. Các mã protograph LDPC mới được đề xuất mang lại độ lợi mã hóa từ 0,3 dB tới 0,7 dB so với các mã P-LDPC hiện đại được nghiên cứu gần đây. Những lợi ích mã hóa này là đáng kể, đặc biệt là đối với hệ thống truyền thông không dây tốc độ cao, nơi mà nguồn điện cung cấp cho các thiết bị hoạt động bằng pin bị hạn chế một cách nghiêm ngặt. Tuy nhiên các lợi ích về mã hóa dường như biến mất với cấu hình LS-MIMO có $M/N < 1$, hay có thể nói rằng việc thiết kế lại các mã P-LDPC cho các hệ thống LS-MIMO với ADC cấu hình cực thấp vẫn còn có những điểm còn hạn chế. Xuất phát từ ý tưởng đó, có lẽ cần một hướng tiếp cận mới khác để giải quyết triệt để hơn vấn đề hiệu quả năng lượng và cải thiện hiệu suất phổ cho các hệ thống truyền thông mã hóa LS-MIMO với ADC độ phân giải thấp. Đây chính là nội dung nghiên cứu được trình bày trong chương 4 dưới đây.

CHƯƠNG 4

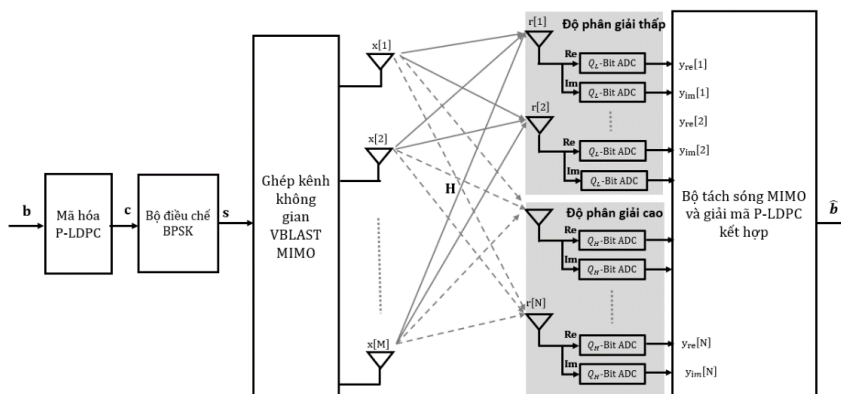
THUẬT TOÁN TÁCH SÓNG VÀ GIẢI MÃ P-LDPC CHO HỆ THỐNG LS-MIMO VỚI ADC HỖN HỢP

Tóm tắt: Hiệu năng tổng thể của của hệ thống MIMO cỡ lớn với ADC độ phân giải thấp đã được nghiên cứu cải thiện thông qua cải thiện hiệu suất phổ (SE) và tiết kiệm năng lượng (EE) như được trình bày lần lượt trong chương 2 và chương 3 ở trên. Sự cải thiện về hiệu năng này đạt được là nhờ việc tối ưu bộ ADC độ phân giải thấp và thiết kế lại giải pháp mã P-LDPC cho hệ thống thông tin MIMO cỡ lớn. Nội dung chương 4 tập trung nghiên cứu về hiệu năng của hệ thống MIMO cỡ lớn với ADC độ phân giải hỗn hợp thông qua thuật toán tách sóng MIMO và giải mã P-LDPC kết hợp. Một thuật toán tách sóng MIMO và giải mã P-LDPC mới sử dụng đồ thị hai lớp ở phía thu được nghiên cứu đề xuất cho trường hợp các bộ ADC độ phân giải hỗn hợp. Trong đó, thành phần đồ thị tách sóng MIMO được chia thành hai đồ thị con, tương ứng với thành phần ăng ten có độ phân giải thấp và độ phân giải cao. Hơn nữa, độ phân giải cao nhất của các bộ ADC được sử dụng cho nhóm ăng ten độ phân giải cao chỉ là 5 bit. Đây cũng là một điểm mới so với các nghiên cứu về bộ ADC có độ phân giải hỗn hợp trước đây, vốn sử dụng độ phân giải cao là 8-12 bit.

Để kiểm chứng tính đúng đắn của thuật toán mới được đề xuất, một phiên bản mới của thuật toán truyền thông tin ngoại lai cho các hệ thống MIMO cỡ lớn (LS-MIMO-PEXIT) cũng được đề xuất, được đặt tên là MIXED-ADC-LS-MIMO-PEXIT. Các kết quả phân tích thông qua ngưỡng giải mã lặp sử dụng thuật toán MIXED-ADC-LS-MIMO-PEXIT và kết quả mô phỏng sử dụng thuật toán mới được đề xuất đã kiểm chứng tính chính xác của thuật toán mới. Sau đó, thuật toán mới đề xuất được sử dụng để thực hiện mô phỏng cho hệ thống MIMO cỡ lớn với nhiều tỉ lệ hỗn hợp độ phân giải khác nhau của bộ ADC. Các kết quả cho thấy hiệu năng tổng thể của hệ thống được cải thiện đáng kể ở tất cả các tỉ lệ hỗn hợp độ phân giải so với chỉ sử dụng duy nhất một mức độ phân giải. Thuật toán tách sóng MIMO và giải mã P-LDPC cho hệ thống thông tin MIMO cỡ lớn với bộ ADC độ phân giải hỗn hợp là đóng góp chính của chương này trong luận án và đã được công bố trong trong [CT6].

4.1. Mô hình hệ thống

Mô hình hệ thống sử dụng trong nghiên cứu được trình bày trong Hình 4.1 dưới đây.



Hình 4.1. Mô hình kênh của hệ thống truyền thông mã hóa LS-MIMO với ADC hỗn hợp

Quan sát phía thu, điểm khác biệt trong nghiên cứu này là sử dụng $2 \times N$ cặp ADC có độ phân giải hỗn hợp thay vì sử dụng các ADC đồng nhất về độ phân giải. Trong khuôn khổ luận án này,

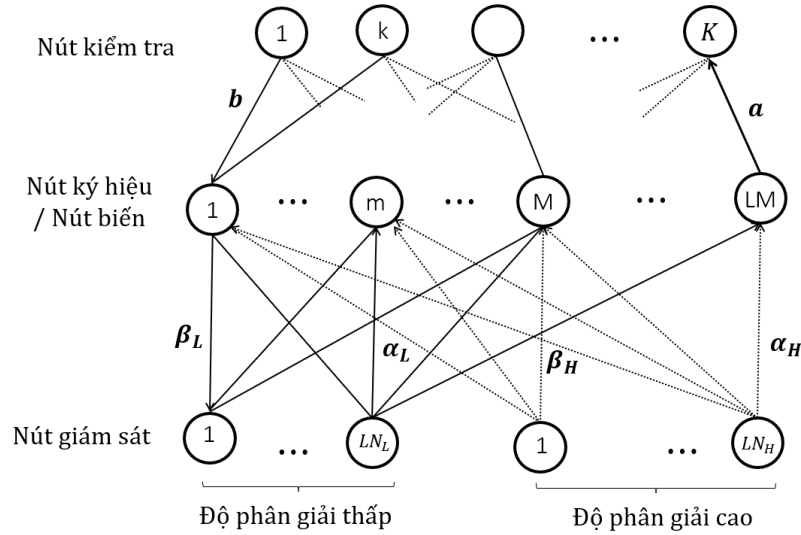
các ADC hỗn hợp gồm các ADC độ phân giải thấp gồm 1-bit và Ternary-ADC, các ADC độ phân giải cao là từ 3-bit tới 5-bit. Giá trị cắt tối ưu và số liệu hiệu năng φ_z tối ưu tương ứng cho các mức độ phân giải khác nhau của bộ lượng tử hóa tối ưu được liệt kê trong Bảng 4.1.

Bảng 4.1. Giá trị cắt tối ưu và tham số hiệu năng φ của các bộ ADC độ phân giải thấp

	1-ADC	T-ADC	2-ADC	3-ADC	4-ADC	5-ADC
L_s	1,699	1,922	2,091	2,461	2,791	3,028
φ	0,6261	0,8095	0,8796	0,9628	0,9885	0,9963

4.2. Thuật toán tách sóng và giải mã P-LDPC cho LS-MIMO với ADC hỗn hợp

Nội dung 4.2 trình bày thuật toán tách sóng và giải mã kết hợp dựa trên đồ thị hai lớp đề xuất cho hệ thống MIMO cỡ lớn với bộ ADC độ phân giải hỗn hợp. Trong đó có hai loại nút giám sát là: Nút giám sát độ phân giải thấp và nút giám sát độ phân giải cao như trong Hình 4.2.



Hình 4.2. Đồ thị hai lớp thuật toán tách sóng và giải mã cho ADC hỗn hợp

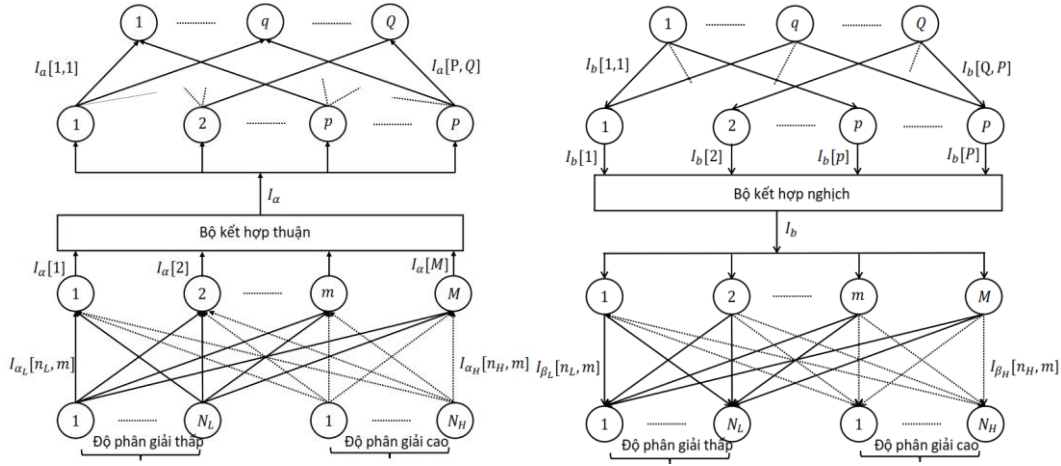
Các thông điệp được truyền giữa các nút trên đồ thị hai lớp và công thức để tính toán được trình bày chi tiết trong phần 4.2 của luận án.

4.3. Thuật toán PEXIT đề xuất cho hệ thống LS-MIMO với ADC hỗn hợp

Phiên bản thuật toán LS-MIMO-PEXIT cho hệ thống LS-MIMO không thể áp dụng cho trường hợp sử dụng các bộ ADC độ phân giải hỗn hợp. Do vậy, nội dung tiếp theo trình bày thuật toán PEXIT đề xuất mới cho hệ thống LS-MIMO với các bộ ADC độ phân giải hỗn hợp.

4.3.1 Đồ thị hai lớp MIMO và P-LDPC kết hợp

Thuật toán đề xuất được minh họa thông qua một đồ thị hai lớp, là phiên bản thu nhỏ của đồ thị hai lớp trong Hình 4.2. Trong trường hợp này, các nút biến và các nút ký hiệu được phân tách thành hai thành phần riêng biệt để thuận tiện cho việc phân tích luồng thông tin tương ứng. Luồng thông tin tương hỗ trao đổi trong đồ thị được mô tả chi tiết như trong Hình 4.3 (a) và Hình 4.3 (b). Trong đó, có sử dụng một bộ kết hợp thuận cho luồng thông tin đi và một bộ kết hợp nghịch cho luồng thông tin trở lại.



Hình 4.3. Luồng thông tin thuận (a) và Luồng thông tin nghịch (b) trong đồ thị hai lớp

Chi tiết luồng thông tin và biểu thức tính toán các thông điệp truyền đi được trình bày trong phần 4.3.2 và 4.3.3 về luồng thông tin tương hỗ thuận và nghịch.

4.3.5. Thuật toán PEXIT đề xuất cho các hệ thống truyền thông LS-MIMO với ADC hỗn hợp

Thuật toán PEXIT đề xuất trong nghiên cứu này của luận án được xây dựng bằng cách khai thác các hàm thông tin tương hỗ trình bày ở nội dung trước với các tham số đầu vào như sau:

- Hệ thống LS-MIMO cho trước với cấu hình là $M \times N$
- Một ma trận cơ sở B có kích thước $Q \times P$
- Mức tín hiệu kênh E_b/N_0
- Các mức độ phân giải của bộ ADC là Q_L (độ phân giải thấp) và Q_H (độ phân giải cao)

Thuật toán Mixed-ADC-LS-MIMO-PEXIT được trình bày như dưới đây:

- **Bước 0: Khởi tạo**
 - Lựa chọn ma trận cơ sở: B
 - Tính toán tỉ lệ mã: $R = \frac{P-Q}{\sum_{p=1}^P P_p}$
 - Tính toán giá trị mật độ phổ công suất nhiễu $N_0 = \frac{M}{R(E_b/N_0)}$
 - Gán giá trị cho φ_L và φ_H lần lượt từ Bảng 4.1 tương ứng với mức độ phân giải Q_L và Q_H
 - Thiết lập giá trị ban đầu cho $I_{\beta_L} = 0$ và $I_{\beta_H} = 0$
 - Sinh F các ma trận kênh sửa lỗi LS-MIMO $\{H_{\zeta,1}, H_{\zeta,2}, \dots, H_{\zeta,F}\}, \zeta \in \{L, H\}$, các ma trận sinh tuân theo phân phối Rayleigh
- **Bước 1: Cập nhật thông tin từ nút giám sát tới nút biên**
 - For $f = 1, 2, \dots, F$
 - For $m = 1, 2, \dots, M$ và $n_\zeta = 1, 2, \dots, N_\zeta$ với $\zeta \in \{L, H\}$
 - Tính $\sigma_{\beta_\zeta} = J^{-1}(I_{\beta_\zeta})$
 - Sinh $\beta_{\zeta,f}[m, n_\zeta] \sim \mathcal{N}(\pm \frac{\sigma_{\beta_\zeta}^2}{2}, \sigma_{\beta_\zeta}^2)$

- Ước lượng xấp xỉ thông tin mềm cho $\hat{x}_f[m, n_\zeta] = \tanh\left(\frac{\beta_{\zeta,f}[m, n_\zeta]}{2}\right)$
- Tính $\Psi_{\zeta,f}[n_\zeta, m]$ sử dụng biểu thức (12)
- For $m = 1, 2, \dots, M$
 - Tính $I_{\alpha,f}[m]$ sử dụng biểu thức (4.27)
- Tính giá trị trung bình của $I_{\alpha,f}$ trên tất cả các kênh sửa lỗi (realizations)

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

- For $p = 1, 2, \dots, P$, thực hiện tính $I_\alpha[p]$ qua biểu thức

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

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

- **Bước 2: Cập nhật thông tin từ nút biên tới nút kiểm tra**

- For $p = 1, 2, \dots, P$ và $q = 1, 2, \dots, Q$, thực hiện tính giá trị $I_\alpha[p, q]$
 - Nếu $B[p, q] \neq 0$, thực hiện tính giá trị $I_\alpha[p, q]$ sử dụng biểu thức (30)
 - Nếu $B[p, q] = 0$, gán giá trị $I_\alpha[p, q] = 0$

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

- For $q = 1, 2, \dots, Q$ và $p = 1, 2, \dots, P$ thực hiện tính giá trị $I_b[q, p]$
 - Nếu $B[q, p] \neq 0$, thực hiện tính giá trị $I_b[q, p]$ sử dụng biểu thức (31)
 - Nếu $B[q, p] = 0$, gán giá trị $I_b[q, p] = 0$

- **Bước 4: Cập nhật thông tin từ nút ký hiệu tới nút giám sát**

- For $f = 1, 2, \dots, F$
 - For $m = 1, 2, \dots, M$ và $n_L = 1, 2, 3, \dots, N_L$, thực hiện tính giá trị $I_{\beta_L,f}[m, n_L]$ sử dụng biểu thức (4.34)
 - For $m = 1, 2, \dots, M$ và $n_H = 1, 2, 3, \dots, N_H$, thực hiện tính giá trị $I_{\beta_H,f}[m, n_H]$ sử dụng biểu thức (4.35)
- For $m = 1, 2, \dots, M$ và $n_L = 1, 2, 3, \dots, N_L$, tính

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

- For $m = 1, 2, \dots, M$ và $n_H = 1, 2, 3, \dots, N_H$, tính

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

- **Bước 5: Tính thông tin trong hố APP-LLR**

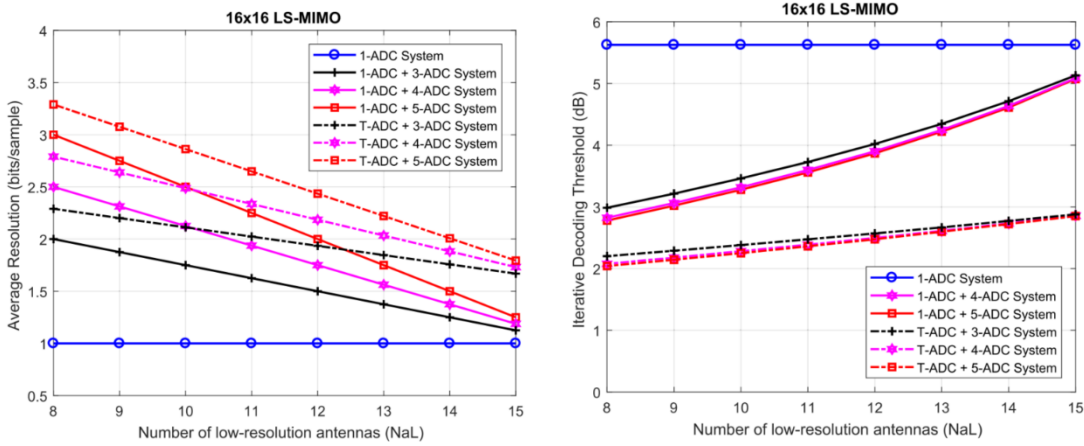
- For $p = 1, 2, \dots, P$, thực hiện tính giá trị $I_\Gamma[p]$ sử dụng biểu thức (4.36)

- **Bước 6: Kiểm tra giá trị $I_{\Gamma}[p]$ và lặp lại Bước 1 – Bước 5 cho đến khi $I_{\Gamma}[p] = 1, \forall p = 1, 2, \dots, P$**

Thuật toán sẽ kết thúc khi tồn tại E_b/N_0 nằm trên ngưỡng giải mã lặp mong đợi. Thuật toán mới đề xuất cho các ADC độ phân giải hỗn hợp khác với thuật toán PEXIT nguyên thủy cho ADC cùng độ phân giải trong mọi bước, ngoại trừ Bước 3. Trong phần sau, thuật toán PEXIT mới đề xuất được sử dụng để đánh giá hiệu năng của hệ thống truyền thông LS-MIMO với ADC hỗn hợp.

4.4. Đánh giá thuật toán ADC-Mixed-LS-MIMO-PEXIT

Thuật toán ADC-Mixed-LS-MIMO-PEXIT được đề xuất ở Phần 4.3 được sử dụng để tính toán ngưỡng giải mã lặp của mã P-LDPC được tối ưu cho hệ thống LS-MIMO với ADC 1-bit trong công trình [CT5]. Ngưỡng giải mã lặp và độ phân giải trung bình của hệ thống 1-ADC và hệ thống hỗn hợp-ADC với cấu hình MIMO 16×16 được đưa ra trong Hình 4.4.



Hình 4.4. Độ phân giải trung bình và ngưỡng giải mã lặp của các ADC hỗn hợp ở cấu hình MIMO 16×16

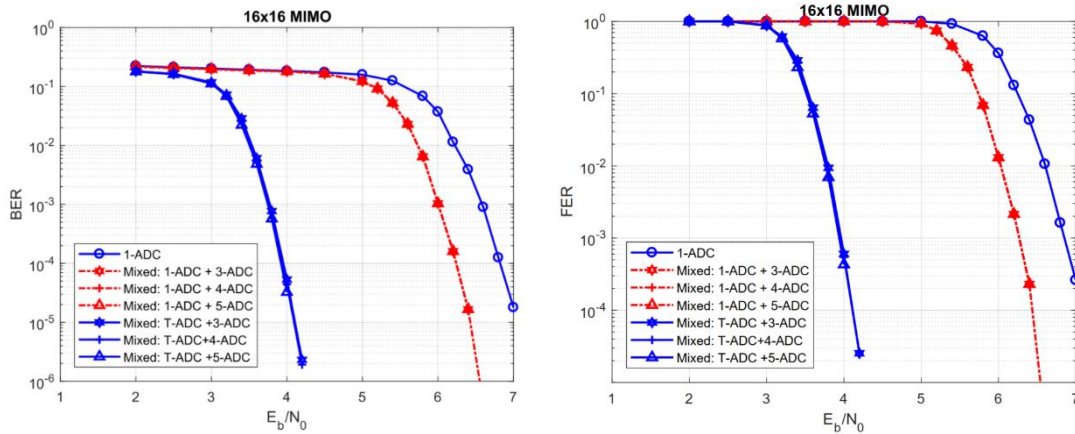
Quan sát Hình 4.4, ngưỡng giải mã lặp của hệ thống ADC hỗn hợp thấp hơn của hệ thống 1-ADC với khoảng cách nhỏ nhất tại điểm $N_L = 15$ và $N_H = 1$ và khoảng cách lớn nhất tại $N_L = 8$ và $N_H = 8$. Cụ thể, khoảng cách nhỏ nhất 0,55 dB được quan sát khi số lượng ăng ten có 1-ADC là $N_L = 15$ và số lượng ăng ten có 5-ADC là $N_H = 1$, hay tương đương 6,25% số ăng ten thu được trang bị ADC độ phân giải cao. Khi tăng tỉ lệ số lượng ăng ten có độ phân giải cao (5-ADC) lên đến 50%, khoảng cách ngưỡng giải mã lặp tăng đáng kể lên khoảng 2,843 dB. Sự cải thiện hiệu suất đáng kể này bắt nguồn từ thực tế là thông tin tương hỗ I_{α} , trong (4.27), được tăng lên khi số lượng ăng ten có độ phân giải cao tăng lên. Tuy nhiên, việc tăng số lượng ăng ten có độ phân giải cao nên được thực hiện cẩn thận để đảm bảo khía cạnh hiệu quả năng lượng.

Xu hướng tương tự cũng được quan sát khi cấu hình MIMO hỗn hợp là 16×32 . Tuy nhiên, khi so sánh giá trị độ lợi này với trường hợp 6,25% số ăng ten thu được trang bị các ADC độ phân giải cao trong trường hợp cấu hình MIMO 16×16 , có thể thấy độ lợi của hệ thống LS-MIMO 16×32 với ADC hỗn hợp giảm xuống. Trong phần tiếp theo, các mô phỏng được thực hiện để xác minh các phân tích lý thuyết về hiệu năng thông qua ngưỡng giải mã lặp ở trên.

4.5. Mô phỏng hệ thống với thuật toán tách sóng MIMO và giải mã P-LDPC kết hợp

Mô phỏng trong phần 4.5 được thực hiện theo mô hình hệ thống trình bày tại Hình 4.1 với bộ ADC đồng nhất tối ưu đề xuất trong [CT3], mã P-LDPC được thiết kế trong [CT5] và thuật toán tách sóng MIMO và giải mã P-LDPC cho các bộ ADC hỗn hợp trong [CT6].

Quan sát sự kết hợp của $N_L = 15$ ăng ten độ phân giải thấp và $N_H = 1$ ăng ten độ phân giải cao được trình bày trong Hình 4.6 (a) và (b). Với phần lớn các ăng ten thu có ADC 1-bit và số lượng tối thiểu ăng ten thu có ADC 5-bit có thể cung cấp độ lợi mã hóa khoảng 0,5 dB tại Mức BER hoặc FER 10^{-4} . Sự cải thiện rõ ràng hơn được quan sát khi các Ternary-ADC được sử dụng trong nhóm ăng ten có độ phân giải thấp. Ở mức BER / FER 10^{-4} , độ lợi mã hóa của hệ thống ADC hỗn hợp là khoảng 2,8 dB so với hệ thống chỉ sử dụng ADC 1-bit và 2,2 dB so với hệ thống ADC hỗn hợp với sự kết hợp của ADC 1-bit và ADC 5-bit. Độ lợi thu được bắt nguồn từ sự gia tăng độ phân giải trung bình của hệ thống ADC hỗn hợp với các Ternary-ADC.



Hình 4.6. Hiệu năng với cấu hình MIMO: 16×16 và ADC hỗn hợp: $N_L = 15$ và $N_H = 1$

Hành vi tương tự của các đường cong hiệu năng BER và FER cũng được quan sát thấy ở tỉ lệ ăng ten hỗn hợp là $N_L = 14$, $N_H = 2$ và hỗn hợp $N_L = 8$, $N_H = 8$, được thể hiện ở Hình 4.7 và Hình 4.8 trong luận án. Hơn nữa, hệ thống ADC hỗn hợp dựa trên Ternary-ADC vẫn có lợi thế tiết kiệm năng lượng hơn so với hệ thống hỗn hợp ADC dựa trên ADC 1-bit trong khi có độ phân giải trung bình thấp hơn hoặc bằng.

Xu hướng tương tự cũng diễn ra với kết quả mô phỏng cho cấu hình MIMO 16×32 ở ba tỷ lệ ăng ten hỗn hợp khác nhau được thể hiện chi tiết ở Hình 4.9 - Hình 4.11 trong luận án. Sự phù hợp giữa kết quả lý thuyết và mô phỏng ở các cấu hình khác nhau một lần nữa lại xác nhận phân tích lý thuyết và tính hữu dụng của thuật toán Mixed-ADC-LS-MIMO PEXIT đề xuất.

4.5. Kết luận chương

Trong chương 4, hai thuật toán mới được đề xuất là thuật toán tách sóng và giải mã kết hợp trên đồ thị hai lớp và thuật toán PEXIT tương đương để phân tích hiệu năng của mã protograph LDPC cho các hệ thống truyền thông LS-MIMO sử dụng ADC hỗn hợp. Để kiểm chứng, thuật toán PEXIT mới đề xuất này được sử dụng để phân tích hiệu năng của hệ thống LS-MIMO sử dụng mã protograph LPDC với bộ ADC hỗn hợp trong nhiều các cấu hình kết hợp ADC hỗn hợp khác nhau. Các kết quả thu được trong hai cấu hình MIMO được lựa chọn (16×16 và 16×32) ở các tỷ lệ ăng ten hỗn

hợp khác nhau xác nhận độ chính xác của thuật toán Mixed-ADC-LS-MIMO-PEXIT được đề xuất. Hơn nữa, kết quả mô phỏng sử dụng thuật toán tách sóng MIMO và giải mã P-LDPC kết hợp cho thấy rằng hệ thống MIMO cỡ lớn với ADC hỗn hợp đạt được độ lợi cao nhất tại điểm cực trị nơi chỉ có một ăng ten thu được trang bị với các ADC độ phân giải cao. Cả kết quả phân tích và mô phỏng đều chỉ ra rằng mức độ phân giải tối đa cho ADC độ phân giải cao là 4 hoặc 5 bit/mẫu. Ngoài độ phân giải này, mức tăng thêm là nhỏ trong khi mức tiêu thụ điện năng có thể tăng lên theo cấp số nhân. Đáng chú ý, hệ thống ADC hỗn hợp dựa trên Ternary-ADC luôn cung cấp độ lợi về hiệu năng tốt hơn so với hệ thống hỗn hợp ADC dựa trên ADC 1-bit ở cùng độ phân giải trung bình hoặc thậm chí thấp hơn. Cuối cùng, dựa trên các kết quả mô phỏng, để cải thiện hiệu năng hệ thống hơn nữa, mã protograph LDPC nên được thiết kế lại cùng với/hoặc thiết kế riêng cho từng tham số tỷ lệ ăng ten hỗn hợp để phù hợp giữa bậc của nút biến trong ma trận protograph với mức độ phân giải của nhóm ăng ten có độ phân giải thấp và độ phân giải cao.

KẾT LUẬN

Mục đích của luận án là nghiên cứu thuật toán tách sóng MIMO và giải mã P-LDPC nhằm cải thiện hiệu năng tổng thể của hệ thống thông tin MIMO cỡ lớn với các bộ ADC độ phân giải thấp từ 1 tới 2 bit. Những kết quả, đóng góp mới được trình bày trong luận án gồm:

- *Nghiên cứu cải tiến bộ chuyển đổi ADC đồng nhất, độ phân giải thấp cho hệ thống MIMO cỡ lớn. Đề xuất giải pháp tính ngưỡng giới hạn cắt không phụ thuộc số lượng ăng ten phát để thiết kế các bộ ADC đồng nhất với độ phân giải thấp tùy biến. Các kết quả mô phỏng cho thấy rằng sự cải thiện hiệu suất phổ đường lên của bộ lượng tử hóa tối ưu này là rất đáng kể cho các hệ thống LS-MIMO.*
- *Đề xuất giải pháp và thiết kế mã P-LDPC phù hợp cho các hệ thống MIMO cỡ lớn với bộ ADC độ phân giải 1 bit cho phép cải thiện hiệu năng hệ thống. Các mã P-LDPC mới được đề xuất mang lại mức cải thiện năng lượng mã hóa từ 0,3 dB tới 0,7 dB so với các mã P-LDPC hiện đại được công bố gần đây. Những lợi ích mã hóa này là đáng kể, đặc biệt là cho hệ thống truyền thông không dây tốc độ cao, nơi mà nguồn điện cung cấp cho các thiết bị hoạt động bằng pin bị hạn chế một cách nghiêm ngặt.*
- *Đề xuất thuật toán tách sóng và giải mã P-LDPC kết hợp cho hệ thống MIMO cỡ lớn với các bộ ADC độ phân giải hỗn hợp. Các kết quả phân tích và mô phỏng cho hai cấu hình MIMO được lựa chọn (16×16 và 16×32), ở các tỷ lệ hỗn hợp ăng ten khác nhau xác nhận tính hữu dụng và độ chính xác của thuật toán được đề xuất. Hơn nữa, các kết quả cũng cho thấy hiệu năng tổng thể của hệ thống MIMO cỡ lớn được cải thiện đáng kể ở tất cả các tỉ lệ hỗn hợp độ phân giải của bộ ADC so với sử dụng duy nhất một mức độ phân giải.*

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ

- [CT1] T. V. Nguyen, **H. N. Dang**, and H. T. Nguyen, “Delay-Limited Rate-Compatible Protograph LDPC Codes,” *International Journal of Engineering Trends and Technology*, vol. 67, no. 7, pp. 115–123, Jul. 2019, doi: 10.14445/22315381/IJETT-V67I7P223.
- [CT2] V. Q. Pham, **H. N. Dang**, T. V. Nguyen, and H. T. Nguyen, “Performance of deep learning LDPC coded communications in large scale MIMO channels,” *Proceedings - 2019 6th NAFOSTED Conference on Information and Computer Science, NICS 2019*, pp. 214–218, Dec. 2019, doi: 10.1109/NICS48868.2019.9023820.
- [CT3] **H. N. Dang**, T. V. Nguyen, and H. T. Nguyen, “Improve Uplink Achievable Rate for Massive MIMO Systems with Low-Resolution ADCs,” *ICCE 2020 - 2020 IEEE 8th International Conference on Communications and Electronics*, pp. 99–104, Jan. 2021, doi: 10.1109/ICCE48956.2021.9352104.
- [CT4] **H. N. Dang**, T. V. Nguyen, and H. T. Nguyen, “On The Performance Of 1-Bit ADC In Massive MIMO Communication Systems,” *REV Journal on Electronics and Communications*, vol. 10, no. 3–4, Apr. 2021, doi: 10.21553/REV-JEC.255.
- [CT5] **H. N. Dang** and T. V. Nguyen, “Protograph LDPC Code Design For LS-MIMO 1-bit ADC Systems,” *REV Journal on Electronics and Communications*, vol. 0, no. 0, May 2021, doi: 10.21553/REV-JEC.266.
- [CT6] **H. N. Dang**, H. T. Nguyen, and T. V. Nguyen, “Joint Detection and Decoding of Mixed-ADC Large-Scale MIMO Communication Systems With Protograph LDPC Codes,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 101013–101029, July 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3097444.