

Một số kết quả đạt được của luận án

1. Đề xuất thuật toán lựa chọn ăng-ten phát theo nhóm dựa trên kỹ thuật phân tách SVD và phép tính định thức ma trận kênh truyền. Những nhóm ăng-ten có đóng góp nhiều nhất vào tổng dung lượng kênh truyền sẽ được lựa chọn.
2. Đề xuất bộ tiền mã hóa theo nhóm LR-LGP cho hệ thống Massive MIMO hoạt động trong điều kiện kênh truyền hoàn hảo. Bộ toán tiền mã hóa theo nhóm đề xuất có độ phức tạp thấp hơn đáng kể so với thuật toán tiền mã hóa LC-RBD-LR-ZF, trong khi phẩm chất BER của thuật toán đề xuất gần tiệm cận với thuật toán LC-RBD-LR-ZF khi số lượng các nhóm tăng lên.
3. Đề xuất bộ tiền mã hóa ZF-GP-LR hoạt động trong điều kiện kênh truyền có tương quan theo hàm mũ. Độ phức tạp của thuật toán đề xuất thấp hơn đáng kể so với thuật toán LC-RBD-LR-ZF, trong khi phẩm chất BER của thuật toán đề xuất gần tiệm cận với thuật toán LC-RBD-LR-ZF trong vùng SNR thấp và tốt hơn thuật toán LC-RBD-LR-ZF trong vùng SNR cao.
4. Đề xuất bộ tiền mã hóa có độ phức tạp thấp PCA-LP hoạt động trong điều kiện kênh truyền không hoàn hảo. Bộ tiền mã hóa đề xuất PCA-LP cho phẩm chất BER tương đương với các bộ tiền mã hóa LC-RBD-LR-ZF và PCA-MMSE-BD, trong khi độ phức tạp tính toán thấp hơn các bộ tiền mã hóa còn lại.

Hướng phát triển của luận án

1. Mở rộng hướng nghiên cứu đề xuất các bộ tiền mã hóa phi tuyến theo nhóm kết hợp với các kỹ thuật rút gọn cơ sở giàn và kỹ thuật phân tích thành phần chính.
2. Nghiên cứu đề xuất các bộ tiền mã hóa cho hệ thống Massive MIMO song công phân chia theo tần số.
3. Nghiên cứu, đề xuất các bộ tiền mã hóa trong điều kiện có ảnh hưởng nhiễu từ những tế bào lân cận.
4. Phân tích, đánh giá phẩm chất của hệ thống bằng các biểu thức toán học.

1. Động lực nghiên cứu:

Với sự phát triển không ngừng của ngành điện tử truyền thông trong những năm qua, cùng với những nhu cầu về dịch vụ ngày càng đa dạng của con người, đang là những động lực phát triển mạnh mẽ trong lĩnh vực thông tin di động. Các nhu cầu về liên lạc, công việc cũng như giải trí của con người ngày càng có những đòi hỏi khắt khe hơn về chất lượng, tính ổn định và sự linh hoạt để tối đa hóa trải nghiệm của người dùng. Để giải quyết nhu cầu tất yếu này, kỹ thuật MIMO đã được nghiên cứu rộng rãi trong hai thập kỷ qua và được áp dụng cho nhiều chuẩn không dây, kỹ thuật này cho phép cải thiện đáng kể về dung lượng và độ tin cậy của hệ thống.

Trong hầu hết các hệ thống MIMO đang triển khai, các trạm gốc thường chỉ trang bị một số ít ăng-ten (thường ít hơn 10). Vì vậy, hiệu suất sử dụng phổ tần và dung lượng hệ thống chưa thực sự đáp ứng được nhu cầu ngày càng cao của người dùng. Trước vấn đề thực tế nêu trên, một hệ thống mới đã được đề xuất, được gọi là hệ thống Massive MIMO. Massive MIMO là công nghệ sử dụng mảng ăng-ten, với số lượng các phần tử trên mảng có thể lên tới hàng trăm, nhằm mục tiêu tăng dung lượng truyền dẫn và cải thiện độ tăng ích của ăng-ten lên rất nhiều lần.

Khi triển khai số lượng rất lớn các ăng-ten thu/phát tại mỗi trạm gốc. Điều này dẫn tới số chuỗi cao tần vô tuyến tại trạm gốc tăng lên, vấn đề đồng bộ giữa các ăng-ten phát trở nên phức tạp hơn.... Bên cạnh đó, các thiết bị phía trước giao diện vô tuyến rất phức tạp, công kênh và đắt tiền và tỷ lệ với số lượng ăng-ten được sử dụng. Bên cạnh đó, khó khăn chính trong truyền dữ liệu từ các trạm gốc tới các thiết bị đầu cuối là quá trình tách những tín hiệu của nhiều người dùng đã bị trộn lẫn ở phía máy thu, để mỗi người dùng lúc này chỉ nhận được phần tín hiệu mong muốn, thành phần xuyên nhiễu từ những người dùng lân cận cần được loại bỏ. Để giải quyết vấn đề này, một trong những phương pháp thường được sử dụng là kỹ thuật tiền mã hóa.

Hệ thống Massive MIMO là một bước đột phá hiện nay, hứa hẹn là một kỹ thuật đầy tiềm năng, phát huy hết khả năng của công nghệ truyền dẫn MIMO. Với những lý do trên, Massive MIMO đang là một hướng nghiên cứu mới cho rất nhiều các học giả trong và ngoài nước. Do đó, đề tài "*Nghiên cứu kỹ thuật*

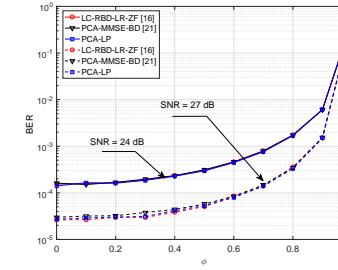
lựa chọn ăng-ten phát và tiền mã hóa cho hệ thống Massive MIMO” mang tính cấp thiết, có ý nghĩa khoa học cao và phù hợp với xu thế thời đại. Đề tài tập trung vào hai hướng nghiên cứu chính đó là đề xuất các kỹ thuật lựa chọn ăng-ten phát và kỹ thuật tiền mã hóa cho đường xuống trong hệ thống Massive MIMO. Những kết quả đạt được của luận án sẽ góp phần xây dựng vững chắc cơ sở lý thuyết về xử lý tín hiệu trong Massive MIMO, góp phần đưa hệ thống vào ứng dụng trong thực tế.

2. Các đóng góp của luận án:

1. Đề xuất các thuật toán lựa chọn ăng-ten phát theo nhóm, độ phức tạp thấp dựa trên cơ sở phân tích dung lượng kênh truyền cho hệ thống Massive MIMO, trong điều kiện thông tin trạng thái kênh truyền tại BS là hoàn hảo. Dung lượng kênh truyền của mỗi nhóm ăng-ten được lựa chọn được tính bằng phép phân tách SVD và phép tính định thức ma trận kênh truyền.
2. Đề xuất các thuật toán tiền mã hóa theo nhóm LR-LGP và ZF-GP-LR trên cơ sở các bộ tiền mã hóa tuyến tính kết hợp với kỹ thuật rút gọn giàn ELR, hoạt động trong các điều kiện kênh truyền hoàn hảo và kênh truyền có tương quan. Kết quả mô phỏng và tính toán cho thấy rằng, độ phức tạp tính toán của các bộ tiền mã hóa đề xuất thấp hơn đáng kể, trong khi phẩm chất BER của đề xuất là gần tiệm cận với đề xuất trong [16] khi số lượng nhóm tăng lên. Kết quả mô phỏng cũng cho thấy rằng, kênh truyền tương quan có ảnh hưởng xấu đến phẩm chất BER của hệ thống đối với tất cả các bộ tiền mã hóa được áp dụng.
3. Trên cơ sở kỹ thuật phân tích thành phần chính PCA, đề xuất bộ tiền mã hóa có độ phức tạp thấp trong điều kiện kênh truyền từ BS đến tất cả người dùng là không hoàn hảo. Kết quả mô phỏng cho thấy rằng phẩm chất BER của hệ thống khi sử dụng tất cả các bộ tiền mã hóa đều phụ thuộc vào sai số ước lượng kênh truyền. Bên cạnh đó, thuật toán đề xuất cho phẩm chất BER tương đương, trong khi độ phức tạp tính toán của thuật toán đề xuất thấp hơn so với các đề xuất trong [16] và [21].

3. Bố cục luận án:

Luận án được tổ chức như sau: Mở đầu; 3 chương nội dung; Kết luận và hướng nghiên cứu tương lai; Phụ lục và Danh mục các công trình nghiên cứu.



Hình 3.5: Phẩm chất BER của hệ thống theo ϕ tại SNR = 24 dB và 27 dB với $N_T = N_R = 64$, $K = 32$, $N_u = 2$

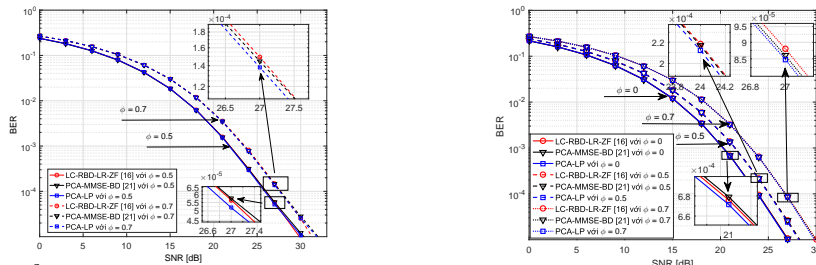
hưởng xấu đến tỷ lệ lỗi bit của hệ thống cho tất cả các bộ tiền mã hóa.

3.3 Kết luận chương 3

Trong Chương 3, Luận án đề xuất bộ tiền mã hóa theo nhóm bằng sự kết hợp giữa thuật toán tiền mã hóa tuyến tính và kỹ thuật rút gọn giàn ELR-SLB hoạt động trong điều kiện kênh truyền có sự tương quan giữa các ăng-ten theo hàm mũ. Kết quả tính toán và mô phỏng cho thấy rằng, bộ tiền mã hóa theo nhóm đề xuất LR-LGP có độ phức tạp thấp hơn đáng kể so với bộ tiền mã hóa LC-RBD-LR-ZF. Trong khi đó, phẩm chất BER của thuật toán tiền mã hóa đề xuất LR-LGP là tiệm cận so với LC-RBD-LR-ZF trong vùng SNR thấp khi số lượng nhóm người dùng tăng lên. Trong vùng SNR cao, bộ tiền mã hóa đề xuất cho phẩm chất BER tốt hơn so với thuật toán LC-RBD-LR-ZF. Bên cạnh đó, trong chương này, luận án cũng đề xuất bộ tiền mã hóa có độ phức tạp thấp PCA-LP. Thuật toán này được thiết kế trên cơ sở kết hợp giữa kỹ thuật tiền mã hóa tuyến tính và kỹ thuật PCA hoạt động trong điều kiện kênh truyền không hoàn hảo tại phía BS. Kết quả tính toán và mô phỏng cho thấy rằng, bộ tiền mã hóa đề xuất PCA-LP có độ phức tạp thấp hơn các bộ tiền mã hóa LC-RBD-LR-ZF và PCA-MMSE-BD, trong khi phẩm chất BER của bộ tiền mã hóa đề xuất PCA-LP là tương đương với các bộ tiền mã hóa còn lại. Các kết quả mô phỏng từ những đề xuất cũng cho thấy rằng, tính tương quan giữa các ăng-ten và lỗi ước lượng kênh đều ảnh hưởng xấu đến các bộ tiền mã hóa. Khi hệ số tương quan hoặc sai số ước lượng kênh truyền tăng lên dẫn tới phẩm chất hệ thống suy giảm và ngược lại.

$K = N_R/2$. Kết quả biểu diễn độ phức tạp tính toán cho thấy rằng, độ phức tạp tính toán của bộ tiền mã hóa đề xuất PCA-LP là thấp hơn bộ tiền mã hóa PCA-MMSE-BD và thấp hơn đáng kể so với các bộ tiền mã hóa LC-RBD-LR-ZF. Cụ thể, tại $N_R = N_T = 80$ ăng-ten, độ phức tạp tính toán của bộ tiền mã hóa đề xuất PCA-LP xấp xỉ bằng 2.58% và 84.07% so với độ phức tạp tính toán của các bộ tiền mã hóa LC-RBD-LR-ZF và PCA-MMSE-BD tương ứng.

Trong Hình 3.3(b) và Hình 3.4 thể hiện phẩm chất BER của hệ thống trong điều kiện kênh truyền hoàn hảo ($\phi = 0$) và không hoàn hảo ($\phi = 0.5$ và $\phi = 0.7$), tín hiệu được điều chế 4QAM, kênh truyền từ BS đến tất cả các người dùng giả thiết là kênh truyền pha đình Rayleigh cận tĩnh, ít biến đổi trong khoảng thời gian 200 symbol. Kết quả mô phỏng trong Hình 3.3(b) và Hình 3.4(a) cho thấy rằng, các đường cong BER của các bộ tiền mã hóa gần như tương đương nhau trong vùng SNR thấp và trung bình. Với vùng SNR đủ lớn, bộ tiền mã hóa LC-RBD-LR-ZF cho phẩm chất BER tốt hơn các bộ tiền mã hóa còn lại. Kết quả mô phỏng trong Hình 3.4(b) cho thấy rằng các đường cong BER của bộ tiền mã hóa đề xuất PCA-LP gần như trùng khớp với tất cả các bộ tiền mã hóa còn lại trong cùng một kịch bản khi N_T tăng lên từ 64 đến 128 ăng-ten phát. Rõ ràng, khi số lượng rất lớn N_T ăng-ten được triển khai, phẩm chất BER của bộ tiền mã hóa đề xuất PCA-LP càng được cải thiện.



a) Phẩm chất BER của hệ thống với $N_T = N_R = 64$, $K = 32$, $N_u = 2$, $\phi = 0.5$ và $\phi = 0.7$.
b) Phẩm chất BER của hệ thống với $N_T = N_R = 128$, $K = 64$, $N_u = 2$, $\phi = 0$, $\phi = 0.5$ và $\phi = 0.7$.

Hình 3.4: So sánh phẩm chất BER của hệ thống

Hình 3.5 minh họa các đường cong BER của các bộ tiền mã hóa tại các tỷ số SNR = 24 dB và SNR = 27 dB. Kết quả mô phỏng trong Hình 3.5 cũng cho thấy rằng, phẩm chất BER của bộ tiền mã hóa đề xuất PCA-LP là tương đồng với các bộ tiền mã hóa còn lại. Bên cạnh đó, lỗi ước lượng kênh có ảnh

Chương 1

Tổng quan về hệ thống Massive MIMO

1.1 Quá trình chuyển tiếp từ MIMO đến hệ thống Massive MIMO

Quá trình hình thành và phát triển lên đến hệ thống Massive MIMO là quá trình kế thừa những ưu điểm từ hệ thống MIMO điểm - điểm đến hệ thống MIMO đa người dùng cũng như các yêu cầu trong thực tế. Massive MIMO đề cập đến việc triển khai một số lượng lớn ăng-ten tại các trạm gốc. Công nghệ này cải thiện đáng kể hiệu quả sử dụng năng lượng và hiệu quả sử dụng phổ tần. Massive MIMO là một hình thức của MU-MIMO khi số lượng các ăng-ten tại các BS và số lượng người dùng tăng lên.

Ba điểm khác biệt chính giữa Massive MIMO và MU-MIMO thông thường:

- Chỉ có trạm gốc có được thông tin về trạng thái kênh truyền.
- Số lượng ăng-ten tại trạm gốc N_T thường lớn hơn so với số lượng người dùng K . Tuy nhiên, đây không phải là đặc điểm mang tính chất bắt buộc và không mang tính quyết định sự khác biệt giữa MU-MIMO thông thường và Massive MIMO.
- Quá trình xử lý tuyến tính được áp dụng cho cả đường lên và đường xuống.

1.2 Nguyên lý hoạt động trong hệ thống Massive MIMO

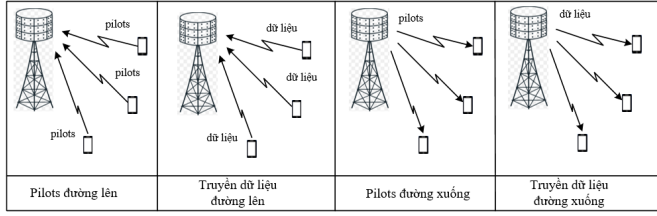
Trong một khoảng thời gian đồng bộ, hệ thống thực hiện 3 hoạt động bao gồm: Ước lượng kênh truyền (cho cả đường lên và đường xuống), truyền tín hiệu đường lên và truyền tín hiệu đường xuống. Hình 1.1 là một ví dụ cho giao thức truyền dẫn TDD trong Massive MIMO.

1.2.1 Ước lượng kênh truyền trong hệ thống Massive MIMO

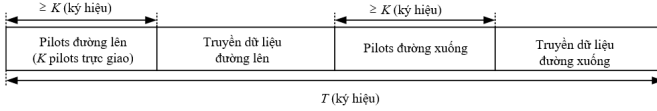
Tùy vào kỹ thuật TDD hoặc FDD được áp dụng cho hệ thống Massive MIMO mà kỹ thuật ước lượng kênh truyền cho từng kỹ thuật là khác nhau.

1.2.2 Quá trình truyền tín hiệu đường xuống

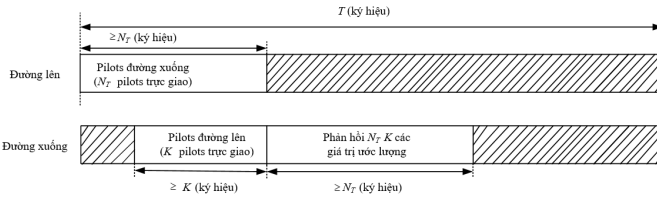
Đặt \mathbf{x} là vector tín hiệu phát từ BS tới tất cả người dùng. Tín hiệu trước khi phát xuống tất cả các người dùng sẽ được nhân với ma trận trọng số \mathbf{W} .



Hình 1.1: Giao thức thực hiện TDD trong Massive MIMO



Hình 1.2: Cấu trúc khung và ước lượng kênh truyền trong hệ thống TDD.



Hình 1.3: Cấu trúc khung và ước lượng kênh truyền trong hệ thống FDD.

Tín hiệu nhận được tại tất cả người dùng được biểu diễn:

$$\mathbf{y}_d = \mathbf{H}\mathbf{W}\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (1.1)$$

Để giảm độ phức tạp của hệ thống, lựa chọn ăng-ten phát là một trong những giải pháp quan trọng. Theo đó, những ăng-ten phát tốt nhất sẽ được lựa chọn để truyền tín hiệu. Điều này sẽ làm giảm số lượng các bộ cao tần ở phía phát, đồng thời làm giảm chi phí cho việc thiết kế hệ thống. Về cơ bản, một số tiêu chuẩn lựa chọn ăng-ten phát bao gồm:

- Lựa chọn ăng-ten phát dựa trên cơ sở chuẩn NORM hay tăng ích kênh.
- Lựa chọn ăng-ten phát dựa trên tỷ số công suất tín hiệu trên tạp âm SNR.
- Lựa chọn ăng-ten phát dựa trên hiệu quả sử dụng năng lượng.

- Ma trận tiền mã hóa thứ hai \mathbf{W}_b được thiết kế có dạng:

$$\mathbf{W}_{GP}^b = \text{diag}(\mathbf{W}_b^u) \quad (3.26)$$

Hệ số chuẩn hóa công suất. β_{PCA-LP} được tính bằng:

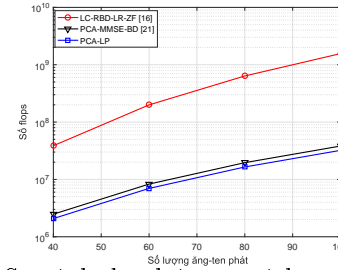
$$\beta_{PCA-LP} = \sqrt{\frac{N_R}{\text{trace}[(\mathbf{W}_a \mathbf{W}_b)(\mathbf{W}_a \mathbf{W}_b)^H]}} \quad (3.27)$$

3.2.4 Phân tích độ phức tạp tính toán

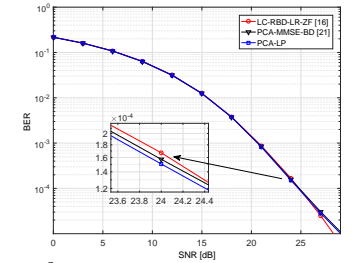
Qua các phép tính chi tiết, độ phức tạp của thuật toán tiền mã hóa đề xuất PCA-LP được biểu diễn như sau:

$$\begin{aligned} F_{PCA-LP} &= 8N_R^3 + 16N_R^2N_T - N_R^2 - 2N_RN_T + 1 + K(8N_u^2N_T - 2N_u^2) \\ &\quad + K(6N_u^3 + 3N_u^2 - N_u) + 21KN_u^3 + 2K(8N_u^3 - 2N_u^2) \\ &\quad + K(24N_u^3 - 4N_u^2) + 8N_R^2N_T - 2N_RN_T \quad (flops) \quad (3.28) \\ &\sim \mathcal{O}(N_TN_R^2). \end{aligned}$$

3.2.5 Kết quả mô phỏng.



a) So sánh độ phức tạp tính toán của thuật toán đề xuất với các thuật toán LC-RBD-LR-ZF và PCA-MMSE-BD.



b) Phẩm chất BER của hệ thống với $N_T = N_R = 64$, $K = 32$, $N_u = 2$ trong điều kiện CSI hoàn hảo tại phía BS..

Hình 3.3: So sánh độ phức tạp phẩm chất BER của hệ thống

Trong Hình 3.3(a) thể hiện độ phức tạp tính toán của các bộ tiền mã hóa PCA-LP, LC-RBD-LR-ZF và PCA-MMSE-BD. Trong kịch bản này, tham số N_T được thiết lập bằng N_R và thay đổi từ 40 tới 100 ăng-ten, $N_u = 2$, và

Bước 2: Thiết kế ma trận \mathbf{W}_b :

- Sử dụng \mathbf{W}_a^u trong (3.18), chúng ta có được ma trận kênh hiệu quả cho người dùng thứ u được biểu diễn như sau:

$$\mathbf{H}_{eff}^u = \mathbf{H}_u \mathbf{W}_a^u, \quad (3.19)$$

- Ma trận kênh \mathbf{H}_{eff}^u được chuẩn hóa tới $\mathbf{H}_{nor}^u \in \mathbb{C}^{N_u \times N_u}$ với trung bình bằng 0 như sau:

$$\mathbf{H}_{nor}^u = \mathbf{H}_{eff}^u - \mathbf{H}_{mean}^u, \quad (3.20)$$

Ở đây $\mathbf{H}_{mean}^u \in \mathbb{C}^{N_u \times N_u}$ được định nghĩa là ma trận trung bình, mỗi phần tử của \mathbf{H}_{mean}^u là giá trị trung bình của hàng tương ứng trong ma trận \mathbf{H}_{eff}^u .

- Áp dụng kỹ thuật phân tách QR đối với ma trận \mathbf{H}_{nor}^u ta có:

$$\mathbf{H}_{nor}^u = \mathbf{Q}_{nor}^u \mathbf{R}_{nor}^u, \quad (3.21)$$

- Thực hiện phân tách SVD áp dụng trên ma trận $(\mathbf{R}_{nor}^u)^H$ như sau:

$$(\mathbf{R}_{nor}^u)^H = \mathbf{U}_{nor}^u \mathbf{\Sigma}_{nor}^u (\mathbf{V}_{nor}^u)^H, \quad (3.22)$$

- Ma trận hệ số thành phần chính $\mathbf{A}_{PCA}^u \in \mathbb{C}^{N_u \times N_u}$ cho người dùng thứ u được tính như sau:

$$\mathbf{A}_{PCA}^u = \mathbf{Q}_{nor}^u \mathbf{V}_{nor}^u. \quad (3.23)$$

- Sử dụng \mathbf{A}_{PCA}^u và \mathbf{H}_{eff}^u , ma trận kênh kết hợp $\mathbf{H}_{com}^u \in \mathbb{C}^{N_u \times N_u}$ cho người dùng thứ u được tính bằng:

$$\mathbf{H}_{com}^u = \mathbf{A}_{PCA}^u \mathbf{H}_{eff}^u. \quad (3.24)$$

- Ma trận tiền mã hóa \mathbf{W}_b^u cho người dùng thứ u được biểu diễn như sau:

$$\mathbf{W}_b^u = (\mathbf{H}_{com}^u)^H [\mathbf{H}_{com}^u (\mathbf{H}_{com}^u)^H]^{-1}. \quad (3.25)$$

- Lựa chọn ăng-ten phát dựa trên cơ sở phân tích dung lượng kênh truyền.

Trong đường xuống của hệ thống Massive MIMO, tại mỗi BS phải thiết kế được ma trận tiền mã hóa. Sao cho, khi dữ liệu được truyền tới các thiết bị đầu cuối, mỗi thiết bị đầu cuối chỉ nhận được thành phần tín hiệu mong muốn. Những thành phần xuyên nhiễu từ những thiết bị đầu cuối lân cận cần được loại bỏ. Ma trận trọng số của kỹ thuật tiền mã hóa tuyến tính đơn giản như ZF và MMSE được biểu diễn như sau:

$$\mathbf{W}_{ZF} = \mathbf{H}^H (\mathbf{H}\mathbf{H}^H)^{-1}. \quad (1.2)$$

$$\mathbf{W}_{MMSE} = \mathbf{H}^H (\mathbf{H}\mathbf{H}^H + \sigma_n^2 \mathbf{I}_{N_R})^{-1}, \quad (1.3)$$

với $\sigma_n^2 = \sigma^2/E_s$ và E_s là năng lượng của mỗi symbol phát, σ^2 là phương sai của nhiễu.

1.3 Ưu điểm và một số thách thức trong hệ thống Massive MIMO

1.3.1 Những ưu điểm chính của hệ thống Massive MIMO

- Massive MIMO có thể tăng dung lượng gấp 10 lần, đồng thời cải thiện hiệu suất năng lượng bức xạ tới 100 lần so với hệ thống MIMO thường.
- Cho phép giảm đáng kể độ trễ trong môi trường không khí.
- Thực hiện thu phát song công phân chia theo thời gian TDD, điều này giúp việc mở rộng hệ thống một cách dễ dàng.
- Xử lý tín hiệu tuyến tính (mô hình kết hợp tuyến tính cho đường lên và tiền mã hóa cho đường xuống) gần như đạt tối ưu.
- Đơn giản hóa lớp đa truy nhập.
- Tất cả các quá trình xử lý phức tạp đều được thực hiện tại BS.

1.3.2 Một số thách thức trong hệ thống Massive MIMO

Mặc dù có rất nhiều những ưu điểm, tuy nhiên hệ thống Massive MIMO đang tồn tại những vấn đề thách thức như: Nhiều pilot, trở ngại trong truyền dẫn, yêu cầu thiết kế và chuẩn mới.

1.4 Kết luận chương 1

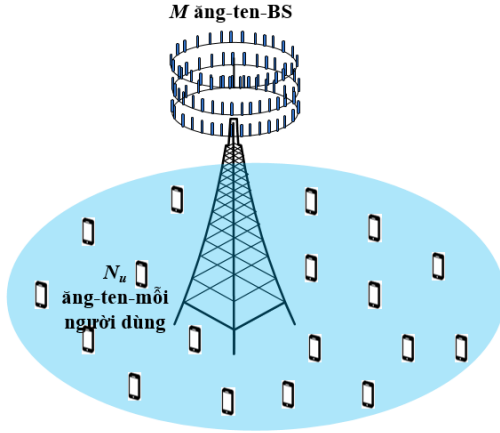
Trong Chương 1, Luận án trình bày những vấn đề tổng quan về hệ thống Massive MIMO. Quan trọng hơn, trong chương này, những vấn đề còn tồn tại liên quan đến kỹ thuật lựa chọn ăng-ten phát và kỹ thuật tiền mã hóa của các công trình nghiên cứu đã được trình bày. Những kiến thức cơ bản này sẽ được sử dụng làm cơ sở lý thuyết hỗ trợ cho các vấn đề nghiên cứu, đề xuất được trình bày trong các chương tiếp theo.

Chương 2

Kỹ thuật lựa chọn ăng-ten phát và kỹ thuật tiền mã hóa theo nhóm cho hệ thống Massive MIMO trong điều kiện kênh truyền hoàn hảo

2.1 Mô hình hệ thống

Xem xét mô hình kênh đường xuống hệ thống Massive MIMO song công phân chia theo thời gian được mô tả như Hình 2.1. Trong mô hình này, mỗi BS được trang bị M ăng-ten phát phục vụ đồng thời K người dùng, mỗi người dùng được trang bị N_u ăng-ten thu. Do đó, tổng số ăng-ten thu cho tất cả người dùng được biểu diễn bằng $N_R = KN_u$. Số lượng ăng-ten phát được lựa chọn tại BS là N_T , trong đó N_T thỏa mãn điều kiện $N_R \leq N_T \leq M$.



Hình 2.1: Mô hình kênh lựa chọn ăng-ten phát đường xuống hệ thống Massive MIMO

2.2 Kỹ thuật lựa chọn ăng-ten phát tối ưu

Kỹ thuật lựa chọn ăng-ten phát tối ưu được thực hiện dựa trên cơ sở phân tích dung lượng kênh truyền. Theo đó, những ăng-ten phát có đóng góp nhiều nhất vào tổng dung lượng kênh sẽ là những ăng-ten phát được lựa chọn. Qua mỗi bước, chỉ duy nhất một ăng-ten được lựa chọn.

BS có được thông tin về trạng thái kênh truyền hoàn hảo là điều tương đối khó khăn trong hệ thống Massive MIMO. Nói cách khác, hệ thống phải hoạt động trong điều kiện CSI không hoàn hảo. Độ chính xác của CSI có được tại BS phụ thuộc vào các công cụ ước lượng kênh được sử dụng. Giả thiết rằng, ma trận kênh truyền không hoàn hảo từ BS đến tất cả người dùng thu được bằng bộ ước lượng kênh MMSE, có thể được mô hình hóa như sau:

$$\mathbf{H} = \sqrt{1 - \phi^2} \tilde{\mathbf{H}} + \phi \mathbf{E}_{err}, \quad (3.15)$$

trong đó $\mathbf{E}_{err} \in \mathbb{C}^{N_R \times N_T}$ là ma trận lỗi ước lượng kênh. $\phi \in [0, 1]$ là một tham số để đánh giá độ chính xác của bộ ước lượng kênh.

3.2.2 Tổng quan về kỹ thuật phân tích thành phần chính PCA.

PCA là một công cụ toán học sử dụng một phép biến đổi trực giao để chuyển đổi một tập các biến có tương quan thành một tập các giá trị không tương quan tuyến tính, được gọi là các thành phần chính. Đặt $\mathbf{U} \in \mathbb{C}^{M \times N}$ là tập dữ liệu gốc và $\mathbf{Y} \in \mathbb{C}^{M \times N}$ là biểu diễn lại của tập dữ liệu đó. Trên cơ sở kỹ thuật phân tích giá trị riêng của $\mathbf{U}\mathbf{U}^T$ trong đại số tuyến tính, mối quan hệ giữa \mathbf{Y} và \mathbf{U} được biểu diễn như sau:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{B}\mathbf{U}. \quad (3.16)$$

trong đó, $\mathbf{B} \in \mathbb{C}^{M \times M}$ được định nghĩa là thành phần chính của \mathbf{U} .

3.2.3 Thuật toán tiền mã hóa đề xuất PCA-LP.

Trong đề xuất này, ma trận tiền mã hóa được thiết kế có dạng như sau:

$$\mathbf{W}_{PCA-LP} = \beta_{PCA-LP} \mathbf{W}_a \mathbf{W}_b, \quad (3.17)$$

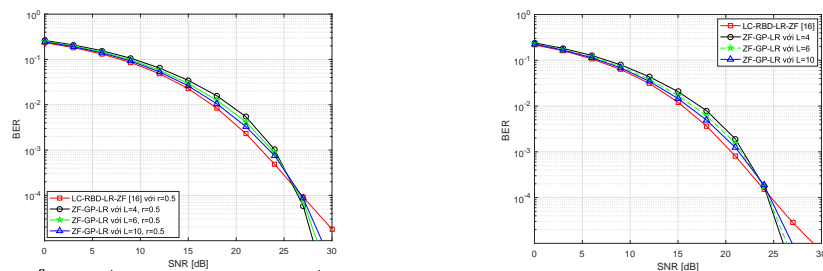
Bước 1: Thiết kế ma trận \mathbf{W}_a :

- Ma trận tiền mã hóa đầu tiên \mathbf{W}_a thu được bằng cách sử dụng kỹ thuật MMSE truyền thống như sau:

$$\begin{aligned} \mathbf{W}_a &= \mathbf{H}^H (\mathbf{H}\mathbf{H}^H + \sigma_n^2 \mathbf{I}_{N_R})^{-1} \\ &= [\mathbf{W}_a^1, \mathbf{W}_a^2, \dots, \mathbf{W}_a^K], \end{aligned} \quad (3.18)$$

trong đó $\sigma_n^2 = \sigma^2/E_s$, E_s là năng lượng của mỗi symbol phát và $\mathbf{W}_a^u \in \mathbb{C}^{N_T \times N_u}$ ($u = 1, 2, \dots, K$) là ma trận tiền mã hóa cho người dùng thứ u .

có tương quan ($r = 0.5$ và $r = 0.7$). Trong đó, tín hiệu được điều chế 4QAM, kênh truyền từ BS đến tất cả các người dùng là kênh pha đình Rayleigh cận tĩnh, ít biến đổi trong khoảng thời gian 200 symbol. Kết quả mô phỏng trong Hình 3.1(b) và Hình 3.2 cho thấy rằng, trong vùng SNR thấp và trung bình, phẩm chất BER của thuật toán tiền mã hóa đề xuất ZF-GP-LR gần tiệm cận với thuật toán LC-RBD-LR-ZF khi L tăng lên. Tuy nhiên, tại vùng SNR cao thuật toán đề xuất cho phẩm chất BER tốt hơn thuật toán LC-RBD-LR-ZF. Kết quả mô phỏng trong Hình 3.2 cũng chỉ ra rằng, mối tương quan không gian ảnh hưởng xấu đến phẩm chất BER của hệ thống cho dù sử dụng bất kỳ bộ tiền mã hóa nào.



a) Phẩm chất BER của hệ thống với $N_T = 60$, $N_u = 1$, $K = 60$, $L = 4, 6, 10$ và $r = 0.5$.

b) Phẩm chất BER của hệ thống với $N_T = 60$, $N_u = 1$, $K = 60$, $L = 4, 6, 10$ và $r = 0.7$.

Hình 3.2: So sánh phẩm chất BER của hệ thống

Để cân bằng giữa độ phức tạp tính toán và phẩm chất BER của hệ thống, L nên được lựa chọn bằng $N_R/2N_u$ là hiệu quả nhất khi K là một số chẵn. Ngược lại, khi K là một số lẻ, L nên được lựa chọn trùng với ước số liền kề ước số số lớn nhất của K là hiệu quả nhất.

3.2 Kỹ thuật tiền mã hóa tuyến tính trong hệ thống Massive MIMO trong điều kiện kênh truyền không hoàn hảo dưới sự hỗ trợ của thuật toán PCA.

3.2.1 Mô hình hệ thống.

Xem xét mô hình hệ thống Massive MIMO với N_T ăng-ten phát được trang bị tại phía BS phục vụ đồng thời K người dùng, mỗi người dùng có N_u ăng-ten thu. Tổng số ăng-ten thu tại phía người dùng là $N_R = KN_u$. Trong thực tế việc

2.3 Kỹ thuật lựa chọn ăng-ten phát theo nhóm trên cơ sở phân tích SVD ma trận kênh truyền

2.3.1 Xây dựng thuật toán

Để xây dựng thuật toán, trước hết ma trận kênh $\mathbf{H}_M \in \mathbb{C}^{N_R \times M}$ được phân chia thành G ($G = \lfloor \frac{M}{\delta} \rfloor$) nhóm nhỏ. δ là một số nguyên dương lớn hơn 1, δ cũng là kích thước của mỗi nhóm. Dung lượng kênh truyền với một ma trận kênh $\mathbf{H}_r \in \mathbb{C}^{N_R \times N}$ bất kỳ được biểu diễn như sau:

$$C_r = \sum_{n=1}^{\min(N_R, N)} \log_2 \left(1 + \frac{\rho}{N} \lambda_{r,n}^2 \right). \quad (2.1)$$

Theo đó, nhóm ăng-ten đầu tiên được lựa chọn trong G nhóm là nhóm ăng-ten có dung lượng kênh truyền lớn nhất:

$$g_1 = \arg \max_g C_g = \arg \max_g \sum_{n=1}^{\delta} \log \left(1 + \frac{\rho}{N_T} \lambda_{g,n}^2 \right). \quad (2.2)$$

Sau khi nhóm ăng-ten thứ nhất được lựa chọn, nhóm ăng-ten thứ hai trong $(G-1)$ nhóm còn lại được lựa chọn qua các bước như sau:

- Kết hợp lần lượt từng nhóm trong $(G-1)$ nhóm còn lại với nhóm ăng-ten phát đã được lựa chọn để tạo ra ma trận kênh mới $\mathbf{H}_{[g_1, g]}^{GP} = [\mathbf{H}_{g_1}^{GP} \mathbf{H}_g^{GP}]$, $\mathbf{H}_{[g_1, g]}^{GP} \in \mathbb{C}^{N_R \times 2\delta}$, $g = 1, 2, \dots, G-1$;
- Tính dung lượng kênh truyền $C_{[g_1, g]}$ tương ứng với $\mathbf{H}_{[g_1, g]}^{GP}$;
- Nhóm ăng-ten thứ hai được lựa chọn tương ứng với dung lượng kênh $C_{[g_1, g]}$ lớn nhất:

$$g_2 = \arg \max_g C_{[g_1, g]} = \arg \max_g \sum_{n=1}^{2\delta} \log \left(1 + \frac{\rho}{N_T} \lambda_{[g_1, g], n}^2 \right). \quad (2.3)$$

Quá trình này được lặp lại và kết thúc khi N_T ăng-ten phát được lựa chọn.

2.3.2 Phân tích độ phức tạp tính toán

Độ phức tạp tính toán được tính bằng số lượng hoạt động dấu phẩy động (flops: *floating point operations*). Chúng ta giả thiết rằng, mỗi phép cộng, trừ, nhân, chia số thực tương đương với 1 flops. Mỗi phép nhân, phép chia số phức tương đương với 6 và 11 flops.

Độ phức tạp tính toán của thuật toán lựa chọn ăng-ten phát tối ưu

Tổng số flops cần thiết cho thuật toán lựa chọn ăng-ten phát tối ưu được biểu diễn bằng:

$$F_O = \sum_{n=1}^{N_T} (M - n + 1) \left(\frac{2}{3}N_R^3 + 8nN_R^2 + 3N_R^2 + 2 \right) \quad (flops) \quad (2.4)$$

$$\sim \mathcal{O}(MN_R^3).$$

Phân tích độ phức tạp tính toán của thuật toán lựa chọn ăng-ten phát theo nhóm trên cơ sở phân tách SVD ma trận kênh truyền

Trong trường hợp $N_T = N_R$, tổng số flops cho thuật toán đề xuất được biểu diễn:

$$\sum_{n=1}^Q (G - n + 1) [4N_R^2 \delta n + 8N_R(\delta n)^2 + 9(\delta n)^3] + 6\delta n - 1 \quad (flops), \quad (2.5)$$

trong đó $Q = \frac{N_T}{\delta} = \frac{N_R}{\delta}$.

Trong trường hợp $N_T > N_R$, tổng số flops cho thuật toán đề xuất được tính bằng:

$$P_{pro} = \sum_{n=1}^{N_R/\delta} (G - n + 1) [4N_R^2 \delta n + 8N_R(\delta n)^2 + 9(\delta n)^3] + 6\delta n - 1$$

$$+ \sum_{k=\frac{N_R}{\delta}+1}^Q (G - k + 1) [4(\delta k)^2 N_R + 8(\delta k)N_R^2 + 9N_R^3] + 6N_R - 1 \quad (2.6)$$

$$\sim \mathcal{O}(N_R^3)$$

2.3.3 Kết quả mô phỏng

Kết quả thể hiện trong Hình 2.2(a) cho thấy rằng, độ phức tạp tính toán của thuật toán đề xuất thấp hơn rất nhiều so với thuật toán lựa chọn ăng-ten phát tối ưu. Cụ thể, khi $\delta = 2$, $M = 120$, 140 và 160 ăng ten, độ phức tạp của thuật toán đề xuất xấp xỉ bằng 30,2%, 29,7% và 29,3% so với thuật toán tối ưu. Khi $\delta = 3$ độ phức tạp thuật toán đề xuất giảm hơn 50% so với trường hợp $\delta = 2$ và bằng 13,6%, 13,5% and 13,3% so với thuật toán tối ưu với $M = 120$, 140 và 160 ăng-ten phát tương ứng.

Hình 2.2(b) và Hình 2.3 thể hiện phẩm chất BER hệ thống khi các bộ tiền mã hóa tuyến tính ZF và MMSE được áp dụng. Tín hiệu được điều chế 4QAM,

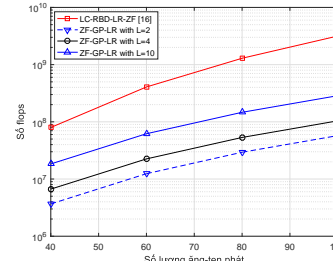
3.1.3 Phân tích độ phức tạp tính toán.

Qua các bước tính toán chi tiết, độ phức tạp của thuật toán ZF-GP-LR được tính bằng:

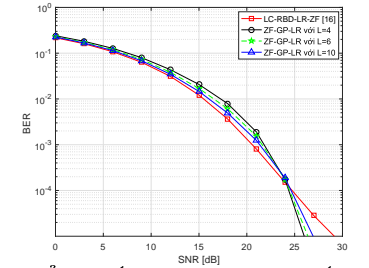
$$F = L [6(N_R - \gamma)(N_R + N_T - \gamma)^2 + 4(N_R - \gamma)(N_R + N_T - \gamma) - (N_R + N_T - \gamma)^2 - (N_R + N_T - \gamma)] + L(8N_T^2\gamma - 2N_T\gamma) + L(8\gamma^3 + 16\gamma^2 N_T - 2\gamma^2 - 2\gamma N_T + F_{update-SLB}) + L(8\gamma^3 + 16\gamma^2 N_T - 2\gamma^2 - 2\gamma N_T) + 8LN_T^2 N_R - 2N_T N_R \quad (flops) \quad (3.14)$$

$$\sim \mathcal{O}(LN_T^2 N_R)$$

3.1.4 Kết quả mô phỏng.



a) So sánh độ phức tạp tính toán của thuật toán đề xuất ZF-GP-LR và thuật toán LC-RBD-LR-ZF.



b) Phẩm chất BER của hệ thống với $N_T = 60$, $N_u = 1$, $K = 60$, $L = 4, 6, 10$ và $r = 0$.

Hình 3.1: So sánh độ phức tạp và phẩm chất BER của hệ thống

Hình 3.1(a) biểu diễn độ phức tạp tính toán của thuật toán đề xuất ZF-GP-LR và thuật toán LC-RBD-LR-ZF với N_T thay đổi từ 40 đến 100 ăng-ten phát. Chúng ta có thể dễ dàng thấy rằng, độ phức tạp tính toán của thuật toán tiền mã hóa đề xuất ZF-GP-LR thấp hơn đáng kể so với thuật toán LC-RBD-LR-ZF. Cụ thể, tại $N_R = N_T = 60$ ăng-ten, độ phức tạp của thuật toán ZF-GP-LR với $L = 2, 4$ và $L = 10$ xấp xỉ bằng 3.04%, 5.52% và 15.21% so với độ phức tạp của thuật toán LC-RBD-LR-ZF tương ứng.

Trong Hình 3.1(b) và Hình 3.2 mô tả phẩm chất BER của hệ thống Massive MIMO làm việc trong điều kiện kênh truyền không chịu ảnh hưởng của hiện tượng tương quan giữa các ăng-ten thu hoặc ăng-ten phát ($r = 0$) và kênh truyền

- Xây dựng ma trận kênh $\tilde{\mathbf{H}}_{corr}^l \in \mathbb{C}^{(N_R - \gamma) \times (N_T)}$ bao gồm tất cả các thành phần trạng thái kênh của các nhóm trừ đi trạng thái kênh truyền của nhóm người dùng thứ l như sau:

$$\tilde{\mathbf{H}}_{corr}^l = [(\mathbf{H}_{corr}^1)^T \dots (\mathbf{H}_{corr}^{l-1})^T (\mathbf{H}_{corr}^{l+1})^T \dots (\mathbf{H}_{corr}^L)^T]^T. \quad (3.4)$$

- Ma trận kênh mở rộng của $\tilde{\mathbf{H}}_{corr}^l$ có dạng như sau:

$$\tilde{\mathbf{H}}_{ext}^l = \{\lambda \mathbf{I}_{N_l}, \tilde{\mathbf{H}}_{corr}^l\}, \quad (3.5)$$

- Áp dụng kỹ thuật phân tách QR đối với $(\tilde{\mathbf{H}}_{ext}^l)^H$, chúng ta có:

$$(\tilde{\mathbf{H}}_{ext}^l)^H = \mathbf{Q}_l \mathbf{R}_l, \quad (3.6)$$

- Ma trận tiền mã hóa $\mathbf{W}_{GP_l}^a$ cho nhóm thứ l có cấu trúc:

$$\mathbf{W}_{GP_l}^a = \mathbf{Q}_l(N_l + 1 : N_l + N_T, N_l + 1 : N_l + N_T). \quad (3.7)$$

- Ma trận tiền mã hóa thứ nhất \mathbf{W}_{GP}^a được thiết kế có dạng như sau:

$$\mathbf{W}_{GP}^a = [\mathbf{W}_{GP_1}^a \ \mathbf{W}_{GP_2}^a \ \dots \ \mathbf{W}_{GP_L}^a], \quad (3.8)$$

Bước 3: Thiết kế ma trận \mathbf{W}_{GP}^b :

- Ma trận kênh hiệu quả cho nhóm người dùng thứ l được tính bằng:

$$\tilde{\mathbf{H}}_l = \mathbf{H}_{corr}^l \mathbf{W}_{GP_l}^a. \quad (3.9)$$

- Áp dụng kỹ thuật ELR-SLB biến đổi $(\tilde{\mathbf{H}}_l)$ thành $\tilde{\mathbf{H}}_l^{LR}$ trong miền LR:

$$\tilde{\mathbf{H}}_l^{LR} = \mathbf{U}_l^T \tilde{\mathbf{H}}_l, \quad (3.10)$$

- Ma trận trọng số $\mathbf{w}_{ZF_l}^b$ cho nhóm thứ l được biểu diễn:

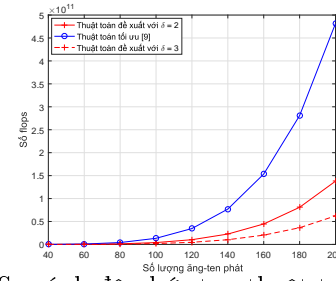
$$\mathbf{w}_{ZF_l}^b = (\tilde{\mathbf{H}}_l^{LR})^H \left[(\tilde{\mathbf{H}}_l^{LR}) (\tilde{\mathbf{H}}_l^{LR})^H \right]^{-1}. \quad (3.11)$$

- Ma trận tiền mã hóa thứ hai \mathbf{W}_{GP}^b được biểu diễn:

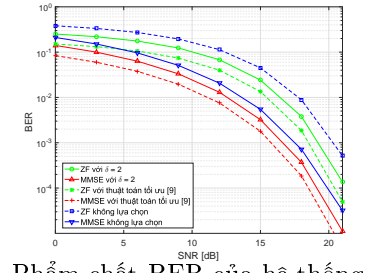
$$\mathbf{W}_{GP}^b = \text{diag}(\mathbf{w}_{ZF_l}^b) \quad (3.12)$$

Hệ số chuẩn hóa công suất β_{GP} được tính như sau:

$$\beta_{GP} = \sqrt{\frac{N_R}{\text{Tr}[(\mathbf{W}_{GP}^a \mathbf{W}_{GP}^b) (\mathbf{W}_{GP}^a \mathbf{W}_{GP}^b)^H]}}. \quad (3.13)$$

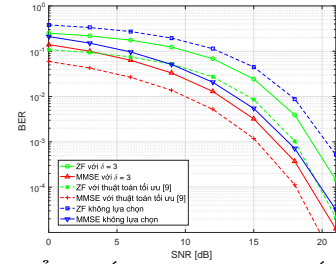


a) So sánh độ phức tạp thuật toán đề xuất (với $\delta = 2$ và $\delta = 3$) và thuật toán lựa chọn ăng-ten phát tối ưu.

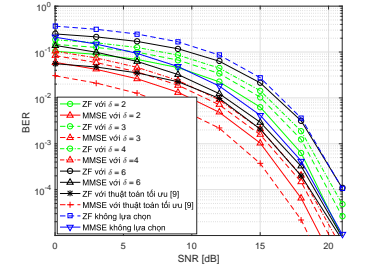


b) Phẩm chất BER của hệ thống với $\delta = 2, M = 70, N_T = 66, K = 60, N_u = 1$.

Hình 2.2: So sánh độ phức tạp và phẩm chất BER hệ thống



a) Phẩm chất BER của hệ thống với $\delta = 3, M = 72, N_T = 66, K = 60, N_u = 1$.



b) Phẩm chất BER của hệ thống với $\delta = 2, 3, 4, 6, M = 72, N_T = 60, K = 54, N_u = 1$.

Hình 2.3: So sánh phẩm chất BER hệ thống

kênh truyền từ BS đến tất cả các người dùng giả thiết là kênh truyền pha định Rayleigh cận tĩnh, ít biến đổi trong khoảng thời gian 200 symbol. Kết quả mô phỏng cho thấy rằng, với cùng một bộ tiền mã hóa trên các ăng-ten phát được lựa chọn, tại $\text{BER} = 10^{-3}$, thuật toán đề xuất bị suy giảm hiệu suất khoảng 0.7dB trong Hình 2.2(b) và 1.2dB ở Hình 2.3(a) trong SNR so với thuật toán tối ưu. Kết quả mô phỏng trong Hình 2.3(b) cũng cho thấy rằng, khi $\delta = 6$, khoảng cách đường cong BER của thuật toán đề xuất càng xa hơn với thuật toán tối ưu và gần tiệm cận với đường cong BER trong trường hợp không lựa chọn ăng-ten phát. Trong trường hợp này, thuật toán đề xuất hoạt động dần

kém hiệu quả. Để cân bằng giữa độ phức tạp và phẩm chất của hệ thống chúng ta nên lựa chọn δ trong khoảng [2 – 5].

2.4 Thuật toán lựa chọn ăng-ten phát hỗ trợ tiên mã hóa tuyến tính theo nhóm trong hệ thống Massive MIMO

2.4.1 Tổng quan về kỹ thuật rút gọn giàn ELR và kỹ thuật tiên mã hóa LC-RBD-LR-ZF

Kỹ thuật rút gọn giàn ELR

Thuật toán này thực hiện tối thiểu các phần tử trên đường chéo chính của ma trận hiệp phương sai lỗi $\tilde{\mathbf{C}} = (\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1}$. Thuật toán ELR gồm hai phiên bản đó là: 1) Tối thiểu cơ sở dài nhất rút gọn giàn trên cơ sở phần tử ELR-SLB; 2) Tối thiểu véc-tơ dài nhất rút gọn giàn trên cơ sở phần tử ELR-SLV. Trong đó, thuật toán ELR-SLB thực hiện tối thiểu tất cả các phần tử trên đường chéo của $\tilde{\mathbf{C}}$. Ngược lại, thuật toán ELR-SLV lựa chọn phần tử lớn nhất trên đường chéo để tối thiểu.

Thuật toán tiên mã hóa LC-RBD-LR-ZF

Ma trận tiên mã hóa của thuật toán LC-RBD-LR-ZF được biểu diễn:

$$\mathbf{W} = \mathbf{W}^a \mathbf{W}^b, \quad (2.7)$$

trong đó $\mathbf{W}^a \in \mathbb{C}^{N_T \times KN_T}$ được thiết kế dựa trên phép phân tách QR ma trận kênh truyền. $\mathbf{W}^b \in \mathbb{C}^{KN_T \times N_R}$ được thiết kế trên cơ sở kỹ thuật rút gọn giàn LLL và các kỹ thuật tiên mã hóa tuyến tính.

2.4.2 Lựa chọn ăng-ten phát theo nhóm bằng cách tính định thức ma trận

Chúng ta thấy rằng, độ phức tạp tính toán của thuật toán lựa chọn ăng-ten phát theo nhóm trên cơ sở phân tách SVD ma trận kênh truyền đã đề xuất phụ thuộc chủ yếu vào số flops cho các phép tính phân tách SVD ma trận kênh truyền. Để giảm tiếp độ phức tạp, thuật toán lựa chọn ăng-ten phát theo nhóm trên cơ sở phép tính định thức ma trận được đề xuất. Trong đề xuất này, việc chia nhóm được thực hiện tương tự như trong đề xuất ở mục 2.3. Nhóm ăng-ten đầu tiên được lựa chọn là nhóm ăng-ten có dung lượng kênh truyền lớn nhất:

$$g_1 = \arg \max_{g \in (1, \dots, G)} \log_2 \det \left[\mathbf{I}_{N_R} + \frac{\rho}{N_T} \mathbf{H}_g^{GP} \left(\mathbf{H}_g^{GP} \right)^H \right], \quad (2.8)$$

Chương 3

Kỹ thuật tiên mã hóa cho hệ thống Massive MIMO trong điều kiện kênh truyền có tương quan và kênh truyền không hoàn hảo

3.1 Kỹ thuật tiên mã hóa tuyến tính theo nhóm cho hệ thống Massive MIMO trong điều kiện kênh truyền tương quan theo hàm mũ.

3.1.1 Mô hình hệ thống

Xem xét mô hình hệ thống Massive MIMO với N_T ăng-ten phát được trang bị tại phía BS phục vụ đồng thời K người dùng, mỗi người dùng có N_u ăng-ten thu. Tổng số ăng-ten thu tại phía người dùng là $N_R = KN_u$. Trong thực tế, mặc dù khoảng cách giữa các ăng-ten theo lý thuyết được đảm bảo. Tuy nhiên, giữa các ăng-ten phát hoặc các ăng-ten thu luôn tồn tại một lượng tương quan nhất định do giới hạn về không gian triển khai. Để tính đến ảnh hưởng của mối tương quan không gian, mô hình kênh luận án xem xét được biểu diễn như sau:

$$\mathbf{H}_{corr} = \mathbf{R}_R^{1/2} \mathbf{H} \mathbf{R}_T^{1/2}, \quad (3.1)$$

trong đó \mathbf{R}_T là ma trận tương quan phát, \mathbf{R}_R là ma trận tương quan thu. Các phần tử của \mathbf{R}_T và \mathbf{R}_R được biểu diễn:

$$r_{uv} = \begin{cases} r^{v-u}, & u \leq v \\ r_{vu}^*, & u > v \end{cases}, \quad |r| \leq 1, \quad (3.2)$$

với $0 \leq r \leq 1$ là hệ số tương quan giữa hai ăng-ten phát hoặc hai ăng-ten thu cạnh nhau.

3.1.2 Thuật toán tiên mã hóa đề xuất ZF-GP-LR.

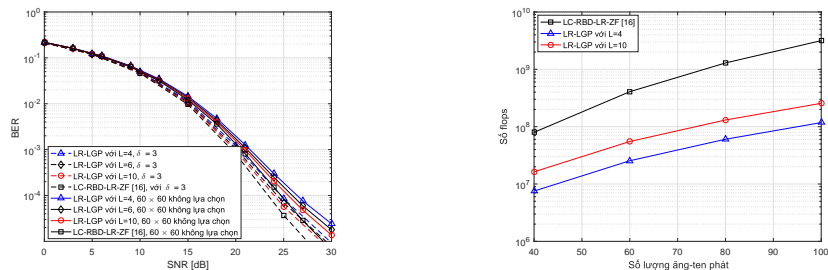
Bộ tiên mã hóa đề xuất được thiết kế như sau:

$$\mathbf{W}_{corr} = \beta_{GP} \mathbf{W}_{GP}^a \mathbf{W}_{GP}^b, \quad (3.3)$$

Bước 1: Ma trận kênh truyền \mathbf{H}_{corr} được chia thành L nhóm nhỏ.

Bước 2: Thiết kế ma trận \mathbf{W}_{GP}^a :

tiền mã hóa đề xuất thấp hơn rất nhiều so với bộ tiền mã hóa LC-RBD-LR-ZF. Cụ thể, tại $N_T = 80$ ăng-ten phát, độ phức tạp của bộ tiền mã hóa đề xuất LR-LGP với $L = 4$ và $L = 10$ nhóm xấp xỉ bằng 6.25%, 13.54% so với bộ tiền mã hóa LC-RBD-LR-ZF tương ứng.



a) Phẩm chất BER của hệ thống với $M = 90, N_T = 60, N_u = 1, K = 60, L = 4, 6, 10$ và $\delta = 3$.
b) So sánh độ phức tạp tính toán của thuật toán đề xuất với thuật toán LC-RBD-LR-ZF.

Hình 2.5: So sánh độ phức tạp và phẩm chất BER hệ thống

Để cân bằng giữa độ phức tạp tính toán và phẩm chất BER của hệ thống, L nên được lựa chọn bằng $N_R/2N_u$ là hiệu quả nhất khi K là một số chẵn. Trong trường hợp K là một số lẻ, L hiệu quả nhất khi L là ước số liền kề ước số lớn nhất của K .

2.5 Kết luận chương 2

Trong Chương 2, Luận án đã trình bày chi tiết các bước trong thuật toán lựa chọn ăng-ten phát theo nhóm với độ phức tạp thấp trên cơ sở phân tích dung lượng kênh truyền bằng phương pháp phân tách SVD và tính định thức ma trận cho hệ thống Massive MIMO. Trên cơ sở những ăng-ten phát được lựa chọn, trong Chương 2, Luận án đã trình bày đề xuất thuật toán tiền mã hóa theo nhóm gồm hai thành phần. Bộ tiền mã hóa đề xuất có độ phức tạp thấp hơn đáng kể trong khi phẩm chất BER gần tiệm cận với thuật toán LC-RBD-LR-ZF khi số lượng nhóm người dùng tăng lên. Phẩm chất BER của hệ thống được cải thiện khi số lượng nhóm ăng-ten phát G hoặc số lượng nhóm người dùng L tăng lên. Tuy nhiên sự trả giá của các thuật toán này là độ phức tạp tính toán cũng tăng tuyến tính với số lượng các nhóm G hoặc L . Các kỹ thuật lựa chọn ăng-ten phát và bộ tiền mã hóa đề xuất hoạt động trong điều kiện thông tin về trạng thái kênh truyền CSI được biết hoàn hảo tại phía BS.

ở đây, \mathbf{H}_g^{GP} là nhóm thứ g của \mathbf{H}_M , g là chỉ số của các nhóm. Nhóm ăng-ten thứ hai được lựa chọn là nhóm ghép với nhóm ăng-ten thứ nhất có dung lượng kênh truyền lớn nhất.

$$g_2 = \arg \max_{g \in (1, \dots, G), g \neq g_1} \log_2 \det(\mathbf{Q}) \quad (2.9)$$

trong đó $\mathbf{Q} = \mathbf{I}_{N_R} + \frac{\rho}{N_T} \mathbf{H}_{[g_1, g]}^{GP} (\mathbf{H}_{[g_1, g]}^{GP})^H$. Quá trình này được lặp lại và kết thúc khi N_T ăng-ten phát được lựa chọn.

2.4.3 Thuật toán tiền mã hóa tuyến tính theo nhóm trong sự hỗ trợ của kỹ thuật rút gọn giàn độ phức tạp thấp LR-LGP.

Ma trận tiền mã hóa cho đề xuất này được biểu diễn như sau:

$$\mathbf{W} = \beta \mathbf{W}_1 \mathbf{W}_2. \quad (2.10)$$

với $\beta = \sqrt{\frac{N_R}{\text{Tr}[(\mathbf{W}_1 \mathbf{W}_2)(\mathbf{W}_1 \mathbf{W}_2)^H]}}$ là hệ số chuẩn hóa công suất, \mathbf{W}_1 và \mathbf{W}_2 là các ma trận tiền mã hóa thứ nhất và thứ hai tương ứng.

Bước 1: Ma trận kênh truyền \mathbf{H} được chia thành L nhóm nhỏ.

Bước 2: Thiết kế ma trận \mathbf{W}_1

- Ma trận trọng số $\mathbf{W}_{MMSE} \in \mathbb{C}^{N_T \times N_R}$ cho tất cả các người dùng được biểu diễn bằng:

$$\mathbf{W}_{MMSE} = [\mathbf{W}_{MMSE}^{GP_1}, \mathbf{W}_{MMSE}^{GP_2}, \dots, \mathbf{W}_{MMSE}^{GP_L}], \quad (2.11)$$

- Áp dụng kỹ thuật phân tách QR cho $\mathbf{W}_{MMSE}^{GP_1}$ ta có:

$$\mathbf{W}_{MMSE}^{GP_1} = \mathbf{Q}_l \mathbf{R}_l, \quad (2.12)$$

- Chúng ta thấy rằng:

$$\mathbf{Q}_l \mathbf{R}_l = \mathbf{Q}_{l,1} \mathbf{R}_{l,1} \quad (2.13)$$

- Sử dụng $\mathbf{W}_1^{GP_l} = \mathbf{Q}_{l,1}$ như là ma trận tiền mã hóa cho nhóm thứ l .
- \mathbf{W}_1 được thiết kế có cấu trúc như sau:

$$\mathbf{W}_1 = [\mathbf{W}_1^{GP_1}, \mathbf{W}_1^{GP_2}, \dots, \mathbf{W}_1^{GP_L}]. \quad (2.14)$$

Bước 3: Thiết kế ma trận \mathbf{W}_2

- Ma trận kênh hiệu quả cho nhóm người dùng thứ l được tạo ra như sau:

$$\bar{\mathbf{H}}_l = \mathbf{H}_l^{GP} \mathbf{W}_1^{GP_l}, \quad (2.15)$$

- $\bar{\mathbf{H}}_l$ được sử dụng để tạo ra ma trận kênh mở rộng $\bar{\mathbf{H}}_l^{ext} \in \mathbb{C}^{\alpha \times 2\alpha}$.
- $(\bar{\mathbf{H}}_l^{ext})^T$ được chuyển đổi tới $\hat{\mathbf{H}}_l$ trong miền LR bằng cách sử dụng kỹ thuật rút gọn giàn ELR-SLV:

$$\hat{\mathbf{H}}_l = \mathbf{U}_l^T \bar{\mathbf{H}}_l^{ext} \quad (2.16)$$

trong đó \mathbf{U}_l là ma trận đơn với các phần tử là các số nguyên thỏa mãn $\det |\mathbf{U}_l| = 1$.

- Ma trận tiền mã hóa $\mathbf{W}_2^{GP_l}$ cho nhóm thứ l được biểu diễn bằng:

$$\mathbf{W}_2^{GP_l} = \mathbf{A}_l \hat{\mathbf{H}}_l^H (\hat{\mathbf{H}}_l \hat{\mathbf{H}}_l^H)^{-1} \quad (2.17)$$

- Ma trận tiền mã hóa thứ hai \mathbf{W}_2 được biểu diễn:

$$\mathbf{W}_2 = \text{diag} \left(\mathbf{W}_2^{GP_l} \right) \quad (2.18)$$

2.4.4 Phân tích độ phức tạp tính toán.

Độ phức tạp tính toán của thuật toán LC-RBD-LR-ZF.

Số flops cần thiết cho bộ tiền mã hóa LC-RBD-LR-ZF được tính như sau:

$$\begin{aligned} F &= K [6(N_R - N_u)(N_R + N_T - N_u)^2 + 4(N_R - N_u)(N_R + N_T - N_u) \\ &\quad - (N_R + N_T - N_u)^2 - (N_R + N_T - N_u)] + K(8N_T^2 N_u - 2N_T N_u) \\ &\quad + K(16N_u^2 N_T - 2N_u N_T + 8N_u^3 - 2N_u^2 + F_{update-LLL}) \\ &\quad + K(8N_u^3 + 16N_u^2 N_T - 2N_u^2 - 2N_u N_T) + 8KN_T^2 N_R - 2N_T N_R (flops) \\ &\sim \mathcal{O}(KN_T^2 N_R). \end{aligned} \quad (2.19)$$

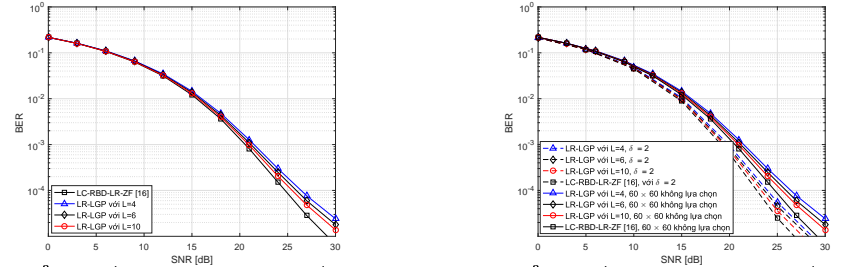
Độ phức tạp tính toán của thuật toán LR-LGP.

Số flops cần thiết cho thuật toán đề xuất LR-LGP được tính bằng:

$$\begin{aligned} F_1 &= 8N_R^3 + 16N_R^2 N_T - N_R^2 - 2N_R N_T + N_R + 1 + L(6N_T^2 \alpha + 4N_T \alpha \\ &\quad - \alpha^2 - \alpha) + L(8N_T \alpha^2 - 2\alpha^2) + L(24\alpha^3 - 2\alpha^2) + L(16\alpha^3 - 4\alpha^2) \\ &\quad + LF_{update-SLV} + L(56\alpha^3 - 8\alpha^2) + 8N_R^2 N_T - 2N_R N_T (flops). \\ &\sim \mathcal{O}(N_T N_R^2). \end{aligned} \quad (2.20)$$

2.4.5 Kết quả mô phỏng.

Hình 2.4(a) minh họa phẩm chất BER của hệ thống cho thuật toán đề xuất LR-LGP và thuật toán LC-RBD-LR-ZF trong trường hợp kỹ thuật lựa chọn ăng-ten phát không được áp dụng. Tín hiệu được điều chế bằng 4QAM. Kênh truyền giữa BS đến tất cả các người dùng là kênh pha đình Rayleigh cận tĩnh, ít biến đổi trong khoảng thời gian 200 symbol. Kết quả mô phỏng trong Hình 2.4(a) cho thấy rằng phẩm chất BER của thuật toán tiền mã hóa LR-LGP là tiệm cận với thuật toán LC-RBD-LR-ZF khi số lượng nhóm người dùng L tăng lên. Cụ thể, tại tỷ lệ lỗi bit BER = 10^{-3} , thuật toán đề xuất bị suy giảm khoảng 0.5 dB, 0.8 dB và 1.1 dB trong SNR tương ứng với $L = 10, 6$ và 4 nhóm khi so sánh với thuật toán tiền mã hóa LC-RBD-LR-ZF.



a) Phẩm chất BER của hệ thống với $N_T = M = 60, N_u = 1, K = 60, L = 4, 6, 10..$

b) Phẩm chất BER của hệ thống với $M = 90, N_T = 60, N_u = 1, K = 60, L = 4, 6, 10$ và $\delta = 2, N_u = 1$.

Hình 2.4: So sánh phẩm chất BER hệ thống

Hình 2.4(b) và Hình 2.5(a) thể hiện phẩm chất BER của hệ thống khi kỹ thuật lựa chọn ăng-ten phát được áp dụng với $\delta = 2$ cho Hình 2.4(b) và $\delta = 3$ cho Hình 2.5(a). Kết quả mô phỏng cho thấy rằng phẩm chất BER của hệ thống được cải thiện đáng kể khi kỹ thuật lựa chọn ăng-ten phát được áp dụng. Cụ thể, tại BER = 10^{-3} cho cùng một bộ tiền mã hóa, hệ thống cải thiện khoảng 2 dB và 1.5 dB trong SNR tương ứng với $\delta = 2$ và $\delta = 3$ khi so sánh với trường hợp không áp dụng kỹ thuật lựa chọn ăng-ten phát.

Hình 2.5(b) biểu diễn độ phức tạp tính toán của thuật toán đề xuất LR-LGP và thuật toán LC-RBD-LR-ZF. Trong kịch bản này, N_T được thay đổi từ 40 tới 100 ăng-ten phát, $N_R = N_T, L = 4$ và $L = 10$. Từ kết quả thể hiện trong Hình 2.5(b) chúng ta có thể dễ dàng thấy rằng, độ phức tạp tính toán của bộ

