HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG

Hồ Văn Tuyển

ĐÁNH GIÁ TỈ LỆ LỖI BIT HỆ THỐNG MASSIVE MIMO SỬ DỤNG THUẬT TOÁN TIỀN MÃ HÓA TUYẾN TÍNH TRONG ĐIỀU KIỆN KÊNH TRUYỀN KHÔNG HOÀN HẢO

Chuyên ngành: **KỸ THUẬT VIỄN THÔNG**

Mã Số: 8.52.02.08

TÓM TẮT ĐỀ ÁN TỐT NGHIỆP THẠC SĨ

HÀ NỘI – NĂM 2025

Đề án tốt nghiệp được hoàn thành tại:

HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG

Người hướng dẫn khoa học: TS. Đinh Văn Khôi
PGS. TS. Dương Thị Thanh Tú

Phản biện 1: PGS. TS. Nguyễn Tiến Hòa

Phản biện 2: PGS. TS. Lê Nhật Thăng

Đề án tốt nghiệp sẽ được bảo vệ trước Hội đồng chấm đề án tốt nghiệp thạc sĩ tại Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông

Vào lúc: 09 giờ 45 ngày 24 tháng 01 năm 2026

Có thể tìm hiểu đề án tại:

- Thư viện của Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông

MỞ ĐẦU

Trong xu thế phát triển của các hệ thống thông tin vô tuyến, và những yêu cầu ngày càng cao của người dùng đã và đang trở thành những động lực để phát triển hệ thống thông tin di động. Các hệ thống di động phát triển từ 1G tới 5G và tương lai sẽ là 6G đã chứng kiến nhiều sự phát triển đột phá về mặt công nghệ nhằm tối ưu hóa về mặt hệ thống, đáp ứng tốt nhất về chất lượng lẫn đa dạng các dịch vụ cho người dùng. Mỗi người sử dụng đều có những yêu cầu cao đối với các nhà mạng cung cấp dịch vụ như: yêu cầu cao về chất lượng, tính ổn định và sự linh hoạt của các dịch vụ... Nhằm đáp ứng các yêu cầu đó, một giải pháp quan trọng đó là mở rộng phổ tần số, tuy nhiên việc mở rộng phổ tần là rất khó khăn, kèm theo đó là việc chi phí cao phần nào cũng là những khó khăn đối với các nhà mạng. Để giải quyết khó khăn trên, công nghệ vô tuyến sử dụng số lượng lớn ăng-ten ở cả hai phía phát và thu được nghiên cứu áp dụng, được gọi là công nghệ truyền thông nhiều đầu vào và nhiều đầu ra (MIMO: Multiple-Input Multiple-Output). Thực tế, công nghệ MIMO đã chứng minh hiệu quả với các hệ thống như 3GPP, WCDMA2000, 3GPP LTE; nhiều chuẩn mạng không dây hiện tại như: WIMAX, 4G, 5G và 6G trong tương lai…đều được khuyến nghị sử dụng kỹ thuật MIMO ở cả hai phía trạm gốc (BS: Base Station) và thiết bị người dùng.

Trên nền tảng kỹ thuật MIMO, trong những năm gần đây, kỹ thuật Massive MIMO được xem như công nghệ cốt lõi để phát triển cho hệ thống 5G. Trong kỹ thuật này, mỗi trạm gốc có thể được trang bị hàng trăm ăng-ten nhằm phục vụ cùng lúc hàng chục người dùng, kỹ thuật này giúp cải thiện về mặt dụng lượng cũng như hiệu suất sử

dụng phổ tần. Một yêu cầu quan trọng trong quá trình truyền dữ liệu từ BS đến các người dùng đó là mỗi người dùng chỉ nhận được thành phần tín hiệu mong muốn, các thành phần tín hiệu của các người dùng lân cận cần được loại bỏ. Để khắc phục vấn đề này, các kỹ thuật tiền mã hóa (Precoding) được nghiên cứu áp dụng cho hệ thống Massive MIMO. Các kỹ thuật tiền mã hóa tuyến tính với độ phức tạp thấp đã được nghiên cứu áp dụng và đã được chứng minh gần như đạt tối ưu cho hệ thống Massive MIMO. Thực tế, nghiên cứu gần đây tập trung vào việc đề xuất các thuật toán tiền mã hóa và chứng minh dựa trên kết quả mô phỏng, việc đưa ra các biểu thức toán học để đánh giá tỉ lệ lỗi bit (BER: Bit Error Rate) đang là một khó khăn do sự phức tạp của hệ thống Massive MIMO.

Từ các vấn đề về lý luận và thực tiễn, học viên lựa chọn đề án **"Đánh giá tỉ lệ lỗi bit hệ thống Massive MIMO sử dụng thuật toán tiền mã hóa tuyến tính trong điều kiện kênh truyền không hoàn hảo**" nhằm nghiên cứu những vấn đề lý thuyết, kỹ thuật tiền mã hóa tuyến tính, từ đó tiến hành phân tích bằng toán học để đánh giá tỉ lệ lỗi bit cho hệ thống Massive MIMO.

Đề án tập trung nghiên cứu những vấn đề cơ bản về hệ thống Massive MIMO, các thuật toán tiền mã hóa tuyến tính. Trên cơ sở đó, đề án tiến hành phân tích bằng toán học các biểu thức phân tích tỉ lệ lỗi bit BER các thuật toán tiền mã hóa tuyến tính cơ bản đó là: cưỡng bức bằng không (ZF: Zero-Forcing) và truyền tỷ lệ cực đại (MRT: Maximal Ratio Transmission). Trên cơ sở phân tích lý thuyết, tiến hành mô phỏng bằng phần mềm mô phỏng Matlab để đánh giá tỉ lệ lỗi bit (BER: Bit Error Rate) của các thuật toán tiền mã hóa tuyến tính đã được phân tích. Kết quả đạt được của đề án là cơ sở cho việc tiếp tục đánh giá tỉ lệ lỗi bit cho các thuật toán tiền mã

hóa tuyến tính khác cũng như các thuật toán tiền mã hóa phi tuyến áp dụng cho hệ thống Massive MIMO.

Đề án gồm 3 chương với nội dung tóm tắt như sau:

CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN VỀ HỆ THỐNG MASSIVE MIMO

Chương này giới thiệu tổng quan về hệ thống Massive MIMO như: kỹ thuật MIMO, kỹ thuật MU MIMO, kỹ thuật Massive MIMO**.**

CHƯƠNG 2: PHÂN TÍCH TỈ LỆ LỖI BIT HỆ THỐNG THEO CÁC THUẬT TOÁN TIỀN MÃ HÓA TUYẾN TÍNH

Chương này trình bày mô hình hệ thống, kỹ thuật tiền mã hóa tuyến tính; Phân tích tỉ lệ lỗi bit hệ thống theo các kỹ thuật tiền mã hóa ZF và MRT theo các tham số như: công suất phát, số lượng ăng-ten phát, số lượng ăng-ten thu. Những kết quả phân tích trong Chương 2 là cơ sở cho các mô phỏng được thực hiện trong Chương 3.

CHƯƠNG 3: MÔ PHỎNG VÀ ĐÁNH GIÁ TỈ LỆ LỖI BIT HỆ THỐNG SỬ DỤNG THUẬT TOÁN TIỀN MÃ HÓA TUYẾN TÍNH

Tiến hành mô phỏng và đánh giá tỉ lệ lỗi bit của hệ thống theo các kỹ thuật tiền mã hóa ZF, MRT bằng phần mềm Matlab theo các tham số đã được phân tích trong Chương 2.

CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN VỀ HỆ THỐNG MASSIVE MIMO

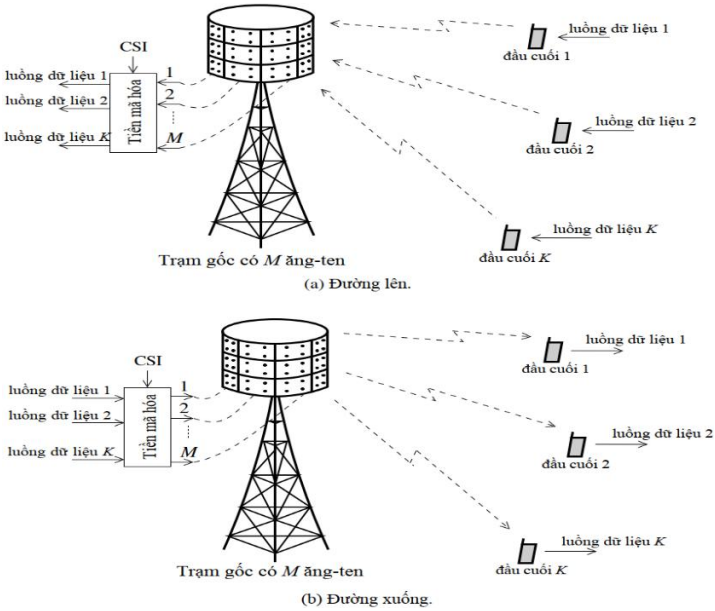
1.1. Tổng quan về kỹ thuật MIMO

1.2. Quá trình hình thành, phát triển từ hệ thống MU-MIMO lên hệ thống Massive MIMO

1.2.1. Hệ thống MU-MIMO

1.2.2. Hệ thống Massive MIMO

Trong kỉ nguyên hiện đại, các thiết bị kết nối không dây được sử dụng đã tăng lên vượt bậc. Hàng tỷ thiết bị hiện đang kết nối và quản lý qua các mạng không dây. Bên cạnh đó, mỗi thiết bị đều yêu cầu băng thông cao để đáp ứng cho các ứng dụng đa dạng như thoại, video thời gian thực, xem phim và chơi game trực tuyến. Nhu cầu về tốc độ truyền dữ liệu và số lượng thiết bị kết nối sẽ còn tiếp tục tăng. Mặt khác, bài toán tối ưu hiệu quả sử dụng năng lượng trong những hệ thống truyền thông không dây cũng đang trở thành mối quan tâm lớn. Do đó, các hệ thống không dây tương lai cần đáp ứng đồng thời ba yêu cầu chính: Đạt tốc độ truyền dữ liệu cao, phục vụ được nhiều người dùng đồng thời và tiêu thụ năng lượng thấp. Hướng tới mục tiêu trên, việc nghiên cứu và phát triển hệ thống Massive MIMO được coi như một công nghệ có tính đột phá cao, đã được triển khai cho hệ thống 5G trên thế giới. Hệ thống Massive MIMO là bước phát triển của hệ thống MU-MIMO, trong đó trạm gốc được trang bị số lượng ăng-ten rất lớn nhằm phục vụ đồng thời đến hàng trăm người dùng trong một vùng phủ sóng. Massive MIMO cho phép sử dụng hàng trăm đến hàng nghìn anten tại trạm gốc để cùng lúc đáp ứng nhu cầu kết nối cho hàng chục hoặc hàng trăm thiết bị đầu cuối trên cùng một băng tần.



Hình 1. 1: Mô hình kênh truyền đường lên và đường xuống hệ thống Massive MIMO

Mô hình tổng quát hệ thống Massive MIMO được minh họa cụ thể trong hình 1.4. Tại mỗi trạm gốc đều có quy mô ăng-ten rất lớn, ký hiệu là *M*, và phục vụ một ô chứa các thiết bị đầu cuối có số lượng cũng rất lớn, ký hiệu là *K*. Thông thường, mỗi thiết bị đầu cuối được trang bị một ăng-ten duy nhất. Các trạm gốc khác nhau sẽ phục vụ các ô khác nhau, và ngoại trừ một số trường hợp như điều khiển công suất hoặc gán tín hiệu dẫn.

1.3. Nguyên lý hoạt động của hệ thống Massive MIMO

1.3.1. Nguyên lý truyền tín hiệu đường lên

1.3.2. Nguyên lý truyền tín hiệu đường xuống

Trong đường xuống, dữ liệu được truyền từ trạm gốc đến các người dùng. Với cấu trúc nhiều ăng-ten tại BS, hệ thống Massive MIMO khai thác kỹ thuật định dạng chùm tia và kỹ

thuật tiền mã hóa tuyến tính. Cụ thể:

Bước 1. Định dạng chùm tín hiệu (Beamforming): Dựa trên thông tin trạng thái kênh truyền CSI thu được, trạm gốc thực hiện định hướng năng lượng phát chính xác đến từng người dùng thông qua kỹ thuật tạo chùm tia. Nhờ đó, cho phép trạm gốc có thể phục vụ cùng lúc nhiều người dùng tại cùng một thời điểm trên cùng tần số (kỹ thuật ghép kênh phân chia theo không gian). Việc định hướng chùm tia giúp tăng tỷ số tín hiệu trên nhiễu SNR và giảm nhiễu giao thoa liên người dùng.

Bước 2. Tiền mã hóa tín hiệu (Precoding): Sau khi xác định hướng chùm tia, kỹ thuật tiền mã hóa tuyến tính được trạm gốc sử dụng cho các luồng dữ liệu dựa trên ma trận kênh truyền cho từng ăng-ten và từng người dùng. Tiền mã hóa giúp đảm bảo rằng mỗi người dùng chỉ nhận được tín hiệu mong muốn và nhiễu từ các luồng khác được triệt tiêu.

Quá trình phát hiện và giải mã tín hiệu, hệ thống Massive MIMO phụ thuộc vào thông tin trạng thái kênh truyền CSI. CSI là tập hợp thông tin mô tả đặc tính của đường truyền giữa máy phát và máy thu.

Trong hệ thống sử dụng chế độ ghép song công phân chia theo tần số (FDD: Frequency Division Duplexing), CSI cần được ước lượng ở cả đường lên và đường xuống [3]. Riêng đối với đường lên, trạm gốc sẽ đảm nhận việc ước tính kênh, dựa trên các chuỗi tín hiệu lái trực giao mà thiết bị đầu cuối phát đi. Trong đường xuống, vai trò ước lượng kênh thuộc về thiết bị người dùng, căn cứ vào các tín hiệu lái phát ra từ trạm gốc, sau đó thiết bị người dùng phản hồi lại CSI đã ước lượng cho trạm gốc thông qua kênh điều khiển. Tuy nhiên, quá trình phản hồi CSI tiêu tốn nhiều tài nguyên, đặc biệt đối với trạm gốc của hệ

thống Massive MIMO có số lượng lớn ăng-ten, việc ước lượng kênh đường xuống trong chế độ FDD trở nên phức tạp và khó triển khai trong thực tế.

Chế độ ghép song công phân chia theo thời gian TDD được xem là giải pháp khắc phục vấn đề ước lượng kênh đường xuống trong chế độ FDD. Trong TDD, bằng cách khai thác tính đối xứng kênh truyền (đáp ứng xung giữa hai ăng-ten giống nhau ở cả hai hướng truyền), trạm gốc có thể ước lượng kênh đường xuống căn cứ vào thông tin trạm gốc thu được trong quá trình ước lượng kênh đường lên. Cụ thể, thiết bị người dùng gửi các tín hiệu lái trực giao lên trạm gốc, các tín hiệu này tại trạm gốc được sử dụng để ước lượng CSI cho từng người dùng. Dựa trên CSI đã thu được, trạm gốc sẽ thực hiện tạo chùm tia để truyền dữ liệu đường xuống chính xác đến thiết bị người dùng.

1.4. Một số ưu điểm, hạn chế của hệ thống Massive MIMO

1.4.1 Ưu điểm

1.4.2. Hạn chế

1.4.3. Thách thức

1.5. Ứng dụng kỹ thuật Massive MIMO trong triển khai các hệ thống vô tuyến

1.5.1. Ứng dụng trong triển khai hệ thống mạng 5G

1.5.2. Ứng dụng trong triển khai mạng WIFI

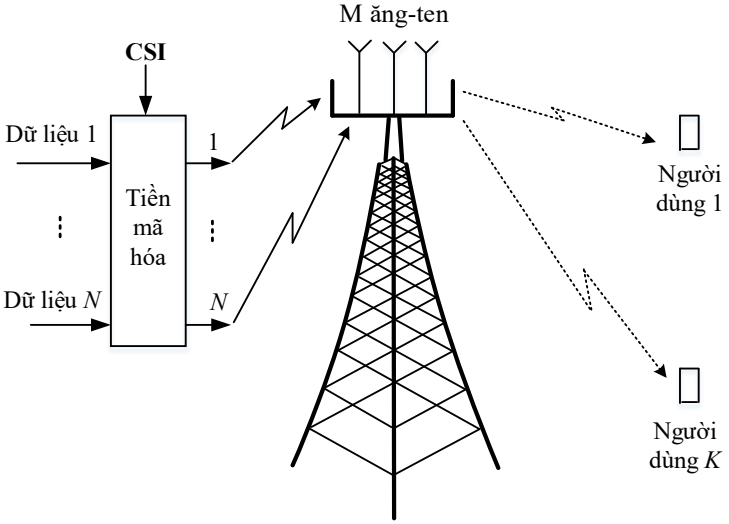
1.6. Kết luận chương

Chương 1 đã khái quát kỹ thuật MIMO và quá trình phát triển từ hệ thống MU-MIMO sang hệ thống Massive MIMO. Hệ thống Massive MIMO mang lại thông lượng cao, hiệu suất phổ và năng lượng tốt hơn, độ tin cậy và vùng phủ lớn, có thể đạt nhiều lợi ích mà không cần mở rộng băng thông.

CHƯƠNG 2: PHÂN TÍCH TỈ LỆ LỖI BIT HỆ THỐNG THEO CÁC THUẬT TOÁN TIỀN MÃ HÓA TUYẾN TÍNH

2.1. Mô hình hệ thống

Mô hình kênh đường xuống của hệ thống Massive MIMO được thể hiện trong hình 2.1. Trong mô hình này, phía trạm gốc BS sử dụng *M* ăng-ten phát phục vụ cùng lúc *K* người dùng.



Hình 2. 1: Mô hình Kênh đường xuống hệ thống MIMO đa người dùng

Sai số ước lượng kênh truyền quyết định đến tỉ lệ lỗi bit BER hệ thống trong quá trình truyền dữ liệu từ BS đến người dùng khi áp dụng các kỹ thuật tiền mã hoá.

Như đã phân tích, thông tin về trạng thái kênh truyền **H** tại phía trạm gốc thu nhận thông qua các bộ ước lượng kênh đặt tại BS. Độ chính xác của thông tin trạng thái kênh truyền phụ thuộc vào các bộ ước lượng kênh. Trong phạm vi của đề án, giả thiết bộ

ước lượng kênh được sử dụng tại phía BS là trung bình bình phương sai số nhỏ nhất (MMSE), được mô hình hóa như sau:

$$\mathbf{H} = \sqrt{1-e^2}\,\hat{\mathbf{H}} + e\mathbf{E} \quad (2.1)$$

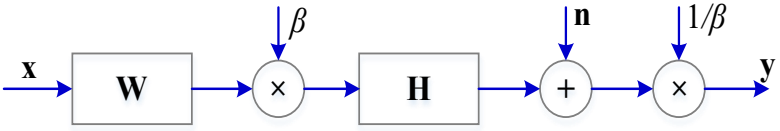
Từ biểu thức (2.1) ta thấy rằng, khi e = 0, có nghĩa rằng không có lỗi ước lượng kênh và trạng thái kênh truyền thu được tại trạm gốc BS là hoàn hảo ($\mathbf{H}=\hat{\mathbf{H}}$). Ngược lại, nếu e = 1, kênh truyền bị ước lượng sai hoàn toàn.

Đặt **y** là véc-tơ tín hiệu nhận được của tất cả người dùng, **x** là véc-tơ tín hiệu phát. Khi đó, mối quan hệ giữa véc-tơ tín hiệu thu **y** và véc-tơ tín hiệu phát **x** được biểu diễn như sau:

$$\mathbf{y} = \mathbf{HWx} + \mathbf{n} \quad (2.2)$$

2.2. Kỹ thuật tiền mã hóa tuyến tính

Kỹ thuật tiền mã hóa tuyến tính là kỹ thuật cơ bản, tương đối đơn giản, các kỹ thuật này là cơ sở để xây dựng các bộ tiền mã hóa sau này, các kỹ thuật tiền mã hóa tuyến tính bao gồm kỹ thuật ZF, MRT. Mô hình tổng quát kỹ thuật tiền mã hóa tuyến tính được thể hiện trong hình 2.2.



Hình 2. 2: Mô hình kỹ thuật tiền mã hóa tuyến tính tổng quát cho hệ thống Massive MIMO

Như đã đề cập và phân tích trong Chương 1, các ma trận tiền mã hoá cần được xây dựng trước khi truyền dữ liệu đến các người dùng. Theo đó, ma trận tiền mã hoá tuyến tính ZF và MRT được biểu diễn như sau:

$$\mathbf{W}_{ZF} = \beta_{ZF}\mathbf{H}^H(\mathbf{H}\mathbf{H}^H)^{-1} \quad (2.3)$$

$$\mathbf{W}_{MRT}=\beta_{MRT}\mathbf{H}^{H} \quad (2.4)$$

Trong các biểu thức (2.3) và (2.4), β là hằng số chuẩn hóa công suất phát được xác định như sau :

$$\beta_{ZF} = \sqrt{\frac{P_d}{tr\left((\mathbf{B}_{ZF}\mathbf{B}_{ZF}^{H})\right)}} \quad (2.5)$$

$$\beta_{MRT} = \sqrt{\frac{P_d}{tr\left((\mathbf{B}_{MRT}\mathbf{B}_{MRT}^{H})\right)}} \quad (2.6)$$

Trong đó, $P_d = \mathrm{E}\left\{\|\mathrm{Wx}\|^2\right\}$ là tổng công suất, $\mathbf{B}_{ZF} = \mathbf{H}^{H}(\mathbf{H}\mathbf{H}^{H})^{-1}$ và $\mathbf{B}_{MRT} = \mathbf{H}^{H}$ để bù lại sự ảnh hưởng của hệ số β ở bên phát, tín hiệu thu được phải chia cho β qua khối tự động điều khiển AGC (Automatic gain control) ở phía thu.

2.3. Phân tích xác suất lỗi bit của hệ thống theo kỹ thuật tiền mã hóa ZF

Tổng tỉ lệ tín hiệu trên nhiễu của người dùng thứ k được biểu diễn như sau:

$$SINR_k^{ZF} = \frac{P_d\left(M-K\right)}{\left(P_d e^2+1\right)K} \quad (2.14)$$

Tỉ lệ lỗi trung bình P_e được tính toán như sau:

$$P_e = BER_k = \frac{1}{2}\left(1-\sqrt{\frac{SINR_k}{1+SINR_k}}\right) \quad (2.20)$$

Mặt khác ta có:

$$\text{SINR}_k^{ZF} = \frac{P_d}{\left(P_d e^2 + 1\right) tr\left(\mathbf{B}_{ZF}\mathbf{B}_{ZF}^H\right)^{-1}}$$

$$= \frac{P_d}{\left(P_d e^2 + 1\right)\sum_{k=1}^{K} 1/\lambda_k^2} \qquad (2.21)$$

Trong các trường hợp phân tích, giả sử công suất phát hệ thống được mô hình hoá bằng tỉ số SNR. Trong mọi trường hợp khi $SNR \to \infty$, giá trị BER của hệ thống giảm, hay chất lượng tín hiệu tốt lên khi tăng công suất phát.

Thay biểu thức (2.21) vào biểu thức (2.20) ta có:

$$BER_k^{ZF} = \frac{1}{2}\left(1 - \sqrt{\frac{\dfrac{P_d}{\left(P_d e^2 + 1\right)\sum_{k=1}^{K} 1/\lambda_k^2}}{1 + \dfrac{P_d}{\left(P_d e^2 + 1\right)\sum_{k=1}^{K} 1/\lambda_k^2}}}\right)$$

$$= \frac{1}{2}\left(1 - \sqrt{\frac{P_d}{\left(P_d e^2 + 1\right)\sum_{k=1}^{K} 1/\lambda_k^2 + P_d}}\right) \qquad (2.22)$$

Xác suất lỗi hệ thống khi công suất phát tiến ra vô cùng được tính toán chi tiết như sau:

$$\lim_{P_d\to\infty} BER_k^{ZF} \approx \lim_{P_d\to\infty} \frac{1}{2}\left(1-\sqrt{\frac{1}{\left(e^2+\frac{1}{P_d}\right)\sum_{k=1}^{K} 1/\lambda_k^2+1}}\right)$$

$$\approx \frac{1}{2}\left(1-\sqrt{\frac{1}{e^2\sum_{k=1}^{K} 1/\lambda_k^2+1}}\right) \quad (2.23)$$

Ngược lại, khi công suất phát tiến về 0, xác suất lỗi của hệ thống được biểu diễn bằng:

$$\lim_{P_d\to 0} BER_k^{ZF} \approx \lim_{P_d\to 0} \frac{1}{2}\left(1-\sqrt{\frac{1}{\left(e^2+\frac{1}{P_d}\right)\sum_{k=1}^{K} 1/\delta_k^2+1}}\right) \quad (2.24)$$

$$\approx 0.5$$

Kết quả phân tích trong các biểu thức (2.23) và (2.24) cho thấy, khi tăng công suất phát dẫn tới xác suất lỗi giảm và ngược lại. Bên cạnh đó, xác suất lỗi hệ thống phục thuộc vào sai số ước lượng kênh truyền. Cụ thể, khi sai số ước lượng kênh truyền tăng dẫn tới xác suất lỗi hệ thống tăng, sai số ước lượng kênh truyền giảm dẫn tới xác suất hệ thống giảm. Nói cách khác, xác suất lỗi hệ thống tỉ lệ thuận với sai số ước lượng kênh truyền.

Tiếp theo, đề án tiến hành xem xét xác suất lỗi hệ thống theo tham số: số lượng người dùng đầu cuối và số lượng ăng-ten phát tại phía BS.

Thay biểu thức (2.14) vào biểu thức (2.20) ta có:

$$BER_k^{ZF} = \frac{1}{2}\left(1 - \sqrt{\frac{P_d(M-K)}{(P_d e^2 + 1)K + P_d(M-K)}}\right) \quad (2.25)$$

Ta thấy, khi K tiến ra ∞, biểu thức (2.25) được viết lại như sau:

$$\lim_{k\to\infty} BER_k^{ZF} = \frac{1}{2}\left(1 - \sqrt{\frac{P_d(M/K-1)}{\left(P_d e^2 + 1\right) + P_d(M/K-1)}}\right)$$

$$\approx \frac{1}{2}\left(1 - \sqrt{\frac{P_d}{P_d - \left(P_d e^2 + 1\right)}}\right) \quad (2.26)$$

Ngược lại, khi K tiến về 0, biểu thức (2.25) được biểu diễn:

$$\lim_{k\to 0} BER_k^{ZF} = \frac{1}{2}\left(1 - \sqrt{\frac{P_d(M-K)}{(P_d e^2 + 1)K + P_d(M-K)}}\right)$$

$$\approx \frac{1}{2}\left(1 - \sqrt{\frac{MP_d}{P_d M}}\right) \approx 0 \quad (2.27)$$

Kết quả phân tích từ biểu thức (2.26) và (2.27) chỉ ra rằng, khi số lượng người dùng đầu cuối tăng lên, dẫn tới xác suất lỗi bit hệ thống tăng và ngược lại. Bên cạnh đó, sai số ước lượng kênh truyền và công suất phát cũng ảnh hưởng đến xác suất lỗi hệ thống.

Mặt khác, khi M tiến ra ∞, biểu thức (2.25) được viết lại như sau:

$$\lim_{M\to\infty} BER_k^{ZF} = \frac{1}{2}\left(1 - \sqrt{\frac{P_d(1-K/M)}{(P_d e^2 + 1)K/M + P_d(1-K/M)}}\right)$$

$$\approx \frac{1}{2}\left(1-\sqrt{\frac{P_d}{P_d}}\right)\approx 0 \tag{2.28}$$

Kết quả phân tích xác suất lỗi hệ thống theo tham số M từ biểu thức (2.28) cho thấy rằng, khi trạm gốc BS được trang bị số lượng ăng-ten phát rất lớn làm cho xác suất lỗi hệ thống gần tiến về 0. Nói cách khác, khi số lượng người dùng là hữu hạn, việc gia tăng số lượng ăng-ten phát tại phía BS có vai trò rất lớn trong việc giảm thiểu lỗi của hệ thống.

Đồng thời, khi M tiến về 0, biểu thức (2.25) được biểu diễn lại như sau:

$$\lim_{M\to 0} BER_k^{ZF} = \frac{1}{2}\left(1-\sqrt{\frac{P_d(M-K)}{(P_d e^2+1)K+P_d\left(M-K\right)}}\right)$$

$$\approx \frac{1}{2}\left(1-\sqrt{\frac{P_d}{P_d-\left(P_d e^2+1\right)}}\right) \tag{2.29}$$

Theo kết quả biểu thức (2.29) cho thấy, khi số lượng ăng-ten phát tại phía BS giảm xuống, dẫn tới xác suất lỗi hệ thống tăng tên. Bên cạnh đó, công suất phát và sai số ước lượng kênh truyền quyết định xác suất lỗi hệ thống.

2.4. Phân tích xác suất lỗi bit của hệ thống theo kỹ thuật tiền mã hóa MRT

Trong tiểu mục này, đề án tiếp tục phân tích xác suất lỗi hệ thống theo các tham số: công suất phát, số lượng người dùng và số lượng ăng-ten phát được trang bị tại phía BS trong trường hợp áp dụng kỹ thuật tiền mã hoá MRT.

Tỉ số SINR của người dùng thứ k trong trường hợp áp dụng kỹ thuật tiền mã hoá MRT với điều kiện kênh truyền không hoàn

hảo được biểu diễn như sau:

$$SINR_k^{MRT} = \left[\frac{(1-e^2)P_d(M/K)}{P_d + e^2 + 1} \right] \quad (2.34)$$

Thay biểu thức (2.34) vào bảo thức (2.20), khi đó xác suất lỗi của hệ thống được tính như sau:

$$P_e = BER_k^{MRT} == \frac{1}{2}\left(1 - \sqrt{\frac{\left(1-e^2\right)\times P_d \times \left(M/K\right)}{\left(P_d + e^2\right) + 1 + \left(1-e^2\right)\times P_d \times \left(M/K\right)}}\right) \quad (2.35)$$

Từ biểu thức (2.35), khi công suất hệ thống tiến ra ∞ và tiến về 0, biểu thức (2.35) được biểu diễn lại như sau:

$$\lim_{P_d \to \infty} BER_k^{MRT} \approx \frac{1}{2}\left(1 - \sqrt{\frac{\left(M/K\right)}{\frac{1}{\left(1-e^2\right)} + \left(M/K\right)}}\right) \quad (2.36)$$

$$\lim_{P_d \to 0} BER_k^{MRT} \approx \lim_{P_d \to 0} \frac{1}{2}\left(1 - \sqrt{\frac{\left(1-e^2\right)\times\left(M/K\right)}{\left(1+\frac{e^2}{P_d}\right) + \frac{1}{P_d} + \left(1-e^2\right)\times\left(M/K\right)}}\right) \quad (2.37)$$

$$\approx 0.5$$

Tương tự như kỹ thuật tiền mã hoá ZF, kết quả phân tích trong các biểu thức (2.36) và (2.37) cho thấy rằng, khi tăng công suất phát dẫn tới xác suất lỗi hệ thống sẽ giảm và ngược lại. Nói cách khác, một giải pháp để cải thiện phẩm chất BER hệ thống tăng công suất phát hệ thống.

Tiếp theo, đề án tiến hành xem xét xác suất lỗi của hệ thống theo các tham số còn lại: số lượng người dùng phía đầu cuối và số lượng ăng-ten phát tại phía BS.

Tiến hành chia cả tử và mẫu của biểu thức (2.35) cho K, khi đó giới hạn hệ thống khi K tiến ra ∞ và tiến về 0 biểu diễn bằng các biểu thức sau:

$$\lim_{K\to\infty} BER_k^{MRT} \approx \lim_{K\to\infty} \frac{1}{2}\left(1-\sqrt{\frac{\left(1-e^2\right)\times P_d \times \left(M/K\right)}{\left(P_d+e^2\right)+1+\left(1-e^2\right)\times P_d\times\left(M/K\right)}}\right) \approx 0.5 \quad (2.38)$$

$$\lim_{K\to 0} BER_k^{MRT} \approx \lim_{K\to 0} \frac{1}{2}\left(1-\sqrt{\frac{\left(1-e^2\right)\times P_d \times \left(M/K\right)}{\left(P_d+e^2\right)+1+\left(1-e^2\right)\times P_d\times\left(M/K\right)}}\right)$$

$$\approx \lim_{K\to 0} \frac{1}{2}\left(1-\sqrt{\frac{\left(1-e^2\right)\times P_d}{\left(P_d+e^2+1\right)\times\left(K/M\right)+\left(1-e^2\right)\times P_d}}\right) \approx 0 \quad (2.39)$$

Kết quả tính toàn trong các biểu thức (2.38) và (2.39) cho thấy rằng, với số lượng ăng-ten phát cố định tại phía trạm gốc, khi số lượng người dùng tăng lên, dẫn tới xác suất lỗi hệ thống tăng lên và ngược lại. Bên cạnh đó, sai số ước lượng kênh truyền cũng ảnh hưởng đến xác suất lỗi hệ thống trong trường hợp xem xét tính phụ thuộc xác suất của hệ thống vào tham số K.

Mặt khác, từ biểu thức (2.35), thực hiện chia cả tử và mẫu số cho M, đồng lấy giới hạn khi M tiến ra ∞ và tiến về 0, khi đó xác suất lỗi hệ thống theo tham số M được biểu diễn thông qua các biểu thức sau:

$$\lim_{M\to\infty} BER_k^{MRT} \approx \lim_{M\to\infty} \frac{1}{2}\left(1-\sqrt{\frac{\left(1-e^2\right)\times P_d \times \left(M/K\right)}{\left(P_d+e^2\right)+1+\left(1-e^2\right)\times P_d \times \left(M/K\right)}}\right)$$

$$\approx \lim_{M\to\infty} \frac{1}{2}\left(1-\sqrt{\frac{\left(1-e^2\right)\times P_d}{\left(P_d+e^2+1\right)\times \left(K/M\right)+\left(1-e^2\right)\times P_d}}\right) \quad (2.40)$$

$$\lim_{M\to 0} BER_k^{MRT} \approx \lim_{M\to 0} \frac{1}{2}\left(1-\sqrt{\frac{\left(1-e^2\right)\times P_d \times \left(M/K\right)}{\left(P_d+e^2\right)+1+\left(1-e^2\right)\times P_d \times \left(M/K\right)}}\right) \quad (2.41)$$

Kết quả phân tích trong các biểu thức (2.40) và (2.41) cho thấy rằng, số lượng ăng-ten phát tại phía BS có ảnh hưởng rất lớn đến xác suất lỗi của hệ thống. Khi một BS phục vụ số lượng nhất định các người dùng, số lượng các ăng-ten phát tăng lên dẫn tới xác suất lỗi hệ thống giảm xuống và ngược lại. Cũng tương tự như thuật toán tiền mã hoá tuyến tính ZF, tăng số lượng ăng-ten phát được trang bị ở phía BS là một giải pháp quan trọng để cải thiện phẩm chất BER hệ thống. Điều này cũng được tiếp tục chứng minh thông qua các kết quả mô phỏng trong Chương 3. Kết quả tính toán trong các biểu thức (2.40) và (2.41) cũng chỉ ra rằng, xác suất lỗi hệ thống theo tham số M còn phục thuộc vào sai số số ước lượng kênh truyền và công suất phát của hệ thống.

2.5. Kết luận chương 2

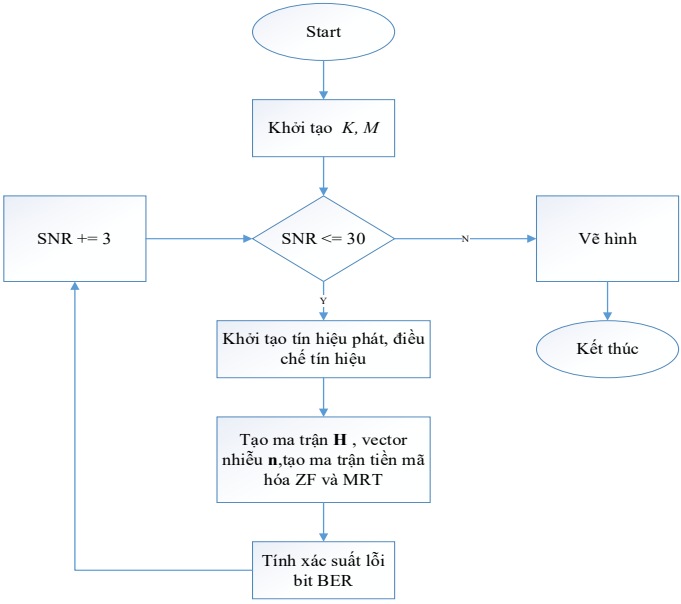
Chương 2 của đề án phân tích các nội dung đặc trưng cơ bản

của mô hình kênh hệ thống Massive MIMO, trong đó làm rõ mô hình kênh đường xuống với điều kiện kênh truyền không hoàn hảo. Bên cạnh đó, đề án trình bày những nét tổng quát về hai kỹ thuật tiền mã hoá tuyến tính ZF và MRT. Mặt khác, trong Chương 2 đã tiến hành phân tích, làm rõ bằng toán học tính phụ thuộc xác suất lỗi hệ thống theo các tham số: công suất phát, số lượng ăng-ten phát, số lượng người dùng đầu cuối cho các thuật toán tiền mã hoá ZF và MRT. Các kết quả tính toán trong chương 2 đã chỉ ra rằng, các tham số về công suất phát, số lượng ăng-ten phát và số lượng người dùng đều có ảnh hưởng đến xác suất lỗi hệ thống một cách tích cực và tiêu cực. Ngoài ra, sai số ước lượng kênh truyền đóng vai trò đặc biệt quan trọng trong việc cải thiện xác suất lỗi.

CHƯƠNG 3: MÔ PHỎNG VÀ ĐÁNH GIÁ TỈ LỆ LỖI BIT HỆ THỐNG SỬ DỤNG THUẬT TOÁN TIỀN MÃ HÓA TUYẾN TÍNH

3.1. Giới thiệu chung

Lưu đồ mô phỏng xác suất lỗi bit của hệ thống Massive MIMO được mô hình hóa trong hình 3.1. Để thực hiện được kết các quả mô phỏng đánh giá xác suất lỗi bit của hệ thống, đề án thiết lập các tham số đầu vào như: Số lượng ăng-ten phát tại BS, số lượng người dùng, Công suất phát; tạo kênh truyền không hoàn hảo từ BS đến tất cả các người dùng. Trong các kết quả mô phỏng đánh giá xác suất lỗi bit của hệ thống, kênh truyền được sử dụng là kênh pha đinh Rayleigh bán tĩnh.



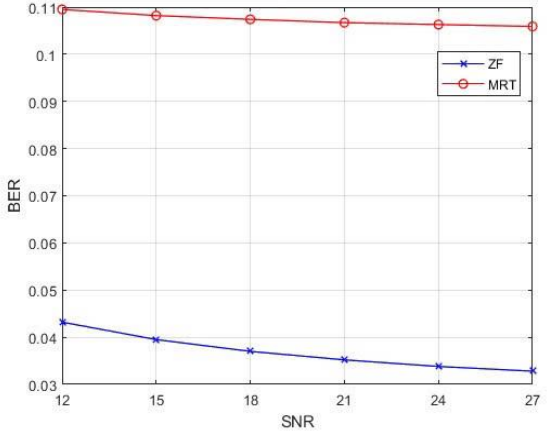
Hình 3. 1: Lưu đồ mô phỏng hiệu năng BER của hệ thống

3.2. Mô phỏng, đánh giá xác suất lỗi bit hệ thống Massive MIMO của các kỹ thuật tiền mã hóa theo công suất phát

Các tham số cụ thể được sử dụng trong quá trình mô phỏng được thể hiện trong bảng 3.1.

Tham số	Giá trị
Công suất phát	12dB → 27dB
Số lượng người dùng đầu cuối	32
Số lượng ăng-ten phát	60
Sai số ước lượng kênh truyền	0.3
Kiểu điều chế	QPSK

Bảng 3. 1: Tham số mô phỏng xác suất lỗi bit hệ thống Massive MIMO của các kỹ thuật tiền mã hóa theo công suất phát



Hình 3. 2: Kết quả mô phỏng xác suất lỗi bit hệ thống theo tham số công suất phát

Thông qua mô phỏng, xác suất lỗi bit của hệ thống theo tham số công suất phát được thể hiện trong hình 3.2. Trên cơ sở các tham số đã được thiết lập, xác suất lỗi bit hệ thống cho các thuật

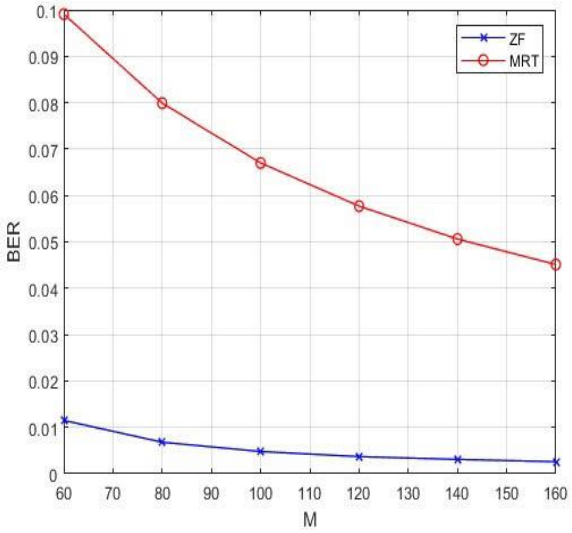
toán ZF và MRT được mô phỏng tương ứng với các biểu thức (2.22) và (2.35). Kết quả mô phỏng trong hình 3.2 cho thấy, khi tăng công suất phát dẫn tới xác suất lỗi hệ thống càng suy giảm đối với tất cả các bộ tiền mã hoá. Nói các khác, xác suất lỗi hệ thống tỉ lệ nghịch với công suất phát. Kết quả mô phỏng trong hình 3.2 cũng cho thấy rằng, xác suất lỗi hệ thống đối với kỹ thuật tiền mã hoá ZF luôn thấp hơn so với kỹ thuật MRT trong mọi tình huống. Đồng thời, tăng công suất là một giải pháp quan trọng để cải thiện phẩm chất hệ thống.

3.3. Mô phỏng, đánh giá xác suất lỗi bit hệ thống Massive MIMO của các kỹ thuật tiền mã hóa theo số lượng ăng-ten phát

Trong tiểu mục này, đề án tiến hành mô phỏng xác suất lỗi hệ thống Massive MIMO theo tham số số lượng ăng-ten phát tại phía BS. Các tham số mô phỏng chính trong bảng 3.2:

Tham số	Giá trị
Số lượng ăng-ten phát tại BS	60 → 100
Công suất phát hệ thống	24dB
Số lượng người dùng	32
Sai số ước lượng kênh truyền	0 (kênh truyền hoàn hảo)
Kiểu điều chế	QPSK

Bảng 3. 2: Tham số mô phỏng xác suất lỗi bit hệ thống Massive MIMO của các kỹ thuật tiền mã hóa theo số lượng ăng-ten phát



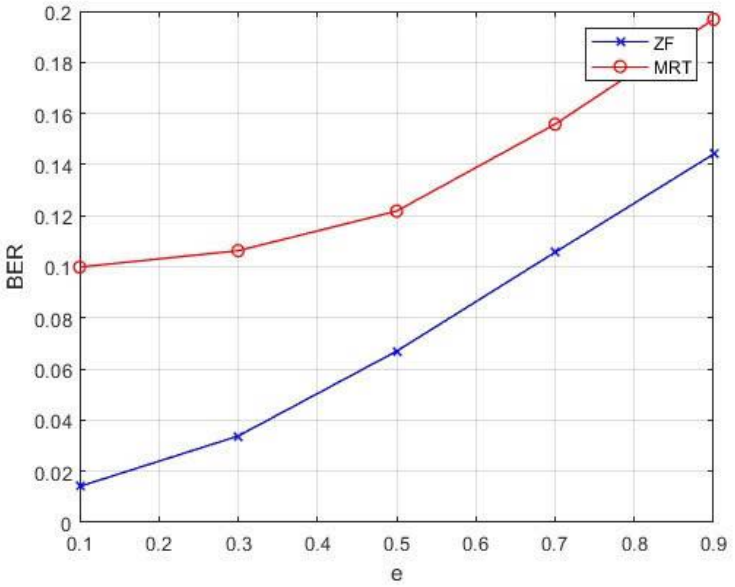
Hình 3. 3: Kết quả mô phỏng xác suất lỗi bit hệ thống theo tham số số lượng ăng-ten phát với điều kiện kênh truyền hoàn hảo

Kết quả mô phỏng trong hình 3.3 cho thấy rằng, với một số lượng người dùng nhất định, khi số lượng ăng-ten phát tại phía BS tăng lên, dẫn tới xác suất lỗi bit của hệ thống giảm xuống và ngược lại, điều này luôn đúng với tất cả các bộ tiền mã hoá. Tương tự như kết quả mô phỏng trong hình 3.2, kết quả mô phỏng trong hình 3.3 cũng cho thấy rằng, xác suất lỗi bit của hệ thống đối với thuật toán tiền mã hoá ZF luôn tốt hơn thuật toán MRT trong mọi điều kiện. Có thể nói rằng, để cải thiện phẩm chất BER hệ thống Massive MIMO, một giải pháp quan trọng đó là tăng số lượng ăng-ten phát.

Tiếp theo, đề án tiến hành mô phỏng xác suất lỗi hệ thống theo tham số sai số ước lượng kênh truyền. Các tham số mô phỏng thể hiện trong bảng 3.3 như sau:

Tham số	Giá trị
Sai số ước lượng kênh truyền	0.1 → 0.9
Số lượng ăng-ten phát	60
Số lượng người dùng	32
Công suất phát hệ thống	24dB
Kiểu điều chế	QPSK

Bảng 3. 3: Tham số mô phỏng xác suất lỗi bit hệ thống Massive MIMO của các kỹ thuật tiền mã hóa theo sai số ước lượng kênh truyền



Hình 3. 4: Kết quả mô phỏng xác suất lỗi bit hệ thống theo tham số sai số ước lượng kênh truyền

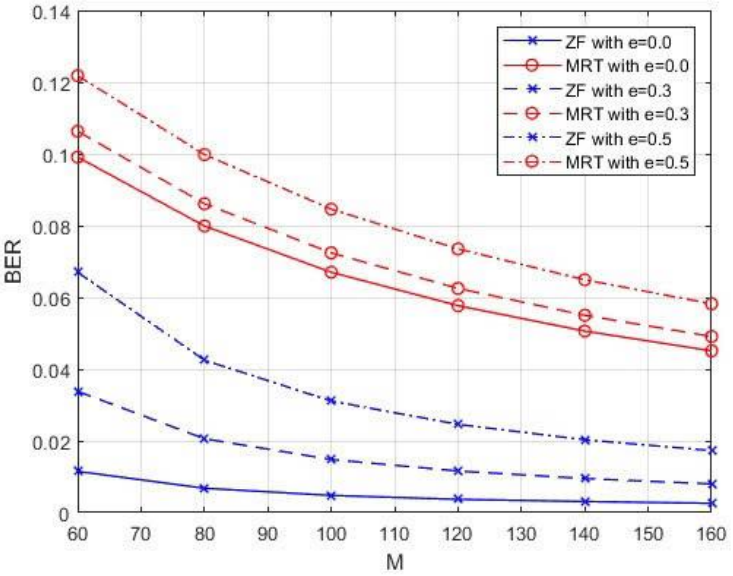
Kết quả mô phỏng trong hình 3.4 cho thấy rằng, sai số ước lượng kênh truyền có ảnh hưởng tiêu cực đến xác suất lỗi hệ thống. Cụ thể, khi sai số ước lượng kênh truyền tăng lên, dẫn tới xác suất lỗi hệ thống tăng và ngược lại. Điều này đặt ra một yêu

cầu đối với hệ thống Massive MIMO đó là phải tăng độ chính xác của bài toán ước lượng kênh truyền, nhằm cải thiện phẩm chất BER hệ thống.

Cuối cùng, để đánh giá ảnh hưởng đồng thời của hai tham số: số lượng ăng-ten phát và sai số ước lượng kênh truyền đến xác suất lỗi của hệ thống. Đề án thực hiện mô phỏng với các tham số như trong bảng 3.4:

Tham số	**Giá trị**
Sai số ước lượng kênh truyền (e)	0.0, 0.3 và 0.5
Số lượng ăng-ten phát	60 → 160
Số lượng người dùng	32
Công suất phát hệ thống	24dB
Kiểu điều chế	QPSK

Bảng 3. 4: Tham số mô phỏng xác suất lỗi bit hệ thống Massive MIMO của các kỹ thuật tiền mã hóa theo đồng thời của hai tham số: số lượng ăng-ten phát và sai số ước lượng kênh truyền



Hình 3. 5: Kết quả mô phỏng xác suất lỗi bit hệ thống theo tham số: số lượng ăng-ten phát và sai số ước lượng kênh truyền

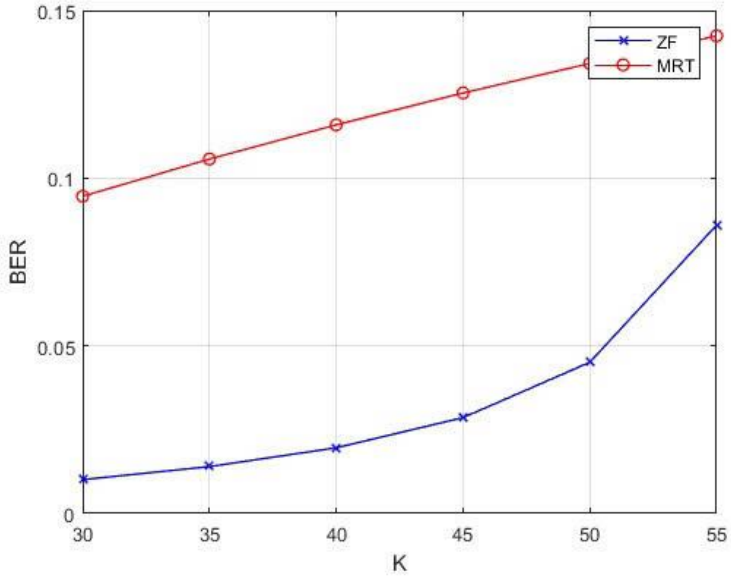
Kết quả mô phỏng trong hình 3.5 cho thấy rằng, khi tăng số lượng ăng-ten phát dẫn tới xác suất lỗi hệ thống giảm và ngược lại. Bên cạnh đó, sai số ước lượng kênh truyền luôn ảnh hưởng tiêu cực đến xác suất lỗi hệ thống đối với tất cả các bộ tiền mã hoá.

3.4. Mô phỏng, đánh giá xác suất lỗi bit hệ thống Massive MIMO của các kỹ thuật tiền mã hóa theo theo số lượng người dùng

Trong tiểu mục này, đề án tiến hành mô phỏng và đánh giá xác suất lỗi bit BER của hệ thống Massive MIMO khi xét đến sự thay đổi của số lượng người dùng được phục vụ đồng thời. Trong mô phỏng này, các tham số được thiết lập trong bảng 3.5 như sau:

Tham số	Giá trị
Số lượng người dùng	30 → 55
Sai số ước lượng kênh truyền (*e*)	0.3
Số lượng ăng-ten phát	60
Công suất phát hệ thống	24dB
Kiểu điều chế	QPSK

Bảng 3. 5: Tham số mô phỏng xác suất lỗi bit hệ thống Massive MIMO của các kỹ thuật tiền mã hóa theo số lượng người dùng



Hình 3. 6: Kết quả mô phỏng xác suất lỗi bit hệ thống theo tham số số lượng người dùng đầu cuối

Kết quả mô phỏng trong hình 3.6 cho thấy rằng, với một số lượng ăng-ten phát nhất định, khi số lượng người dùng phía đầu cuối tăng lên dẫn tới xác suất lỗi hệ thống tăng và ngược lại. Nói cách khác, khi số lượng người dùng đầu cuối tăng lên, dẫn tới

phẩm chất hệ thống sẽ giảm. Một thực tế hiện nay đó là số lượng các thiết bị đầu cuối sẽ không ngừng tăng lên, do đó khi các tham số khác không được cải thiện sẽ ảnh hưởng không nhỏ đến chất lượng dịch vụ phía người dùng.

Các kết quả mô phỏng từ các hình 3.2 đến 3.6 cho thấy rằng, để giảm thiểu xác suất lỗi hệ thống, một trong những giải pháp đó là: tăng công suất phát của hệ thống hoặc tăng số lượng ăng-ten phát được trang bị tại phía BS. Bên cạnh đó, tăng tính chính xác của việc ước lượng kênh truyền cùng là một trong những giải pháp có tính khả thi cao nhằm giảm xác suất lỗi hệ thống.

3.5. Kết luận chương

Trong chương 3, đề án đã tiến hành mô phỏng đánh giá xác suất lỗi bit của hệ thống cho các thuật toán ZF và MRT theo các tham số: công suất phát, số lượng ăng-ten phát tại phía BS và số lượng người dùng đầu cuối. Các kết quả mô phỏng đã chỉ ra rằng, xác suất lỗi của hệ thống tỉ lệ nghịch với công suất phát và số lượng ăng-ten được trang bị tại phía BS; tỉ lệ thuận với số lượng người dùng đầu cuối và sai số ước lượng kênh truyền. Trên cơ sở các kết quả mô phỏng, để nâng cao phẩm chất BER hệ thống, trong thực tế có thể gia tăng số lượng các ăng-ten phát hoặc tăng công suất phát, đồng thời cải thiện các bộ ước lượng kênh truyền được thiết kế tại phía trạm gốc.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Đề án nghiên cứu những vấn đề cơ bản trong hệ thống Massive MIMO, nghiên cứu các kỹ thuật tiền mã hóa tuyến tính. Trên cơ sở nghiên cứu những nội dung về lý thuyết kỹ thuật tiền mã hóa tuyến tính, đề án tiến hành phân tích toán học tỉ lệ lỗi bit của hệ thống theo các tham số: công suất phát, số lượng ăng-ten phát, số lượng người dùng, nhằm làm sáng tỏ hơn những vấn đề về lý thuyết.

Kết quả đạt được của đề án làm tiền đề quan trọng cho việc phân tích bằng toán học tỉ lệ lỗi bit hệ thống Massive MIMO đối với các kỹ thuật tiền mã hóa có độ phức tạp lớn hơn.

Hướng phát triển của đề án: Tiếp tục nghiên cứu phân tích bằng toán học tỉ lệ lỗi bit đối với các thuật toán tiền mã hóa tuyến tính khác như MMSE, BD và các thuật toán phi tuyến cho hệ thống Massive MIMO.