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

ĐỀ ÁN TỐT NGHIỆP THẠC SĨ KỸ THUẬT

(Theo định hướng ứng dụng)

HÀ NỘI – 2025

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

ĐỀ ÁN TỐT NGHIỆP THẠC SĨ KỸ THUẬT

(Theo định hướng ứng dụng)

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC:

TS. Đinh Văn Khôi

PGS. TS. Dương Thị Thanh Tú

HÀ NỘI - 2025

LỜI CAM ĐOAN

Tôi cam đoan đây là công trình nghiên cứu của riêng tôi.

Các số liệu, kết quả nêu trong đề án là trung thực và chưa từng được ai công bố trong bất kỳ công trình nào khác.

Tác giả đề án

Hồ Văn Tuyển

LỜI CẢM ƠN

Trong quá trình học tập và nghiên cứu tại Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông, để hoàn thành đề án này, tôi đã nhận được nhiều sự giúp đỡ và đóng góp quý báu của các thầy cô, các nhà khoa học, các đồng chí, đồng đội, các bạn cùng lớp.

Đầu tiên, tôi xin bày tỏ lòng cảm ơn sâu sắc tới thầy, cô giáo hướng dẫn là TS. Đinh Văn Khôi và PGS. TS Dương Thị Thanh Tú đã tận tình hướng dẫn và giúp đỡ tôi trong quá trình học tập và nghiên cứu. Tôi xin chân thành cảm ơn Khoa Sau Đại học, Khoa Viễn thông 1 của Học viện đã tạo điều kiện thuận lợi để tôi hoàn thành nhiệm vụ.

Cuối cùng, tôi xin bày tỏ lòng cảm ơn đến gia đình, bạn bè, các đồng chí, đồng đội đã luôn động viên, giúp đỡ tôi vượt qua khó khăn để đạt được những kết quả nghiên cứu như ngày hôm nay.

Do thời gian và trình độ có hạn, bản đề án không tránh khỏi thiếu sót, rất mong nhận được sự góp ý, đánh giá của các thầy cô để bản đề án được hoàn thiện hơn.

Xin trân trọng cảm ơn!

TÁC GIẢ

MỤC LỤC

LỜI CAM ĐOAN i
LỜI CẢM ƠN ii
MỤC LỤC iii
DANH MỤC CÁC THUẬT NGỮ, CHỮ VIẾT TẮT v
DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU TOÁN HỌC vii
DANH SÁCH BẢNG ix
DANH SÁCH HÌNH VẼ x
MỞ ĐẦU 1
CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN VỀ HỆ THỐNG MASSIVE MIMO 4
1.1. Tổng quan về kỹ thuật MIMO 4
1.2. Quá trình hình thành, phát triển từ hệ thống MU-MIMO lên hệ thống Massive MIMO 6
1.2.1. Hệ thống MU-MIMO 6
1.2.2. Hệ thống Massive MIMO 8
1.3. Nguyên lý hoạt động của hệ thống Massive MIMO 12
1.3.1. Nguyên lý truyền tín hiệu đường lên 13
1.3.2. Nguyên lý truyền tín hiệu đường xuống 14
1.4. Một số ưu điểm, hạn chế của hệ thống Massive MIMO 15
1.4.1 Ưu điểm 15
1.4.2. Hạn chế 16
1.4.3. Thách thức 17
1.5. Ứng dụng kỹ thuật Massive MIMO trong triển khai các hệ thống vô tuyến 21
1.5.1. Ứng dụng trong triển khai hệ thống mạng 5G 21
1.5.2. Ứng dụng trong triển khai mạng WIFI 21
1.6. Kết luận chương 22
CHƯƠNG 2: PHÂN TÍCH TỈ LỆ LỖI BIT HỆ THỐNG THEO CÁC THUẬT TOÁN TIỀN MÃ HÓA TUYẾN TÍNH 23
2.1. Mô hình hệ thống 23

2.2. Kỹ thuật tiền mã hóa tuyến tính 24
2.3. Phân tích xác suất lỗi bit của hệ thống theo kỹ thuật tiền mã hóa ZF 25
2.4. Phân tích xác suất lỗi bit của hệ thống theo kỹ thuật tiền mã hóa MRT.....30
2.5. Kết luận chương 2 33
CHƯƠNG 3: MÔ PHỎNG VÀ ĐÁNH GIÁ TỈ LỆ LỖI BIT HỆ THỐNG SỬ DỤNG THUẬT TOÁN TIỀN MÃ HÓA TUYẾN TÍNH.....34
3.1. Giới thiệu chung 34
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 36
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.....38
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 42
3.5. Kết luận chương 43
KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ.....45
DANH MỤC CÁC TÀI LIỆU THAM KHẢO.....46

DANH MỤC CÁC THUẬT NGỮ, CHỮ VIẾT TẮT

Viết tắt	Tiếng Anh	Tiếng Việt
BER	Bit Error Rate	Tỷ lệ lỗi bit
BS	Base Station	Trạm gốc
CSI	Channel State Information	Thông tin trạng thái kênh truyền
DPC	Dirty Paper Coding	Mã hóa giấy bẩn
I.I.D	Identical Independent Distributed	Phân bố độc lập và đồng nhất
ISI	Inter Symbol Interference	Nhiễu liên ký tự
FDD	Frequency Division Duplexing	Chế độ ghép song công phân chia theo tần số
LOS	Line-of-Sight	Tia trực tiếp
MIMO	Multi Input – Multi output	Đa đầu vào - đa đầu ra
MMSE	Minimum Mean Square Error	Trung bình bình phương sai số nhỏ nhất
MRC	Maximal Ratio Combining	Kết hợp tỉ lệ cực đại
MRT	Maximum Ratio Transmission	Truyền tỉ lệ cực đại
MU-MIMO	Multiuser Multiple-Input Multiple-Output	Hệ thống đa người dùng, đa đầu vào, đa đầu ra
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying	Điều chế khoá dịch pha
SU-MIMO	Single user MIMO	Hệ thống đơn người dùng, đa đầu vào, đa đầu ra
SNR	Signal to Noise Ratio	Tỷ số tín hiệu/ Nhiễu
SINR	Signal to Interference plus Noise Ratio	Tỉ số tín hiệu/Nhiễu giao thoa người dùng cộng nhiễu
TDD	Time Division Duplexing	Ghép kênh phân chia theo thời gian
THP	Tomlinson Harashima Precoding	Tiền mã hóa Tomlinson - Harashima
WiFi	Wireless Fidelity	Hệ thống mạng không dây sử dụng sóng vô tuyến

Viết tắt	Tiếng Anh	Tiếng Việt
ZF	Zero Forcing	Cưỡng bức bằng không
3G	Three Generation Cellular Network	Mạng thông tin di động thế hệ thứ ba
4G	Fourth Generation Cellular Network	Mạng thông tin di động thế hệ thứ tư
5G	Fifth Generation Cellular Network	Mạng thông tin di động thế hệ thứ năm

DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU TOÁN HỌC

Ký hiệu	Ý nghĩa
a	Ký hiệu một biến số
$\mathbf{a}$	Ký hiệu một Véc-tơ
$\mathbf{A}$	Ký hiệu một ma trận
a_{ij}	Phần tử hàng thứ i cột thứ j của ma trận $\mathbf{A}$
$\mathbf{A}^H$	Chuyển vị liên hợp phức của ma trận $\mathbf{A}$
$\mathbf{A}^T$	Chuyển vị của ma trận $\mathbf{A}$
C	Dung lượng hệ thống
$\mathbf{I}$	Ma trận đơn vị
$\mathbf{H}$	Ma trận kênh truyền
$\hat{\mathbf{H}}$	Ma trận kênh truyền pha-đinh Rayleigh hoàn hảo
$\log_2(.)$	Logarit cơ số 2
$\mathbf{n}$	Véc-tơ tạp âm phía người dùng
M	Số ăng-ten phát phía trạm gốc
K	Tổng số ăng-ten thu phía người dùng
$\mathbf{x}$	Véc-tơ tín hiệu gốc phía máy phát
$\mathbf{y}$	Véc-tơ tín hiệu thu phía người dùng
$\mathbf{W}$	Ma trận tiền mã hóa
P_e	Xác suất lỗi bit
P_d	Tổng công suất phát
$\|\|.\|\|_F^2$	Chuẩn Frobenius của ma trận
$\|a\|$	Modul của số phức a
$E\{.\}$	Phép lấy kỳ vọng
σ	Độ lệch chuẩn
σ^2	Phương sai của tạp âm
ρ	Tỉ lệ SNR trung bình
ε	Phân bố Rayleigh

Ký hiệu	Ý nghĩa
e	Tham số đánh giá độ chính xác của bộ ước lượng kênh
$\mathbf{E}$	Ma trận lỗi ước lượng kênh
β	Hằng số chuẩn hóa công suất
$tr(.)$	Phép tính tổng thành phần đường chéo ma trận

DANH SÁCH BẢNG

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 37
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 38
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.....40
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 41
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.....42

DANH SÁCH HÌNH VẼ

Hình 1. 1: Mô hình kênh MIMO cơ bản 4
Hình 1. 2: Mô hình kênh truyền dữ liệu hệ thống MIMO điểm – điểm 5
Hình 1. 3: Mô hình kênh MIMO đa người dùng 7
Hình 1. 4: Mô hình kênh truyền đường lên và đường xuống hệ thống Massive MIMO 9
Hình 1. 5: Các thành phần chính của hệ thống Massive MIMO 11
Hình 1. 6: Hoạt động đường lên và đường xuống của một liên kết Massive MIMO 13
Hình 2. 1: Mô hình kênh đường xuống hệ thống MIMO đa người dùng 23
Hình 2. 2: Mô hình kỹ thuật tiền mã hóa tuyến tính tổng quát cho hệ thống Massive MIMO 25
Hình 3. 1: Lưu đồ mô phỏng hiệu năng BER của hệ thống 36
Hình 3. 2: Kết quả mô phỏng xác suất lỗi bit hệ thống theo tham số công suất phát 37
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 39
Hình 3. 4: Kết quả mô phỏng xác suất lỗi bit hệ thống theo tham số sai số ước lượng kênh truyền 40
Hình 3. 5: Kết quả mô phỏng xác suất lỗ111100i bit hệ thống theo tham số: số lượng ăng-ten phát và sai số ước lượng kênh truyền 41
Hình 3. 6: Kết quả mô phỏng xác suất lỗi bit hệ thống theo tham số số lượng người dùng đầu cuối 43

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 dung 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 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

Trong Chương 2, đề án tập trung trình bày mô hình kênh Massive MIMO trong điều kiện kênh truyền không hoàn hảo. Trên cơ sở mô hình kênh truyền không hoàn hảo, Chương 2 tiến hành phân tích bằng toán học tỉ lệ lỗi bit của hệ thống theo kỹ thuật tiền mã hóa cưỡng bức bằng không ZF và truyền tỉ lệ cực đại MRT theo các tham số: Công suất phát, số lượng ăng-ten phát tại phía BS và số lượng người dùng đầu cuối. Kết quả của Chương 2 là cơ sở cho các mô phỏng, đánh giá thể 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

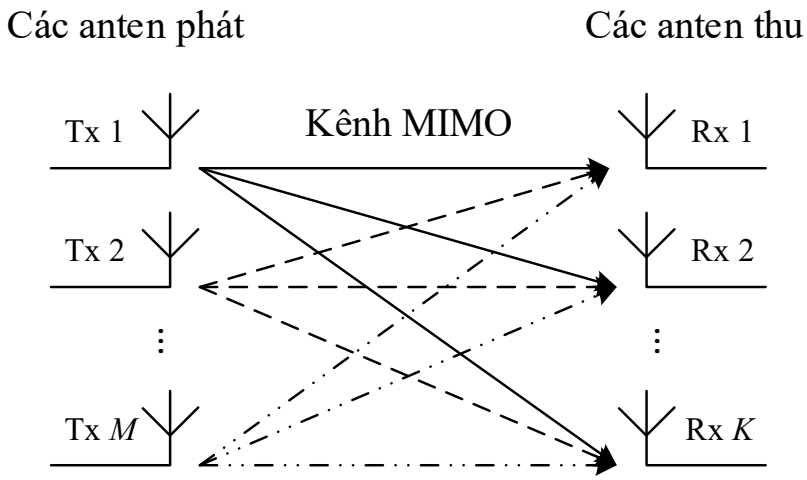
Tiến hành mô phỏng và đánh giá tỉ lệ lỗi bit của hệ thống Massive MIMO theo các kỹ thuật tiền mã hóa ZF, MRT bằng phần mềm Matlab theo các tham số đã được phân tích trong Chương 2.

CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN VỀ HỆ THỐNG MASSIVE MIMO

1.1. Tổng quan về kỹ thuật MIMO

Giới hạn hiệu suất của bất kỳ mạng không dây nào sẽ luôn nằm ở lớp vật lý, bởi lẽ, về cơ bản, khả năng truyền tải dữ liệu giữa hai thiết bị đầu cuối bị giới hạn bởi tính khả dụng của phổ tần, các quy tắc lan truyền sóng điện từ và nguyên lý của lý thuyết thông tin. Mạng không dây có thể nâng cao tính hiệu quả bởi ba cách cơ bản sau: triển khai các điểm truy cập với mật độ dày đặc hơn, sử dụng nhiều phổ tần hơn và tăng hiệu suất phổ (tăng số bit có thể được truyền tải mỗi giây trên mỗi đơn vị băng thông). Mặc dù trong tương lai, có thể triển khai mật độ điểm truy cập nhiều hơn và khai thác thêm các dải phổ tần số mới, nhưng nhu cầu sử dụng hiệu quả hiệu suất phổ trong một băng tần nhất định sẽ không thay đổi.

Việc triển khai đồng thời nhiều ăng-ten, còn được gọi là công nghệ đa đầu vào, đa đầu ra (MIMO: Multi Input Multi Output) là phương pháp khả thi duy nhất nhằm nâng cao hiệu suất sử dụng phổ tần. Công nghệ MIMO được phân thành ba loại, thể hiện sự phát triển qua các thời kỳ gần như tách biệt: MIMO điểm - điểm (SU-MIMO: Single user MIMO), MIMO đa người dùng (MU-MIMO: Multiuser Multiple - Input Multiple - Output) và Massive MIMO [11].



Hình 1. 1: Mô hình kênh MIMO cơ bản

MIMO điểm - điểm đại diện cho dạng đơn giản nhất của MIMO: một trạm gốc được trang bị nhiều ăng-ten cung cấp dịch vụ một thiết bị đầu cuối được trang bị đa ăng-ten; mô hình MIMO điểm - điểm được mô tả như trong hình 1.1. Trong hệ

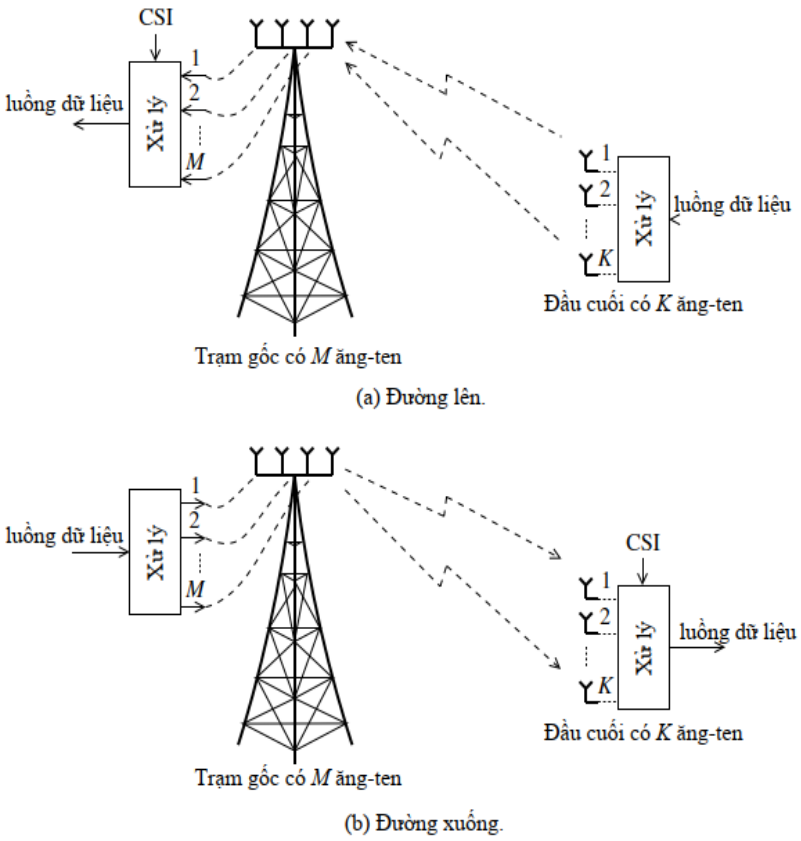
thống này, quá trình truyền dữ liệu giữa các thiết bị đầu cuối một cách trực giao bằng cách kết hợp cả hai phương pháp: ghép kênh phân chia theo thời gian và ghép kênh phân chia theo tần số [9].

Trong mỗi lần sử dụng kênh, một vectơ được phát và một vectơ được thu. Khi có nhiễu trắng Gauss cộng tại máy thu, dung lượng kênh đường lên và đường xuống được tính bằng:

$$C^{\mathrm{ul}} = \log_2 \left| \mathbf{I}_M + \frac{\rho_{\mathrm{ul}}}{K} \mathbf{H}\,\mathbf{H}^{\mathrm{H}} \right| \tag{1.1}$$

$$C^{\mathrm{dl}} = \log_2 \left| \mathbf{I}_K + \frac{\rho_{\mathrm{dl}}}{M} \mathbf{H}^{\mathrm{H}}\mathbf{H} \right|$$

$$= \log_2 \left| \mathbf{I}_M + \frac{\rho_{\mathrm{dl}}}{M} \mathbf{H}\,\mathbf{H}^{\mathrm{H}} \right| \tag{1.2}$$



Hình 1. 2: Mô hình kênh truyền dữ liệu hệ thống MIMO điểm – điểm

Từ biểu thức (1.1) và (1.2), **H** là ma trận kênh từ trạm gốc (BS: Base Station) đến thiết bị đầu cuối có kích thước $M \times K$ biểu thị đáp ứng tần số của kênh từ các ăng-ten của trạm gốc đến từng thiết bị đầu cuối trong hệ thống; ρ_{ul} và ρ_{dl}

là tỷ số tín hiệu trên nhiễu (SNR: Signal to Noise Ratio) đường lên và đường xuống, tỷ lệ với tổng công suất bức xạ tương ứng; M là số lượng ăng-ten của trạm gốc; K là số lượng ăng-ten được trang bị tại thiết bị đầu cuối.

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

Trong hệ thống MIMO đa người dùng, một trạm gốc có khả năng đồng thời kết nối và truyền dữ liệu cho nhiều thiết bị đầu cuối trên cùng dải thời gian và tần số, điều này được thể hiện ở hình 1.3. Về bản chất, mô hình MIMO đa người dùng được hình thành từ mô hình MIMO điểm - điểm bằng cách phân tách thiết bị đầu cuối có K ăng-ten thành các thiết bị đầu cuối độc lập, hoạt động riêng biệt nhưng vẫn dùng chung phổ tần số.

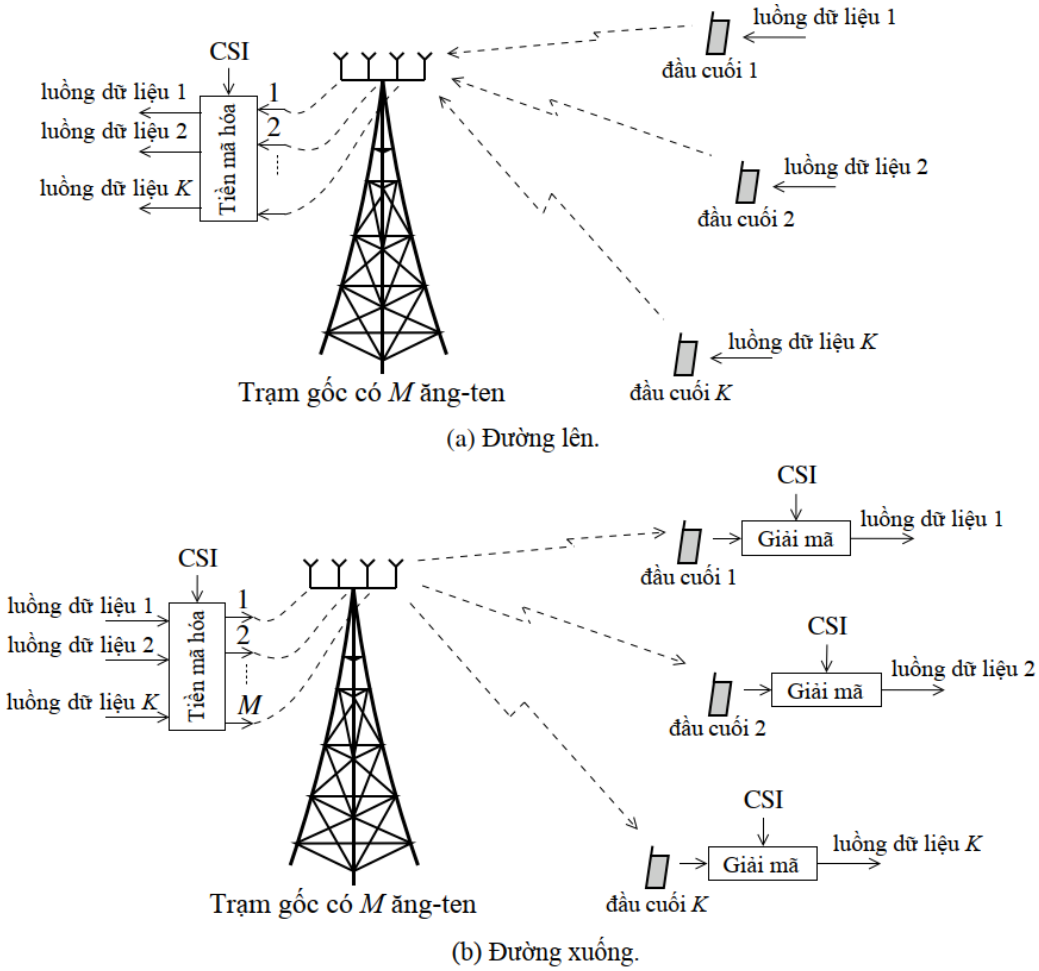
Giả định rằng trong hệ thống MIMO đa người dùng, các thiết bị đầu cuối chỉ được trang bị một ăng-ten duy nhất. Trong mô hình được minh họa ở hình 1.3, trạm gốc (BS) sẽ phục vụ đồng thời K thiết bị đầu cuối. Giả sử $\mathbf{H}$ là ma trận kích thước $M \times K$ tương ứng với đáp ứng tần số giữa các ăng-ten trạm gốc và K các thiết bị đầu cuối. Khi đó, biểu diễn hiệu suất phổ tổng đường lên và đường xuống như sau:

$$C^{\text{ul}} = \log_2 \left| \mathbf{I}_M + \rho_{\text{ul}} \mathbf{H}\mathbf{H}^{\text{H}} \right| \tag{1.3}$$

$$C^{\text{dl}} = \max_{\substack{v_k \geq 0 \\ \sum_{k=1}^{K} v_k \leq 1}} \log_2 \left| \mathbf{I}_M + \rho_{\text{dl}} \mathbf{H}\, \mathbf{D}_{\boldsymbol{v}} \mathbf{H}^{\text{H}} \right| \tag{1.4}$$

Trong đó $v = [v_1, ..., v_k]^T$, ρ_{ul} là tỉ số tín hiệu trên nhiễu SNR đường lên trên mỗi thiết bị đầu cuối và ρ_{dl} là SNR đường xuống (với ρ_{ul} cho trước, tổng công suất đường lên lớn hơn K lần so với mô hình MIMO điểm - điểm). Việc có được thông tin trạng thái kênh truyền (CSI: Channel State Information) giữ vai trò quyết định với cả (1.3) và (1.4). Ở đường lên, trạm gốc cần CSI để tách tín hiệu của từng người dùng, giảm nhiễu và điều chỉnh tốc độ truyền phù hợp cho mỗi thiết bị đầu cuối. Ở đường xuống, cả trạm gốc và thiết bị đầu cuối đều cần CSI: đối với trạm gốc dùng thực hiện kỹ thuật tiền mã hóa (precoding) và định hướng búp sóng (beamforming), còn thiết bị

đầu cuối dùng để giải mã tín hiệu chính xác và phản hồi chất lượng kênh [4]. Nhờ đó, hệ thống đạt hiệu suất phổ cao, giảm lỗi truyền.



Hình 1. 3: Mô hình kênh MIMO đa người dùng

Các ăng-ten tại thiết bị đầu cuối có thể phối hợp nhau trong hệ thống MIMO điểm - điểm để truyền và nhận tín hiệu một cách hiệu quả, giúp nâng cao hiệu suất và giảm nhiễu trong quá trình truyền dữ liệu. Trong hệ thống MIMO đa người dùng, mỗi thiết bị đầu cuối hoạt động riêng biệt và độc lập, không thể phối hợp với các thiết bị khác. Tuy nhiên, hiệu suất phổ trên đường lên vẫn được đảm bảo, thậm chí có thể đạt mức tương đương với hệ thống MIMO điểm - điểm. Đặc biệt đối với hệ thống MIMO đa người dùng, dung lượng đường xuống có thể cao hơn so với MIMO điểm điểm, bởi vì giả định trong trường hợp này, trạm gốc có đầy đủ thông tin trạng thái kênh truyền CSI cho phép trạm gốc tối ưu hóa việc tiền mã hóa và

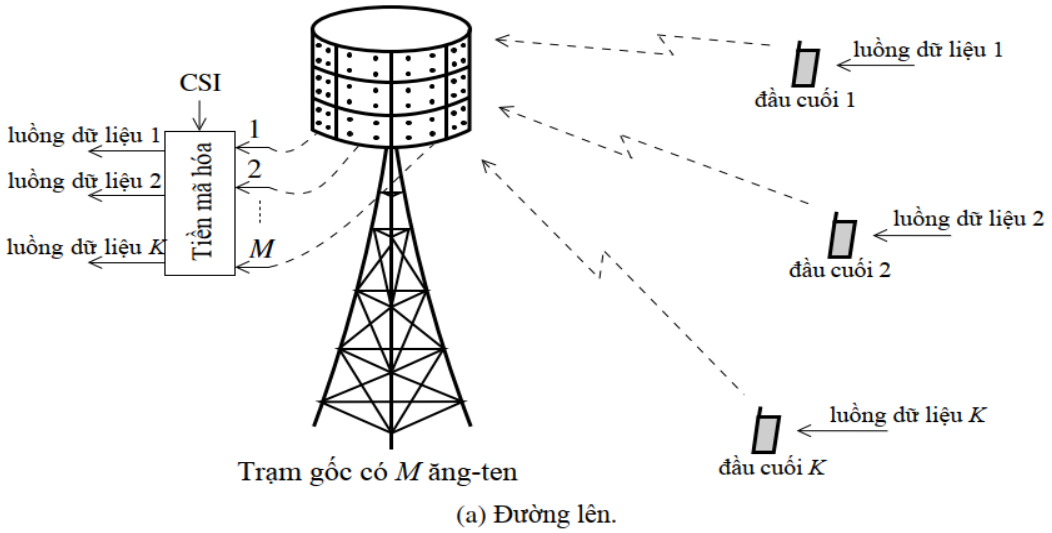
phân bổ tài nguyên, qua đó nâng cao đáng kể hiệu quả truyền dẫn và chất lượng cung cấp.

Hệ thống MIMO đa người dùng có hai ưu điểm cơ bản so với hệ thống MIMO điểm - điểm: Thứ nhất, hệ thống MIMO đa người dùng ít nhạy cảm hơn với các giả định về môi trường lan truyền. Ví dụ, các điều kiện về tia trực tiếp (LoS: Line-of-Sight) đang là thách thức cho hệ thống MIMO điểm - điểm, tuy nhiên điều này không bị ảnh hưởng với hệ thống MIMO đa người dùng. Ưu điểm thứ hai là hệ thống MIMO đa người dùng chỉ yêu cầu một ăng-ten được trang bị tại các thiết bị đầu cuối. Bên cạnh những ưu điểm mà hệ thống MU-MIMO mang lại, hệ thống này cũng phải đối diện với các hạn chế nhất định: Thứ nhất, để đạt được hiệu suất phổ trong (1.3) và (1.4) đòi hỏi cả trạm gốc cùng với thiết bị đầu cuối phải xử lý tín hiệu phức tạp. Thứ hai, trên đường xuống, cả trạm gốc và thiết bị đầu cuối cần có thông tin ma trận **H**; vì vậy phải phân bổ không ít tài nguyên cho tín hiệu lái theo cả chiều lên và chiều xuống. Vì những lý do này, dạng MIMO đa người dùng ban đầu không thể mở rộng về cả M lẫn K.

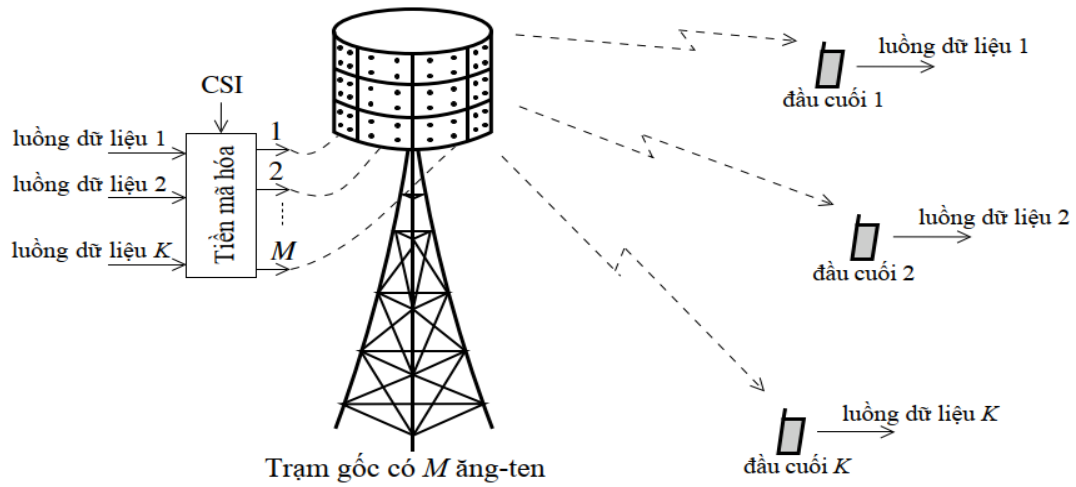
1.2.2. Hệ thống Massive MIMO

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 ăng-ten 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.



(a) Đường lên.



(b) Đường xuống.

Hình 1. 4: 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, hệ thống Massive MIMO không cần sự can thiệp và phối hợp giữa các trạm gốc.

Hệ thống Massive MIMO được hình thành trên cơ sở hệ thống MU-MIMO, tuy nhiên, so với hệ thống này, Massive MIMO có một số điểm khác biệt như:

Trước hết, toàn bộ CSI được ước lượng và quản lý tập trung tại trạm gốc. Đối với hệ thống MIMO thông thường, cả trạm gốc và thiết bị đầu cuối đều cần biết CSI để hiệu chỉnh và tối ưu hóa quá trình truyền và thu tín hiệu trong kênh. Đối với hệ thống Massive MIMO, có thể tối ưu hóa kỹ thuật tạo chùm tia và tiền mã hóa tại trạm gốc dựa trên CSI thu được từ các tín hiệu lái trong kỹ thuật ghép song công phân chia theo thời gian (TDD: Time Division Duplexing). Tuy nhiên, kỹ thuật này yêu cầu hiệu chỉnh đối xứng kênh một cách chuẩn xác; bất kỳ sai số phát sinh trong quá trình ước lượng kênh đều có khả năng làm ảnh hưởng hiệu quả vận hành toàn bộ hệ thống.

Hai là, số lượng ăng-ten được trang bị tại trạm gốc rất lớn, lớn hơn nhiều so với số lượng người dùng được phục vụ đồng thời [10]. Cấu trúc này mang lại độ lợi mảng tương đối tốt, giúp tăng tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu SNR và giảm công suất phát yêu cầu mà chất lượng truyền dẫn vẫn được đảm bảo. Khi M tăng, các kênh truyền giữa người dùng trở nên gần như trực giao, nhờ đó triệt tiêu được nhiễu xuyên người dùng gần như hoàn toàn. Bên cạnh đó, hiệu suất phổ của hệ thống tăng gần tuyến tính theo M mà không cần mở rộng băng tần, điều này cho phép phục vụ nhiều người dùng hơn hoặc cải thiện tốc độ dữ liệu.

Ba là, khác với hệ thống MU-MIMO phải sử dụng các thuật toán phi tuyến, các kỹ thuật xử lý tín hiệu tuyến tính đơn giản nhưng có hiệu quả được sử dụng tại hệ thống Massive MIMO như cưỡng bức bằng không (ZF: Zero Forcing), truyền tỉ lệ cực đại (MRT: Maximum Ratio Transmission) và trung bình bình phương sai số nhỏ nhất (MMSE: Minimum Mean Square Error) cho đường xuống. Ở đường lên, sử dụng các thuật toán ZF hoặc MMSE tại trạm gốc để tách tín hiệu xếp chồng từ nhiều người dùng. Ở đường xuống, trạm gốc tiền mã hóa dữ liệu dựa trên CSI đã biết nhằm giảm nhiễu giao thoa cho mỗi người dùng. Khi kết hợp với số lượng ăng-ten rất lớn, các phương pháp tuyến tính này vẫn có thể đạt hiệu năng gần như tối ưu theo giới hạn Shannon, trong khi giảm đáng kể độ phức tạp tính toán. Chính nhờ ưu

điểm này, hệ thống Massive MIMO có khả năng mở rộng quy mô, đảm bảo hiệu quả triển khai trong thực tế mà không cần tới các thuật toán phi tuyến phức tạp.

Giải mã tuyến tính hoặc tách sóng được sử dụng trên đường lên, trong khi tiền mã hóa hoặc ghép kênh tuyến tính được sử dụng trên đường xuống. Hình 1.5 thể hiện các thành phần chính trong một hệ thống Massive MIMO.



Hình 1. 5: Các thành phần chính của hệ thống Massive MIMO

1 - Pilot Tx: Truyền tín hiệu lái "pilot" từ thiết bị đầu cuối hoặc trạm gốc để phục vụ ước lượng kênh truyền. Đây là bước đầu tiên giúp hệ thống xác định đặc tính kênh không gian giữa các ăng-ten.

2 - Mã hóa: Mã hóa kênh dữ liệu người dùng để giảm ảnh hưởng bởi nhiễu và giảm lỗi bit trong quá trình truyền.

3 - Giải mã & phát hiện: Ở đầu thu, tín hiệu nhận được sẽ được phát hiện và giải mã để khôi phục dữ liệu gốc của từng người dùng.

4 - Tạo chùm tia: Tại trạm gốc, thông tin trạng thái kênh CSI được sử dụng để tập trung năng lượng phát theo hướng người dùng mục tiêu, giúp tăng tỷ số tín hiệu trên nhiễu SNR, đồng thời giảm thiểu nhiễu giao thoa giữa các người dùng [4].

5 - Tiền mã hóa: Trước khi phát, tín hiệu được tiền mã hóa tuyến tính dựa trên ma trận kênh ước lượng, đảm bảo mỗi người dùng nhận được luồng dữ liệu riêng biệt.

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, biểu diễn tổng hợp các ảnh hưởng của pha-đinh, quá trình tán xạ cùng các đặc tính truyền sóng khác.

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.

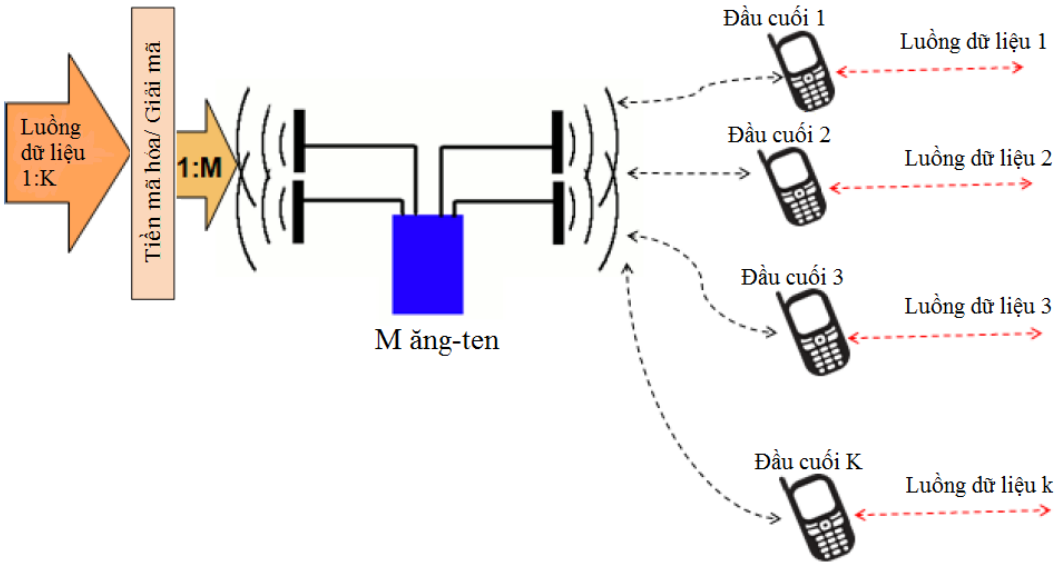
Chế độ ghép song công phân chia theo thời gian TDD được xem là giải pháp khắc phục vấn đề ước lượng kênh đường xuống trong chế độ FDD. Trong TDD, bằng cách khai thác tính đối xứng kênh truyền (đáp ứng xung giữa hai ăng-ten giống nhau ở cả hai hướng truyền), trạm gốc có thể ước lượng kênh đường xuống 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. Tuy vậy, vì tập tín hiệu lái trực giao có giới hạn nên chúng buộc phải được tái sử dụng, hiện tượng nhiễu tín hiệu lái xảy ra, làm giảm chất lượng ước lượng kênh và gây nhiễu chéo giữa các tế bào. Đồng thời, khi số lượng ăng-ten tăng lên, yêu cầu về phần cứng và khối lượng tính toán cũng tăng đáng kể.

1.3. Nguyên lý hoạt động của hệ thống Massive MIMO

Các hệ thống Massive MIMO thông thường bao gồm nhiều trạm gốc được bố trí ngẫu nhiên, mỗi trạm gốc có số lượng người được phục vụ nhất định. Các trạm gốc hoạt động theo một phương thức truy cập, các kỹ thuật sử dụng đa dạng và kiểu truyền tín hiệu tương tự nhau. Ngoài ra, công suất phát trung bình trên mỗi đơn vị

diện tích phục vụ cũng thường được giữ ở mức như nhau (được điều chỉnh bằng các thuật toán điều khiển công suất).

Trong hình 1.6, mô tả hoạt động truyền dữ liệu đường lên và đường xuống giữa trạm gốc và các thiết bị đầu cuối trong hệ thống Massive MIMO. Trạm gốc được trang bị hàng trăm ăng-ten để phục vụ hàng trăm người dùng tại một thời điểm, trong đó mỗi người dùng thường chỉ có một ăng-ten duy nhất như thể hiện trong hình.



Hình 1. 6: Hoạt động đường lên và đường xuống của một liên kết Massive MIMO

1.3.1. Nguyên lý truyền tín hiệu đường lên

Quá trình truyền dữ liệu trên đường lên bao gồm nhiều bước xử lý tín hiệu từ phía người dùng đến trạm gốc. Cụ thể 04 bước sau:

Bước 1. Mã hóa dữ liệu (Data Encoding): Trước khi truyền, dữ liệu gốc người dùng được mã hóa kênh nhằm bảo vệ thông tin khỏi lỗi bit do nhiễu, pha-đinh hoặc giao thoa trong quá trình truyền. Việc áp dụng kỹ thuật mã hóa góp phần tăng cường tính ổn định của kết nối vô tuyến và tối ưu hiệu suất hoạt động hệ thống.

Bước 2. Truyền tín hiệu lái và dữ liệu đồng thời (Pilot Transmission and Uplink Data): Mỗi thiết bị người dùng sẽ phát tín hiệu dẫn và chuỗi dữ liệu đường lên trên cùng băng tần và cùng thời điểm đến trạm gốc. Tín hiệu lái cho phép trạm gốc tiếp nhận được dữ liệu thông tin trạng thái kênh truyền CSI để ước lượng kênh truyền được chính xác giữa trạm gốc và thiết bị người dùng [5].

Bước 3. Ước lượng kênh và thu tín hiệu (Channel Estimation and Signal Reception): Để ước lượng đáp ứng kênh truyền cho từng người dùng, trạm gốc sử dụng tín hiệu lái thu được đồng thời thu nhận tổng hợp các tín hiệu dữ liệu từ tất cả các người dùng trong tế bào. Việc cho phép nhiều người dùng truy cập đồng thời trên cùng băng tần nên trạm gốc cần phân tách các tín hiệu chồng chập bằng các kỹ thuật xử lý tín hiệu.

Bước 4. Giải mã và phát hiện tín hiệu (Detection and Decoding): Dựa trên CSI đã ước lượng, trạm gốc thực hiện giải điều chế và phát hiện tín hiệu để tách riêng các luồng dữ liệu của từng người dùng. Sau đó, các tín hiệu thu được được giải mã để khôi phục lại dữ liệu gốc. Các kỹ thuật giải mã tuyến tính như cưỡng bức bằng không ZF, trung bình bình phương sai số nhỏ nhất MMSE và kết hợp tỉ lệ cực đại (MRC: Maximal Ratio Combining) thường được áp dụng để giảm nhiễu xuyên kênh và tăng độ chính xác của việc tách luồng.

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. Hai phương pháp tiền mã hóa phổ biến là:

- Cưỡng bức bằng không ZF: Triệt tiêu hoàn toàn nhiễu giao thoa bằng cách nghịch đảo ma trận kênh.

- Truyền tỉ lệ cực đại MRT: tín hiệu được truyền theo hướng cực đại của kênh, giúp tối đa công suất thu nhưng không triệt được nhiễu giữa các người dùng.

Các phương pháp này có yêu cầu tính toán thấp, thích hợp cho hệ thống có số lượng lớn ăng-ten như Massive MIMO, đồng thời giảm thiểu lỗi và tăng hiệu suất phổ tần của mạng.

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

1.4.1 Ưu điểm

* Hiệu suất phổ cao: Massive MIMO mang lại hiệu suất phổ vượt trội nhờ có số lượng lớn ăng-ten có thể phục vụ đồng thời nhiều người dùng trong cùng một băng tần số, việc khai thác kỹ thuật ghép kênh không gian và độ lợi mảng ăng-ten đảm bảo hệ thống có thể truyền nhiều luồng dữ liệu song song mà không cần thêm phổ tần mới [8]. Số lượng ăng-ten tại trạm gốc đóng vai trò quyết định, điều này giúp hiệu suất phổ và tốc độ đường truyền của hệ thống tăng gần như tăng tuyến tính với số lượng ăng-ten.

* Hiệu suất năng lượng cao: Ưu điểm nổi bật của hệ thống Massive MIMO là năng lượng được sử dụng hiệu quả nhờ tập trung bức xạ năng lượng vào đúng hướng người dùng thông qua kỹ thuật tạo chùm tia. Nhờ đó, mặc dù công suất phát của mỗi ăng-ten thấp nhưng vẫn đảm bảo cường độ tín hiệu nhận được cao, giúp việc tiêu thụ điện năng giảm. Đồng thời, việc tập trung năng lượng làm giảm can nhiễu ngoài hướng chính, nâng cao hiệu quả truyền dẫn toàn hệ thống.

* Độ tin cậy cao: Do ở phía trạm gốc được trang bị nhiều ăng-ten nên hệ thống Massive MIMO mang lại độ lợi phân tập đáng kể, đóng vai trò quan trọng trong việc tăng cường độ tin cậy cho hệ thống thông tin không dây.

Khi tín hiệu bị suy hao trên một đường truyền, các ăng-ten khác vẫn có thể đảm bảo việc thu nhận tín hiệu ổn định. Điều này giúp giảm tỷ lệ lỗi bit, hạn chế mất gói tin và duy trì kết nối ổn định, đặc biệt với các ứng dụng đòi hỏi độ an toàn bảo mật cao.

* Giảm nhiễu và tăng tính bảo mật: Do các kênh truyền của người dùng gần như trực giao với nhau, hệ thống Massive MIMO giúp giảm thiểu nhiễu giao thoa giữa các thiết bị. Đồng thời, các chùm tia phát ra rất hẹp nên tín hiệu gần như chỉ

tập trung vào khu vực người dùng mục tiêu, hạn chế tín hiệu rò rỉ ra ngoài. Điều này giúp cải thiện chất lượng kết nối và tăng cường bảo mật vật lý, làm cho việc nghe lén hoặc đánh chặn tín hiệu khó hơn.

* Quá trình truyền tín hiệu đơn giản: Hệ thống Massive MIMO có khả năng phục vụ nhiều người dùng đồng thời, giúp giảm đáng kể độ phức tạp của cơ chế lập lịch truy cập kênh. Các thuật toán lập lịch đơn giản được hệ thống sử dụng mà vẫn đạt hiệu quả cao, do mỗi người dùng có thể được phân tách bằng không gian thay vì thời gian hoặc tần số. Điều này góp phần giảm tải cho bộ xử lý và tối ưu hóa tài nguyên mạng.

* Mềm dẻo trong việc khắc phục các ăng-ten hỏng hóc: Hệ thống Massive MIMO có độ dự phòng tốt nhờ số lượng lớn phần tử ăng-ten trong mảng. Khi một hoặc vài phần tử bị hỏng, ảnh hưởng đến hiệu suất tổng thể là rất nhỏ vì các phần tử còn lại có thể bù đắp năng lượng phát xạ hoặc thu nhận tín hiệu. Do đó, hệ thống vẫn hoạt động bình thường và bảo đảm chất lượng dịch vụ ngay cả khi xảy ra lỗi phần cứng nhỏ.

* Chi phí phát triển thấp: Mặc dù tổng thể hệ thống có quy mô lớn, Massive MIMO vẫn cho phép triển khai nhờ các ăng-ten thành phần nhỏ gọn, tiêu thụ ít điện năng và giá thành thấp. Việc sử dụng linh kiện phổ thông, thay vì các phần cứng cao cấp riêng lẻ, giúp tiết kiệm chi phí sản xuất và bảo dưỡng. Yếu tố này khiến hệ thống Massive MIMO là một giải pháp cho các nhà mạng khi mở rộng hạ tầng 5G và các thế hệ mạng tiếp theo.

* Giảm độ trễ truyền: Việc đồng thời truyền dẫn nhiều luồng dữ liệu riêng rẽ là một trong những điểm mạnh quan trọng của hệ thống Massive MIMO làm giảm thời gian chờ giữa các yêu cầu và phản hồi. Nhờ tối ưu về hiệu suất năng lượng và chất lượng kênh truyền cao, độ trễ trên giao diện vô tuyến được rút ngắn đáng kể. Trong các ứng dụng thời gian thực như điều khiển robot, giao tiếp xe tự hành hoặc trò chơi trực tuyến, điều này thực sự hữu ích.

1.4.2. Hạn chế

* Nhiễm bẩn tín hiệu lái: Đây được xem như hạn chế lớn nhất của hệ thống Massive MIMO. Do số lượng tín hiệu lái trực giao trong mỗi khoảng thời gian nhất

định bị giới hạn, các tế bào lân cận phải tái sử dụng cùng tín hiệu lái, gây ra hiện tượng "nhiễm bẩn tín hiệu lái". Hậu quả là việc ước lượng kênh trở nên sai lệch, làm giảm đáng kể hiệu quả ghép kênh không gian và khả năng mở rộng của hệ thống bị giới hạn.

* Xử lý tín hiệu phức tạp: Trang bị số lượng ăng-ten lớn đồng nghĩa với việc phải xử lý ma trận kích thước rất lớn cho quá trình ước lượng kênh, tiền mã hóa cũng như quá trình giải mã tín hiệu. Điều này đòi hỏi bộ xử lý tín hiệu số có tốc độ cao, năng lượng tiêu thụ lớn và gây tăng chi phí phần cứng. Việc thiết kế các thuật toán xử lý tối ưu, hiệu quả và tiết kiệm tài nguyên vẫn đang là thách thức trong triển khai thực tế.

* Nhạy cảm với căn chỉnh búp sóng: Do sử dụng chùm tia cực hẹp để tập trung năng lượng, Massive MIMO rất nhạy cảm với sự dịch chuyển của người dùng hoặc rung lắc ăng-ten. Khi góc tới thay đổi, việc căn chỉnh búp sóng có thể sai lệch, dẫn đến công suất tín hiệu thu được giảm. Vì vậy, hệ thống cần cơ chế theo dõi và điều chỉnh búp sóng nhanh, làm tăng độ phức tạp điều khiển.

* Phụ thuộc vào giả định kênh đối xứng: Hệ thống Massive MIMO trong chế độ TDD căn cứ vào giả định tính đối xứng giữa kênh đường lên và đường xuống. Tuy nhiên, sự khác biệt phần cứng giữa hai hướng truyền có thể khiến giả định này sai lệch. Khi đó, quá trình hiệu chuẩn kênh không chính xác, làm giảm hiệu quả của kỹ thuật tạo bước sóng và gây suy hao hiệu năng toàn hệ thống.

1.4.3. Thách thức

Hệ thống Massive MIMO không chỉ đơn giản là việc mở rộng từ hệ thống MU-MIMO truyền thống, mà còn là một đột phá công nghệ trong truyền thông không dây. Tuy nhiên, để triển khai thực tế công nghệ này một cách hiệu quả, vẫn tồn tại nhiều bài toán và thách thức kỹ thuật cần được giải quyết.

* Nhiễu tín hiệu dẫn: Đối với hệ thống Massive MIMO, ước lượng đáp ứng kênh từ các thiết bị người dùng tại trạm gốc thông qua tín hiệu lái trực giao. Nhờ tính đối xứng kênh trong chế độ TDD, trạm gốc có thể ước lượng kênh đường xuống dựa trên tín hiệu đường lên đã thu được.

Tuy nhiên, số lượng tín hiệu lái trực giao trong mỗi băng thông và chu kỳ là có hạn, các tế bào liền kề phải chia sẻ và tái sử dụng các chuỗi tín hiệu lái đó. Khi đó, các tín hiệu lái giống nhau ở các tế bào sẽ gây nhiễu lẫn nhau, khiến trạm gốc thu được tổ hợp tuyến tính của đáp ứng kênh từ cả tế bào chính và tế bào lân cận, làm việc ước lượng kênh giảm độ chính xác và hạn chế thông lượng của hệ thống. Trong đường xuống, trạm gốc khi tạo chùm tín hiệu cho người dùng trong tế bào của mình có thể vô tình phát năng lượng đến người dùng ở tế bào lân cận sử dụng cùng tín hiệu lái, điều này làm giảm hiệu năng của hệ thống.

* Ước lượng kênh: Việc ước lượng chính xác thông tin trạng thái kênh truyền CSI đóng vai trò quyết định đến hiệu năng của quá trình truyền nhận [12]. CSI mô tả đặc tính của kênh truyền giữa BS và thiết bị đầu cuối, phản ánh các hiện tượng pha đinh, tán xạ và nhiễu giao thoa. Khi CSI được ước lượng hoàn hảo, mỗi ăng-ten phát hoặc thu thêm vào sẽ giúp hiệu suất hệ thống nâng cao một cách tuyến tính tương ứng. Tuy nhiên, việc thu được CSI chính xác trong hệ thống có hàng trăm ăng-ten lại là một khó khăn lớn do độ phức tạp xử lý, giới hạn số lượng tín hiệu lái và các vấn đề nhiễu tín hiệu lái.

Trong hệ thống FDD, CSI phải được ước lượng riêng biệt cho đường lên và cả đường xuống, khiến quá trình này rất tốn tài nguyên và khó thực hiện khi số lượng ăng-ten tăng. Ngược lại, TDD tận dụng tính đối xứng kênh để ước lượng kênh đường xuống dựa trên tín hiệu lái đường lên, giúp giảm độ phức tạp.

Tuy nhiên, do số lượng tín hiệu lái trực giao bị giới hạn, việc tái sử dụng tín hiệu lái giữa các tế bào dẫn đến nhiễu tín hiệu lái, làm giảm độ chính xác của CSI. Ngoài ra, khi số lượng ăng-ten tăng, chi phí tính toán và phần cứng cũng tăng theo. Do đó, các thuật toán ước lượng kênh thường sử dụng có có độ phức tạp thấp và chi phí xử lý nhỏ là hướng nghiên cứu trọng tâm của Massive MIMO hiện nay.

* Tiền mã hóa: Đây là một kỹ thuật trong tạo chùm tia, cho phép truyền đồng thời nhiều luồng dữ liệu đối với hệ thống triển khai với số lượng ăng-ten lớn. Kỹ thuật tiền mã hóa có vai trò quan trọng vì nó giảm thiểu tác động của suy hao đường truyền, giảm thiểu hiện tượng giao thoa, tối đa hóa thông lượng và hiệu suất phổ.

Tại trạm gốc, thông tin trạng thái kênh CSI được ước lượng thông qua tín hiệu lái đường lên hoặc phản hồi CSI từ thiết bị người dùng. Nhưng do tác động bởi môi trường truyền, CSI thu được thiếu chính xác và có thể bị sai lệch. Dù vậy, hiệu suất truyền đường xuống vẫn phụ thuộc mạnh mẽ vào độ chính xác của CSI và thuật toán tiền mã hóa được sử dụng.

Nhờ CSI đã ước lượng, các thuật toán tiền mã hóa có vai trò hiệu chỉnh pha và mức biên độ của tín hiệu truyền đi từ các ăng-ten, sao cho tín hiệu mong muốn đến đúng người dùng, còn nhiễu giao thoa giữa người dùng được giảm thiểu. Tuy nhiên, càng nhiều ăng-ten, độ phức tạp càng cao, dẫn đến yêu cầu cao về phần cứng xử lý. Vì vậy, đối với hệ thống Massive MIMO, các bộ tiền mã hóa hiệu quả, đơn giản về mặt tính toán được ưu tiên sử dụng.

Các kỹ thuật tiền mã hóa trong Massive MIMO được chia thành hai dạng:

- Tiền mã hóa tuyến tính (Linear Precoding):

Đây là nhóm phương pháp phổ biến do độ phức tạp thấp, dễ triển khai và độ trễ nhỏ, trong đó trạm gốc thực hiện phép nhân tuyến tính giữa CSI và tín hiệu dữ liệu. Một số kỹ thuật tuyến tính tiêu biểu gồm:

+ Truyền tỉ lệ cực đại MRT: tín hiệu được truyền theo hướng cực đại của kênh, giúp tối đa công suất thu nhưng không triệt được nhiễu giữa các người dùng.

+ Cưỡng bức bằng không ZF: loại bỏ nhiễu chéo bằng cách sử dụng nghịch đảo ma trận kênh, đạt hiệu suất cao hơn MRT nhưng dễ bị suy giảm khi ma trận kênh kém điều kiện.

+ Trung bình bình phương sai số nhỏ nhất MMSE: tối ưu hóa toàn cục, giảm sai số trung bình bình phương, đạt hiệu suất gần tối ưu.

- Tiền mã hóa phi tuyến (Non-Linear Precoding):

Các kỹ thuật mã hóa dưới đây có hiệu năng cao nhưng độ phức tạp rất lớn, khó triển khai khi số lượng ăng-ten nhiều:

+ Mã hóa “giấy bẩn” (DPC: Dirty Paper Coding): triệt nhiễu trước khi truyền, đạt hiệu suất gần với kênh không nhiễu.

+ Tiền mã hóa Tomlinson–Harashima (THP: Tomlinson–Harashima Precoding): triệt nhiễu tuần tự trong miền phát.

Mặc dù các kỹ thuật phi tuyến như DPC, THP mang lại hiệu suất cao hơn, nhưng độ phức tạp phần cứng và yêu cầu tính toán ma trận lớn khiến chúng khó triển khai thực tế trong hệ thống Massive MIMO. Do đó, ZF và MRT vẫn là các lựa chọn chủ đạo cho hệ thống Massive MIMO nhờ tính thực tế và hiệu suất gần tối ưu.

* Lập lịch người dùng: Với cấu hình nhiều ăng-ten, trạm gốc có thể giao tiếp với nhiều người dùng tại cùng một thời điểm, nhưng điều này gây nhiễu đa người dùng, làm giảm hiệu suất thông lượng. Do đó, cơ chế lập lịch người dùng được áp dụng để chọn ra nhóm người dùng tối ưu trước khi tiền mã hóa, có tác dụng làm tăng thông lượng hệ thống và giữ ổn định mức độ công bằng cho các người dùng.

Các phương pháp tuyến tính như ZF và MMSE cho hiệu suất cao với độ phức tạp vừa phải, trong khi phương pháp phi tuyến đạt hiệu năng gần tối ưu nhưng quá phức tạp cho hệ thống có số lượng ăng-ten lớn.

* Suy hao phần cứng: Hệ thống Massive MIMO giảm thiểu tác động của nhiễu, pha-đinh và giao thoa nhờ số lượng lớn ăng-ten nhưng làm độ phức tạp hệ thống và chi phí phần cứng tăng. Để triển khai hiệu quả, việc thiết kế hệ thống bằng các linh kiện nhỏ gọn, chi phí thấp, nhưng điều này lại làm tăng các sai lệch phần cứng như nhiễu pha, nhiễu từ hóa, méo khuếch đại.

Do số lượng lớn ăng-ten, hiện tượng ghép nối tương hỗ giữa các phần tử ăng-ten xảy ra, gây thay đổi trở kháng tải và tạo ra méo tín hiệu. Mặc dù hệ thống Massive MIMO cho phép giảm công suất bức xạ tới 100 lần so với MIMO truyền thống, nhưng công suất tiêu thụ của phần cứng băng tần cơ sở và bộ chuyển đổi dữ liệu lại tăng tuyến tính theo số lượng ăng-ten. Việc sử dụng các linh kiện giá rẻ như vòng khóa pha (PLL: phase-locked loop) hoặc dao động tần số làm tăng sai lệch pha giữa các ăng-ten, gây suy giảm hiệu suất hệ thống. Các sai lệch phần cứng có thể được giảm thiểu thông qua việc áp dụng các thuật toán bù trừ. Tuy nhiên, các phương pháp như ước lượng và bù nhiễu pha trở nên không khả thi khi số ăng-ten quá lớn.

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

Trong mạng 5G, Massive MIMO được xem là công nghệ cốt lõi giúp đạt được các mục tiêu đối với truyền thông di động thế hệ mới theo tiêu chuẩn IMT-2020, bao gồm khả năng truyền dữ liệu cực cao, độ trễ tối thiểu và khả năng kết nối hàng triệu thiết bị đồng thời. Bằng cách trang bị hàng trăm ăng-ten tại trạm gốc, Massive MIMO cho phép hệ thống phát và thu nhiều luồng dữ liệu đồng thời trên một kênh tần số, tận dụng hiệu quả không gian để tăng thông lượng mà không cần mở rộng băng thông.

Công nghệ tạo chùm tia định hướng giúp tập trung năng lượng phát về phía từng người dùng cụ thể, tăng cường cường độ tín hiệu, giảm nhiễu giao thoa và mở rộng vùng phủ sóng. Đồng thời, khả năng tái sử dụng không gian cho phép nhiều người dùng trong cùng một tế bào được phục vụ đồng thời, nhờ đó nâng cao đáng kể hiệu suất phổ tần và dung lượng mạng. Sự kết hợp giữa hai kỹ thuật này giúp mạng 5G cho phép đạt tốc độ truyền dữ liệu lên đến hàng chục Gbps, vượt trội so với các thế hệ mạng cũ như 4G LTE.

Ngoài ra, Massive MIMO còn đóng vai trò then chốt trong việc bảo đảm các dịch vụ tiên tiến của 5G như Internet vạn vật (IoT), xe tự hành, thực tế ảo và thực tế tăng cường (AR/VR), cũng như truyền thông thời gian thực trong công nghiệp. Khả năng định hướng chùm tia bảo đảm đường truyền ổn định ngay cả khi thiết bị di chuyển, trong khi độ trễ được rút ngắn xuống chỉ còn vài mili giây, đảm bảo phản hồi tức thời giữa các thiết bị. Nhờ vậy, Massive MIMO không chỉ mang lại tốc độ và hiệu quả cao hơn, mà còn tạo dựng một cơ sở bền vững cho hệ sinh thái thông minh của 5G, nơi mọi thiết bị đều có thể giao tiếp linh hoạt, nhanh chóng và an toàn.

1.5.2. Ứng dụng trong triển khai mạng WIFI

Đối với các phiên bản WLAN tiên tiến như IEEE 802.11ac, 802.11ad và 802.11ax (Wi-Fi 6), công nghệ Massive MIMO đóng vai trò then chốt trong việc truyền dữ liệu tốc độ cao, mở rộng vùng phủ và tối ưu hóa hiệu suất hệ thống trong

khu vực có lượng người dùng cao. Trong Wi-Fi 5 (802.11ac), MIMO đã được mở rộng để hỗ trợ MU-MIMO, cho phép nhiều thiết bị có thể truy cập đến điểm truy cập cùng lúc, thay vì lần lượt như trước đây, giúp giảm độ trễ và tăng thông lượng mạng tổng thể. Sang đến Wi-Fi 6 (802.11ax), công nghệ này được kết hợp với OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) và định dạng chùm tia tiên tiến, giúp tài nguyên tần số phân bổ hiệu quả hơn và định hướng tín hiệu đến từng thiết bị cụ thể, giảm nhiễu chéo và tăng độ ổn định. Còn với Wi-Fi 7 (802.11be) - thế hệ tiếp theo, Massive MIMO hỗ trợ tới hàng trăm luồng không gian và băng thông kênh lên đến 320 MHz, mang lại tốc độ vượt trội, phục vụ nhu cầu truyền tải dữ liệu lớn trong những ứng dụng như thực tế ảo, video 8K hay điều khiển thiết bị thông minh IoT. Nhờ đó, Massive MIMO không chỉ giúp Wi-Fi nhanh hơn mà còn ổn định và hiệu quả hơn trong các môi trường phức tạp.

1.6. Kết luận chương

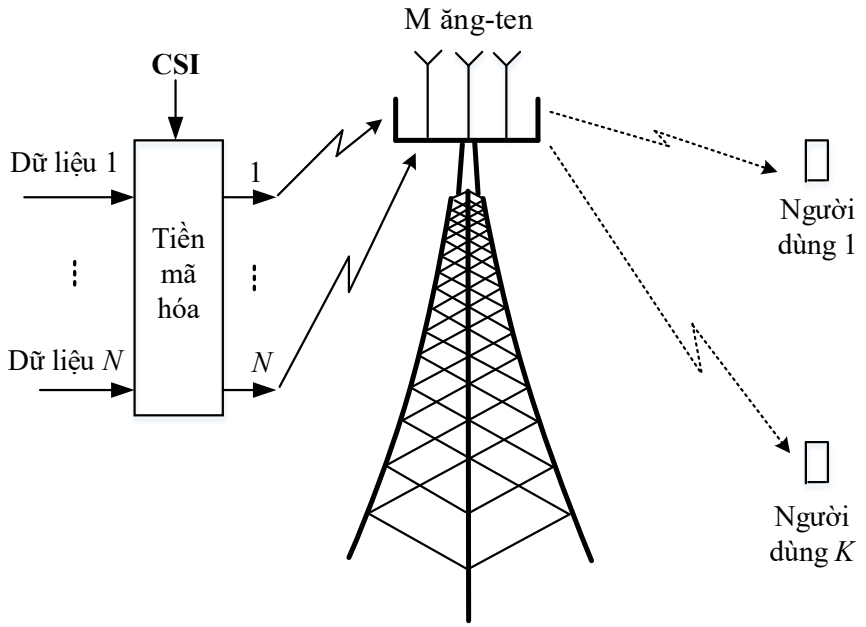
Chương 1 đã khái quát kỹ thuật MIMO và quá trình phát triển từ hệ thống MU-MIMO sang hệ thống Massive MIMO, trong đó số lượng ăng-ten trang bị tại trạm gốc được mở rộng để phục vụ nhiều người dùng đồng thời. Hệ thống Massive MIMO mang lại thông lượng cao, hiệu suất phổ và năng lượng tốt hơn, độ tin cậy 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

Trong Chương 2, đề án tập trung trình bày mô hình kênh Massive MIMO trong điều kiện kênh truyền không hoàn hảo. Trên cơ sở mô hình kênh truyền không hoàn hảo, Chương 2 tiến hành phân tích bằng toán học tỉ lệ lỗi bit của hệ thống theo kỹ thuật tiền mã hóa cưỡng bức bằng không ZF và truyền tỉ lệ cực đại MRT theo các tham số: Công suất phát, số lượng ăng-ten phát tại phía BS và số lượng người dùng đầu cuối. Kết quả của Chương 2 là cơ sở cho các mô phỏng, đánh giá thể hiện trong Chương 3.

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

Việc có được thông tin về trạng thái kênh truyền để thực hiện tiền mã hoá hiệu quả là đặc biệt quan trọng. Nói cách khác, 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 thực tế, để ước lượng kênh một cách hoàn hảo là điều tương đối khó khăn. Nói cách khác, hệ thống phải làm việc trong điều kiện kênh truyền không hoàn hảo. 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 [13], [15]:

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

Tại công thức (2.1), $\hat{\mathbf{H}}$ là ma trận kênh truyền pha-đinh Rayleigh hoàn hảo từ BS đến tất cả các thiết bị đầu cuối, với đầu vào là các biến Gaussian phức ngẫu nhiên có giá trị trung bình bằng 0 và phương sai bằng 1; $\mathbf{E}$ là ma trận lỗi ước lượng kênh; e là một tham số để đánh giá độ chính xác của bộ ước lượng kênh có giá từ 0 tới 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.

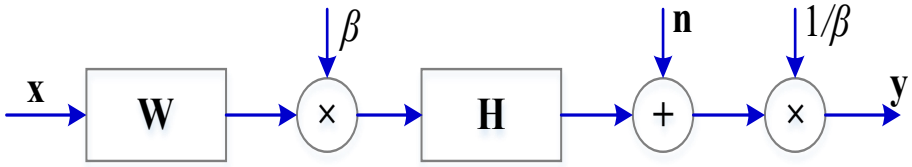
Đặt $\mathbf{y}$ là véc-tơ tín hiệu nhận được của tất cả người dùng, $\mathbf{x}$ là véc-tơ tín hiệu phát. Khi đó, mối quan hệ giữa véc-tơ tín hiệu thu $\mathbf{y}$ và véc-tơ tín hiệu phát $\mathbf{x}$ được biểu diễn như sau:

$$\mathbf{y} = \mathbf{HWx} + \mathbf{n} \tag{2.2}$$

Trong biển thức (2.2), $\mathbf{W}$ được định nghĩa là ma trận tiền mã hóa cho tất cả các người dùng, ma trận này được thiết kế tại phía BS; $\mathbf{n}$ là véc-tơ tạp âm tại phía thu, với đầu vào là các biến ngẫu nhiên phân bố độc lập đồng nhất, có giá trị trung bình bằng 0 và phương sai bằng σ^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 [14]:

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

$$\mathbf{W}_{MRT} = \beta_{MRT}\mathbf{H}^{H} \tag{2.4}$$

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

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

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

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

Từ biểu thức (2.2) ta có:

$$y_k = \mathbf{h}_k\mathbf{w}_k x_k + \sum_{i=1,i\neq k}^{k}\mathbf{h}_k\mathbf{w}_i x_i + n_k \tag{2.7}$$

Ta có, y_k là tín hiệu thu nhận của người dùng thứ *k*, gồm ba thành phần: thành phần tín hiệu mong muốn $\mathbf{h}_k\mathbf{w}_k x_k$, thành phần xuyên nhiễu từ những người dùng lân cận $\sum_{i=1,i\neq k}^{k}\mathbf{h}_k\mathbf{w}_i x_i$ và nhiễu n_k. Tổng tỉ lệ tín hiệu trên nhiễu của người dùng thứ k

được biểu diễn như sau [14]:

$$SINR_k = \frac{|h_k w_k|^2}{\sum_{i=1,i\neq k}^{k} |h_k w_i|^2 + 1} \tag{2.8}$$

Theo tài liệu tham khảo [14], tốc độ bit của người dùng thứ k được tính toán bằng:

$$R_k = \log_2(1 + SINR_k) \tag{2.9}$$

Do đó, tốc độ bit của tất cả các người dùng được biểu diễn như sau:

$$R_{sum} = \sum_{k=1}^{K} E\{R_k\} \tag{2.10}$$

Trong đó $E\{.\}$ là tốc độ bit trung bình của tất cả các người dùng. Kết hợp biểu thức (2.9) và (2.10), tổng tốc độ bit có thể được biểu diễn lại như sau:

$$R_{sum} = KE\{\log_2(1 + SINR_k)\} \tag{2.11}$$

Mặt khác, $\text{SINR}_k^{ZF} = \frac{P_d}{\left(P_d e^2 + 1\right) tr\left(\mathbf{B}_{ZF}\mathbf{B}_{ZF}^H\right)^{-1}}$, do đó biểu thức (2.11) được viết lại bằng:

$$\begin{aligned} R_{sum} &= KE\left\{\log_2\left(1 + \frac{P_d}{\left(P_d e^2 + 1\right) tr\left(\mathbf{B}_{ZF}\mathbf{B}_{ZF}^H\right)^{-1}}\right)\right\} \\ &= K\log_2\left(1 + \frac{P_d}{\left(P_d e^2 + 1\right)} E\left\{\frac{1}{tr\left(\mathbf{B}_{ZF}\mathbf{B}_{ZF}^H\right)^{-1}}\right\}\right) \end{aligned} \tag{2.12}$$

Mặt khác, theo [15], $E\left\{tr\left(\mathbf{B}_{ZF}\mathbf{B}_{ZF}^H\right)^{-1}\right\} \approx \frac{M}{M-K}$, do đó:

$$R_{sum} = K\log_2\left(1 + \frac{P_d(M-K)}{\left(P_d e^2 + 1\right)K}\right) \tag{2.13}$$

Suy ra:

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

Theo tài liệu tham khảo [16], với sự suy giảm cố định ε, xác suất lỗi bit với kỹ thuật điều chế khoá dịch pha (QPSK: Quadrature Phase Shift Keying) được cho biểu thức sau:

$$P(\mu) = Q(\sqrt{2\mu}) \tag{2.15}$$

với $\mu = \varepsilon^2 SINR$. Khi đó ε là một giá trị ngẫu nhiên, xác suất lỗi bit (BER) với tỉ lệ lỗi trung bình P_e được tính toán như sau:

$$P_e = \int_0^\infty P(\mu)\rho(\mu)d(\mu) \tag{2.16}$$

Trong đó, $\rho(\mu)$ là hàm mật độ xác suất của μ khi ε là một giá trị ngẫu nhiên. Với kênh truyền pha-đinh Rayleigh, ε là một phân bố Rayleigh, ε^2 có phân bố xác suất Chi-square có bậc tự do, μ cũng là một biến với kiểu phân bố Chi-square. Do đó:

$$\rho(\mu) = \frac{1}{\mu} e^{\mu} \frac{1}{\bar{\mu}} \tag{2.17}$$

với $\mu \geq 0$ và $\bar{\mu}$ được định nghĩa là giá trị trung bình của SNR, nó được định nghĩa như sau:

$$\bar{\mu} = E\{\varepsilon^2\} SINR \tag{2.18}$$

Với $E\{\varepsilon^2\}$ là giá trị trung bình của ε^2 . Thay biểu thức (2.15) và (2.17) vào biểu thức (2.16) ta có:

$$P_e = \int_0^\infty Q(\sqrt{2\mu}) \frac{1}{\mu} e^{\mu} \frac{1}{\mu} d(\mu) \cong \frac{1}{2}\left(1 - \sqrt{\frac{\sqrt{\bar{\mu}}}{1+\bar{\mu}}}\right) \tag{2.19}$$

Trong biểu thức này, $Q(\sqrt{2\mu}) = \frac{1}{2\pi} \int_\mu^\infty e^{\frac{-t^2}{2}} dt$ và $\bar{\mu} = SINR_k$, do đó biểu thức (2.19) được viết lại như sau:

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

Mặt khác ta có:

$$\begin{aligned} \text{SINR}_k^{ZF} &= \frac{P_d}{\left(P_d e^2 + 1\right) tr\left(\mathbf{B}_{ZF}\mathbf{B}_{ZF}^H\right)^{-1}} \\ &= \frac{P_d}{\left(P_d e^2 + 1\right) \sum_{k=1}^{K} 1/\lambda_k^2} \end{aligned} \tag{2.21}$$

Với λ_k là các giá trị trên đường chéo chính của phép ma trận $\mathbf{B}_{ZF}\mathbf{B}_{ZF}^H$.

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:

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

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

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:

$$\lim_{P_d \to 0} BER_k^{ZF} \approx \lim_{P_d \to 0} \frac{1}{2}\left(1 - \sqrt{\frac{1}{\left(e^2 + \frac{1}{P_d}\right)\sum_{k=1}^{K} 1/\delta_k^2 + 1}}\right) \approx 0.5 \quad (2.24)$$

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 phụ 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:

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

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

$$\begin{aligned}\lim_{k\to\infty} BER_k^{ZF} &= \frac{1}{2}\left(1 - \sqrt{\frac{P_d(M/K-1)}{\left(P_d e^2+1\right) + P_d(M/K-1)}}\right) \\ &\approx \frac{1}{2}\left(1 - \sqrt{\frac{P_d}{P_d - \left(P_d e^2+1\right)}}\right)\end{aligned} \tag{2.26}$$

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

$$\begin{aligned}\lim_{k\to 0} BER_k^{ZF} &= \frac{1}{2}\left(1 - \sqrt{\frac{P_d(M-K)}{(P_d e^2+1)K + P_d(M-K)}}\right) \\ &\approx \frac{1}{2}\left(1 - \sqrt{\frac{MP_d}{P_d M}}\right) \approx 0\end{aligned} \tag{2.27}$$

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:

$$\begin{aligned}\lim_{M\to\infty} BER_k^{ZF} &= \frac{1}{2}\left(1 - \sqrt{\frac{P_d(1-K/M)}{(P_d e^2+1)K/M + P_d(1-K/M)}}\right) \\ &\approx \frac{1}{2}\left(1 - \sqrt{\frac{P_d}{P_d}}\right) \approx 0\end{aligned} \tag{2.28}$$

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:

$$\lim_{M\to 0} BER_k^{ZF} = \frac{1}{2}\left(1-\sqrt{\frac{P_d(M-K)}{(P_d e^2+1)K+P_d(M-K)}}\right)$$
$$\approx \frac{1}{2}\left(1-\sqrt{\frac{P_d}{P_d-\left(P_d e^2+1\right)}}\right) \quad (2.29)$$

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.

Chúng ta thấy rằng, tín hiệu nhận được của người dùng thứ K có thể được biểu diễn như sau:

$$y_k = \beta \mathbf{h}_k \mathbf{h}_k^H x_k + \sum_{i=1,i\neq k}^{k} \beta \mathbf{h}_k \mathbf{h}_i^H x_i + \sum_{i=1}^{k} \beta \mathbf{h}_i^H \mathbf{E}_i x_i + n_k \quad (2.30)$$

Do đó, tỉ số SINR đối với thuật toán tiền mã hoá MRT trong trường hợp kênh truyền không hoàn hảo được tính như sau [5]:

$$SINR_k = \frac{\beta^2 |\mathbf{h}_k \mathbf{h}_k^H|^2 \left(1-e^2\right)}{\beta^2\left[\sum_{i=1,i\neq k}^{k} \left|\mathbf{h}_k \mathbf{h}_i^H\right|^2 (1-e^2)+e^2\right]+1} \quad (2.31)$$

Theo tài liệu tham khảo [4] ta có:

$$\frac{1}{K}\sum_{i=1,i\neq k}^{k} \left|\mathbf{h}_k \mathbf{h}_i^H\right|^2 = \mathbf{E}\left|\mathbf{h}_k \mathbf{h}_i^H\right|^2 = M \quad (2.32)$$

và:

$$\mathbf{h}_k \mathbf{h}_k^H = M \quad (2.33)$$

Thay biểu thức (2.32) và (2.33) vào biểu thức (2.31) ta được 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:

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

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

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

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

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:

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

$$\approx \frac{1}{2}\left(1 - \sqrt{\frac{\left(M/K\right)}{\frac{1}{\left(1-e^2\right)}+\left(M/K\right)}} \right) \tag{2.36}$$

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

$$\approx \lim_{P_d \to 0} \frac{1}{2}\left(1 - \sqrt{\frac{\left(1-e^2\right)\times \left(M/K\right)}{\left(1+\frac{e^2}{P_d}\right)+\frac{1}{P_d}+\left(1-e^2\right)\times \left(M/K\right)}} \right) \approx 0.5 \tag{2.37}$$

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:

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

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

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

Kết quả tính toán 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 thời 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:

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

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

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

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 phụ 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, điều này hoàn toàn phụ thuộc vào các bộ ước lượng kênh được thiết kế tại các trạm gốc. Kết quả tính toán trong Chương 2 là cơ sở cho việc thực hiện các kết quả mô phỏng 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

3.1. Giới thiệu chung

Kỹ thuật đa đầu vào đa đầu ra MIMO đã được nghiên cứu trong nhiều năm qua và được áp dụng cho nhiều chuẩn vô tuyến, cho phép cải thiện về dung lượng và độ tin cậy hệ thống do các thiết bị thu, phát được trang bị nhiều ăng-ten [2], [8]. Những nghiên cứu, đề xuất trên mô hình kênh cơ bản (MIMO điểm - điểm) là tiền đề quan trọng cho các nghiên cứu phát triển sau này trên các mô hình kênh MIMO đa người dùng (MU-MIMO) và Massive MIMO. Một thực tế rằng, ở phía trạm gốc tại các mô hình MU-MIMO đã được triển khai thường bị giới hạn bởi số lượng ăng-ten. Vậy nên, hiệu suất sử dụng phổ tần cũng như dung lượng hệ thống chưa thực sự đáp ứng được yêu cầu cao của người dùng hiện nay [2] ÷ [3]. Trên cơ sở thực tế đó, các công trình [3], [7] đã giới thiệu hệ thống Massive MIMO, hệ thống sử dụng mảng ăng-ten quy mô lớn, nơi số lượng ăng-ten thu, phát ở trạm gốc có thể lên tới hàng trăm ăng-ten phục vụ đồng thời hàng chục người dùng trên cùng một nguồn tài nguyên tần số. Với việc gia tăng số lượng ăng-ten tại phía BS, hiệu suất sử dụng và dung lượng hệ thống được cải thiện so với hệ thống MU-MIMO. Những ưu điểm của hệ thống Massive MIMO làm cho hệ thống này đang phát triển thành một công nghệ lõi cho việc triển khai hệ thống 5G trên thế giới. Tuy nhiên, việc triển khai số lượng rất lớn ăng-ten tại mỗi BS cũng xảy ra rất nhiều khó khăn trong việc triển khai hệ thống trong thực tế như: sự phức tạp của các thuật toán xử lý tín hiệu, chi phí triển khai [8]…vv.

Tương tự như hệ thống MU-MIMO, đối với hệ thống Massive MIMO, việc truyền dữ liệu từ các trạm gốc đến người dùng là những tín hiệu đã được trộn lẫn. Trong khi đó, tại mỗi người dùng chỉ cần nhận được thành phần tín hiệu mong muốn, thành phần tín hiệu khác cần được loại bỏ. Để thực hiện yêu cần trên, các kỹ thuật tiền mã hóa được nghiên cứu triển khai. Các nghiên cứu trong các tài liệu [1], [14] đã được chứng minh, các kỹ thuật tiền mã hóa tuyến tính có thể đạt tối ưu và được ưu tiên áp dụng vào hệ thống Massive MIMO. Bên cạnh đó, các thuật toán

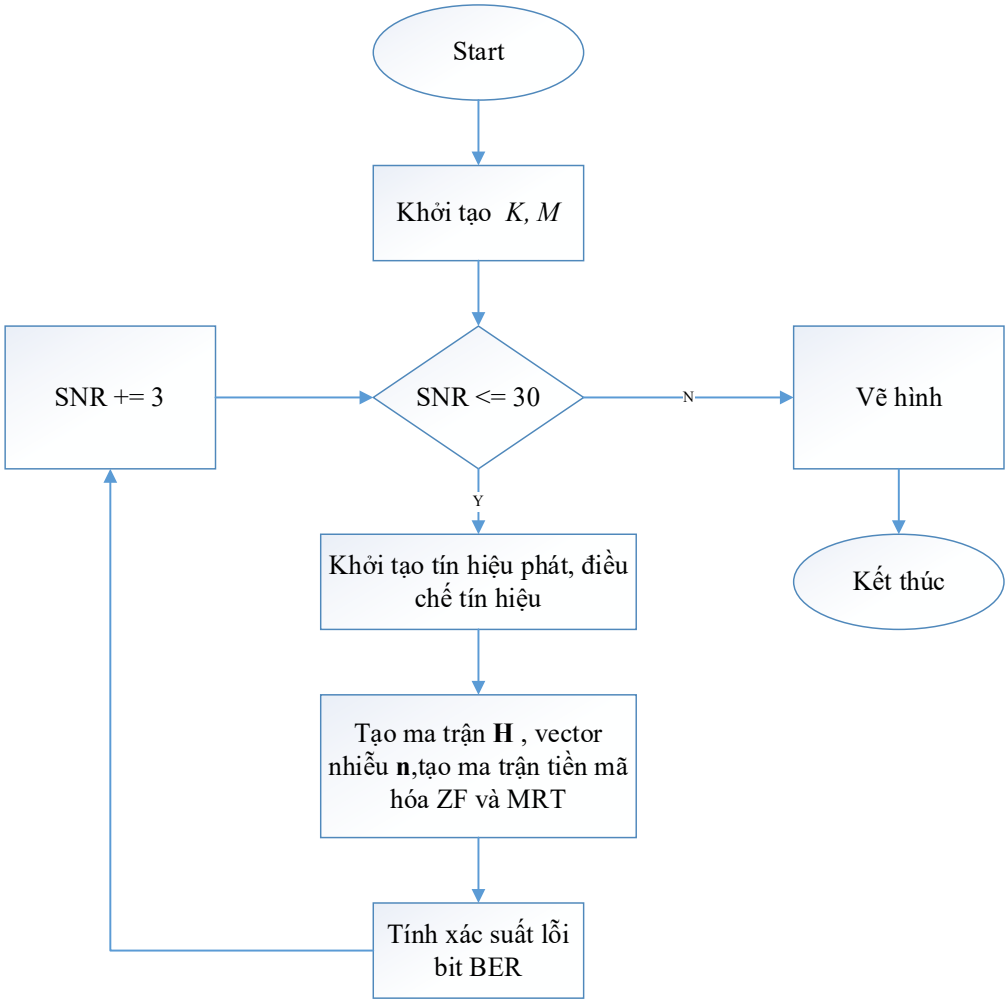
tiền mã hóa phi tuyến được chứng minh không phù hợp với hệ thống Massive MIMO do có độ phức tạp rất cao [1]. Trong tài liệu tham khảo [12], tác giả đã phân tích hiệu suất các phương pháp tiền mã hóa tuyến tính trong điều kiện thông tin trạng thái kênh truyền CSI không hoàn hảo ở cả máy phát và máy thu. Việc giả định chỉ dừng lại trong trường hợp một phần đáp ứng kênh là không rõ ràng. Các kết quả mô phỏng cho thấy, kỹ thuật tiền mã hóa truyền tỷ lệ cực đại (MRT) tốt hơn trong vùng tỉ số tín hiệu trên nhiễu SNR thấp, ngược lại kỹ thuật tiền mã hóa cưỡng bức bằng không (ZF) tốt hơn trong vùng SNR cao. Bên cạnh đó, phân tích của tác giả chỉ dừng lại ở mức giả định, đồng thời các tác giả chưa đưa ra được biểu thức tính toán cụ thể để xác định thành phần còn thiếu trong ma trận kênh truyền. Mặt khác, trong các đề xuất [1], [14] các đánh giá được minh chứng dựa vào các kết quả mô phỏng, việc phân tích, đánh giá tỉ lệ lỗi bit chưa được phân tích chính xác bằng các biểu thức toán học. Các tác giả trong tài liệu tham khảo [6] đã đề xuất kỹ thuật tiền mã hóa kết hợp kỹ thuật phân tích thành phần chính (PCA: principal component analysis technique). Trong đề xuất này, tác giả đã đưa ra biểu thức tính toán ma trận hiệp phương sai số, trong khi biểu thức phân tích hiệu suất BER chưa được đề cập. Trong [5], tác giả đưa ra biểu thức phân tích hiệu suất hệ thống dựa trên việc phân tích tỷ lệ đạt được (Achievable Rate).

Có thể nói, khi trạm gốc trang bị một số lượng lớn ăng-ten, các kỹ thuật xử lý tín hiệu trở nên ngày càng phức tạp và yêu cầu cao hơn trong việc xử lý [8]. Đồng thời, các bài toán về phân tích tỉ lệ lỗi bit BER hệ thống cảng trở nên khó khăn. Việc nghiên cứu thuật toán tiền mã hóa tuyến tính, đồng thời phân tích bằng toán học nhằm luận giải cho các kết quả mô phỏng đang là một nội dung nghiên cứu được quan tâm bởi các nhà khoa học.

Trên cơ sở các kết quả phân tích bằng toán học xác suất lỗi hệ thống trong Chương 2, Chương 3 tiến hành mô phỏng và đánh giá xác suất lỗi bit hệ thống đối với các thuật toán tiền mã hoá ZF và MRT theo các tham số: công suất phát, số lượng ăng-ten phát và số lượng người dùng. Các kết quả trong Chương 3 sẽ làm rõ hơn các kết quả tính toán trong Chương 2 của đề án.

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. Xác suất lỗi bit của hệ thống được tính toán trong các biểu thức toán học đã thể hiện trong Chương 2.



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

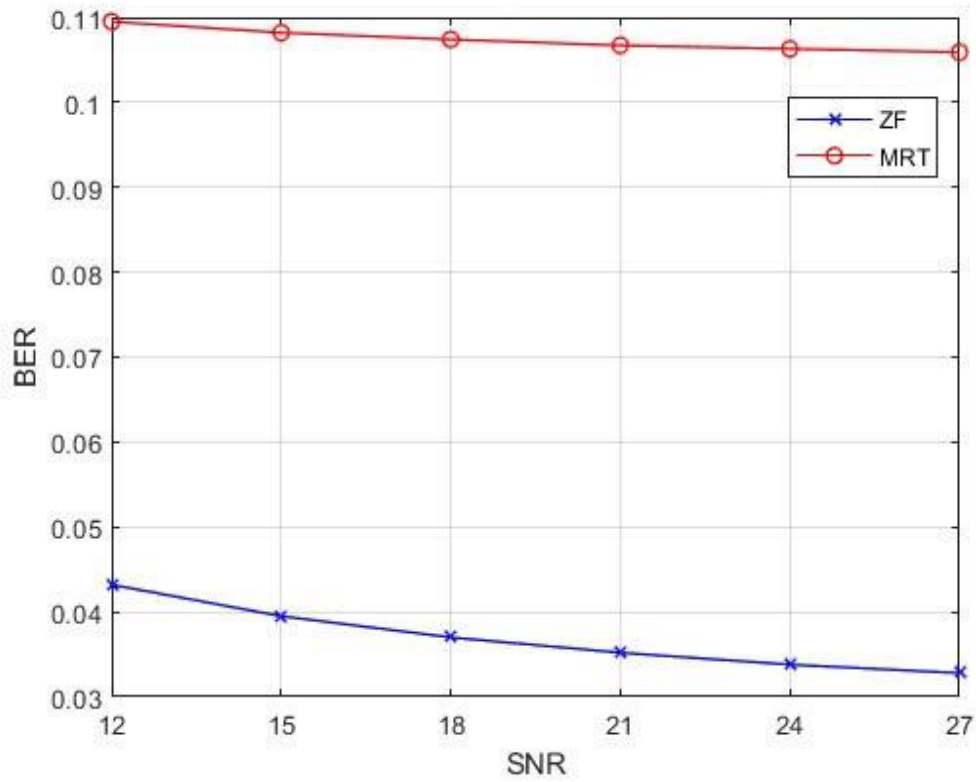
Để đánh giá xác suất lỗi bit hệ thống Massive MIMO dưới tác động của của công suất phát, tiểu mục này tiến hành xây dựng mô hình mô phỏng xác suất lỗi bit

BER cho các kỹ thuật tiền mã hóa tuyến tính. 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	Điều chế khóa dịch pha (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

Thông qua mô phỏng, xác suất lỗi bit của hệ thống theo tham số công suất phát được thể hiện trong hình 3.2.



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

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

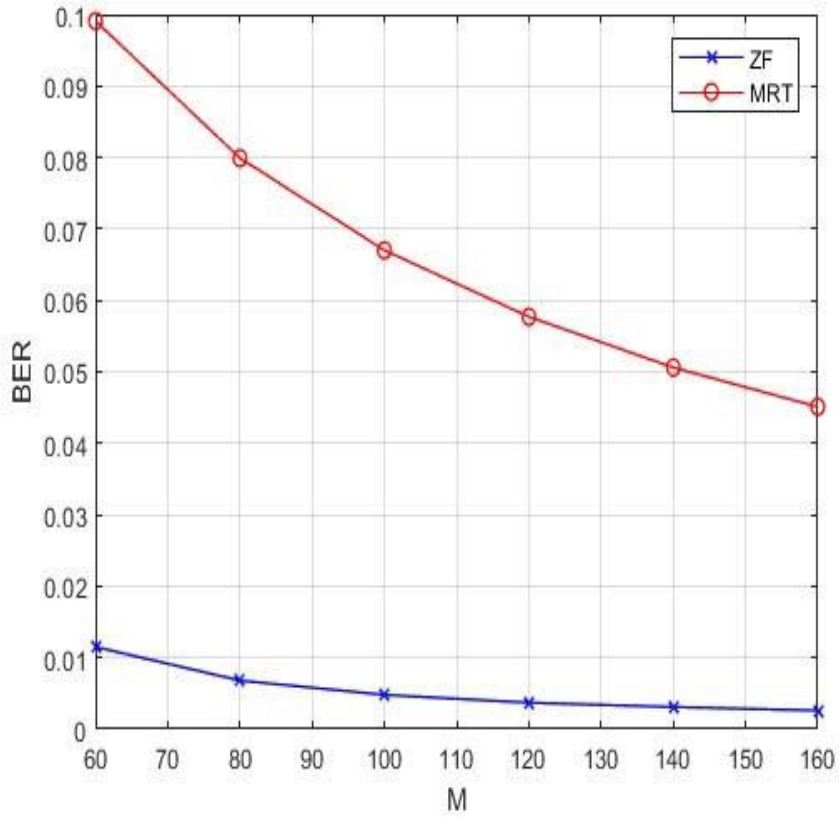
(2.35). Kết quả mô phỏng trong hình 3.2 cho thấy, khi tăng công suất phát dẫn tới xác suất lỗi hệ thống càng suy giảm đối với tất cả các bộ tiền mã hoá. Nói cách khác, xác suất lỗi hệ thống tỉ lệ nghịch với công suất phát. Kết quả mô phỏng trong hình 3.2 cũng cho thấy rằng, xác suất lỗi hệ thống đối 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. Tuy nhiên, việc tăng công suất phát cũng đặt ra nhiều thách thức như: Nguồn tiêu thụ, tối ưu hiệu suất sử dụng năng lượng, công nghệ chế tạo pin….

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. Việc thay đổi số lượng ăng-ten cho phép quan sát tác động của chùm tia, khả năng triệt nhiễu giữa người dùng và độ lợi mảng tác động đến chất lượng tín hiệu thu được. Các tham số mô phỏng chính được thể hiện trong bảng 3.2 như sau:

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 (e)	0 (kênh truyền hoàn hảo)
Kiểu điều chế	Điều chế khóa dịch pha (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

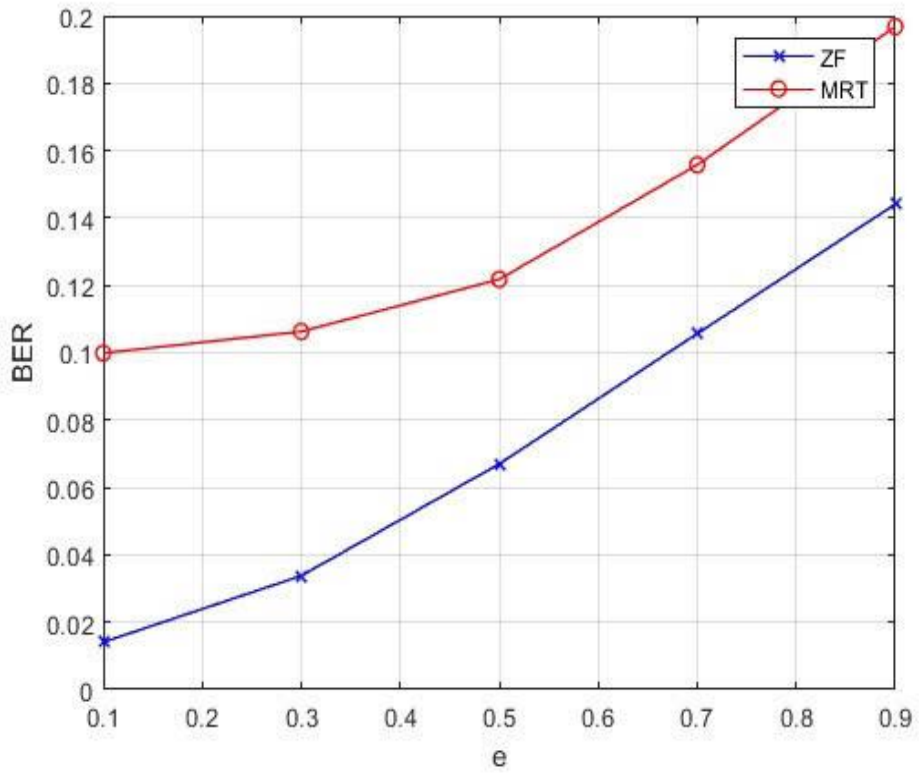
Kết quả mô phỏng trong hình 3.3 cho thấy rằng, với một số lượng người dùng nhất định, khi số lượng ăng-ten phát tại phía BS tăng lên, dẫn tới xác suất lỗi bit của hệ thống giảm xuống và ngược lại, điều này luôn đúng với tất cả các bộ tiền mã hoá. Tương tự như kết quả mô phỏng trong hình 3.2, kết quả 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, nhằm đánh giá xác suất lỗi hệ thống theo tham số sai số ước lượng kênh truyền, đề án tiến hành mô phỏng xác suất lỗi bit hệ thống theo tham số này. Tham số này giữ vai trò đặc biệt quan trọng, bởi mọi sai lệch trong quá trình ước lượng kênh đều có thể làm suy giảm khả năng tách tín hiệu, triệt giao thoa và hiệu quả của các kỹ thuật tiền mã hóa. Các tham số mô phỏng ảnh hưởng sai số ước

lượng kênh được thể hiện trong bảng 3.3 như sau:

Tham số	Giá trị
Sai số ước lượng kênh truyền (e)	$0.1 \rightarrow 0.9$
Số lượng ăng-ten phát	60
Số lượng người dùng	32
Công suất phát hệ thống	24dB
Kiểu điều chế	Điều chế khóa dịch pha (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

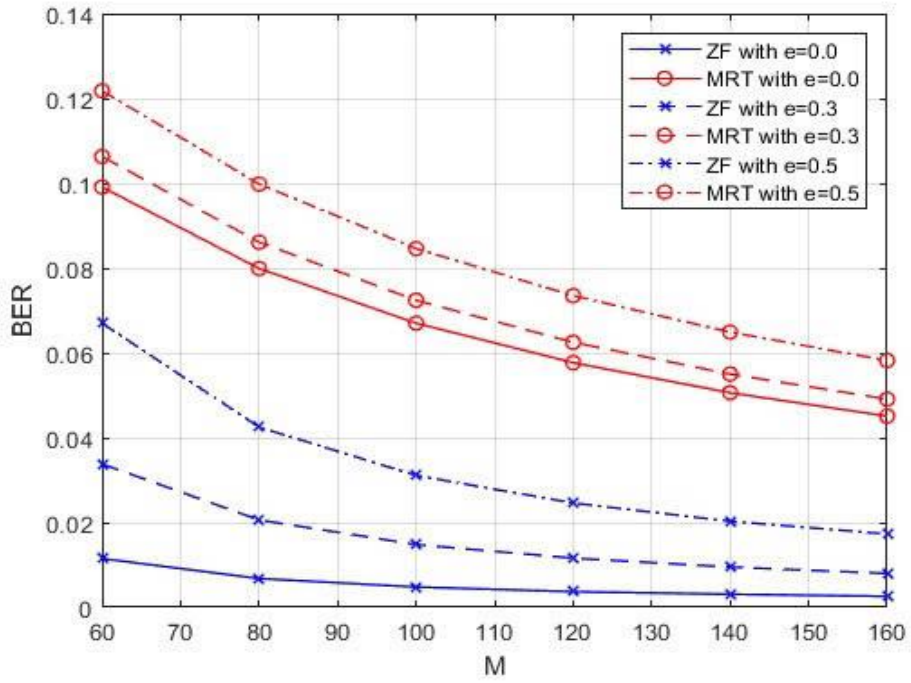
Kết quả mô phỏng trong hình 3.4 cho thấy rằng, sai số ước lượng kênh truyền có ảnh hưởng tiêu cực đến xác suất lỗi hệ thống. Cụ thể, khi sai số ước lượng kênh truyền tăng lên, dẫn tới xác suất lỗi hệ thống tăng và ngược lại. Điều này đặt ra một yêu cầu đối với hệ thống Massive MIMO đó là phải tăng độ chính xác của bài toán ước lượng kênh truyền, nhằm cải thiện phẩm chất BER hệ thống. Việc xây dựng,

thiết kế các kỹ thuật ước lượng kênh truyền là một bài toán cũng thu hút được nhiều sự quan tâm của các nhà khoa học.

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	Điều chế khóa dịch pha (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

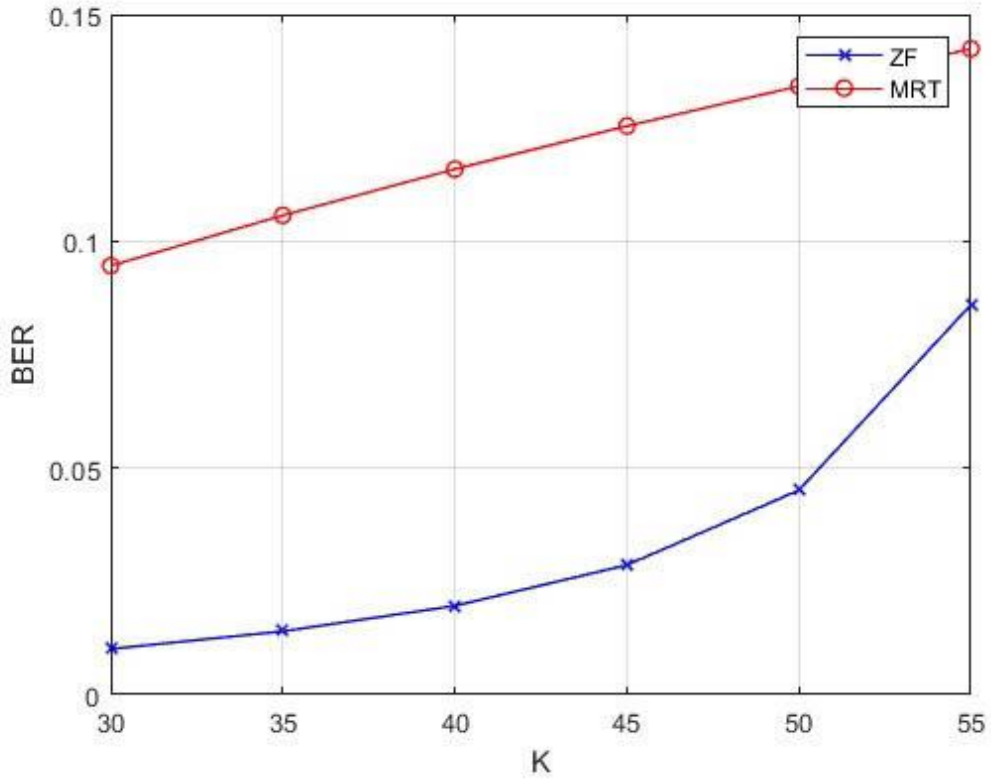
phát dẫn tới xác suất lỗi hệ thống giảm và ngược lại. Bên cạnh đó, sai số ước lượng kênh truyền luôn ảnh hưởng tiêu cực đến xác suất lỗi hệ thống đối với tất cả các bộ tiền mã hoá.

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. Mục tiêu là đánh giá mức độ biến thiên tỉ lệ lỗi bit BER theo số lượng người dùng, từ đó làm rõ khả năng mở rộng và giới hạn hoạt động của của các thuật toán tiền mã hóa. 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	Điều chế khóa dịch pha (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.

DANH MỤC CÁC TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Y. S. Cho, J. Kim, W. Y. Yang, and C. G. Kang (2010), *MIMO-OFDM wireless communications with MATLAB,* John Wiley & Sons.

[2] Ngo Quoc Hien (2015), *Massive MIMO: Fundamentals and system designs*, Linkoping University Electronic Press.

[3] Ngo Quoc Hien (2015), *Massive MIMO: Fundamentals and system designs*, Linkoping University Electronic Press, vol. 1642.

[4] Ngo Quoc Hien, E. G. Larsson, and T. L. Marzetta (2013), "*Massive mu-mimo downlink tdd systems with linear precoding and downlink pilots*," pp. 293–298.

[5] J. M. F. K. Adil Israr, Zahid Rauf (2017), "Performance analysis of downlink linear precoding in massive mimo systems under imperfect csi" *Wireless Personal Communications*, vol. 96, pp. 2603– 2619.

[6] Dinh Van Khoi, Le Minh Tuan, Ngo Vu Duc and Ta Chi Hieu (2020), "Pca-aided linear precoding in massive mimo systems with imperfect csi" *Wireless Communications and Mobile Computing*.

[7] E. G. Larsson, O. Edfors, F. Tufvesson, and T. L. Marzetta (2014), "Massive mimo for next generation wireless systems" *IEEE communications magazine*, vol. 52, no. 2, pp. 186-195.

[8] L. Lu, G. Y. Li, A. L. Swindlehurst, A. Ashikhmin, and R. Zhang (2014), "An overview of Massive MIMO: Benefits and challenges" *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing,* vol. 8, no. 5, pp. 742-758.

[9] T. L. Marzetta, E. G. Larsson, H. Yang, and N. Q. Hien (2016), *Fundamentals of Massive MIMO*, Cambridge University Press.

[10] T. L. Marzetta (2010), "Noncooperative Cellular Wireless with Unlimited Numbers of Base Station Ang-tennas" *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol.9, no.11, pp 3590-3600.

[11] T. L. Marzetta (2015), "Massive MIMO: An introduction" *Bell Labs Technical Journal*, vol. 20, pp. 1122.

[12] D. A. Md. Mahfuzur Rahman (2016), “Performance analysis of massive mimo with different precoders under perfect and imperfect csit condition” *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, vol. 33, no. 1, pp. 11-20.

[13] F. Rusek, D. Persson, B. K. Lau, E. G. Larsson, T. L. Marzetta, O. Edfors, and F. Tufvesson (2013), “Scaling up mimo: Opportunities and challenges with very large arrays” *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 30, no. 1, pp. 40–60.

[14] V. P. Selvan, M. S. Iqbal, and H. S. Al-Raweshidy (2014), “Performance analysis of linear precoding schemes for very large multi-user mimo downlink system” *Fourth edition of the International Conference on the Innovative Computing Technology (INTECH 2014)*, pp. 219–224.

[15] A. Sharma, K. K. Paliwal, S. Imoto, and S. Miyano (2013), “Principal component analysis using qr decomposition” *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*, vol. 4, no. 6, pp. 679–683.

[16] Tse and Viswanath (2005), *Fundamentals of wireless communication*, Cambridge: Cambridge University Press.