HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG

NGUYỄN THỊ THU HÀ

ĐÁNH GIÁ HIỆU NĂNG 5G ĐƯỜNG XUỐNG VỚI OFDMA VÀ NOMA THEO MÔ HÌNH KÊNH RAYLEIGH

ĐỀ ÁN TỐT NGHIỆP THẠC SĨ KỸ THUẬT

(Theo định hướng ứng dụng)

HÀ NỘI – 2026

HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG



NGUYỄN THỊ THU HÀ

ĐÁNH GIÁ HIỆU NĂNG 5G ĐƯỜNG XUỐNG VỚI OFDMA VÀ NOMA THEO MÔ HÌNH KÊNH RAYLEIGH

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:

PGS.TS. HOÀNG TRỌNG MINH

HÀ NỘI - 2026

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan rằng đề án này là kết quả của quá trình nghiên cứu khoa học độc lập do tôi thực hiện. Toàn bộ số liệu, thông tin, tài liệu trích dẫn và kết quả nghiên cứu được sử dụng trong đề án đều có nguồn gốc rõ ràng, trung thực và chưa từng được công bố trong bất kỳ công trình nghiên cứu nào khác. Các kết luận trong đề án được xây dựng dựa trên quá trình phân tích, tổng hợp và nghiên cứu nghiêm túc dưới sự hướng dẫn khoa học tận tình của PGS, TS. Hoàng Trọng Minh.

Tác giả đề án

Nguyễn Thị Thu Hà

LỜI CẢM ƠN

Trong quá trình học tập và làm đề án tốt nghiệp tại Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông, tác giả đã được các thầy cô giáo và cán bộ, nhân viên nhà trường giúp đỡ rất nhiệt tình. Với những kiến thức đã được học tại trường và theo mong muốn nghiên cứu, cùng với tình hình thực tiễn đặt ra, tác giả đã lựa chọn đề tài *"Đánh giá hiệu năng 5G đường xuống với OFDMA và NOMA theo mô hình kênh RAYLEIGH"* làm đề án thạc sỹ của mình.

Tác giả xin bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc tới nhà trường, các thầy cô giáo tại Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông và đặc biệt là PGS, TS. Hoàng Trọng Minh, người trực tiếp hướng dẫn khoa học, đã giúp đỡ tác giả hoàn thành đề án tốt nghiệp này.

Do các giới hạn về kiến thức và thời gian nghiên cứu, chắc chắn đề án còn có những thiếu sót và hạn chế. Tác giả mong nhận được sự chỉ dẫn, góp ý, của thầy cô giáo và doanh nghiệp bè, đồng nghiệp.

Tác giả xin trân trọng cảm ơn.

MỤC LỤC

LỜI CAM ĐOAN i
MỤC LỤC vi
DANH MỤC CÁC THUẬT NGỮ, CHỮ VIẾT TẮT ix
DANH SÁCH CÁC BẢNG vi
DANH SÁCH HÌNH VẼ vi
MỞ ĐẦU 1
CHƯƠNG 1 - TỔNG QUAN VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU 2
1.1. Bối cảnh nghiên cứu mạng 5G NR 2
1.1.1. Vai trò của 5G trong hệ thống thông tin di động hiện đại 2
1.1.2. Yêu cầu hiệu năng đường xuống trong 5G NR 6
1.1.3. Thách thức đối với đánh giá hiệu năng trong môi trường vô tuyến 9
1.2. Bài toán nghiên cứu của đề án 11
1.2.1. Mục tiêu của đề án 11
1.2.2. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu 12
1.2.3. Phương pháp nghiên cứu 13
1.2.4. Các chỉ tiêu đánh giá chính 14
1.3. Tổng quan các kỹ thuật đa truy nhập trong bài toán khảo sát 15
1.3.1. OFDMA trong đường xuống 5G NR 15
1.3.2. NOMA trong đường xuống 5G NR 17
1.3.3. Ý nghĩa của việc so sánh OFDMA và NOMA 18
1.4. Tổng quan mô hình kênh sử dụng trong đề án 20
1.4.1. Đặc điểm kênh vô tuyến 5G 20
1.4.2. Mô hình Rayleigh fading 22
1.4.3. Lý do lựa chọn mô hình Rayleigh cho bài toán đánh giá 23
1.5. Cấu trúc của đề án 25
1.6. Kết luận Chương 1 26
CHƯƠNG 2 - CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ MÔ HÌNH HỆ THỐNG 27
2.1. Cơ sở lý thuyết đánh giá hiệu năng kênh 27
2.1.1. Dung lượng kênh và thông tin tương hỗ 27
2.1.2. Path-loss, shadowing và fading 28

2.1.3. Nhiễu AWGN và ý nghĩa trong mô phỏng *29*
2.2. Mô hình hệ thống đường xuống 5G NR khảo sát **30**
2.2.1. Mô hình truyền dẫn giữa gNB và UE *30*
2.2.2. Các giả thiết hệ thống *30*
2.2.3. Các tham số mô phỏng cơ bản *31*
2.3. Mô hình OFDMA **32**
2.3.1. Nguyên lý hoạt động *32*
2.3.2. Biểu diễn toán học *33*
2.3.3. Ưu điểm và hạn chế trong đánh giá hiệu năng *34*
2.4. Mô hình NOMA **34**
2.4.1. Nguyên lý chồng công suất *34*
2.4.2. Giải mã SIC *35*
2.4.3. Biểu diễn toán học cho kịch bản hai người dùng *35*
2.4.4. Ưu điểm và hạn chế trong đánh giá hiệu năng *36*
2.5. Mô hình kênh truyền Rayleigh tổng hợp dùng trong đề án **37**
2.5.1. Suy hao không gian tự do *37*
2.5.2. Suy hao do mưa *37*
2.5.3. Fading Rayleigh *38*
2.5.4. Mô hình nhiễu nền *38*
2.5.5. Công thức tính công suất thu và SNR *39*
2.6. Các chỉ tiêu đánh giá hiệu năng **39**
2.6.1. SNR *39*
2.6.2. BER *40*
2.6.3. Outage probability *41*
2.6.4. Dung lượng kênh và thông lượng *41*
2.7. Kết luận chương 2 ..... *44*
CHƯƠNG 3 - MÔ PHỎNG VÀ ĐÁNH GIÁ HIỆU NĂNG *46*
3.1. Thiết lập mô phỏng *46*
3.1.1. Công cụ mô phỏng *46*
3.1.2. Tham số hệ thống *47*
3.1.3. Kịch bản mô phỏng *48*

3.1.4. Phương pháp Monte Carlo *49*
3.2. Đánh giá đặc tính kênh truyền *50*
3.2.1. Suy hao đường truyền theo khoảng cách và tần số *50*
3.2.2. SNR theo khoảng cách *51*
3.2.3. Ảnh hưởng của băng tần FR1 và FR2 ..... *52*
3.3. Đánh giá độ tin cậy truyền dẫn *53*
3.3.1. BER của QPSK trong kênh Rayleigh *53*
3.3.2. Outage probability theo khoảng cách *54*
3.3.3. Nhận xét về chất lượng liên kết vô tuyến *55*
3.4. So sánh hiệu năng OFDMA và NOMA *56*
3.4.1. Mô hình so sánh và các giả thiết *56*
3.4.2. So sánh thông lượng *57*
3.4.3. So sánh BER *58*
3.4.4 So sánh theo người dùng gần và người dùng xa *59*
3.4.5 Thảo luận về ưu điểm và hạn chế của từng kỹ thuật *60*
3.5. Thảo luận kết quả và hàm ý triển khai *61*
3.5.1. Liên hệ giữa mô hình kênh và kết quả mô phỏng *61*
3.5.2. Ý nghĩa đối với triển khai thực tế *61*
3.5.3. Giới hạn của mô hình nghiên cứu *62*
3.6. Kết luận chương 3 ..... *63*
KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ *64*
DANH MỤC TÀI LIỆU THAM KHẢO *66*

DANH MỤC CÁC THUẬT NGỮ, CHỮ VIẾT TẮT

Từ viết tắt	Nghĩa tiếng Anh	Nghĩa tiếng Việt
1G	First Generation	Thế hệ mạng di động đầu tiên
2G	Second Generation	Thế hệ mạng di động thứ hai
3G	Third Generation	Thế hệ mạng di động thứ ba
4G	Fourth Generation	Thế hệ mạng di động thứ tư
5G	Fifth Generation	Thế hệ mạng di động thứ năm
AMF	Access and Mobility Management Function	Chức năng quản lý truy cập và di động
AR	Augmented Reality	Thực tế tăng cường
AUSF	Authentication Server Function	Chức năng máy chủ xác thực
BER	Bit Error Rate	Tỷ lệ lỗi bit
CDMA	Code Division Multiple Access	Đa truy cập phân chia theo mã
FDMA	Frequency Division Multiple Access	Đa truy cập phân chia tần số
IP	Internet Protocol	Giao thức Internet
IoT	Internet of Things	Kết nối vạn vật
LTE	Long-Term Evolution	Mạng 4G
MCS	Modulation and Coding Scheme	Sơ đồ điều chế và mã hóa
MEC	Multi-Access Edge Computing	Điện toán biên đa truy cập
MIMO	Multiple-Input Multiple- Output	Nhiều đầu vào - Nhiều đầu ra
NEF	Network Exposure Function	Chức năng tiếp xúc với mạng
NF	Network Function	Chức năng mạng

Từ viết tắt	Nghĩa tiếng Anh	Nghĩa tiếng Việt
NOMA	Non-Orthogonal Multiple Access	Đa truy cập không trực giao
NR	New Radio	Hệ thống truyền thông vô tuyến mới
NRF	Network Repository Function	Chức năng lưu trữ mạng
NSA	Non-Standalone	Trạm cơ sở không độc lập
NVF	Network Virtualization Function	Chức năng ảo hóa mạng
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing	Ghép kênh phân chia tần số trực giao
PCF	Policy Control Function	Chức năng kiểm soát chính sách
PDSCH	Physical Downlink Shared Channel	Kênh chia sẻ đường xuống vật lý
PDU	Protocol Data Unit	Đơn vị dữ liệu giao thức
PSTN	Public Switched Telephone Network	Mạng điện thoại chuyển mạch công cộng
RAN	Radio Access Network	Mạng truy cập vô tuyến
RB	Resource Block	Khối tài nguyên
SA	Standalone	Trạm cơ sở độc lập
SCS	Subcarrier Spacing	Khoảng cách sóng mang con
SDN	Software-Defined Networking	Mạng xác định bằng phần mềm
SMF	Service Management Function	Chức năng quản lý dịch vụ
SNR	Signal-to-Noise Ratio	Tỷ lệ tín hiệu trên tạp âm
TBS	Transport Block Size	Kích thước khối vận chuyển
TDMA	Time Division Multiple Access	Đa truy cập phân chia thời gian
UDM	Unified Data Management	Quản lý dữ liệu hợp nhất
UE	UE User eqipment	Thiết bị người dùng

Từ viết tắt	Nghĩa tiếng Anh	Nghĩa tiếng Việt
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System	Hệ thống viễn thông di động toàn cầu
UPF	User Plane Function	Chức năng mặt phẳng người dùng
VR	Virtual Reality	Thực tế ảo
VoIP	Voice over Internet Protocol	Giao thức thoại qua Internet
WWWW	World Wide Wireless Web	Mạng không dây toàn cầu
eMBB	Enhanced Mobile Broadband	Băng thông rộng di động nâng cao
mMTC	Massive Machine Type Communications	Kết nối rộng lớn
uRLLC	Ultra Reliable Low Latency Communication	Giao tiếp có độ trễ thấp cực kỳ đáng tin cậy

DANH SÁCH CÁC BẢNG

Bảng 1.1: Một số chỉ tiêu định hướng của IMT-2020 liên quan tới đánh giá 5G 5
Bảng 1.2: Khung phạm vi nghiên cứu của đề án.....12
Bảng 1.3: Các chỉ tiêu đánh giá chính sử dụng trong đề án 15
Bảng 1.4: So sánh định tính OFDMA và NOMA trong bài toán đường xuống 20
Bảng 1.5: Vị trí của Rayleigh trong hệ các mô hình fading thường dùng 24
Bảng 2.1: Khung tham số mô phỏng cơ bản cho mô hình đường xuống 5G NR 31
Bảng 2.2: Ý nghĩa của các chỉ tiêu đánh giá 43
Bảng 3.1: Tổng hợp các kịch bản mô phỏng.....48
Bảng 3.2: Các giả thiết so sánh giữa OFDMA và NOMA.....56

DANH SÁCH HÌNH VẼ

Hình 1.1: Quá trình phát triển từ 1G đến 5G....4
Hình 1.2: Ba nhóm dịch vụ tiêu biểu của 5G....5
Hình 1.3: Phân lớp dải tần FR1 và FR2 trong 5G NR....9
Hình 1.4: Sơ đồ tổng quát kiến trúc 5G phục vụ bối cảnh đánh giá hiệu năng....22
Hình 2.1: Ví dụ đường cong BER theo SNR trên các kênh Rayleigh và Rician....40
Hình 2.2: Minh họa BER của NOMA hai người dùng trên kênh Rayleigh với các hệ số công suất khác nhau....43
Hình 2.3: So sánh BER mô phỏng và đường lý thuyết trong các kênh AWGN và Rayleigh....44
Hình 3.1: Các tham số hệ thống mô phỏng cơ bản....47
Hình 3.2: Suy hao không gian tự do theo khoảng cách đối với các băng tần 0,7 GHz, 2,6 GHz và 28 GHz.....50
Hình 3.3: SNR trung bình theo khoảng cách truyền tại các băng tần 0,7 GHz, 2,6 GHz và 28 GHz.....51
Hình 3.4: BER của điều chế QPSK trong kênh Rayleigh theo khoảng cách đối với các băng tần 700 MHz và 28 GHz.....53
Hình 3.5: Xác suất dừng theo khoảng cách truyền đối với các băng tần 700 MHz và 28 GHz trong kênh Rayleigh.....55
Hình 3.6: So sánh BER giữa OFDMA và NOMA đối với UE gần và UE xa trong kịch bản hai người dùng.....59

MỞ ĐẦU

Trong tiến trình phát triển của thông tin di động, 5G New Radio (5G NR) đánh dấu bước chuyển từ tư duy tăng tốc độ truyền dữ liệu đơn thuần sang tư duy tối ưu hóa đồng thời dung lượng, độ tin cậy, hiệu quả phổ và khả năng phục vụ dị thể cho nhiều loại dịch vụ. Trong bối cảnh đó, đánh giá hiệu năng đường xuống trở thành một bài toán có ý nghĩa thực tiễn rõ rệt, vì đây là hướng truyền chi phối phần lớn lưu lượng người dùng và chịu tác động trực tiếp của cơ chế đa truy nhập, điều kiện kênh truyền và phân bố tài nguyên vô tuyến.

Đối với bài toán nghiên cứu trong tài liệu này, trọng tâm được đặt vào việc mô hình hóa và so sánh hai cơ chế đa truy nhập tiêu biểu là OFDMA và NOMA trong đường xuống 5G NR dưới tác động của kênh Rayleigh tổng hợp. Mục tiêu không phải là khẳng định một kỹ thuật luôn vượt trội trong mọi điều kiện, mà là làm rõ điều kiện mà mỗi kỹ thuật thể hiện ưu thế, mức đánh đổi về BER, outage probability, dung lượng kênh và thông lượng, cũng như ý nghĩa của các kết quả đó đối với triển khai thực tế.

Trên cơ sở định hướng đó, đề án được tổ chức thành ba chương:

Chương 1: "Tổng quan vấn đề nghiên cứu", nội dung này trình bày về khái quát về bối cảnh nghiên cứu, xác định bài toán và làm rõ phạm vi khảo sát.

Chương 2: "Cơ sở lý thuyết và mô hình hệ thống", chương này tập trung vào việc xây dựng nền lý thuyết và mô hình hệ thống dùng cho đánh giá.

Chương 3: "Mô hình và đánh giá hiệu năng", nội dung chương này trình bày quá trình triển khai mô phỏng, phân tích kết quả và rút ra các hàm ý triển khai.

Trong phần Kết luận, đề án tóm tắt các kết quả nghiên cứu chính đã thực hiện và đưa ra những gợi mở cho hướng nghiên cứu phát triển tiếp theo.

CHƯƠNG 1 -TỔNG QUAN VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU

Chương này xây dựng nền tảng khoa học và kỹ thuật cho bài toán đánh giá hiệu năng đường xuống trong hệ thống 5G NR, với trọng tâm là hai kỹ thuật đa truy nhập OFDMA và NOMA trong môi trường kênh Rayleigh. Thay vì đi sâu vào chi tiết mô hình toán học hay thuật toán mô phỏng, chương tập trung xác lập bối cảnh công nghệ, làm rõ các yêu cầu hiệu năng đặc trưng của đường xuống, đồng thời lý giải sự cần thiết của việc khảo sát song song hai cơ chế đa truy nhập tiêu biểu này. Bên cạnh đó, chương cũng biện giải việc lựa chọn mô hình kênh Rayleigh như một chuẩn tham chiếu phù hợp cho các đánh giá ban đầu ở cấp liên kết. Theo định hướng đó, nội dung chương được tổ chức lại theo một cấu trúc logic, bắt đầu từ bối cảnh hệ thống, bài toán nghiên cứu, kỹ thuật đa truy nhập, đến mô hình kênh và cấu trúc tổng thể của đề án.

1.1. Bối cảnh nghiên cứu mạng 5G NR

1.1.1. Vai trò của 5G trong hệ thống thông tin di động hiện đại

Sự hình thành của 5G không chỉ là bước nâng cấp tuần tự về tốc độ so với 4G LTE mà là sự chuyển dịch trong triết lý thiết kế của toàn bộ hệ thống thông tin di động. Nếu các thế hệ trước chủ yếu tập trung vào thoại, dữ liệu gói, và Internet di động cho người dùng cuối, thì 5G được xây dựng như một nền tảng kết nối thống nhất cho ba lớp nhu cầu rất khác nhau: băng rộng di động nâng cao, truyền thông độ trễ thấp siêu tin cậy, và kết nối khối lượng lớn thiết bị máy. Khung nhìn này đã được ITU xác lập trong IMT-2020 khi nhấn mạnh rằng hệ thống vô tuyến tương lai phải đồng thời hỗ trợ tốc độ dữ liệu rất cao, số lượng thiết bị kết nối lớn, cũng như các ứng dụng yêu cầu độ trễ rất thấp và độ tin cậy cao [1].

Ở góc độ hạ tầng số, vai trò của 5G nằm ở khả năng biến mạng di động từ một nền tảng truyền tải dữ liệu thành một nền tảng thực thi dịch vụ. Điều này đặc biệt quan trọng đối với các kịch bản sản xuất thông minh, logistics thời gian thực, giao thông kết nối, đô thị thông minh, giám sát môi trường diện rộng và các ứng dụng thực tế ảo hoặc tăng cường. Trong các kịch bản này, chất lượng dịch vụ không thể chỉ đo bằng tốc độ cực đại theo lý thuyết. Hệ thống còn phải duy trì thông lượng hữu dụng, độ trễ đầu cuối, độ ổn định liên kết, khả năng phục vụ số đông người dùng và hiệu quả sử dụng phổ trong những điều kiện truyền dẫn thay đổi nhanh.

Về kiến trúc kỹ thuật, 5G NR được tiêu chuẩn hóa để vận hành trên một dải phổ rất rộng và theo một kiến trúc linh hoạt hơn đáng kể so với LTE. 3GPP mô tả NR như một hệ thống vô tuyến có khả năng mở rộng theo numerology, hỗ trợ nhiều khoảng cách sóng mang con và tương thích với các cấu hình triển khai khác nhau [3]. Ở phía mạng lõi, 5GC chuyển sang mô hình Service-Based Architecture, trong đó các chức năng mạng được tổ chức theo dạng network function thay cho cấu trúc thực thể cứng kiểu truyền thống. Cách tổ chức này cho phép tái sử dụng chức năng, linh hoạt hóa mặt phẳng điều khiển - mặt phẳng người dùng và hỗ trợ slicing theo loại dịch vụ [4].

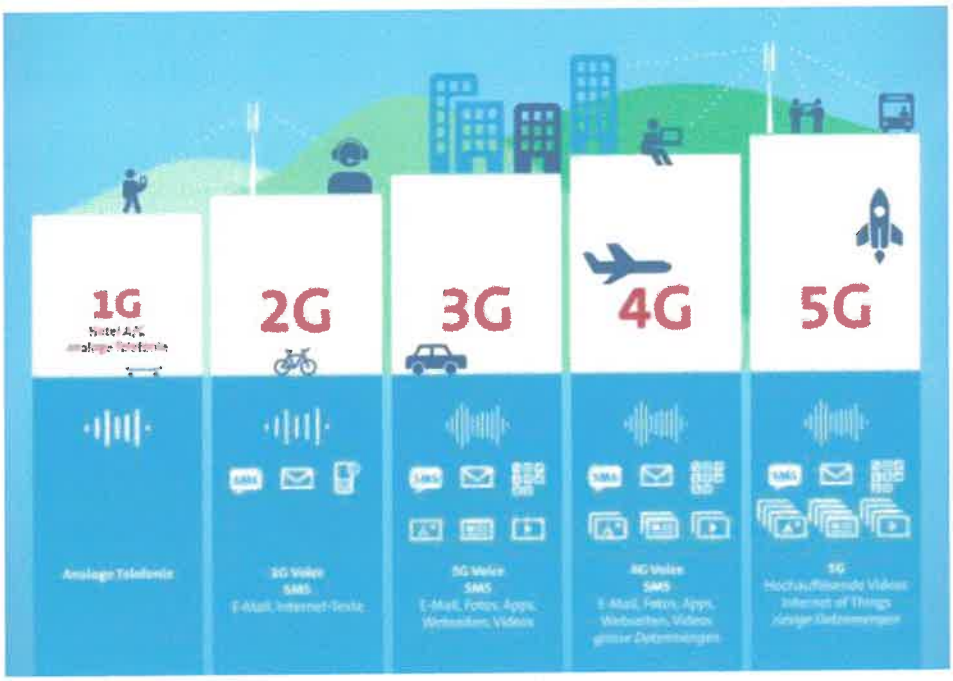
Do đó, khi nói đến vai trò của 5G trong hệ thống thông tin di động hiện đại, cần nhìn nhận nó như một hạ tầng tích hợp giữa truy nhập vô tuyến, mạng lõi, điều phối tài nguyên và khả năng phục vụ nhiều miền ứng dụng. Điều này dẫn tới một hệ quả trực tiếp cho đề án: đánh giá hiệu năng đường xuống không thể chỉ dừng ở mức so sánh riêng lẻ hai công thức dung lượng, mà phải đặt trong bối cảnh của 5G NR, nơi đường xuống là chiều truyền tải mang phần lớn lưu lượng dữ liệu người dùng và chịu áp lực lớn về thông lượng hữu dụng, chất lượng trải nghiệm và hiệu quả khai thác phổ.

Xét theo tiến trình phát triển của thông tin di động, 5G cũng là thế hệ đầu tiên mà yêu cầu về hiệu năng không đồng nhất giữa các lớp dịch vụ đã trở thành một điều kiện thiết kế ngay từ đầu. Trong 2G và 3G, hệ thống chủ yếu được tối ưu cho thoại và dịch vụ dữ liệu cơ bản. Trong 4G, mục tiêu mở rộng sang băng rộng di động toàn IP. Sang 5G, hệ thống phải cùng lúc giải quyết các bài toán có bản chất khác nhau: một mặt cần tốc độ đường xuống rất cao cho eMBB; mặt khác cần độ tin cậy và độ trễ cực thấp cho URLLC; đồng thời phải duy trì khả năng kết nối cực dày cho mMTC. Chính sự dị biệt về mục tiêu này khiến việc đánh giá hiệu năng trong 5G trở nên khó hơn, vì một chỉ tiêu tối ưu cho dịch vụ này có thể chưa phù hợp với dịch vụ khác.

Ở bình diện triển khai, 5G còn gắn với các kỹ thuật như Massive MIMO, beamforming, carrier aggregation, phân lớp triển khai FR1/FR2, điện toán biên và slicing. Mỗi thành phần này đều tác động trực tiếp đến chất lượng đường xuống. Chẳng hạn, Massive MIMO và beamforming làm tăng khả năng tập trung năng lượng về phía người dùng, nhưng đồng thời khiến bài toán ước lượng kênh, phân bổ tài nguyên và quản lý nhiễu trở nên phức tạp hơn. Điện toán biên giúp giảm độ trễ dịch vụ, song không

triệt tiêu được ảnh hưởng của fading trên giao diện vô tuyến. Vì vậy, ở cấp liên kết, chất lượng đường xuống vẫn phải được khảo sát từ nền tảng truyền dẫn vô tuyến trước khi suy rộng sang các tầng hệ thống cao hơn.

Đối với đề án này, vai trò của 5G được hiểu theo một cách hẹp và thực dụng hơn: 5G NR cung cấp bối cảnh chuẩn hóa cho bài toán khảo sát đường xuống, OFDMA đóng vai trò kỹ thuật nền đã được chuẩn hóa và sử dụng rộng rãi trong NR, còn NOMA được xem như một hướng đa truy nhập phi trực giao tiềm năng có thể cải thiện hiệu quả phổ trong một số điều kiện người dùng và phân bổ công suất thích hợp [7]. Từ đây, việc đặt bài toán đánh giá trên kênh Rayleigh không nhằm mô tả toàn bộ thế giới triển khai 5G, mà nhằm tạo ra một nền so sánh cơ sở, có tính phân tích và có khả năng lặp lại.



Hình 1.1: Quá trình phát triển từ 1G đến 5G

(Nguồn: [1], [2].)

Nhìn theo lộ trình phát triển này, có thể thấy 5G kế thừa các kết quả kỹ thuật đã được tích lũy từ các thế hệ trước nhưng mở rộng phạm vi phục vụ sang các dịch vụ số có yêu cầu khắt khe hơn nhiều về độ trễ, độ tin cậy và khả năng điều phối tài nguyên. Vì vậy, một nghiên cứu về hiệu năng 5G chỉ có giá trị khi chỉ ra được hệ quy chiếu đánh giá cụ thể. Trong phạm vi đề án, hệ quy chiếu đó là hiệu năng đường xuống ở cấp liên

kết vô tuyến, nơi tương tác giữa kỹ thuật đa truy nhập, chất lượng kênh và chỉ tiêu lỗi truyền dẫn được thể hiện rõ nhất.

Khía cạnh quan trọng cần nhấn mạnh là 5G không tự động bảo đảm hiệu năng cao trong mọi tình huống. Các khả năng được chuẩn hóa bởi ITU và 3GPP là mục tiêu thiết kế của hệ thống, còn hiệu năng thực tế phụ thuộc mạnh vào môi trường truyền, cấu hình phổ, chiến lược phân bổ tài nguyên, chất lượng CSI, mật độ người dùng và phương thức truy nhập. Vì lý do đó, việc so sánh OFDMA và NOMA trong một môi trường kênh kiểm soát được là bước cần thiết để cô lập ảnh hưởng của cơ chế đa truy nhập trước khi xét tới các yếu tố mạng phức hợp hơn.



Hình 1.2: Ba nhóm dịch vụ tiêu biểu của 5G

(Nguồn: [1], [2].)

Bảng 1.1: Một số chỉ tiêu định hướng của IMT-2020 liên quan tới đánh giá 5G

(Nguồn: tổng hợp từ ITU-R M.2083-0 và ITU-R M.2410-0 [1], [2].)

Chỉ tiêu	Giá trị định hướng	Ý nghĩa với đường xuống	Nguồn
Peak data rate	20 Gbit/s downlink	Thể hiện trần hiệu năng trong điều kiện lý tưởng eMBB; không phản ánh trực tiếp hiệu năng người dùng trung bình.	[2]

Chỉ tiêu	Giá trị định hướng	Ý nghĩa với đường xuống	Nguồn
Peak spectral efficiency	30 bit/s/Hz downlink	Liên quan trực tiếp đến hiệu quả khai thác phổ và giá trị so sánh giữa các sơ đồ đa truy nhập.	[2]
User experienced data rate	100 Mbit/s downlink trong Dense Urban - eMBB	Quan trọng hơn peak rate khi đánh giá chất lượng dịch vụ ở góc nhìn người dùng.	[2]
User plane latency	4 ms cho eMBB; 1 ms cho URLLC	Cho thấy việc tối ưu đường xuống không chỉ là tăng thông lượng mà còn phải kiểm soát thời gian truyền dẫn.	[2]
Connection density	1.000.000 thiết bị/km^2	Nhấn mạnh áp lực truy nhập đa người dùng và lý do cần xem xét các kỹ thuật đa truy nhập hiệu quả hơn.	[2]
Reliability	xác suất thành công 1-10^{-5} cho gói nhỏ trong 1 ms ở kịch bản URLLC	Làm rõ mối liên hệ giữa BER/BLER, chất lượng kênh và khả năng phục vụ dịch vụ tin cậy cao.	[2]

1.1.2. Yêu cầu hiệu năng đường xuống trong 5G NR

Trong phần lớn kịch bản khai thác mạng di động hiện nay, lưu lượng đường xuống vẫn chiếm tỷ trọng chủ đạo do người dùng tiêu thụ nội dung nhiều hơn phát sinh nội dung. Vì vậy, hiệu năng đường xuống là một tiêu điểm tự nhiên khi khảo sát chất lượng của hệ thống 5G NR. Tuy nhiên, khái niệm hiệu năng đường xuống cần được hiểu theo nghĩa rộng hơn thông lượng đỉnh. Ở góc nhìn hệ thống, hiệu năng đường xuống phải phản ánh được ít nhất bốn lớp vấn đề: tốc độ truyền dẫn hữu dụng, độ tin cậy của gói tin, hiệu quả sử dụng phổ và mức độ công bằng giữa các người dùng khi cùng chia sẻ tài nguyên.

Trong NR, đường xuống được tổ chức chủ yếu quanh PDSCH và cơ chế lập lịch tài nguyên theo đơn vị thời gian - tần số. Kỹ thuật nền của đường xuống là OFDMA, cho phép ánh xạ dữ liệu lên các resource block và điều chỉnh linh hoạt theo numerology, băng thông và chất lượng kênh [3]. Tính linh hoạt này rất quan trọng vì 5G NR phải vận

hành từ FR1 đến FR2, trong khi điều kiện lan truyền, vùng phủ và yêu cầu dịch vụ giữa các dải phổ là khác nhau đáng kể. Vì vậy, đánh giá hiệu năng đường xuống phải gắn với cấu hình vật lý, không thể tách rời khỏi bối cảnh phổ và đặc tính kênh.

Ở mức chuẩn hóa, ITU quy định các chỉ tiêu tối thiểu của IMT-2020 theo cách đủ rộng để bao phủ nhiều kịch bản. Song đối với một nghiên cứu cấp liên kết như đề án này, không phải mọi chỉ tiêu đều có thể đo trực tiếp bằng một mô hình mô phỏng đơn giản. Chẳng hạn, connection density là mục tiêu cấp hệ thống, còn user plane latency phụ thuộc cả giao diện vô tuyến lẫn xử lý giao thức. Vì vậy, cần chuyển các yêu cầu cấp chuẩn hóa thành các chỉ tiêu thao tác được ở cấp mô phỏng, như BER, xác suất dừng, thông lượng hoặc dung lượng đạt được, và chỉ số fairness giữa các người dùng.

Xét riêng đối với đường xuống, có ba yêu cầu kỹ thuật nổi bật. Thứ nhất là duy trì thông lượng hữu dụng cao trên mỗi đơn vị phổ. Yêu cầu này gắn trực tiếp với hiệu suất sử dụng tài nguyên vô tuyến và thường là tiêu chí khiến NOMA được đưa vào so sánh với OFDMA. Thứ hai là bảo đảm mức lỗi truyền dẫn thấp, vì thông lượng danh nghĩa cao nhưng BER lớn sẽ làm giảm thông lượng hữu dụng sau tái truyền hoặc giải mã thất bại. Thứ ba là giữ được sự cân bằng hợp lý giữa người dùng gần và xa trạm gốc; nếu hệ thống chỉ tối ưu tổng thông lượng mà bỏ qua công bằng, hiệu năng trải nghiệm của người dùng biên ô sẽ suy giảm đáng kể.

Thực tế này dẫn tới một điểm quan trọng về phương pháp luận. Một đánh giá đường xuống có ý nghĩa không nên dựa trên một chỉ tiêu đơn lẻ. OFDMA có thể cho BER ổn định hơn nhờ tính trực giao và cấu trúc thu đơn giản hơn, trong khi NOMA có thể đem lại tổng thông lượng hoặc hiệu quả phổ cao hơn nếu khoảng cách kênh giữa người dùng đủ lớn và chiến lược phân bổ công suất hợp lý. Tuy nhiên, khi có sai lệch CSI, fading sâu hoặc SIC không hoàn hảo, lợi thế đó có thể thu hẹp, thậm chí đảo chiều. Vì vậy, đề án cần dùng một bộ chỉ tiêu đa chiều thay vì kết luận từ một đồ thị đơn lẻ.

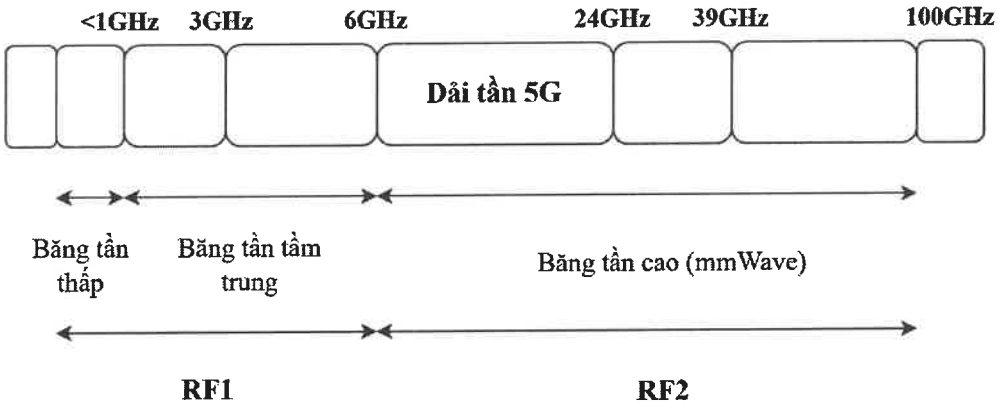
Trong 5G NR, yêu cầu hiệu năng đường xuống còn gắn với tính thích nghi của hệ thống. 3GPP cho phép NR vận hành với numerology có thể mở rộng, từ đó thay đổi thời lượng symbol, slot và độ rộng subcarrier theo dải tần và loại dịch vụ [3]. Ở cấp kỹ thuật, điều này cho thấy cùng một nền tảng vật lý nhưng hành vi đường xuống có thể khác nhau đáng kể khi cấu hình sóng mang thay đổi. Đề án hiện không đặt trọng tâm vào

đánh giá toàn bộ không gian numerology, nhưng việc nêu rõ bối cảnh này giúp xác định rằng so sánh OFDMA và NOMA phải được hiểu là so sánh trong một cấu hình khảo sát xác định, không phải một kết luận bao trùm cho mọi cấu hình NR.

Đối với người dùng cuối, chỉ tiêu có ý nghĩa thực dụng nhất không phải tốc độ cực đại trong điều kiện lý tưởng mà là chất lượng dịch vụ thực nhận trên liên kết thực. Đây là lý do mà tốc độ dữ liệu mà người dùng trải nghiệm trong IMT-2020 được dùng như một mục tiêu tham chiếu quan trọng [2]. Ở cấp mô phỏng của đề án, tinh thần đó được chuyển thành các thước đo như thông lượng trung bình đạt được theo SNR, BER theo điều kiện kênh, và mức công bằng giữa các người dùng. Cách tiếp cận này phù hợp với một nghiên cứu nền tảng, nơi mục tiêu chính là làm rõ quy luật chứ không phải mô phỏng toàn bộ giao thức vận hành của mạng thương mại.

Nhìn từ góc độ triển khai, yêu cầu đường xuống của 5G NR cũng nhấn mạnh đến tính ổn định dưới biến động của môi trường vô tuyến. Một kỹ thuật đa truy nhập chỉ thực sự hữu dụng khi lợi thế của nó không biến mất ngay khi chuyển từ kênh lý tưởng sang kênh fading. Bởi vậy, nghiên cứu so sánh OFDMA và NOMA trên kênh Rayleigh có ý nghĩa như một phép thử nền: nếu một phương án chỉ vượt trội khi không có fading, nhưng suy giảm mạnh trong môi trường NLOS cơ bản, thì giá trị triển khai thực tế của nó cần được xem xét thận trọng hơn.

Xét theo ba nhóm dịch vụ cơ bản của 5G NR, eMBB ưu tiên thông lượng cao và hiệu quả phổ; uRLLC ưu tiên độ tin cậy rất cao và độ trễ cực thấp; còn mMTC ưu tiên khả năng phục vụ số lượng lớn thiết bị với tải lưu lượng nhỏ. Trong hệ quy chiếu đó, OFDMA là kỹ thuật nền phù hợp cho cả ba nhóm dịch vụ do đã được chuẩn hóa và có hành vi ổn định hơn ở phía thu, trong khi NOMA chủ yếu có ý nghĩa nghiên cứu đối với các kịch bản cần tăng hiệu quả phổ hoặc phục vụ đồng thời nhiều người dùng có chênh lệch kênh rõ, đặc biệt là một số tình huống eMBB quá tải và mMTC mật độ lớn. Ngược lại, NOMA kém phù hợp hơn với các kịch bản uRLLC nghiêm ngặt, vì cơ chế chồng công suất và SIC có thể làm tăng độ phức tạp thu, độ nhạy với sai số CSI và nguy cơ lan truyền lỗi.



Hình 1.3: Phân lớp dải tần FR1 và FR2 trong 5G NR

(Nguồn: [3], [5].)

1.1.3. Thách thức đối với đánh giá hiệu năng trong môi trường vô tuyến

Khó khăn cốt lõi của mọi nghiên cứu về hiệu năng vô tuyến nằm ở chỗ kênh truyền không cố định. Tín hiệu thu tại đầu cuối không chỉ chịu suy hao khoảng cách mà còn chịu bóng che, đa đường, tán xạ, dịch Doppler và nhiễu giao thoa từ các nguồn khác. Trong 5G, mức độ phức tạp này còn tăng lên do hệ thống hoạt động trên dải phổ rộng hơn, hỗ trợ cấu hình ăng-ten lớn hơn và có thể triển khai trong nhiều môi trường rất khác nhau, từ macro-cell phủ rộng đến hotspot mật độ cao hoặc dải mmWave [5].

Ở cấp đánh giá, điều đó tạo ra một bài toán mô hình hóa: nếu mô hình quá đơn giản, kết quả thu được khó đại diện cho hành vi thực tế; ngược lại, nếu mô hình quá phức tạp, rất khó cô lập ảnh hưởng riêng của từng thành phần kỹ thuật. Đối với một đề án định hướng ứng dụng và tập trung vào so sánh hai cơ chế đa truy nhập, cách tiếp cận hợp lý là chọn một mô hình kênh đủ điển hình để thể hiện fading đa đường và đủ gọn để cho phép mô phỏng lặp lại và giải thích kết quả. Đây chính là cơ sở dẫn tới việc chọn Rayleigh làm mô hình chuẩn nền.

Thách thức thứ nhất là tính ngẫu nhiên theo thời gian của kênh. Khi người dùng di chuyển hoặc môi trường phản xạ thay đổi, biên độ và pha của đáp ứng kênh cũng thay đổi. Điều này làm SNR tức thời biến thiên, kéo theo BER, thông lượng và xác suất dừng thay đổi theo từng phiên truyền. Trong điều kiện như vậy, đánh giá một kỹ thuật đa truy nhập không thể dựa trên một mẫu kênh đơn lẻ mà phải dựa trên hành vi trung bình hoặc phân bố theo nhiều hiện thực kênh khác nhau.

Thách thức thứ hai là sự không đồng nhất giữa người dùng. Trong đường xuống đa người dùng, mỗi thiết bị quan sát một chất lượng kênh khác nhau do vị trí, che khuất và điều kiện fading khác nhau. Đây là vấn đề đặc biệt quan trọng đối với NOMA, vì lợi thế của kỹ thuật này phụ thuộc mạnh vào chênh lệch kênh và phân bổ công suất. Nếu khoảng cách kênh giữa người dùng quá nhỏ hoặc ước lượng kênh không đủ chính xác, khả năng SIC bị suy giảm và mức tăng hiệu quả phổ không còn rõ ràng. Trong khi đó, OFDMA ít phụ thuộc vào quá trình khử giao thoa nội cell hơn, nên hành vi thường ổn định và dễ dự đoán hơn.

Thách thức thứ ba liên quan tới mối quan hệ giữa mô hình kênh và thước đo đánh giá. BER rất nhạy với fading sâu và là chỉ tiêu tốt để phản ánh độ tin cậy của liên kết. Tuy nhiên, BER không tự mô tả hết hiệu quả sử dụng phổ. Ngược lại, tổng thông lượng có thể che lấp tình trạng một số người dùng bị thiệt nghiêm trọng. Vì vậy, đánh giá hiệu năng trong môi trường vô tuyến phải đồng thời xem xét cả chỉ tiêu lỗi, chỉ tiêu tốc độ và chỉ tiêu fairness. Đây là lý do đề án lựa chọn bộ chỉ tiêu kết hợp thay vì tập trung vào một giá trị duy nhất.

Thách thức thứ tư là khoảng cách giữa mô hình đánh giá và điều kiện triển khai. Các tiêu chuẩn như 3GPP TR 38.901 đưa ra hệ thống mô hình kênh rất phong phú cho nhiều môi trường từ 0,5 GHz đến 100 GHz [5]. Tuy nhiên, việc dùng toàn bộ các thành phần này trong một đề án so sánh nền có thể làm mờ đi mục tiêu chính là nhận diện sự khác biệt do đa truy nhập. Nói cách khác, khi bài toán nghiên cứu là so sánh OFDMA và NOMA, cần ưu tiên một cấu hình đủ chuẩn để kiểm định sự khác biệt nguyên lý trước khi mở rộng sang các kịch bản phức tạp hơn như LOS mạnh, beamforming định hướng hay mạng đa ô.

Cuối cùng, môi trường vô tuyến còn đặt ra thách thức trong diễn giải kết quả. Một đường cong BER tốt hơn trong kênh Rayleigh không đồng nghĩa với việc phương án đó sẽ luôn tốt hơn ở kênh Rician hoặc trong mạng có điều phối liên ô. Tương tự, một lợi thế về tổng dung lượng chưa chắc chuyển hóa thành lợi thế triển khai nếu chi phí thu, độ nhạy với CSI hay độ phức tạp SIC tăng quá mạnh. Do đó, chương này lựa chọn nhấn mạnh ngay từ đầu rằng kết quả của đề án phải được hiểu như kết quả trên một mô hình

kênh cơ sở, phục vụ so sánh công bằng giữa hai cơ chế đa truy nhập, chứ không phải một tuyên bố bao trùm cho mọi tình huống mạng 5G.

1.2. Bài toán nghiên cứu của đề án

1.2.1. Mục tiêu của đề án

Mục tiêu tổng quát của đề án là đánh giá hiệu năng đường xuống của hệ thống 5G NR trên cơ sở so sánh hai cơ chế đa truy nhập OFDMA và NOMA trong môi trường kênh Rayleigh, từ đó xác định điều kiện mà mỗi cơ chế thể hiện ưu thế, giới hạn mô hình còn tồn tại và ý nghĩa của kết quả đối với bài toán triển khai.

Mục tiêu cụ thể: Từ mục tiêu tổng quát đó, đề án cụ thể hóa thành ba mục tiêu thành phần.

- Thứ nhất, hệ thống hóa cơ sở lý thuyết liên quan đến đường xuống 5G NR, đặc trưng của OFDMA, NOMA và mô hình kênh Rayleigh để thiết lập đúng hệ quy chiếu đánh giá.

- Thứ hai, xây dựng mô hình mô phỏng nhất quán ở cấp liên kết, trong đó hai cơ chế được đặt dưới cùng ngân sách công suất, băng thông và điều kiện kênh để bảo đảm tính công bằng của phép so sánh.

- Thứ ba, đánh giá định lượng các chỉ tiêu SNR, BER, outage probability, dung lượng/thông lượng và rút ra nhận xét về vùng điều kiện mà OFDMA hoặc NOMA phù hợp hơn.

Như vậy, đề án không đặt mục tiêu khẳng định một kỹ thuật luôn vượt trội trong mọi trường hợp, mà nhằm chỉ ra mối quan hệ giữa mô hình kênh, cấu trúc người dùng, cơ chế đa truy nhập và chỉ tiêu đánh giá. Đây là cơ sở để bảo đảm sự thống nhất giữa mục tiêu nghiên cứu, phần kết quả đạt được và phần kết luận cuối cùng của đề án.

Về mặt khoa học ứng dụng, mục tiêu của đề án không phải chứng minh rằng một kỹ thuật tuyệt đối tốt hơn kỹ thuật còn lại trong mọi tình huống, mà là xác định logic đánh đổi giữa trực giao và phi trực giao ở đường xuống. Cách đặt mục tiêu này phù hợp với thực tế triển khai, nơi các quyết định thiết kế thường không tối ưu theo một chỉ tiêu duy nhất mà phải cân bằng giữa hiệu quả phổ, độ ổn định, độ phức tạp thu và khả năng mở rộng hệ thống.

1.2.2. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

Đối tượng khảo sát trực tiếp của đề án là hiệu năng đường xuống trong hệ thống 5G khi sử dụng hai cơ chế đa truy nhập OFDMA và NOMA. Nói chính xác hơn, đối tượng nghiên cứu không phải toàn bộ mạng 5G ở cấp hệ thống, mà là cơ chế truyền dẫn và phân chia tài nguyên ở giao diện vô tuyến đường xuống, nơi sự khác biệt giữa trực giao và phi trực giao bộc lộ rõ nhất thông qua các chỉ tiêu lỗi, tốc độ và công bằng người dùng.

Phạm vi nghiên cứu được giới hạn theo hướng vừa đủ để bảo đảm tính tập trung. Thứ nhất, đề án xét bài toán ở cấp liên kết và cấp mô phỏng so sánh, không đi sâu vào tối ưu liên ô, điều khiển chuyển giao, quản lý mạng lõi hay điều phối slicing. Thứ hai, môi trường kênh được chuẩn hóa về Rayleigh nhằm nhấn mạnh tác động của fading đa đường trong điều kiện không có thành phần LOS trội. Thứ ba, việc so sánh tập trung vào hành vi của OFDMA và NOMA dưới cùng bộ giả thiết mô phỏng, thay vì pha trộn thêm quá nhiều cơ chế nâng cao có thể làm sai lệch bản chất so sánh.

Giới hạn như vậy là cần thiết để đề án giữ được tính chặt chẽ. Nếu mở rộng đồng thời sang nhiều biến như beamforming thích nghi, nhiều mô hình kênh, lịch biểu đa ô và các cơ chế HARQ chi tiết, bài toán sẽ chuyển từ nghiên cứu so sánh nguyên lý sang nghiên cứu tối ưu hệ thống quy mô lớn. Đó là một hướng phát triển có giá trị, nhưng không còn phù hợp với mục tiêu của đề án hiện tại.

Trong cách hiểu này, đề án đóng vai trò như một nghiên cứu nền cho các bước phát triển tiếp theo. Sau khi đặc trưng hành vi OFDMA và NOMA được xác lập trên kênh Rayleigh, các nghiên cứu tiếp theo có thể mở rộng sang kênh Rician, kênh theo TR 38.901, lỗi CSI, phân bổ công suất tối ưu hơn hoặc môi trường đa ô. Việc giới hạn phạm vi ngay từ đầu do đó không phải là thu hẹp giá trị của đề án, mà là điều kiện để kết luận thu được có độ tin cậy và khả năng diễn giải rõ ràng hơn.

Bảng 1.2: Khung phạm vi nghiên cứu của đề án

Thành phần	Bao gồm	Không đi sâu trong đề án
Kỹ thuật đa truy nhập	OFDMA đường xuống, NOMA đường xuống	Các biến thể NOMA phức tạp, CoMP-NOMA, MIMO-NOMA quy mô lớn
Môi trường kênh	Rayleigh fading như mô hình chuẩn nền	Rician, Nakagami-m, kênh đo thực địa, mô hình đầy đủ cho mmWave
Mức đánh giá	Cấp liên kết và mô phỏng so sánh	Quản lý tài nguyên toàn mạng, slicing, handover, điều phối liên ô
Chỉ tiêu	BER, thông lượng/dung lượng, fairness, xu hướng hiệu năng theo SNR	Mô phỏng end-to-end toàn giao thức thương mại

Nguồn: tác giả tổng hợp từ mục tiêu và phạm vi của đề án.

1.2.3. Phương pháp nghiên cứu

Phương pháp nghiên cứu của đề án được tổ chức theo hướng mô-đun, gồm bốn bước liên hoàn. Bước đầu tiên là tổng quan tài liệu và tiêu chuẩn để xác lập bối cảnh 5G NR, nhận diện vai trò chuẩn hóa của OFDMA, vị trí nghiên cứu của NOMA, và đặc trưng của môi trường kênh Rayleigh [1]–[7]. Bước này giữ vai trò định vị bài toán, tránh tình trạng so sánh hai kỹ thuật mà không làm rõ hệ quy chiếu đánh giá.

Bước thứ hai là xây dựng mô hình nghiên cứu. Ở bước này, hệ thống được trừu tượng hóa đến mức đủ để phản ánh bản chất của hai cơ chế đa truy nhập nhưng vẫn duy trì tính khả thi trong mô phỏng. Cách làm này phù hợp với mục tiêu của đề án, vì trọng tâm là so sánh hành vi của OFDMA và NOMA khi chịu cùng một kiểu fading, chứ không phải tái hiện toàn bộ ngăn xếp giao thức của 5G NR.

Bước thứ ba là mô phỏng và thu thập chỉ tiêu. Các cấu hình tham số được đặt dưới cùng một điều kiện nền để bảo đảm tính công bằng trong so sánh. Kết quả mô phỏng sau đó được biểu diễn theo các đồ thị và bảng số liệu cho BER, thông lượng hoặc dung lượng, fairness và xu hướng biến đổi theo chất lượng kênh. Đây là bước quyết định để chuyển từ lý luận định tính sang nhận xét định lượng.

Bước thứ tư là phân tích và diễn giải kết quả theo logic quan sát - so sánh - giải thích - hàm ý. Đây cũng là nguyên tắc được duy trì xuyên suốt đề án. Một kết quả chỉ có giá trị khi trả lời được ba câu hỏi: quan sát được điều gì; vì sao OFDMA và NOMA

khác nhau dưới điều kiện đó; và khác biệt ấy nói lên điều gì về khả năng sử dụng trong bối cảnh 5G đường xuống. Cách phân tích này giúp đề án giữ được tính học thuật nhưng vẫn bám sát mục tiêu ứng dụng.

1.2.4. Các chỉ tiêu đánh giá chính

Vì đề án tập trung vào hiệu năng đường xuống cấp liên kết, các chỉ tiêu đánh giá phải vừa phản ánh được chất lượng truyền dẫn, vừa đủ trực tiếp để so sánh giữa OFDMA và NOMA. Theo định hướng đó, bốn nhóm chỉ tiêu được lựa chọn gồm: chỉ tiêu lỗi, chỉ tiêu tốc độ/hiệu quả phổ, chỉ tiêu công bằng và chỉ tiêu ổn định theo điều kiện kênh. Đây là nhóm chỉ tiêu đủ mạnh để đặc tả hành vi của hai kỹ thuật trong môi trường Rayleigh mà không làm loãng mục tiêu nghiên cứu.

Nhóm thứ nhất là chỉ tiêu lỗi, tiêu biểu là BER hoặc các chỉ tiêu lỗi gần gũi như BLER khi xét khối truyền. Chỉ tiêu này cho biết mức độ tin cậy của liên kết dưới tác động của fading và nhiễu. Đối với OFDMA, BER thường phản ánh trực tiếp khả năng duy trì trực giao và chất lượng giải điều chế trên từng tài nguyên con. Đối với NOMA, BER còn chịu ảnh hưởng của trật tự giải mã và sai số do SIC, nên có giá trị đặc biệt trong việc phát hiện rủi ro lỗi lan truyền giữa các người dùng.

Nhóm thứ hai là chỉ tiêu tốc độ, bao gồm thông lượng đạt được, tổng dung lượng hoặc hiệu quả phổ. Đây là nhóm chỉ tiêu thường tạo ra lợi thế lý thuyết cho NOMA, bởi NOMA cho phép nhiều người dùng chia sẻ cùng tài nguyên thời gian - tần số thông qua siêu vị tự tín hiệu và phân bổ công suất [7]. Tuy nhiên, giá trị của nhóm chỉ tiêu này chỉ thực sự thuyết phục khi đi cùng chỉ tiêu lỗi; một phương án có tổng thông lượng cao nhưng BER không kiểm soát được thì hiệu năng hữu dụng sẽ giảm đáng kể.

Nhóm thứ ba là tính công bằng (fairness), phản ánh mức độ cân bằng chất lượng dịch vụ giữa người dùng. Chỉ tiêu này đặc biệt quan trọng trong đường xuống 5G, nơi người dùng ở gần và xa trạm gốc quan sát chất lượng kênh khác nhau. NOMA thường được quảng bá là có thể cải thiện fairness thông qua phân bổ công suất thích hợp, nhưng kết quả thực tế phụ thuộc mạnh vào mức chênh lệch kênh, cách ghép cặp người dùng và hiệu quả SIC. Vì vậy, fairness là chỉ tiêu cần có để tránh kết luận chỉ dựa trên tổng thông lượng.

Nhóm thứ tư là tính ổn định theo điều kiện kênh, thường được thể hiện gián tiếp qua đường cong BER hoặc thông lượng theo SNR, và trong một số trường hợp là xác suất dừng. Chỉ tiêu này cho thấy kỹ thuật nào bền vững hơn khi chất lượng liên kết suy giảm. Về mặt triển khai, đây là thông tin thiết yếu vì mạng thực không vận hành ở một điểm SNR cố định. Một cơ chế chỉ vượt trội trong vùng SNR hẹp sẽ có giá trị ứng dụng thấp hơn một cơ chế có hiệu năng ổn định trên dải điều kiện rộng hơn.

Như vậy, các chỉ tiêu đánh giá của đề án không được chọn theo cách tách rời mà tạo thành một hệ quy chiếu liên kết. BER đo độ tin cậy, thông lượng và hiệu quả phổ đo năng suất của tài nguyên vô tuyến, fairness đo tính cân bằng dịch vụ, còn phân tích theo SNR cho thấy độ bền của cơ chế trước biến động kênh. Đây là bộ chỉ tiêu phù hợp cho mục tiêu so sánh OFDMA và NOMA trong môi trường Rayleigh.

Bảng 1.3: Các chỉ tiêu đánh giá chính sử dụng trong đề án

Chỉ tiêu	Ý nghĩa kỹ thuật	Giá trị đối với so sánh OFDMA-NOMA	Ghi chú
BER	Đo xác suất lỗi bit sau truyền dẫn	Phản ánh độ tin cậy của liên kết; rất quan trọng với SIC trong NOMA	Nhạy với fading sâu
Thông lượng / dung lượng	Đo tốc độ hữu dụng hoặc năng lực truyền dẫn	Cho thấy hiệu quả sử dụng tài nguyên; là nơi NOMA thường kỳ vọng vượt OFDMA	Cần đọc cùng BER
Fairness	Đo mức cân bằng chất lượng giữa người dùng	Ngăn việc kết luận chỉ dựa trên tổng thông lượng	Phù hợp bài toán đa người dùng
Xác suất dừng / xu hướng theo SNR	Đo độ ổn định của hệ thống dưới biến động kênh	Cho thấy vùng điều kiện mà mỗi kỹ thuật hoạt động hiệu quả hơn	Hữu ích cho diễn giải triển khai

Nguồn: tác giả tổng hợp trên cơ sở yêu cầu đánh giá hiệu năng liên kết 5G đường xuống.

1.3. Tổng quan các kỹ thuật đa truy nhập trong bài toán khảo sát

1.3.1. OFDMA trong đường xuống 5G NR

OFDMA là cơ chế đa truy nhập nền của đường xuống trong LTE và tiếp tục giữ vai trò trung tâm trong 5G NR. Về nguyên lý, OFDMA phân chia tài nguyên phổ thành

nhiều sóng mang con trực giao; các sóng mang này tiếp tục được gom thành các resource block để phục vụ lập lịch và cấp phát tài nguyên. Cách tổ chức này rất phù hợp với kiến trúc NR vì nó tương thích tốt với khung thời gian - tần số, với numerology mở rộng và với các cơ chế điều chế, mã hóa và lập lịch thích nghi [3].

Ưu điểm cốt lõi của OFDMA là khả năng duy trì trực giao giữa người dùng trong cùng ô nếu đồng bộ được bảo đảm. Nhờ đó, giao thoa nội cell được kiểm soát tốt hơn và phía thu không cần thực hiện khử giao thoa phức tạp như SIC. Trên kênh đa đường, đặc tính OFDM cùng cyclic prefix cho phép biến kênh chọn lọc tần số thành tập các kênh con tương đối đơn giản hơn để xử lý. Theo phân tích kinh điển của Tse và Viswanath, việc chèn cyclic prefix giúp loại bỏ ISI và duy trì tính trực giao của các sóng mang con, dù phải đánh đổi bằng phần overhead về thời gian và công suất [6].

Trong bối cảnh 5G NR, OFDMA còn có một lợi thế thực tiễn rất lớn: đây là công nghệ đã trưởng thành về chuẩn hóa, triển khai và tối ưu thiết bị. Từ góc độ kỹ thuật hệ thống, điều này đồng nghĩa với độ phức tạp thu dễ kiểm soát, hành vi hiệu năng dễ tiên lượng hơn, và khả năng tích hợp thuận lợi với các cơ chế lập lịch theo CQI, MCS, beamforming và quản lý tài nguyên đã quen thuộc trong mạng di động. Chính vì vậy, OFDMA là điểm tham chiếu bắt buộc khi đánh giá bất kỳ phương án đa truy nhập mới nào trong bối cảnh 5G đường xuống.

Tuy nhiên, OFDMA cũng có giới hạn rõ ràng. Do mỗi phần tử tài nguyên tại một thời điểm chỉ phục vụ một người dùng, hệ thống phải đánh đổi giữa trực giao và hiệu quả sử dụng phổ. Trong những trường hợp có chênh lệch kênh rõ rệt giữa người dùng, việc giữ nguyên trực giao có thể khiến tài nguyên chưa được khai thác đến mức cao nhất. Mặt khác, nếu quá tập trung tối ưu cho người dùng kênh tốt, fairness sẽ giảm. Nói cách khác, OFDMA mạnh về tính ổn định và triển khai, nhưng không phải lúc nào cũng là lời giải hiệu quả nhất về mặt ghép nhiều người dùng trên cùng tài nguyên.

Trong đề án này, OFDMA được xem là đường cơ sở chuẩn hóa của 5G NR. Việc so sánh với NOMA vì thế có ý nghĩa rõ ràng: nếu NOMA không tạo ra cải thiện đáng kể so với OFDMA trong cùng điều kiện Rayleigh, thì giá trị của NOMA đối với bài toán đường xuống cơ sở sẽ bị hạn chế. Ngược lại, nếu NOMA cho thấy một vùng vận hành

mà lợi ích về thông lượng hoặc fairness đủ rõ trong khi BER vẫn được kiểm soát, kết quả đó sẽ tạo cơ sở cho các nghiên cứu mở rộng hơn về phân bổ công suất, ghép cặp người dùng hoặc SIC không hoàn hảo.

1.3.2. NOMA trong đường xuống 5G NR

NOMA được phát triển từ ý tưởng cho phép nhiều người dùng cùng chia sẻ một tài nguyên thời gian - tần số thay vì buộc phải trực giao tuyệt đối. Trong miền công suất, tín hiệu của nhiều người dùng được chồng lên nhau tại phía phát; phía thu sau đó tách các thành phần tín hiệu theo trật tự công suất bằng quá trình SIC. Theo các khảo sát tổng quan về NOMA, đây là một hướng đa truy nhập được quan tâm mạnh trong bối cảnh 5G và beyond 5G do tiềm năng cải thiện hiệu quả phổ, hỗ trợ kết nối dày và khai thác chênh lệch kênh giữa người dùng [7].

Điểm hấp dẫn nhất của NOMA nằm ở chỗ nó không xem tài nguyên thời gian - tần số là một thực thể chỉ phục vụ một người dùng tại một thời điểm. Nếu người dùng có chất lượng kênh khác biệt đủ lớn, hệ thống có thể cấp nhiều công suất hơn cho người dùng kênh yếu, đồng thời vẫn giữ người dùng kênh mạnh trên cùng tài nguyên với mức công suất thấp hơn. Về lý thuyết, cách ghép này có thể cải thiện tổng thông lượng hoặc fairness tùy theo cách phân bổ công suất và tiêu chí tối ưu được chọn.

Tuy vậy, NOMA không phải là một lợi thế miễn phí. Trái lại, nó đẩy phần khó từ cấp phát trực giao sang phía thu. SIC chỉ hoạt động tốt khi thứ tự giải mã được xác định đúng, chênh lệch công suất đủ rõ và sai số ước lượng kênh đủ thấp. Nếu một bước giải mã trước bị lỗi, nhiễu dư sẽ lan sang các bước sau và làm BER tăng nhanh. Vì vậy, trong môi trường fading, lợi ích của NOMA thường đi kèm rủi ro nhạy hơn với chất lượng CSI và thiết kế phân bổ công suất.

Một điểm cần nhìn nhận trung thực là NOMA thường được thảo luận như một kỹ thuật hứa hẹn cho 5G và beyond 5G, nhưng không nên đồng nhất nó với cơ chế truy nhập nền đã được triển khai rộng rãi như OFDMA trong 5G NR [3], [7]. Nói cách khác, NOMA là một phương án nghiên cứu giàu tiềm năng, song giá trị của nó phải được chứng minh trong những điều kiện so sánh cụ thể. Điều này càng làm tăng ý nghĩa của đề án: thay vì lặp lại nhận định định tính rằng NOMA có hiệu quả phổ cao hơn, đề án

đặt nó vào cùng nền kênh Rayleigh với OFDMA để kiểm tra xem lợi thế đó xuất hiện ở đâu, mạnh đến mức nào, và phải đánh đổi bằng những gì.

Đối với đường xuống, NOMA còn đặc biệt nhạy với chiến lược ghép cặp người dùng. Nếu ghép hai người dùng có chất lượng kênh quá tương đồng, lợi ích của siêu vị tự theo miền công suất sẽ giảm vì SIC khó phân tách hơn. Ngược lại, ghép hai người dùng có chênh lệch kênh đủ lớn thường giúp tạo ra lợi thế rõ hơn về cả tổng tốc độ lẫn fairness, nhưng lại có thể làm người dùng yếu phụ thuộc mạnh vào mức công suất được cấp. Do đó, phân tích NOMA trong đề án cũng phải được hiểu là phân tích một cơ chế vừa có tiềm năng hệ thống, vừa có độ nhạy thiết kế cao.

Trong bối cảnh đó, khảo sát NOMA trên kênh Rayleigh mang ý nghĩa rất rõ. Rayleigh tạo ra biến thiên kênh mạnh và không có thành phần LOS trội, do đó là môi trường phù hợp để kiểm tra độ bền của SIC và mức ổn định của lợi ích phổ. Nếu NOMA vẫn duy trì được lợi thế định lượng trên một kênh nền khó như vậy, thì đó là dấu hiệu tích cực cho các bước mở rộng. Ngược lại, nếu BER tăng quá mạnh hoặc fairness không cải thiện, kết quả ấy cũng có giá trị vì nó cho thấy giới hạn thực của hướng tiếp cận này trong điều kiện fading cơ sở.

1.3.3. Ý nghĩa của việc so sánh OFDMA và NOMA

So sánh OFDMA và NOMA trong đề án không chỉ mang ý nghĩa kỹ thuật thuần túy mà còn mang ý nghĩa phương pháp luận. OFDMA đại diện cho cơ chế trực giao đã hoàn thiện, đang gắn chặt với chuẩn hóa và triển khai của 5G NR. NOMA đại diện cho nỗ lực mở rộng năng lực phục vụ đa người dùng bằng cách nới lỏng ràng buộc trực giao. Khi đặt hai cơ chế này vào cùng một môi trường Rayleigh, đề án thực chất đang kiểm tra một câu hỏi cơ bản: lợi ích về hiệu quả phổ có bù được chi phí về độ phức tạp và độ nhạy với fading hay không.

Ý nghĩa thứ nhất của phép so sánh là tạo ra mốc chuẩn. Không có OFDMA, mọi tuyên bố về NOMA sẽ thiếu hệ quy chiếu triển khai. Khi OFDMA được dùng làm đường cơ sở, mọi chênh lệch về BER, thông lượng hay fairness đều có thể diễn giải trong ngôn ngữ của một kỹ thuật đã được thừa nhận rộng rãi trong thực tế mạng di động.

Ý nghĩa thứ hai là làm rõ logic đánh đổi. OFDMA thiên về ổn định, đơn giản hóa thu và kiểm soát giao thoa nội cell. NOMA thiên về tận dụng chênh lệch kênh và tăng

khả năng ghép người dùng trên cùng tài nguyên. Hai triết lý này dẫn tới hai kiểu hành vi khác nhau dưới fading. Vì vậy, kết quả so sánh sẽ không chỉ trả lời phương án nào tốt hơn tại một điểm SNR, mà còn trả lời loại lợi thế nào xuất hiện, trong điều kiện nào, và cái giá kỹ thuật phải trả là gì.

Ý nghĩa thứ ba là định vị phần đóng góp của đề án ở đúng mức. Một nghiên cứu so sánh trên kênh Rayleigh không thể thay thế cho đánh giá thương mại quy mô mạng. Tuy nhiên, nó có giá trị nền tảng vì giúp cô lập ảnh hưởng của cơ chế đa truy nhập khỏi các yếu tố hệ thống khác. Nói cách khác, đây là bước cần thiết trước khi chuyển sang các bài toán phức tạp hơn như MIMO-NOMA, beamforming thích nghi, lỗi CSI hoặc mô hình kênh theo 3GPP đầy đủ.

Vì những lý do đó, phép so sánh OFDMA - NOMA trong đề án nên được hiểu là một phép so sánh có kiểm soát và có mục tiêu rõ ràng. Nó không nhằm tuyên bố thay thế hoàn toàn OFDMA bằng NOMA, mà nhằm chỉ ra điều kiện mà NOMA có thể đem lại lợi ích đáng kể, cũng như điều kiện mà OFDMA vẫn là lựa chọn hợp lý hơn về độ ổn định và tính khả thi triển khai.

Bảng 1.4: So sánh định tính OFDMA và NOMA trong bài toán đường xuống

Tiêu chí	OFDMA	NOMA	Nhận xét cho đề án
Nguyên lý chia sẻ tài nguyên	Trực giao theo thời gian - tần số	Phi trực giao, chồng tín hiệu theo miền công suất	Khác biệt nguyên lý cần được kiểm chứng trên cùng mô hình kênh
Độ phức tạp phía thu	Thấp hơn, không cần SIC nội cell	Cao hơn do cần SIC	Ảnh hưởng trực tiếp tới BER và độ nhạy với CSI
Hiệu quả phổ	Ổn định nhưng có thể chưa khai thác hết chênh lệch kênh	Có tiềm năng cao hơn khi ghép cặp và phân bổ công suất tốt	Là trọng tâm so sánh của đề án
Độ bền dưới fading	Thường dễ kiểm soát hơn	Nhạy hơn với fading, lỗi giải mã nối tiếp	Rayleigh là môi trường phù hợp để kiểm tra
Trạng thái chuẩn hóa/triển khai	Kỹ thuật nền của đường xuống NR	Hướng nghiên cứu/candidate technique	Đòi hỏi đánh giá trung thực, tránh overclaim

Nguồn: tác giả tổng hợp từ 3GPP NR và các khảo sát về NOMA [3], [7].

1.4. Tổng quan mô hình kênh sử dụng trong đề án

1.4.1. Đặc điểm kênh vô tuyến 5G

Kênh vô tuyến trong 5G chịu tác động đồng thời của suy hao cỡ lớn và suy hao cỡ nhỏ. Suy hao cỡ lớn bao gồm path loss theo khoảng cách và shadowing do vật cản; suy hao cỡ nhỏ bao gồm fading theo thời gian, tần số và không gian do hiệu ứng đa đường. Sự kết hợp của các thành phần này khiến chất lượng liên kết thay đổi mạnh theo vị trí người dùng, hình học truyền sóng và bối cảnh triển khai. Đây là điểm xuất phát của mọi bài toán đánh giá hiệu năng trong thông tin di động.

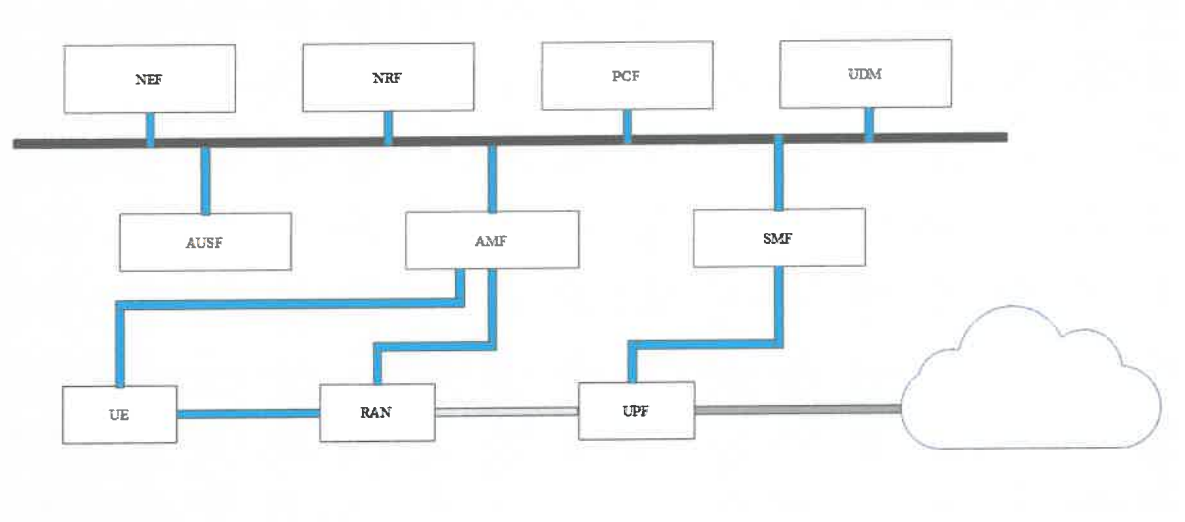
Đối với 5G, đặc tính kênh còn trở nên đa dạng hơn vì hệ thống được thiết kế cho dải tần từ dưới 1 GHz tới hàng chục GHz. Theo đó, tiêu chuẩn TR 38.901 của 3GPP được xây dựng như một khung mô hình kênh thống nhất cho các tần số từ 0,5 GHz đến 100 GHz và cho nhiều môi trường khác nhau [5]. Điều này cho thấy ngay từ cấp chuẩn hóa, không tồn tại một mô hình kênh đơn nhất đại diện cho mọi kịch bản 5G. Mỗi dải tần, mỗi môi trường đô thị, trong nhà hay ngoài trời, đều kéo theo các đặc trưng trễ đa đường, tán xạ góc, suy hao xuyên vật cản và xác suất LOS/NLOS khác nhau.

Ở dải FR1, vùng phủ sóng thường rộng hơn và khả năng xuyên vật cản tốt hơn, nhưng vẫn tồn tại fading đa đường rõ rệt trong môi trường đô thị và khu vực nhiều phản xạ. Ở dải FR2, suy hao tự do và suy hao che khuất tăng mạnh, liên kết phụ thuộc hơn vào beamforming định hướng và xác suất LOS. Vì vậy, nếu mục tiêu là xây dựng một nền so sánh cơ sở giữa OFDMA và NOMA, việc chọn một mô hình NLOS kinh điển như Rayleigh là hợp lý hơn so với việc trực tiếp đi vào các cấu hình mmWave có tính định hướng cao.

Về bản chất truyền dẫn, ba hiện tượng thường có ảnh hưởng mạnh nhất đến hiệu năng đường xuống là trễ lan truyền (delay spread), độ trải Doppler (Doppler spread) và biến thiên công suất nhận. Delay spread làm kênh trở nên chọn lọc theo tần số, tạo ra sự khác biệt chất lượng giữa các sóng mang con. Doppler spread phản ánh mức biến thiên theo thời gian khi người dùng hoặc vật phản xạ di chuyển. Biến thiên công suất nhận lại tác động trực tiếp lên BER và xác suất dừng. Trong hệ thống OFDMA, delay spread có thể được khai thác bằng phân bổ tài nguyên theo sóng mang con (subcarrier); trong NOMA, biến thiên công suất còn liên quan trực tiếp tới thứ tự giải mã và hiệu quả SIC.

Chính vì vậy, đánh giá hiệu năng trên kênh vô tuyến 5G luôn cần một bước lựa chọn mô hình hóa hợp lý. Nếu nghiên cứu muốn bám sát chuẩn hóa và đo lường thực địa, có thể dùng mô hình kênh đầy đủ của 3GPP. Nếu nghiên cứu muốn làm rõ bản chất của hai cơ chế truy nhập trên một nền fading phổ biến, Rayleigh là lựa chọn thuận lợi hơn. Đề án hiện theo hướng thứ hai. Điều này phù hợp với mục tiêu so sánh nền tảng, đồng thời vẫn giữ được sự liên hệ với thực tế NLOS thường gặp trong nhiều môi trường triển khai dưới 6 GHz.

Nhìn từ góc độ phương pháp, mô hình kênh càng phức tạp thì kết quả càng gần thực tế, nhưng đồng thời việc diễn giải càng khó. Một chương tổng quan vì thế cần xác định rõ vai trò của mô hình kênh trong đề án: nó không phải toàn bộ đối tượng nghiên cứu, mà là môi trường chuẩn để quan sát hành vi của OFDMA và NOMA. Lựa chọn mô hình đúng vì thế quan trọng ngang với lựa chọn kỹ thuật đa truy nhập đúng.



Hình 1.4: Sơ đồ tổng quát kiến trúc 5G phục vụ bối cảnh đánh giá hiệu năng

(Nguồn: [1], [2].)

1.4.2. Mô hình Rayleigh fading

Rayleigh fading là mô hình mô tả trường hợp tín hiệu thu không có một thành phần truyền thẳng trội, mà được hình thành từ tổng hợp của nhiều thành phần phản xạ, tán xạ và nhiễu xạ có pha ngẫu nhiên. Trong điều kiện như vậy, biên độ bao của tín hiệu thu có phân bố Rayleigh, còn công suất tức thời tuân theo phân bố mũ. Đây là mô hình kinh điển của kênh NLOS và là nền tảng phân tích trong rất nhiều bài toán truyền thông vô tuyến [6].

Giá trị lớn nhất của Rayleigh không nằm ở chỗ nó mô tả được mọi môi trường, mà ở chỗ nó là mô hình tối thiểu nhưng đủ giàu để thể hiện rõ hậu quả của fading. Một liên kết trên kênh Rayleigh có thể rơi vào các đợt suy hao sâu, khiến BER tăng nhanh và thông lượng tức thời suy giảm mạnh. Vì vậy, nếu một cơ chế truy nhập vẫn duy trì được lợi thế trên nền Rayleigh, kết quả đó thường có ý nghĩa hơn so với khi chỉ kiểm tra trên AWGN.

Ở góc độ phân loại, Rayleigh có thể xuất hiện dưới dạng flat fading hoặc frequency-selective fading. Khi băng thông tín hiệu nhỏ hơn coherence bandwidth, toàn bộ tín hiệu chịu một hệ số fading gần như giống nhau và bài toán thiên về flat fading. Khi băng thông lớn hơn coherence bandwidth, các thành phần tần số bị ảnh hưởng khác nhau và kênh trở thành chọn lọc tần số. Với OFDM/OFDMA, môi trường chọn lọc tần

số là bối cảnh đặc biệt quan trọng vì ưu thế của đa sóng mang và cyclic prefix được phát huy rõ hơn [6].

Đối với NOMA, Rayleigh fading tạo ra một thử thách khác. Vì NOMA phụ thuộc vào chênh lệch công suất nhận giữa các người dùng và hiệu quả của SIC, biến thiên ngẫu nhiên của kênh có thể làm thay đổi thứ tự ưu tiên giải mã hoặc làm suy giảm khoảng cách công suất giữa hai lớp tín hiệu. Do đó, Rayleigh là môi trường phù hợp để đánh giá sự bền vững của NOMA, nhất là khi mục tiêu của đề án là so sánh với OFDMA trong điều kiện công bằng.

Về mặt lý thuyết, Rayleigh cũng là mô hình thuận lợi cho phân tích. Nhiều chỉ tiêu như BER, xác suất dừng và dung lượng trung bình trên kênh Rayleigh đã có các biểu thức hoặc quy luật gần đúng kinh điển trong tài liệu cơ sở [6]. Điều này giúp việc kiểm tra tính hợp lý của kết quả mô phỏng trở nên dễ dàng hơn. Tức là Rayleigh vừa là mô hình mô phỏng, vừa là mô hình đối chiếu lý thuyết.

Một điểm cần nhấn mạnh là sử dụng Rayleigh không đồng nghĩa với giả định môi trường 5G luôn NLOS. Đây chỉ là một lựa chọn mô hình hóa có chủ đích. Trong các môi trường có LOS mạnh, đặc biệt ở mmWave với beamforming định hướng, Rician hoặc các mô hình theo 3GPP chi tiết hơn sẽ thích hợp hơn. Tuy nhiên, với mục tiêu của đề án là đánh giá nền tảng và so sánh công bằng giữa OFDMA và NOMA, Rayleigh vẫn là lựa chọn cân bằng giữa tính thực tế, tính chuẩn và tính khả giải.

1.4.3. Lý do lựa chọn mô hình Rayleigh cho bài toán đánh giá

Lý do thứ nhất để lựa chọn Rayleigh là tính đại diện cho môi trường không có thành phần truyền thẳng trội, vốn xuất hiện phổ biến trong các kịch bản đô thị, trong nhà hoặc các môi trường nhiều phản xạ. Đề án không hướng tới mô tả riêng một tuyến LOS tối ưu hay một cấu hình beamforming đặc biệt, nên Rayleigh là nền kênh cơ sở hợp lý để đánh giá tính bền vững của cơ chế truyền dẫn trong điều kiện kém thuận lợi hơn.

Lý do thứ hai là tính công bằng trong so sánh. Khi dùng cùng một mô hình Rayleigh cho cả OFDMA và NOMA, ảnh hưởng của môi trường truyền được giữ nhất quán giữa hai kỹ thuật. Nhờ đó, phần chênh lệch còn lại trong BER, thông lượng hay fairness có thể được quy chủ yếu cho khác biệt của cơ chế đa truy nhập, thay vì

cho khác biệt của mô hình kênh. Đây là yêu cầu then chốt đối với một nghiên cứu so sánh nền tảng.

Lý do thứ ba là tính khả thi trong mô phỏng và diễn giải. Rayleigh đủ đơn giản để dễ sinh mẫu ngẫu nhiên, lặp thí nghiệm và biểu diễn kết quả; đồng thời đủ khó để tạo ra fading sâu và thử thách thực sự cho hệ thống. Nếu chỉ dùng AWGN, đề án sẽ khó phản ánh vai trò của chất lượng kênh đối với ghép cặp người dùng và SIC. Nếu đi thẳng sang mô hình 3GPP đầy đủ, bài toán có nguy cơ trở nên quá phức tạp so với mục tiêu trọng tâm của đề án.

Lý do thứ tư là tính liên tục với nền tảng lý thuyết. Trong truyền thông vô tuyến, Rayleigh là mô hình chuẩn để kiểm tra hiệu năng cơ sở trước khi mở rộng sang các kênh có LOS hoặc các cấu trúc tương quan không gian phức tạp hơn [6]. Theo lô-gic đó, đề án hiện có thể được xem là tầng nền. Trên tầng nền này, các nghiên cứu tiếp theo hoàn toàn có thể bổ sung Rician, Nakagami-m, tương quan fading, lỗi CSI hoặc các mô hình chuẩn hóa của 3GPP.

Lý do cuối cùng là tính trung thực học thuật. Rayleigh giúp đề án đưa ra kết luận đúng phạm vi: đây là kết luận cho môi trường fading chuẩn nền, không phải kết luận toàn cục cho mọi điều kiện 5G. Việc nêu rõ giới hạn này làm cho kết quả đáng tin cậy hơn. Một luận văn hoặc đề án tốt không nên phóng đại phạm vi áp dụng của kết quả; ngược lại, cần chỉ ra rành mạch kịch bản mà kết luận có giá trị và kịch bản cần nghiên cứu thêm.

Bảng 1.5: Vị trí của Rayleigh trong hệ các mô hình fading thường dùng

(Nguồn: tổng hợp từ [5], [6].)

Mô hình	Đặc trưng chính	Phù hợp khi	Ý nghĩa đối với đề án
Rayleigh	Không có thành phần LOS trội; biên độ bao phân bố Rayleigh	Môi trường NLOS cơ sở, nhiều phản xạ/tán xạ	Mô hình chuẩn nền để so sánh OFDMA và NOMA
Rician	Có thành phần LOS cùng các thành phần tán xạ	Tuyến truyền có đường nhìn đáng kể	Thích hợp cho nghiên cứu mở rộng sau đề án

Mô hình	Đặc trưng chính	Phù hợp khi	Ý nghĩa đối với đề án
Nakagami-m	Mô hình tổng quát hóa mức độ fading bằng tham số m	Khi cần điều chỉnh mức nghiêm trọng của fading	Hữu ích cho phân tích độ nhạy mô hình
3GPP TR 38.901	Mô hình chuẩn hóa đa kịch bản từ 0,5 đến 100 GHz	Đánh giá gần thực tế hơn ở cấp hệ thống hoặc bán hệ thống	Phù hợp cho các nghiên cứu phát triển tiếp theo

1.5. Cấu trúc của đề án

Từ bối cảnh nghiên cứu và phạm vi đã xác định, đề án được tổ chức thành ba chương có quan hệ logic chặt chẽ. Cụ thể:

Chương 1: Tổng quan vấn đề nghiên cứu, làm rõ vị trí của 5G NR, yêu cầu hiệu năng đường xuống, bài toán so sánh OFDMA - NOMA và cơ sở lựa chọn mô hình Rayleigh. Vai trò của chương này là xây dựng nền ngữ cảnh và chuẩn hóa cách hiểu về bài toán, tránh chồng lấn với phần mô hình chi tiết ở chương sau.

Chương 2: Cơ sở lý thuyết và mô hình hệ thống, tại đây, các khái niệm như dung lượng kênh, đặc trưng OFDMA, nguyên lý NOMA, mô hình toán của kênh Rayleigh và các biểu thức dùng trong mô phỏng sẽ được trình bày ở mức cụ thể hơn. Nếu chương 1 trả lời câu hỏi vì sao cần nghiên cứu bài toán này, thì chương 2 trả lời câu hỏi bài toán được mô hình hóa và lượng hóa như thế nào.

Chương 3: Mô phỏng và đánh giá hiệu năng, Chương này trình bày thiết lập tham số, kịch bản mô phỏng, kết quả BER, thông lượng, fairness và các nhận xét so sánh giữa OFDMA và NOMA dưới kênh Rayleigh. Trên cơ sở đó, chương 3 rút ra các nhận định định lượng về điều kiện mà mỗi phương thức hoạt động phù hợp hơn và những hàm ý kỹ thuật đối với bài toán đường xuống 5G.

Với cấu trúc như vậy, toàn bộ đề án được vận hành theo một logic nhất quán: bối cảnh - mô hình - kết quả. Đây là cấu trúc phù hợp với một nghiên cứu kỹ thuật định hướng ứng dụng, nơi mục tiêu không chỉ là trình bày lý thuyết mà còn phải chuyển hóa lý thuyết thành đánh giá định lượng và khuyến nghị kỹ thuật có cơ sở.

1.6. Kết luận Chương 1

Trong chương này, đã trình bày tổng quan về sự phát triển và đặc trưng của 5G, cấu trúc hệ thống bao gồm mạng truy nhập vô tuyến và mạng lõi, cùng các công nghệ then chốt. Đồng thời, đặc điểm kênh vô tuyến và mô hình Rayleigh fading đã được phân tích, nhấn mạnh vai trò quan trọng trong việc đánh giá hiệu năng OFDMA và NOMA. Đây là nền tảng lý thuyết quan trọng để triển khai các mô phỏng và phân tích hiệu năng ở các chương tiếp theo.

CHƯƠNG 2 - CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ MÔ HÌNH HỆ THỐNG

Trên cơ sở phân tích hai kỹ thuật đa truy nhập OFDMA và NOMA trong môi trường kênh Rayleigh. Chương này tập trung vào việc phân tích, xây dựng nền tảng lý thuyết và khung mô hình hóa cho bài toán đánh giá hiệu năng đường xuống 5G RN của hai kỹ thuật đa truy nhập trên. Theo đó, nội dung nghiên cứu chính của chương này nhằm xác định các thành phần kỹ thuật ảnh hưởng trực tiếp đến kết quả ở cấp liên kết, bao gồm mô hình truyền gNB–UE, cơ chế đa truy nhập, mô hình kênh và các chỉ tiêu đánh giá như SNR, BER, outage probability, dung lượng và thông lượng. Đây là cơ sở cho phần mô phỏng và phân tích ở các chương tiếp theo.

2.1. Cơ sở lý thuyết đánh giá hiệu năng kênh

2.1.1. Dung lượng kênh và thông tin tương hỗ

Trong truyền thông số, hiệu năng của một liên kết được quyết định không chỉ bởi việc tín hiệu có đến phía thu hay không mà còn bởi lượng thông tin có thể truyền đi một cách đáng tin cậy qua liên kết đó. Cách nhìn này được xác lập bởi lý thuyết thông tin của Shannon, trong đó dung lượng kênh là tốc độ cực đại mà hệ thống có thể đạt với xác suất lỗi có thể làm nhỏ tùy ý khi chiều dài mã đủ lớn [8]. Dung lượng vì vậy đóng vai trò như một trần lý thuyết để đánh giá mức hiệu quả của mọi sơ đồ điều chế, mã hóa và phân bổ tài nguyên.

Nếu entropy H(X) đo mức bất định của nguồn phát X, thì thông tin tương hỗ I(X;Y) đo lượng bất định của X được giảm đi khi quan sát đầu ra Y. Về mặt hệ thống, đây là đại lượng gắn trực tiếp với chất lượng kênh: kênh càng nhiễu hoặc càng biến thiên mạnh thì thông tin tương hỗ càng thấp, kéo theo dung lượng suy giảm [8], [9]. Dạng tổng quát của dung lượng được viết như một bài toán cực đại hóa theo phân bố đầu vào:

$$C = \max p(x)\, I(X;Y) \tag{2.1}$$

Biểu thức này cho thấy dung lượng không chỉ là thuộc tính của môi trường truyền mà còn phụ thuộc vào cách hệ thống khai thác kênh. Trong kênh AWGN với băng thông B và SNR trung bình γ, định lý Shannon cho dạng quen thuộc:

$$C = B\, log2(1 + \gamma) \tag{2.2}$$

công thức trên rất quan trọng đối với bài toán đường xuống 5G NR vì nó cho thấy hai con đường cơ bản để tăng khả năng tải thông tin là tăng băng thông hoặc cải thiện SNR. Tuy nhiên, lợi ích theo SNR chỉ tăng theo logarit, vì vậy ở vùng SNR cao, việc tăng

công suất phát thường cho lợi ích biên nhỏ dần. Điều này lý giải vì sao những kỹ thuật cải thiện hiệu quả sử dụng phổ, như tối ưu phân bổ tài nguyên hoặc chồng công suất hợp lý, luôn được quan tâm mạnh trong các nghiên cứu 5G [9], [10].

Trong môi trường fading, SNR không còn là một giá trị cố định mà trở thành biến ngẫu nhiên. Khi đó cần phân biệt giữa dung lượng ergodic và dung lượng outage. Dung lượng ergodic phù hợp với mã dài và môi trường biến thiên đủ nhanh, còn dung lượng outage phù hợp hơn với trường hợp phải duy trì một ngưỡng chất lượng dịch vụ nhất định. Trong đề án này, dung lượng được dùng như chuẩn tham chiếu lý thuyết, trong khi thông lượng được hiểu là đại lượng hiệu dụng chịu thêm tác động của sơ đồ đa truy nhập, cấu trúc kênh và các giả thiết triển khai.

2.1.2. Path-loss, shadowing và fading

Một mô hình kênh vô tuyến chặt chẽ cần tách ba lớp suy giảm có bản chất khác nhau là path-loss, shadowing và fading. Path-loss là suy hao quy mô lớn do năng lượng điện từ lan truyền trong không gian. Thành phần này phụ thuộc chủ yếu vào khoảng cách, tần số và dạng môi trường truyền, qua đó chi phối xu hướng suy giảm công suất thu trung bình khi UE di chuyển ra xa gNB [9], [10], [14].

Shadowing là biến thiên chậm xung quanh mức path-loss trung bình, gây ra bởi vật cản lớn như tòa nhà, phương tiện hoặc cấu trúc địa hình. Về mặt thống kê, shadowing thường được mô hình bằng phân bố log-normal. So với path-loss, shadowing không thay đổi theo từng symbol hay từng slot nhưng lại ảnh hưởng rõ tới vùng phủ cục bộ và độ ổn định của mức tín hiệu trung bình. Đây là thành phần đặc biệt quan trọng ở góc nhìn quy hoạch vô tuyến, nhưng ở một số bài toán so sánh cấp liên kết, nó có thể được giản lược để giữ mô hình gọn hơn.

Fading là biến thiên nhanh của biên độ và pha tín hiệu do đa đường. Khi nhiều thành phần phản xạ, tán xạ và nhiễu xạ cùng đến phía thu với chênh lệch pha khác nhau, chúng có thể cộng hoặc triệt tiêu lẫn nhau, làm công suất thu dao động mạnh trong thời gian ngắn hoặc trên những dịch chuyển rất nhỏ của người dùng. Chính fading là nguồn gốc trực tiếp của BER cao, outage tăng và dung lượng tức thời dao động [9], [10], [13].

Đối với đề án này, việc tách riêng ba lớp suy giảm nói trên giúp làm rõ vai trò của từng cơ chế. Path-loss và suy hao do mưa sẽ được xem như thành phần suy hao quy mô lớn. Fading Rayleigh sẽ mô tả biến thiên nhanh của kênh trong môi trường không có

thành phần truyền thẳng trội. Shadowing không được kích hoạt trong mô hình cơ sở để tránh làm mờ đi phần khác biệt thật giữa OFDMA và NOMA. Đây là một lựa chọn có chủ đích nhằm giữ bài toán ở mức kiểm soát được và phù hợp với mục tiêu so sánh cấp liên kết.

2.1.3. Nhiễu AWGN và ý nghĩa trong mô phỏng

AWGN (Additive White Gaussian Noise) là mô hình nhiễu nền chuẩn trong truyền thông số. Thuật ngữ này hàm ý rằng nhiễu cộng trực tiếp vào tín hiệu thu, có mật độ phổ công suất gần như phẳng trong dải tần khảo sát và tuân theo phân bố Gaussian. Dù hệ thống thực tế còn chịu nhiều sai lệch khác như giao thoa đồng kênh, sai số đồng bộ, méo phi tuyến hoặc sai số ước lượng kênh, AWGN vẫn là điểm khởi đầu gần như bắt buộc vì nó tạo ra đường cơ sở để so sánh các cấu hình truyền [7], [10].

Ở dạng băng gốc phức, mô hình tín hiệu thu thường được viết:

$$y = hx + n,\ n \sim CN(0, N0) \tag{2.3}$$

Nếu xét trên băng thông B, công suất nhiễu nền có thể viết dưới dạng N = N0B. Ở miền decibel, mức nhiễu nhiệt thường được biểu diễn gần đúng bởi -174 dBm/Hz trước khi cộng thêm băng thông và hệ số nhiễu thu. Ý nghĩa của AWGN trong mô phỏng là giúp tách giới hạn do nhiễu nền khỏi giới hạn do cấu trúc kênh hoặc do sơ đồ truy nhập.

Đối với OFDMA, AWGN là thành phần nhiễu nền trực tiếp chi phối BER trên tài nguyên được cấp. Đối với NOMA, ngoài AWGN còn tồn tại giao thoa nội tại từ các luồng chồng công suất. Vì vậy, khi đánh giá NOMA, SNR thường phải được đọc cùng với SINR và với giả thiết về chất lượng SIC. Chính điều này cho thấy AWGN vẫn là chuẩn nền cần thiết, nhưng không phải là toàn bộ câu chuyện của NOMA.

Trong đề án, mọi cấu hình so sánh đều giữ AWGN như thành phần nhiễu nền bắt buộc. Nhờ đó, sự khác biệt quan sát được giữa OFDMA và NOMA có thể được quy về cấu trúc truy nhập và cách khai thác kênh, thay vì do thay đổi nền nhiễu giữa các kịch bản. Cách chuẩn hóa này giúp phần mô phỏng ở chương sau có khả năng diễn giải tốt hơn.

2.2. Mô hình hệ thống đường xuống 5G NR khảo sát

2.2.1. Mô hình truyền dẫn giữa gNB và UE

Đề án xét một hệ thống đường xuống 5G NR trong đó một gNB truyền dữ liệu đến tập UE trong cùng một ô. Trọng tâm của mô hình không phải là mô tả toàn bộ ngăn xếp 5G NR mà là tạo ra biểu diễn đủ chặt cho bài toán đánh giá hiệu năng truy nhập. Theo TS 38.300 và TS 38.211, downlink NR sử dụng CP-OFDM, tổ chức tài nguyên theo miền thời gian - tần số và cho phép lập lịch linh hoạt ở mức vật lý [11], [12]. Trên nền chuẩn hóa đó, đề án chỉ giữ các thành phần có ảnh hưởng trực tiếp đến so sánh giữa OFDMA và NOMA.

Ở miền băng gốc tương đương, tín hiệu thu tại UE thứ k được viết:

$$y_k = h_k x_k \sqrt{\frac{P_t G_t G_r}{L_k}} + n_k \tag{2.4}$$

Trong đó P_t là công suất phát của gNB, G_t và G_r là hệ số khuếch đại anten phát và thu, L_k là tổn thất đường truyền quy đổi của liên kết thứ k, h_k là hệ số fading và n_k là AWGN. Việc gom phần suy hao quy mô lớn vào L_k còn biến thiên nhanh vào h_k giúp mô hình có cấu trúc rõ ràng, thuận lợi cho việc thay đổi sơ đồ đa truy nhập nhưng vẫn giữ nguyên nền kênh.

Với OFDMA, x_k đại diện cho luồng dữ liệu của UE k được ánh xạ lên phần tài nguyên trực giao riêng. Với NOMA, x_k là thành phần của tín hiệu chồng công suất trên cùng tài nguyên. Do đó, cùng một khung kênh vật lý nhưng cách hình thành và xử lý tín hiệu ở OFDMA và NOMA là khác nhau về bản chất. Đây là điểm then chốt của phần mô hình hóa trong chương này.

2.2.2. Các giả thiết hệ thống

Để so sánh công bằng giữa hai cơ chế truy nhập, đề án sử dụng một số giả thiết hệ thống có chủ đích. Thứ nhất, hệ thống được xét trong phạm vi một cell đơn với một gNB phục vụ các UE trong cùng vùng phủ. Giả thiết này loại bỏ giao thoa liên cell để làm nổi bật khác biệt nội tại giữa OFDMA và NOMA. Do đó, các kết luận rút ra chủ yếu có ý nghĩa ở cấp liên kết trong môi trường đơn cell, thay vì ở quy mô mạng dày đặc.

Thứ hai, tổng băng thông và tổng công suất phát được giữ như nhau cho cả OFDMA và NOMA trong cùng một kịch bản. Đây là điều kiện công bằng tối thiểu trong mọi nghiên cứu so sánh. Với OFDMA, tài nguyên được chia trực giao theo tỷ lệ β_k. Với

NOMA, tài nguyên được dùng chung nhưng bị ràng buộc bởi tổng công suất và các hệ số α_k. Nếu không chuẩn hóa điều kiện này, khác biệt kết quả có thể phản ánh khác biệt ngân sách tài nguyên chứ không phản ánh đúng bản chất kỹ thuật.

Thứ ba, tại mức cơ sở, đồng bộ thời gian - tần số và CSI phía thu được giả thiết đủ tốt để thực hiện giải điều chế. Với OFDMA, giả thiết này giúp bảo toàn trực giao; với NOMA, nó giúp xây dựng mô hình SIC lý tưởng trước khi bàn đến phần hạn chế. Cách tiếp cận này phù hợp với logic nghiên cứu kỹ thuật: trước hết xác định hành vi trong điều kiện chuẩn, sau đó mới mở rộng sang các phi lý tưởng.

Thứ tư, mô hình kênh được rút gọn về dạng Rayleigh tổng hợp với FSPL, suy hao do mưa, fading Rayleigh và AWGN. Shadowing log-normal, MIMO, beamforming và các mô hình không gian đầy đủ của 3GPP TR 38.901 chưa được kích hoạt trong cấu hình cơ sở. Đây không phải là một thiếu sót ngẫu nhiên mà là một lựa chọn để giữ mô hình có khả năng kiểm soát. Việc nêu rõ giới hạn này là cần thiết để phần kết luận sau này không vượt quá phạm vi của mô hình.

2.2.3. Các tham số mô phỏng cơ bản

Ở cấp chương lý thuyết, bảng tham số được dùng để chuẩn hóa tập biến và ràng buộc nền của bài toán, không nhằm chốt toàn bộ giá trị số cuối cùng cho chương mô phỏng. Cách trình bày này giúp chương 2 giữ đúng vai trò mô hình hóa, đồng thời tránh chồng lấn với chương 3 là nơi các cấu hình quét cụ thể sẽ được nêu ra theo từng thí nghiệm.

Bảng 2.1: Khung tham số mô phỏng cơ bản cho mô hình đường xuống 5G NR

Tham số	Ký hiệu	Diễn giải / ràng buộc
Băng thông hệ thống	B	Giữ cố định giữa OFDMA và NOMA trong cùng một phép so sánh.
Tần số sóng mang	f_c	Quyết định path-loss và mức nhạy với suy hao do mưa.
Công suất phát gNB	P_t	Tổng công suất phát của trạm gốc trong ngân sách công suất chung.
Khoảng cách gNB - UE	d	Biến quét chính để quan sát xu hướng suy giảm vùng phủ và SNR.

Tham số	Ký hiệu	Diễn giải / ràng buộc
Hệ số fading	h_k	Biến ngẫu nhiên Rayleigh mô tả tác động đa đường trên liên kết k.
Phương sai nhiễu	σ_n^2	Được xác định từ mật độ phổ nhiễu và băng thông hệ thống.
Tỷ lệ tài nguyên OFDMA	β_k	Ràng buộc $\sum_{\beta_k} = 1$ cho tổng phần tài nguyên trực giao.
Hệ số công suất NOMA	α_k	Ràng buộc $\sum_{\alpha_k} = 1$; với bài toán hai người dùng thường chọn $\alpha_1 > \alpha_2$.
Ngưỡng outage	γ_{th} hoặc r_{th}	Ngưỡng tối thiểu để xem liên kết có đạt yêu cầu dịch vụ hay không.

Khung tham số trên cho thấy phần lớn đại lượng trong chương này có tính cấu trúc hơn là giá trị tuyệt đối. Điều quan trọng là quan hệ giữa chúng: P_t, f_c và d quyết định mức công suất thu trung bình; h_k và σ_n^2 quyết định chất lượng tức thời; β_k và α_k quyết định cách cùng một tài nguyên vô tuyến được chuyển hóa thành hiệu năng người dùng. Chính mối quan hệ đó mới là hạt nhân của phần mô phỏng và phân tích ở chương sau.

2.3. Mô hình OFDMA

2.3.1. Nguyên lý hoạt động

OFDMA là cơ chế đa truy nhập trực giao dựa trên nền OFDM. Trong OFDM, băng thông được chia thành nhiều sóng mang con trực giao và mỗi symbol được tạo ra bằng IFFT tại phía phát, sau đó bảo vệ bằng cyclic prefix để giảm giao thoa liên ký hiệu trong kênh đa đường. Khi mở rộng sang đa người dùng, OFDMA gán các tập sóng mang con hoặc resource block cho các UE khác nhau, nhờ đó nhiều UE có thể được phục vụ đồng thời mà vẫn tránh giao thoa nội ô trong điều kiện lý tưởng [11], [12].

Một điểm quan trọng của 5G NR là tính linh hoạt numerology. Khoảng cách sóng mang con có thể thay đổi để phù hợp với băng tần, độ trễ và tính nhạy Doppler của kịch bản. Tuy nhiên, trong phạm vi đề án, numerology được xem như phần nền chuẩn hóa

của downlink NR, còn phần so sánh tập trung vào bản chất của cơ chế truy nhập trực giao so với chồng công suất của NOMA.

Từ góc độ hệ thống, OFDMA chuyển bài toán đa người dùng thành bài toán lập lịch tài nguyên, trong đó gNB khai thác thông tin trạng thái kênh và nhu cầu lưu lượng để phân bổ các RB cho từng UE. Nhờ đó, cơ chế này có tính minh bạch cao trong phân tích, thuận lợi cho việc đánh giá fairness và đồng thời đơn giản hơn trong triển khai phía thu. Vì vậy, OFDMA được lựa chọn làm đường cơ sở trong đề án.

Tuy nhiên, chính ưu điểm này cũng đồng thời là hạn chế của OFDMA. Do mỗi đơn vị tài nguyên chỉ được cấp cho một UE tại một thời điểm, khả năng khai thác sự chênh lệch chất lượng kênh giữa nhiều UE chưa được tận dụng triệt để. Điều này tạo ra động lực để khảo sát NOMA như một phương án cho phép nhiều UE đồng thời chia sẻ cùng một tài nguyên.

2.3.2. Biểu diễn toán học

Nếu gọi β_k là tỷ lệ tài nguyên thời gian - tần số được cấp cho UE k trong tổng băng thông B, với điều kiện $\Sigma\beta_k = 1$, tốc độ lý thuyết của UE k trong OFDMA có thể viết:

$$R_k FDMA = \beta_k B log2(1 + \gamma_k) \tag{2.5}$$

Biểu thức trên cho thấy OFDMA tạo ra hai tầng tối ưu hóa tách biệt. Tầng thứ nhất là cải thiện chất lượng liên kết thông qua γ_k. Tầng thứ hai là chia tài nguyên thông qua β_k. Nhờ sự tách biệt đó, việc giải thích kết quả OFDMA thường rõ ràng hơn so với NOMA.

Ở mức tín hiệu OFDM, một symbol phát có thể viết dưới dạng tổng các sóng mang con trực giao:

$$x[n] = \sum_{m=0}^{N-1} X_m e^{\frac{j2\pi mn}{N}}, 0 \leq n < N \tag{2.6}$$

Trong OFDMA, các chỉ số m được chia thành những tập con rời nhau cho từng UE. Bởi vậy, tổng thông lượng hệ thống được viết:

$$R_{FDMA} = \beta_k B log2(1 + \gamma_k) \tag{2.7}$$

Với bài toán hai người dùng chia đều tài nguyên, ta có $\beta_1 = \beta_2 = 1/2$. Khi đó, OFDMA đạt được tổng tốc độ bằng tổng hai liên kết độc lập trên hai nửa tài nguyên. Công thức này là mốc đối chiếu trực tiếp với biểu thức tổng tốc độ của NOMA ở mục

sau. Nó cũng cho thấy rõ đánh đổi cơ bản của OFDMA: tín hiệu sạch hơn, nhưng mỗi UE chỉ được sử dụng một phần tài nguyên tổng thể.

2.3.3. Ưu điểm và hạn chế trong đánh giá hiệu năng

Ưu điểm đầu tiên của OFDMA là tính minh bạch. Vì các UE dùng tài nguyên trực giao, BER, outage và thông lượng của từng UE có thể được quy trực tiếp về chất lượng kênh của chính UE đó trên phần tài nguyên được cấp. Điều này làm cho việc diễn giải kết quả rất rõ, đặc biệt ở giai đoạn xây dựng đường cơ sở cho nghiên cứu.

Ưu điểm thứ hai là độ phức tạp phía thu thấp hơn. UE không cần thực hiện SIC hay khử giao thoa nội ô trong cấu hình lý tưởng. Đây là lợi thế thực dụng quan trọng, vì một sơ đồ có tổng tốc độ cao hơn về lý thuyết nhưng đòi hỏi xử lý thu quá phức tạp chưa chắc phù hợp hơn ở góc nhìn triển khai.

Tuy nhiên, OFDMA có hạn chế rõ. Vì tài nguyên bị chia cứng theo miền trực giao, tổng tài nguyên hữu ích của từng UE giảm khi số người dùng tăng. Trong các kịch bản có chênh lệch kênh lớn giữa người dùng mạnh và yếu, OFDMA chưa chắc tận dụng tốt cơ hội dùng chung tài nguyên để nâng tổng hiệu quả phổ.

Một hạn chế khác trong đánh giá là nếu chỉ nhìn vào BER từng người dùng, OFDMA thường có vẻ thuận lợi hơn NOMA. Nhưng điều đó không đồng nghĩa OFDMA luôn tốt hơn về hiệu quả hệ thống. Vì vậy, trong đề án, OFDMA phải được đánh giá đồng thời theo BER, outage và thông lượng. Chỉ khi đặt cùng nhiều chỉ tiêu, sự đánh đổi giữa ổn định cá thể và hiệu quả phổ của OFDMA mới được nhìn thấy đầy đủ.

2.4. Mô hình NOMA

2.4.1. Nguyên lý chồng công suất

NOMA miền công suất cho phép nhiều UE cùng sử dụng một tài nguyên thời gian - tần số bằng cách chồng các luồng tín hiệu với các mức công suất khác nhau. Khác với OFDMA, NOMA không cố loại bỏ hoàn toàn giao thoa nội ô ngay từ đầu, mà chấp nhận giao thoa có cấu trúc và dùng xử lý thu để tách các luồng. Trong downlink, người dùng có kênh yếu thường được cấp phần công suất lớn hơn, còn người dùng có kênh mạnh được cấp phần công suất nhỏ hơn nhưng bù lại có lợi thế trong giải mã [17]-[19].

Điểm cốt lõi của NOMA là khai thác sự khác biệt kênh giữa các UE. Nếu ghép đúng cặp người dùng mạnh - yếu và chọn hệ số công suất hợp lý, hệ thống có thể tăng

mức sử dụng tài nguyên phổ mà không cần mở rộng băng thông. Đây là lý do NOMA được xem là một hướng hấp dẫn trong nghiên cứu 5G.

Tuy nhiên, NOMA không phải là phương án mặc định vượt trội hơn OMA. Khi chênh lệch kênh nhỏ, khi SIC không ổn định hoặc khi phân bổ công suất chưa tốt, phần giao thoa nội tại có thể làm mất đi lợi ích do chồng tài nguyên mang lại. Vì vậy, trong đề án, NOMA được trình bày như một cơ chế có tiềm năng rõ nhưng phụ thuộc điều kiện, thay vì như một khẳng định đã chắc chắn hơn OFDMA trong mọi kịch bản.

2.4.2. Giải mã SIC

Kỹ thuật khử nhiễu tuần tự - SIC (Successive Interference Cancellation) là cơ chế tách luồng trung tâm của NOMA. Ý tưởng của SIC là giải mã thành phần có công suất nhận lớn hơn trước, tái tạo nó rồi trừ khỏi tín hiệu thu để giảm giao thoa cho bước tiếp theo. Trong kịch bản downlink hai người dùng, UE mạnh trước hết giải mã tín hiệu của UE yếu vì tín hiệu này được cấp công suất cao hơn; sau đó UE mạnh khử thành phần đó rồi mới giải mã tín hiệu của chính mình [17], [18].

Hiệu quả của SIC phụ thuộc vào thứ tự giải mã, độ chính xác của CSI và chất lượng đồng bộ. Trong mô hình lý tưởng, SIC hoàn hảo nghĩa là giao thoa của luồng đã giải mã biến mất hoàn toàn sau bước khử. Nhưng trong hệ thống thực, giao thoa dư có thể còn lại và ảnh hưởng rõ đến BER cũng như thông lượng của UE mạnh.

Về mặt đánh giá, SIC là điểm nối giữa lợi ích lý thuyết và tính khả thi của NOMA. Nếu bỏ qua SIC, NOMA chỉ còn là tín hiệu chồng gây giao thoa nặng. Nếu giả thiết SIC hoàn hảo trong mọi trường hợp, mô hình lại trở nên quá lạc quan. Vì vậy, chương này trình bày trước hết SIC lý tưởng để thiết lập cận trên, đồng thời luôn giữ rõ rằng đây là giả thiết thuận lợi cho NOMA.

2.4.3. Biểu diễn toán học cho kịch bản hai người dùng

Để minh họa rõ bản chất của NOMA, chương này xét kịch bản hai người dùng. Gọi UE_1 là người dùng có kênh yếu hơn và UE_2 là người dùng có kênh mạnh hơn, với $|h_1|^2 \leq |h_2|^2$. Tín hiệu phát chồng công suất tại gNB được viết:

$$x = s_1\sqrt{\alpha_1 P_t} + s_2\sqrt{\alpha_2 P_t},\ \alpha_1 + \alpha_2 = 1,\ \alpha_1 > \alpha_2 \tag{2.8}$$

Tín hiệu thu tại mỗi UE là:

$$y_i = h_i x + n_i,\ i \in \{1,2\} \tag{2.9}$$

Với UE_1, tín hiệu của UE_2 được xem là giao thoa. Khi đó:

$$SINR_1 = \frac{\alpha_1 P_t |h_1|^2}{\alpha_2 P_t |h_1|^2 + N_0 B} \quad (2.10)$$

$$R_1^{NOMA} = Blog2(1 + SINR_1) \quad (2.11)$$

Với UE_2, trước hết phải giải mã tín hiệu của UE_1 để thực hiện SIC:

$$SINR_{2\to1} = \frac{\alpha_1 P_t |h_2|^2}{\alpha_2 P_t |h_2|^2 + N_0 B} \quad (2.12)$$

Sau khi khử thành công, UE_2 giải mã tín hiệu của mình với:

$$SINR_2 = \frac{(\alpha_2 P_t |h_2|^2)}{N_0 B} \quad (2.13)$$

$$R_2^{NOMA} = Blog2(1 + SINR_2) \quad (2.14)$$

Do đó tổng tốc độ của cặp người dùng là:

$$R^{NOMA} = R_1^{NOMA} + R_2^{NOMA} \quad (2.15)$$

Nếu muốn so sánh công bằng với OFDMA hai người dùng chia đều tài nguyên, ta đặt $R_k^{OFDMA} = \frac{1}{2} Blog2(1+\gamma_k)$ .Khi đối chiếu hai họ biểu thức, có thể thấy NOMA giữ nguyên toàn bộ băng thông cho cả hai UE nhưng phải trả giá bằng giao thoa có cấu trúc. OFDMA chia băng thông thành hai phần song giữ tín hiệu sạch hơn. Tính hơn kém giữa hai cơ chế vì vậy phụ thuộc trực tiếp vào chênh lệch kênh và chất lượng SIC.

2.4.4. Ưu điểm và hạn chế trong đánh giá hiệu năng

Ưu điểm rõ nhất của NOMA là khả năng tăng mức sử dụng tài nguyên phổ bằng cách cho nhiều UE cùng dùng một tài nguyên. Trong những kịch bản chênh lệch kênh đủ lớn, NOMA có thể đạt tổng thông lượng cao hơn OFDMA mà không cần mở rộng băng thông. Đây là điểm hấp dẫn nhất của NOMA ở góc nhìn hiệu quả phổ [17]-[19].

Ưu điểm thứ hai là NOMA mở ra chiều tối ưu mới là phân bổ công suất. Ngoài việc ghép cặp người dùng, hệ thống còn có thể điều chỉnh α_k để cân bằng giữa tổng tốc độ và fairness. Điều này tạo thêm dư địa cải thiện so với các sơ đồ truy nhập thuần trực giao.

Tuy nhiên, NOMA cũng có các hạn chế rõ ràng. Nó nhạy với CSI, với thứ tự giải mã, với đồng bộ và với giao thoa dư sau SIC. Một kết quả mô phỏng cho thấy NOMA tốt hơn OFDMA trong cấu hình lý tưởng chưa đủ để kết luận về ưu thế hệ thống. Cần xem lợi ích đó còn giữ được bao nhiêu khi các giả thiết trở nên thực tế hơn.

Một hạn chế khác là fairness không tự động được cải thiện trong NOMA. Việc cấp nhiều công suất cho UE yếu có thể giúp UE này duy trì kết nối nhưng đồng thời làm giảm tốc độ của UE mạnh nếu phân bổ chưa hợp lý. Vì vậy, NOMA phải được đánh giá bằng một bộ chỉ tiêu đa chiều, thay vì chỉ nhìn vào tổng thông lượng.

2.5. Mô hình kênh truyền Rayleigh tổng hợp dùng trong đề án

2.5.1. Suy hao không gian tự do

Suy hao không gian tự do là lớp suy hao nền của mọi liên kết vô tuyến. Theo khuyến nghị ITU-R P.525, suy hao này có thể được viết ở đơn vị decibel dưới dạng thực dụng:

$$FSPL(dB) = 32.45 + 20\,log10(f_{MHz}) + 20\,log10(d_{km}) \quad (2.16)$$

thức cho thấy FSPL tăng theo cả tần số và khoảng cách. Điều đó có ý nghĩa trực tiếp với 5G NR: khi hệ thống làm việc ở tần số cao hơn, cùng một khoảng cách truyền sẽ chịu suy hao lớn hơn. Trong đề án, FSPL được dùng như phần suy hao quy mô lớn nền để xác lập xu hướng công suất thu trung bình theo khoảng cách.

Ưu điểm của FSPL là tính minh bạch và khả năng kiểm chứng cao. Tuy nhiên, nó là mô hình tham chiếu lý tưởng chứ chưa phản ánh đầy đủ ảnh hưởng của môi trường đô thị, trong nhà hoặc các vật cản lớn. Chính vì vậy, FSPL trong chương này được dùng như một thành phần nền trước khi cộng thêm suy hao do mưa và fading Rayleigh.

2.5.2. Suy hao do mưa

Ở những dải tần cao hơn, suy hao do mưa có thể trở thành thành phần không thể bỏ qua trong ngân sách công suất. Theo ITU-R P.838-3, suy hao riêng do mưa được mô tả bằng quan hệ lũy thừa:

$$\gamma_R = kR^{\alpha}\left(\frac{dB}{km}\right) \quad (2.17)$$

Với chiều dài quãng đường hiệu dụng d_{eff}, suy hao do mưa có thể xấp xỉ:

$$A_{rain} = \gamma_R \cdot d_{eff} \quad (2.18)$$

Trong đó R là cường độ mưa, còn k và α phụ thuộc vào tần số và phân cực sóng [8]. Việc bổ sung thành phần này giúp mô hình kênh trong đề án không chỉ phản ánh suy hao theo khoảng cách mà còn phản ánh độ nhạy của liên kết với điều kiện thời tiết, đặc biệt ở các cấu hình tần số cao. Tuy nhiên, đây vẫn là mô hình ghép ngân sách công suất, chưa phải mô hình khí quyển đầy đủ cho thiết kế tuyến ngoài trời.

2.5.3. Fading Rayleigh

Fading Rayleigh là mô hình chuẩn cho trường hợp không có thành phần LOS trội. Trong biểu diễn chuẩn hóa, hệ số kênh phức được mô hình như biến Gaussian phức trung bình bằng không:

$$h \sim CN(0,1), |h|^2 \sim Exponential\ (1) \quad (2.19)$$

Mô hình này phù hợp với môi trường đa đường mạnh và đủ khó để bộc lộ rõ khác biệt giữa OFDMA và NOMA. Rayleigh có lợi thế lớn trong phân tích vì nhiều chỉ tiêu như BER trung bình, outage probability và dung lượng ergodic đều có thể được liên hệ trực tiếp với phân bố mũ của $|h|^2$ [9], [10], [16].

Cũng cần nhấn mạnh rằng chọn Rayleigh không có nghĩa mọi kịch bản 5G đều là NLOS thuần túy. Đây là lựa chọn có chủ đích để xây dựng một nền so sánh cấp liên kết đủ nghiêm ngặt. Trong những môi trường có LOS mạnh hoặc beamforming nổi trội, Rician hoặc các mô hình không gian đầy đủ của 3GPP TR 38.901 sẽ phù hợp hơn. Việc giữ rõ ranh giới này giúp phạm vi kết luận của đề án được trung thực hơn.

2.5.4. Mô hình nhiễu nền

Sau khi xác lập suy hao quy mô lớn và fading, hệ thống vẫn cần mô hình nhiễu nền để hoàn tất liên kết. Trong đề án, công suất nhiễu nền được xác định từ mật độ phổ nhiễu và băng thông tương đương:

$$N = N_0 B \quad (2.20)$$

Nếu quy đổi sang miền decibel và có xét hệ số nhiễu NF của máy thu, có thể dùng dạng gần đúng:

$$P_{noise}(dBm) = -174 + 10\,log10(B_{Hz}) + NF \quad (2.21)$$

Mô hình này giúp tạo điểm neo cho SNR và cho phép quy đổi trực tiếp từ ngân sách công suất sang BER, outage và dung lượng. Trong một số nghiên cứu chi tiết hơn, có thể cần thêm giao thoa liên cell hoặc giao thoa đồng kênh. Tuy nhiên, trong cấu hình cơ sở của đề án, AWGN được giữ là nhiễu nền chuẩn để làm nổi bật vai trò của cấu trúc truy nhập và kênh Rayleigh.

2.5.5. Công thức tính công suất thu và SNR

Từ các thành phần đã xây dựng, công suất thu trung bình của liên kết được viết ở miền decibel như sau:

$$P_{rx}(dBm) = P_t(dBm) + G_t(dBi) + G_r(dBi) - FSPL(dB) - A_{rain}(dB) \quad (2.22)$$

Nếu đưa fading tức thời vào miền tuyến tính, ta có:

$$P_{rx,inst} = P_{rx,avg} \cdot |h|^2 \quad (2.23)$$

Từ đó, SNR tức thời được xác định bởi:

$$\gamma = \frac{P_{rx,inst}}{N} \quad (2.24)$$

Biểu thức này là cầu nối trực tiếp giữa mô hình kênh và mọi chỉ tiêu hiệu năng của chương mô phỏng. Việc tách $P_{rx,avg}$ và $|h|^2$ có ý nghĩa diễn giải rõ ràng: phần thứ nhất phản ánh ảnh hưởng chậm của khoảng cách, tần số và mưa; phần thứ hai phản ánh biến động nhanh do đa đường. Đây là cấu trúc phù hợp để đọc và giải thích kết quả OFDMA và NOMA trên cùng một nền kênh.

2.6. Các chỉ tiêu đánh giá hiệu năng

2.6.1. SNR

SNR là chỉ tiêu cơ sở của chất lượng liên kết. Nó đo tỉ số giữa công suất tín hiệu hữu ích và công suất nhiễu nền tại đầu vào bộ giải điều chế. Trong đề án, cần phân biệt SNR trung bình với SNR tức thời. SNR trung bình chủ yếu do công suất phát, path-loss, suy hao do mưa và băng thông quyết định; còn SNR tức thời bằng SNR trung bình nhân với biến fading ngẫu nhiên.

Đối với OFDMA, SNR của từng UE trên tài nguyên được cấp là đại lượng khá trực tiếp. Đối với NOMA, đại lượng thực sự chi phối hiệu năng thường là SINR vì còn tồn tại giao thoa từ các luồng chồng công suất. Dù vậy, mục SNR vẫn cần được tách riêng vì đây là chuẩn vật lý chung để đọc chất lượng liên kết trước khi xét đến cơ chế truy nhập.

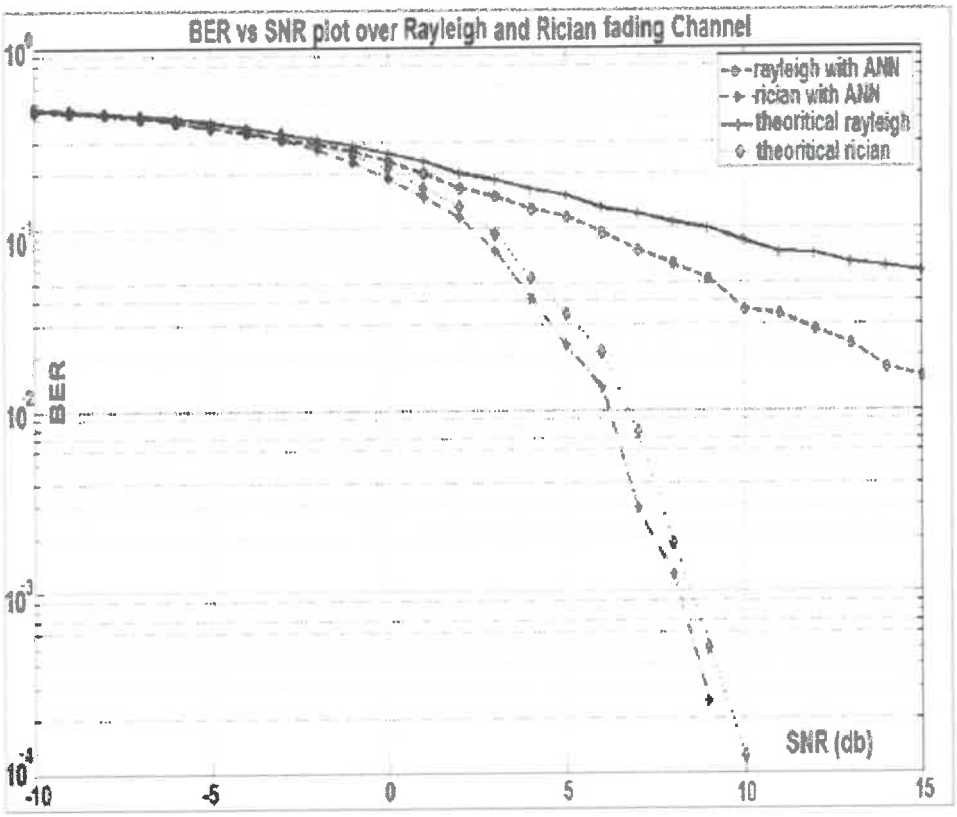
Trong thực hành mô phỏng, SNR thường được dùng làm trục quét chính để so sánh các kỹ thuật. Tuy nhiên, SNR không phải là thước đo đủ. Một cấu hình có SNR tốt hơn chưa chắc tốt hơn về thông lượng hệ thống nếu phải trả giá bằng overhead hoặc fairness kém. Vì vậy, SNR trong đề án được dùng như chỉ tiêu nền, luôn phải được đọc cùng BER, outage và thông lượng.

2.6.2. BER

BER phản ánh độ tin cậy của quá trình truyền bit. Nếu SNR là biến đầu vào vật lý thì BER là đại lượng đầu ra của bộ giải điều chế. Trong kênh Rayleigh, BER trung bình của các sơ đồ điều chế cơ bản thường xấu hơn đáng kể so với AWGN ở cùng SNR trung bình vì sự xuất hiện của fading sâu. Với QPSK hoặc BPSK, một biểu thức trung bình điển hình có thể viết:

$$BER_{QPSK,Rayleigh} = \frac{1}{2}\left(1 - \sqrt{\frac{\bar{\gamma}}{1+\bar{\gamma}}}\right) \tag{2.25}$$

Biểu thức này cho thấy BER không giảm nhanh theo SNR như trong AWGN. Đối với OFDMA, BER phản ánh độ nhạy của từng UE với fading và nhiễu trên phần tài nguyên được cấp. Đối với NOMA, BER còn phản ánh cả chất lượng SIC và cách chọn hệ số công suất. Vì vậy, BER là chỉ tiêu không thể thiếu để đọc cái giá phải trả của NOMA về độ tin cậy bit.



Hình 2.1: Ví dụ đường cong BER theo SNR trên các kênh Rayleigh và Rician

(Nguồn: [1], [2].)

Hình 2.1 cho thấy một ý nghĩa trực quan của BER: khi chuyển từ kênh có điều kiện thuận lợi hơn sang Rayleigh, cùng một mức BER cần SNR cao hơn. Điều này phù hợp với lập luận lý thuyết và là cơ sở để dự đoán rằng các đường BER của OFDMA và NOMA trong chương mô phỏng sẽ phân tách rõ khi fading trở nên nghiêm ngặt hơn.

2.6.3. Outage probability

Outage probability đo xác suất liên kết không đạt được ngưỡng chất lượng tối thiểu đã định. Đây là chỉ tiêu rất quan trọng khi mục tiêu không chỉ là truyền tốt về trung bình mà còn là duy trì dịch vụ với xác suất thất bại nhỏ. Nếu chọn ngưỡng theo SNR, outage probability được viết:

$$P_{out} = P(\gamma < \gamma_{th}) \tag{2.26}$$

Đối với kênh Rayleigh đơn giản, do γ có phân bố mũ, ta có:

$$P_{out} = 1 - e^{-\frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}}} \tag{2.27}$$

Nếu chọn ngưỡng theo tốc độ yêu cầu r_{th} tính theo bit/s/Hz, có thể quy đổi sang ngưỡng SNR qua quan hệ Shannon:

$$\gamma_{th} = 2^{r_{th}} - 1 \tag{2.28}$$

Outage đặc biệt hữu ích vì nó cho thấy trực tiếp tác động của fading lên độ sẵn sàng dịch vụ. Hai hệ thống có thể có dung lượng trung bình gần nhau nhưng outage khác nhau đáng kể. Đối với NOMA, outage còn nhạy với phân bổ công suất và thành công của SIC, do đó thường cho góc nhìn dịch vụ sắc nét hơn chỉ đọc BER đơn thuần.

2.6.4. Dung lượng kênh và thông lượng

Dung lượng kênh và thông lượng đều liên quan đến khả năng tải thông tin nhưng không đồng nhất. Dung lượng là cận lý thuyết do kênh và giả thiết mã hóa lý tưởng quyết định, còn thông lượng là lượng dữ liệu hữu ích thực sự đạt được ở một cấu hình truyền cụ thể. Việc phân biệt hai đại lượng này đặc biệt quan trọng trong nghiên cứu so sánh vì một kỹ thuật có thể cải thiện dung lượng tổng nhưng không cải thiện tương ứng thông lượng hữu ích nếu kéo theo lỗi hoặc overhead lớn.

Ở mức lý thuyết, dung lượng tức thời của liên kết được viết:

$$C = B\,log2(1 + \gamma) \tag{2.29}$$

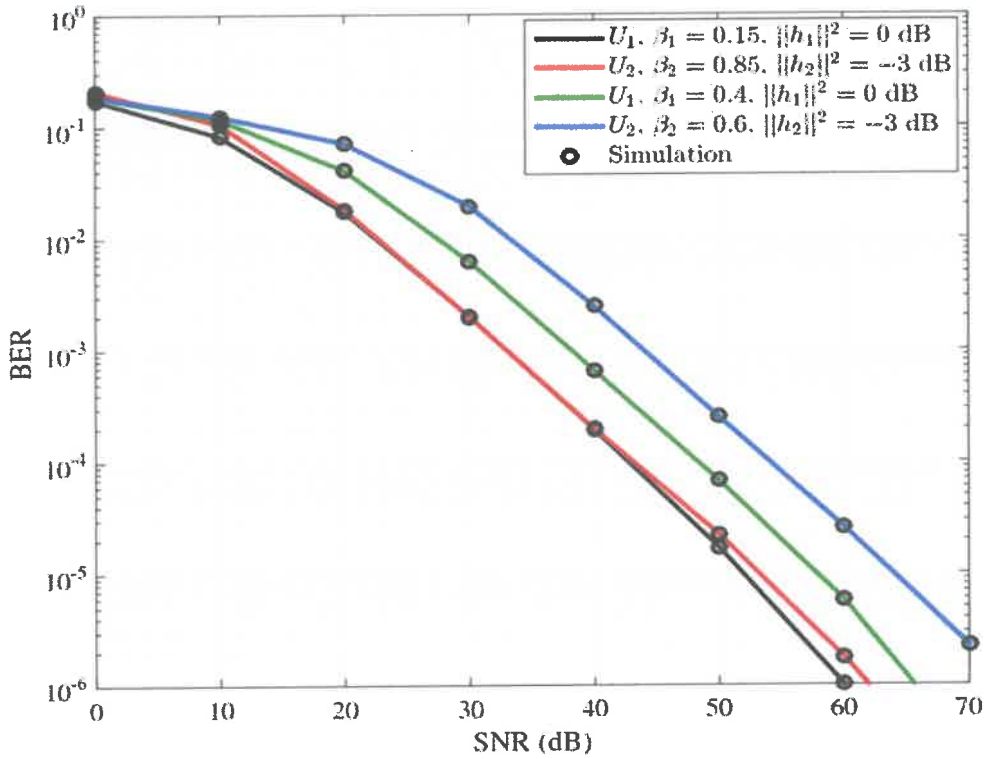
Trong mô phỏng thực tế, thông lượng hiệu dụng thường được nhìn dưới dạng khái niệm:

$$Throughput = Rate_{nominal} \times \left(1 - \frac{PER}{BLER}\right) \times \eta_{overhead} \quad (2.30)$$

Công thức này cho thấy thông lượng là chỉ tiêu hệ thống, không phải chỉ tiêu thuần vật lý. Đối với OFDMA, tổng thông lượng thường ổn định hơn nhưng bị giới hạn bởi việc chia tài nguyên trực giao. Đối với NOMA, tổng thông lượng có thể tăng nhờ dùng chung tài nguyên nhưng chỉ bền vững khi giao thoa được quản lý tốt. Vì vậy, kết luận cuối cùng về kỹ thuật nào tốt hơn không thể dựa vào một đường BER đơn lẻ mà phải dựa trên bức tranh tổng thể của độ tin cậy và hiệu quả phổ.

Bảng 2.2: Ý nghĩa của các chỉ tiêu đánh giá

Chỉ tiêu	Ý nghĩa kỹ thuật	Vai trò trong so sánh OFDMA - NOMA
SNR	Đo chất lượng tín hiệu vật lý so với nhiễu nền.	Xác lập mặt bằng chất lượng liên kết chung cho cả hai sơ đồ.
BER	Đo độ tin cậy bit sau giải điều chế.	Làm rõ cái giá về lỗi bit khi dùng chồng công suất và SIC.
Outage probability	Đo xác suất liên kết không đạt ngưỡng dịch vụ.	Đánh giá độ sẵn sàng duy trì QoS trong fading.
Dung lượng / thông lượng	Đo hiệu quả tải thông tin ở mức lý thuyết và mức hệ thống.	Phản ánh trực tiếp lợi ích hoặc đánh đổi về hiệu quả phổ.

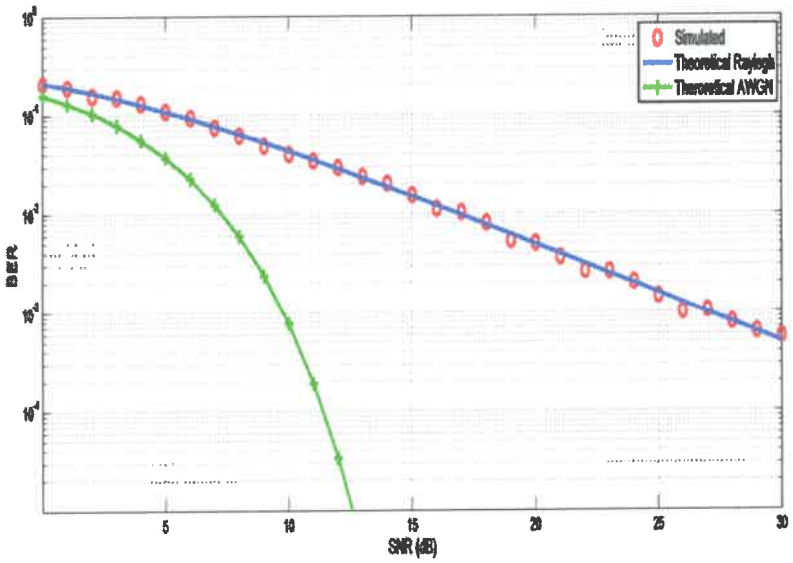


Hình 2.2: Minh họa BER của NOMA hai người dùng trên kênh Rayleigh với các hệ số công suất khác nhau

(Nguồn: [1], [2].)

Hình 2.2 nhấn mạnh rằng BER trong NOMA không chỉ phụ thuộc vào SNR mà còn phụ thuộc rất mạnh vào cách chọn α_1 và α_2. Khoảng cách giữa các đường cong thay đổi đáng kể khi hệ số công suất thay đổi, cho thấy phân bổ công suất là một phần cấu

thành của hiệu năng chứ không phải chi tiết phụ trợ. Điều này cũng lý giải vì sao NOMA cần được đánh giá như một hệ thống ghép giữa chồng công suất và SIC, thay vì chỉ như một biến thể khác của sơ đồ điều chế.



Hình 2.3: So sánh BER mô phỏng và đường lý thuyết trong các kênh AWGN và Rayleigh

(Nguồn: [1], [2].)

Hình 2.3 tiếp tục củng cố ý nghĩa của việc lựa chọn mô hình kênh trong đánh giá. Khi chuyển từ AWGN sang Rayleigh, cùng một mức BER đòi hỏi SNR cao hơn đáng kể. Điều này hàm ý rằng mọi nhận xét về hiệu quả của OFDMA hay NOMA trên nền Rayleigh phải được hiểu như nhận xét trong một môi trường khó hơn rõ rệt so với nền AWGN thuần túy.

2.7. Kết luận chương 2

Chương 2 thiết lập khung lý thuyết và mô hình hệ thống cho bài toán đánh giá hiệu năng đường xuống 5G NR. Trước hết, chương trình bày các cơ sở nền như dung lượng kênh, thông tin tương hỗ, path-loss, fading và AWGN, qua đó hình thành cách tiếp cận nhất quán đối với chất lượng liên kết. Tiếp theo, mô hình truyền giữa gNB và UE được chuẩn hóa cùng các giả thiết nhằm đảm bảo so sánh công bằng giữa OFDMA và NOMA.

Trên nền tảng đó, OFDMA và NOMA được mô tả cả về nguyên lý hoạt động và biểu diễn toán học. OFDMA đóng vai trò đường cơ sở với tính ổn định và dễ phân tích, trong khi NOMA được xem như cơ chế chồng công suất có tiềm năng nâng cao hiệu quả phổ nhưng phụ thuộc vào phân bổ công suất và kỹ thuật SIC. Việc đặt hai cơ chế trong cùng một khung mô hình tạo cơ sở rõ ràng cho phần mô phỏng tiếp theo.

Cuối cùng, chương xây dựng mô hình kênh Rayleigh tổng hợp (bao gồm FSPL, suy hao do mưa, fading Rayleigh và AWGN) và chuẩn hóa các chỉ tiêu đánh giá như SNR, BER, outage probability, dung lượng và thông lượng. Đây là nền tảng trực tiếp cho chương mô phỏng, đồng thời khẳng định phạm vi nghiên cứu ở cấp liên kết có kiểm soát, phù hợp cho so sánh cơ chế truy nhập nhưng chưa phản ánh đầy đủ toàn bộ hệ thống 5G NR.

CHƯƠNG 3 - MÔ PHỎNG VÀ ĐÁNH GIÁ HIỆU NĂNG

Chương này tập trung phân tích, định lượng các nội dung lý thuyết đã trình bày ở Chương 2 thông qua các kịch bản mô phỏng đường xuống 5G NR. Mục tiêu là làm rõ mối quan hệ giữa mô hình kênh, cấu hình phổ tần, cơ chế đa truy nhập và chất lượng dịch vụ, thay vì chỉ mô tả rời rạc các chỉ tiêu như SNR, BER hay xác suất dừng. Nội dung được tổ chức theo trình tự: thiết lập mô phỏng, đánh giá kênh, phân tích độ tin cậy, so sánh OFDMA–NOMA và rút ra hàm ý kỹ thuật.

Cách tiếp cận xuyên suốt là quan sát – so sánh – giải thích – hàm ý, trong đó mỗi kết quả được mô tả theo xu hướng, đối chiếu giữa các kịch bản, giải thích dựa trên mô hình, rồi mới rút ra nhận xét kỹ thuật. Phương pháp này giúp tránh việc chỉ mô tả kết quả mà không làm rõ nguyên nhân của sự khác biệt hiệu năng.

Phạm vi chương được giới hạn trong mô hình đường xuống một tế bào với kênh Rayleigh NLOS phẳng, kết hợp suy hao không gian tự do, suy hao do mưa và nhiễu AWGN. Do đó, các kết luận mang ý nghĩa trong một môi trường mô phỏng đã được kiểm soát, phù hợp cho mục tiêu so sánh cơ chế truy nhập, nhưng chưa đại diện đầy đủ cho toàn bộ không gian hệ thống theo chuẩn 3GPP.

3.1. Thiết lập mô phỏng

3.1.1. Công cụ mô phỏng

Công cụ chính được sử dụng là MATLAB do đây là môi trường tính toán số phù hợp cho các bài toán truyền thông số, đặc biệt khi cần kết hợp xử lý vector, mô hình hóa kênh, đánh giá BER và thực hiện lặp Monte Carlo trên số lượng mẫu lớn. Trong phạm vi đề án, MATLAB được dùng như một công cụ triển khai thuật toán và trực quan hóa kết quả, chứ không phải là đối tượng nghiên cứu tự thân. Điều quan trọng hơn là toàn bộ cấu hình mô phỏng được giữ nhất quán giữa các kịch bản để bảo đảm khả năng so sánh.

Việc lựa chọn MATLAB cũng phù hợp với tính chất của bài toán đang xét. Các phép tính SNR, dung lượng, xác suất dừng hay BER trong kênh Rayleigh có thể được hiện thực một cách trực tiếp và kiểm soát được từng giả thiết. Nhờ đó, chương mô phỏng giữ được sự minh bạch về mô hình: mỗi đường cong thu được đều có thể truy vết ngược về công thức lý thuyết hoặc các tham số đầu vào đã quy định ở Chương 2.

Về mặt phương pháp, các kết quả không được lấy từ một lần truyền dẫn duy nhất mà từ quá trình lặp ngẫu nhiên nhiều lần trên các hệ số fading và mẫu nhiễu khác nhau.

Đây là điểm quan trọng vì với kênh Rayleigh, các đại lượng tức thời dao động mạnh theo từng hiện thực kênh. Do đó, nếu không thực hiện trung bình thống kê, đường cong kết quả sẽ phụ thuộc quá nhiều vào mẫu ngẫu nhiên cụ thể và không phản ánh đúng xu thế hệ thống.

3.1.2. Tham số hệ thống

Mô phỏng được xây dựng cho đường xuống của một tế bào 5G NR, trong đó trạm gốc gNB truyền tín hiệu đến thiết bị người dùng UE. Khoảng cách truyền được quét từ 100 m đến 5000 m để bao quát đồng thời vùng gần trạm, vùng trung gian và vùng biên tế bào. Ba băng tần đại diện được lựa chọn gồm 0,7 GHz, 2,6 GHz và 28 GHz, tương ứng với hai lớp phổ có ý nghĩa triển khai thực tế là FR1 và FR2.

Việc dùng đồng thời hai băng tần FR1 và một băng tần FR2 giúp chương mô phỏng không chỉ so sánh đơn thuần theo tần số mà còn phản ánh đúng đánh đổi cơ bản của 5G NR: phổ thấp cho vùng phủ tốt hơn, trong khi phổ cao cung cấp không gian tài nguyên rộng hơn nhưng nhạy với suy hao đường truyền. Bài toán vì vậy được đặt trong đúng bối cảnh kỹ thuật của triển khai 5G hiện đại.

Hình 3.1: Các tham số hệ thống mô phỏng cơ bản

Tham số	Giá trị sử dụng trong mô phỏng	Ý nghĩa trong đánh giá
Kiểu liên kết	Đường xuống 5G NR giữa gNB và UE	Chuẩn hóa bài toán downlink
Khoảng cách truyền	100 m đến 5000 m	Khảo sát từ gần đến biên tế bào
Công suất phát	43 dBm	Mức phát điển hình của gNB
Băng thông	100 MHz	Cơ sở tính nhiễu và thông lượng
Băng tần khảo sát	0,7 GHz; 2,6 GHz; 28 GHz	Đại diện FR1 thấp, FR1 trung, FR2
Mô hình kênh	Rayleigh phẳng NLOS + AWGN	Đánh giá fading và nhiễu nền
Suy hao quy mô lớn	FSPL và suy hao do mưa	Làm rõ tác động khoảng cách, tần số, thời tiết

Tham số	Giá trị sử dụng trong mô phỏng	Ý nghĩa trong đánh giá
Điều chế BER cơ sở	QPSK	So sánh BER ở cấu hình cơ sở
Ngưỡng outage	0 dB	Mốc đánh giá xác suất dừng
Kịch bản đa truy nhập	OFDMA và NOMA miền công suất	Trục so sánh chính của đề án

Bảng 3.1 cho thấy các tham số được lựa chọn theo hướng vừa đủ để làm rõ bản chất của bài toán. Cấu hình này chưa kích hoạt các cơ chế tăng cường như beamforming, MIMO hay lịch biểu phụ thuộc CSI. Chính vì vậy, kết quả mô phỏng ở chương này cần được hiểu là đường cơ sở. Ưu điểm của cách làm này là giữ được khả năng diễn giải; hạn chế là chưa phản ánh toàn bộ lợi ích có thể đạt được trong mạng thương mại.

3.1.3. Kịch bản mô phỏng

Các kịch bản được thiết kế theo hướng tăng dần độ phức tạp. Nhóm đầu tập trung vào đặc tính kênh và chất lượng liên kết, trong khi nhóm sau đi vào so sánh hai cơ chế truy nhập. Cách tổ chức này giúp mỗi kết luận ở phần sau đều có nền tảng từ các quan sát trước đó, tránh việc rút ra kết luận về OFDMA hay NOMA mà chưa hiểu rõ môi trường truyền dẫn mà chúng đang hoạt động.

Bảng 3.1: Tổng hợp các kịch bản mô phỏng

Kịch bản	Nội dung chính	Mục đích
Kịch bản 1	Khảo sát suy hao đường truyền và SNR theo khoảng cách, tần số	Làm mốc cho toàn bộ chương
Kịch bản 2	Đánh giá BER của điều chế QPSK trong kênh Rayleigh	Đo độ tin cậy liên kết ở lớp vật lý
Kịch bản 3	Đánh giá outage probability theo khoảng cách	Bổ sung góc nhìn xác suất cho chất lượng kênh
Kịch bản 4	So sánh sum-rate OFDMA và NOMA trong kịch bản hai người dùng	Đo hiệu quả khai thác tài nguyên
Kịch bản 5	Đối chiếu chất lượng liên kết theo người dùng gần - xa	Làm rõ hiệu ứng near-far

Kịch bản	Nội dung chính	Mục đích
Kịch bản 6	Thảo luận hành vi khi mở rộng nhiều UE	Đặt nền cho hàm ý triển khai
Kịch bản 7	So sánh BER OFDMA và NOMA trong kênh Rayleigh	Kiểm tra đánh đổi thông lượng - độ tin cậy

Một điểm cần nhấn mạnh là không phải mọi kịch bản đều nhằm tạo ra một chỉ số mới. Một số kịch bản được xây dựng để kiểm chứng lại trực tiếp những dự đoán từ mô hình lý thuyết ở Chương 2. Ví dụ, nếu phần lý thuyết cho thấy BER phải tăng khi SNR giảm theo khoảng cách, thì kịch bản BER ở đây có vai trò xác nhận mối quan hệ đó trong cấu hình cụ thể của đề án. Điều này làm cho chương mô phỏng trở thành phần kiểm chứng mô hình, không chỉ là phần minh họa.

3.1.4. Phương pháp Monte Carlo

Phương pháp Monte Carlo được sử dụng để lấy trung bình thống kê trên nhiều hiện thực kênh ngẫu nhiên. Với mỗi giá trị khoảng cách hoặc mỗi cấu hình so sánh, mô hình sinh nhiều mẫu fading Rayleigh và nhiễu AWGN độc lập, sau đó tính các chỉ tiêu tức thời và trung bình hóa kết quả. Về bản chất, đây là cách ước lượng kỳ vọng của hệ thống khi không thể biểu diễn đầy đủ mọi đại lượng chỉ bằng một công thức đóng.

Nếu ký hiệu N_{MC} là số lần lặp Monte Carlo và z_i là giá trị đo được ở lần lặp thứ i, thì giá trị trung bình ước lượng được viết dưới dạng:

$$\bar{z} = \left(\frac{1}{N_{MC}}\right)\sum_{i=1}^{N_{NC}} z_i \tag{3.1}$$

Đối với outage probability, biến quan sát z_i thường là biến chỉ báo nhận giá trị 1 khi SNR tức thời nhỏ hơn ngưỡng đặt trước và bằng 0 trong trường hợp ngược lại. Khi đó:

$$P_{out} \approx \frac{1}{N_{MC}}\sum_{i=1}^{N_{MC}} \begin{cases} 1, (\gamma_i \le \gamma_{th}) \\ 0, (\gamma_i \ge \gamma_{th}) \end{cases} \tag{3.2}$$

Ưu điểm của cách tiếp cận này là có thể dùng cùng một khuôn khổ cho cả BER, SNR, outage probability và các chỉ tiêu so sánh OFDMA - NOMA. Tuy nhiên, Monte Carlo chỉ đáng tin khi số lần lặp đủ lớn và các tham số được kiểm soát nhất quán giữa các kịch bản. Vì vậy, trong chương này, phương pháp Monte Carlo được xem là một phần của thiết kế thí nghiệm, không chỉ là công cụ số học.

3.2. Đánh giá đặc tính kênh truyền

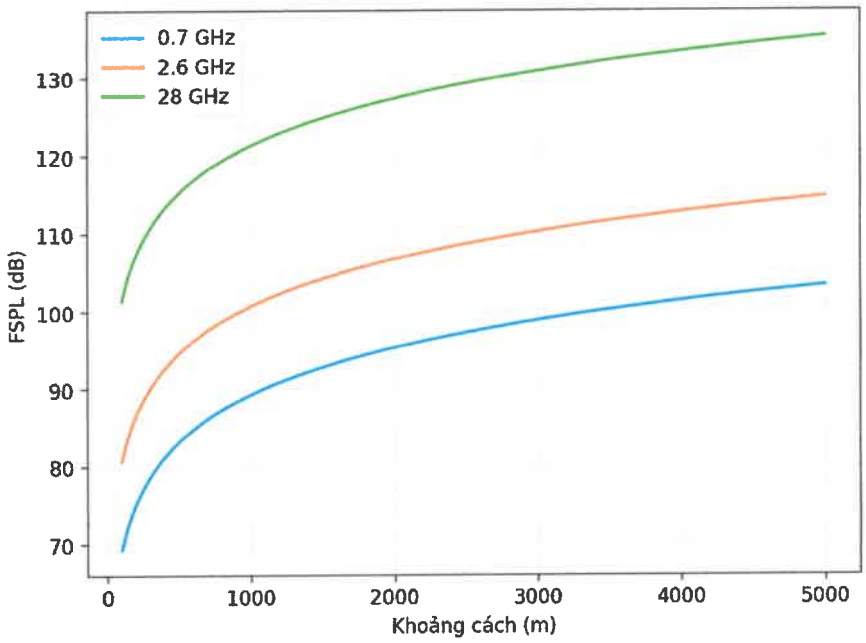
3.2.1. Suy hao đường truyền theo khoảng cách và tần số

Bước đầu tiên của đánh giá hiệu năng là làm rõ đặc tính suy hao quy mô lớn. Trong mô hình của đề án, thành phần suy hao nền được mô tả bởi công thức suy hao không gian tự do theo khuyến nghị ITU-R P.525, sau đó chồng thêm suy hao do mưa khi xét đến tác động khí quyển ở dải tần cao. Công thức FSPL được viết:

$$L_{FS}(dB) = 32{,}4 + 20\,log10(f_{MHz}) + 20\,log10(d_{km}) \quad (3.3)$$

Biểu thức trên cho thấy suy hao tăng theo cả tần số và khoảng cách. Điều này có ý nghĩa rất trực tiếp đối với 5G NR. Khi hệ thống dịch chuyển từ băng tần dưới 1 GHz sang vài chục GHz, mức suy hao nền của liên kết tăng mạnh ngay cả trước khi xét đến fading, che chắn hay định hướng chùm tia. Do đó, các khác biệt quan sát được ở các mục sau không phải là hiện tượng ngẫu nhiên của mô phỏng mà là hệ quả tất yếu của kiến trúc phổ tần.

Hình 3.2 minh họa riêng thành phần suy hao không gian tự do theo khoảng cách cho ba băng tần khảo sát. Đây là đồ thị nền để giải thích vì sao các đường cong SNR, BER và outage ở các mục sau lại tách xa nhau mạnh như vậy, đặc biệt giữa FR1 và FR2.



Hình 3.2: Suy hao không gian tự do theo khoảng cách đối với các băng tần 0,7 GHz, 2,6 GHz và 28 GHz.

(Nguồn: tác giả tính từ công thức FSPL theo ITU-R P.525 và tham số mô phỏng của đề án.)

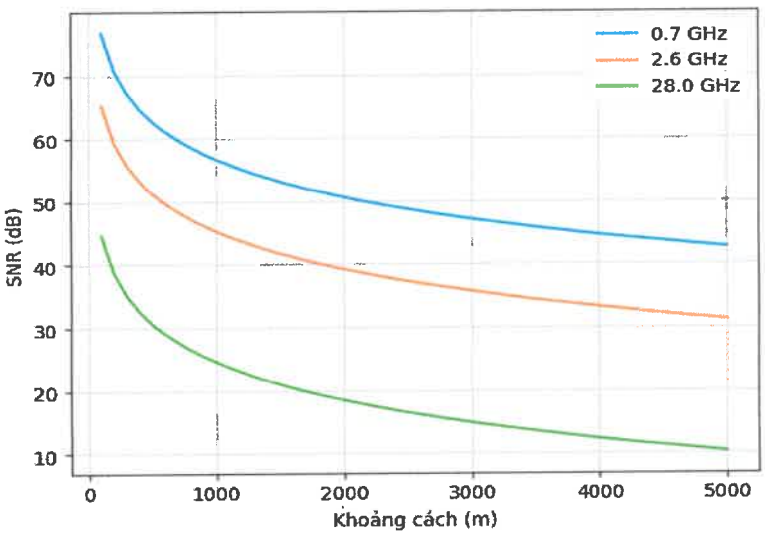
Quan sát Hình 3.2 có thể thấy khoảng cách chỉ tăng từ hàng trăm mét lên vài kilômét đã làm suy hao tăng thêm một lượng lớn theo quy luật logarit. Quan trọng hơn, đường cong 28 GHz luôn nằm cao hơn rõ rệt so với 0,7 GHz và 2,6 GHz trong toàn miền khảo sát. Điều này xác nhận rằng FR2 chỉ thực sự hiệu quả khi có thêm các cơ chế bù suy hao như beamforming, mật độ trạm dày hoặc cự ly truyền ngắn.

Một lưu ý cần nêu rõ là Hình 3.2 mới chỉ phản ánh FSPL. Trong thực tế, khi xét thêm suy hao do mưa theo ITU-R P.838-3, bất lợi của băng tần mmWave còn trở nên rõ hơn. Nói cách khác, đồ thị này là một đánh giá tương đối thận trọng. Nếu môi trường khí tượng xấu hơn hoặc đường truyền có che chắn mạnh, chênh lệch giữa FR1 và FR2 sẽ còn lớn hơn nữa.

3.2.2. SNR theo khoảng cách

Sau khi xác định được suy hao quy mô lớn, chỉ tiêu SNR được dùng để kết nối trực tiếp mô hình truyền dẫn với chất lượng tín hiệu ở phía thu. SNR trung bình được tính từ công suất thu sau suy hao và công suất nhiễu nền trên băng thông hệ thống. Vì BER, outage probability và tốc độ Shannon đều phụ thuộc trực tiếp vào SNR, đây là chỉ tiêu trung gian quan trọng nhất của chương mô phỏng.

Hình 3.3 trình bày SNR trung bình theo khoảng cách đối với ba băng tần khảo sát. Đồ thị được trích từ kết quả mô phỏng trong file gốc, sau khi chuẩn hóa lại caption và vị trí trình bày để phù hợp với cấu trúc mới của đề án.



Hình 3.3: SNR trung bình theo khoảng cách truyền tại các băng tần 0,7 GHz, 2,6 GHz và 28 GHz.

Kết quả cho thấy SNR suy giảm đơn điệu khi khoảng cách truyền tăng, phù hợp với diễn giải từ Hình 3.3. Tuy nhiên, điều quan trọng hơn không chỉ nằm ở xu thế giảm mà ở độ dốc chênh giữa các băng tần. Băng 0,7 GHz duy trì SNR cao nhất trên toàn miền khoảng cách, kế đến là 2,6 GHz, còn 28 GHz giảm nhanh nhất. Ở đây có thể quan sát rất rõ hai lớp hành vi khác nhau của 5G NR: lớp phủ rộng của FR1 và lớp phủ ngắn của FR2.

Từ góc nhìn hệ thống, SNR cao hơn đồng nghĩa với khả năng duy trì BER thấp hơn, xác suất dừng nhỏ hơn và khả năng mở rộng điều chế - mã hóa tốt hơn. Do đó, Hình 3.3 không chỉ phản ánh chất lượng kênh, mà còn dự báo trước kết quả của các kịch bản BER và outage. Đây là lý do vì sao phần đánh giá SNR được đặt trước phần đánh giá độ tin cậy truyền dẫn.

Một nhận xét có ý nghĩa triển khai là 2,6 GHz thể hiện vai trò trung gian khá rõ. Nó không đạt vùng phủ mạnh như 0,7 GHz nhưng cũng không suy giảm khắc nghiệt như 28 GHz. Điều này lý giải vì sao các băng tần trung FR1 thường được sử dụng như lớp năng lực chính của mạng 5G: đủ rộng về băng thông để tăng dung lượng, nhưng chưa đòi hỏi mật độ trạm quá cao như mmWave.

3.2.3. Ảnh hưởng của băng tần FR1 và FR2

Từ hai tiểu mục trên có thể rút ra rằng khác biệt giữa FR1 và FR2 không chỉ là khác biệt về giá trị tần số. Đó là khác biệt về cả triết lý triển khai. Với FR1, liên kết có xu hướng ổn định hơn theo khoảng cách, chịu suy hao nhỏ hơn và phù hợp với mục tiêu vùng phủ rộng. Với FR2, đổi lại là tiềm năng băng thông lớn hơn nhưng chất lượng liên kết giảm nhanh nếu không có các kỹ thuật hỗ trợ.

Trong bối cảnh đề án này, FR1 là nền thích hợp để quan sát các chỉ tiêu BER và outage trong một miền khoảng cách rộng, còn FR2 cho phép bộc lộ rõ giới hạn của liên kết khi suy hao tăng. Chính sự tương phản này làm cho chương mô phỏng có giá trị giải thích. Nếu chỉ khảo sát một băng tần duy nhất, sẽ khó chỉ ra được bản chất của đánh đổi vùng phủ - dung lượng trong 5G NR.

Một góc nhìn thận trọng cũng cần được nêu ra. Việc FR2 cho kết quả kém hơn trong mô hình hiện tại không có nghĩa là FR2 không phù hợp với 5G NR. Ngược lại, điều đó chỉ cho thấy FR2 không nên được đánh giá bằng cùng một kiến trúc liên kết cơ sở như FR1. Khi đưa vào beamforming hẹp, Massive MIMO, định hướng chùm và triển

khai hotspot cự ly ngắn, FR2 vẫn có vai trò quan trọng. Vì vậy, kết quả ở đây nên được hiểu là giới hạn nền của FR2 khi chưa kích hoạt các cơ chế bù suy hao.

3.3. Đánh giá độ tin cậy truyền dẫn

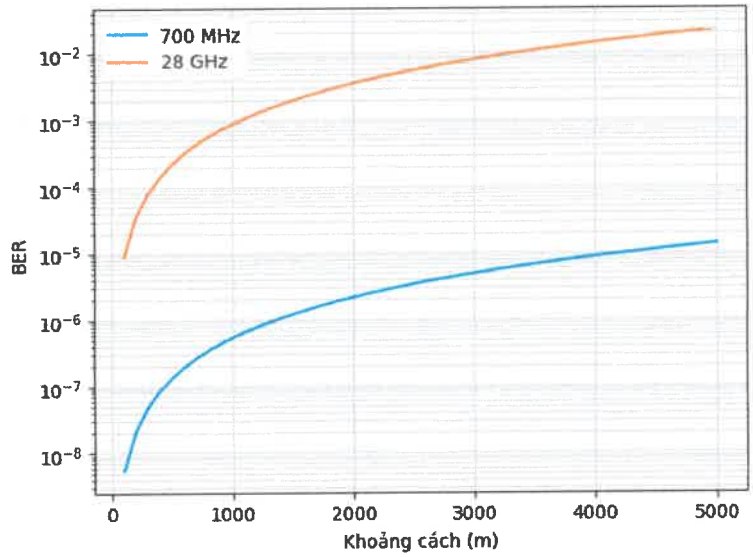
3.3.1. BER của QPSK trong kênh Rayleigh

Sau SNR, chỉ tiêu quan trọng tiếp theo là BER vì đây là đại lượng phản ánh trực tiếp độ tin cậy của bit ở lớp vật lý. Trong đề án, điều chế QPSK được chọn làm cấu hình cơ sở do tính ổn định và khả năng phản ánh khá rõ mối liên hệ giữa SNR và xác suất lỗi trong kênh Rayleigh. BER trung bình của QPSK trên kênh Rayleigh phẳng được tính theo biểu thức:

$$BER_{QPSK,Rayleigh} = \frac{1}{2}\left(1 - \sqrt{\frac{\gamma}{1+\gamma}}\right) \tag{3.4}$$

Biểu thức trên cho thấy BER giảm khi SNR tăng, nhưng tốc độ giảm phụ thuộc mạnh vào vùng SNR đang xét. Ở vùng SNR thấp, chỉ một thay đổi nhỏ của SNR cũng có thể làm BER thay đổi đáng kể. Điều này đặc biệt quan trọng với các liên kết biên tế bào hoặc các liên kết FR2 không có tăng ích anten định hướng.

Hình 3.4 trình bày BER theo khoảng cách của QPSK tại hai băng tần đại diện là 700 MHz và 28 GHz. Việc chỉ chọn hai băng tần ở đây nhằm làm nổi bật sự tương phản giữa một cấu hình FR1 có vùng phủ tốt và một cấu hình FR2 nhạy với suy hao.



Hình 3.4: BER của điều chế QPSK trong kênh Rayleigh theo khoảng cách đối với các băng tần 700 MHz và 28 GHz.

(Nguồn: [1], [2].)

Kết quả cho thấy BER tăng dần khi khoảng cách tăng đối với cả hai trường hợp khảo sát. Xu hướng này là hệ quả trực tiếp của việc SNR suy giảm theo khoảng cách. Tuy nhiên, mức độ tăng giữa hai băng tần là rất khác nhau. Ở 700 MHz, BER duy trì rất thấp trên hầu hết miền khoảng cách; trong khi ở 28 GHz, BER tăng nhanh hơn nhiều và sớm đi vào vùng không còn phù hợp với các dịch vụ đòi hỏi độ tin cậy cao.

Từ góc nhìn kỹ thuật, Hình 3.4 xác nhận một luận điểm quan trọng: cùng một sơ đồ điều chế và cùng một mô hình nhiễu, chất lượng liên kết chịu chi phối mạnh bởi lớp phổ tần và điều kiện suy hao. Điều này có nghĩa là trong thiết kế hệ thống, điều chế - mã hóa không thể được lựa chọn độc lập với băng tần và cự ly phục vụ. Các kết quả BER vì vậy không chỉ là đặc tính của QPSK mà còn là phản ánh của toàn bộ chuỗi giả thiết mô hình.

3.3.2. Outage probability theo khoảng cách

Nếu BER mô tả mức lỗi trung bình ở lớp bit, thì outage probability mô tả xác suất liên kết rơi xuống dưới một ngưỡng chất lượng tối thiểu. Đây là chỉ tiêu đặc biệt hữu ích khi đánh giá tính sẵn sàng của liên kết trong môi trường fading, bởi ngay cả khi SNR trung bình còn chấp nhận được, các hiện thực kênh xấu vẫn có thể làm kết nối không đáp ứng được yêu cầu dịch vụ.

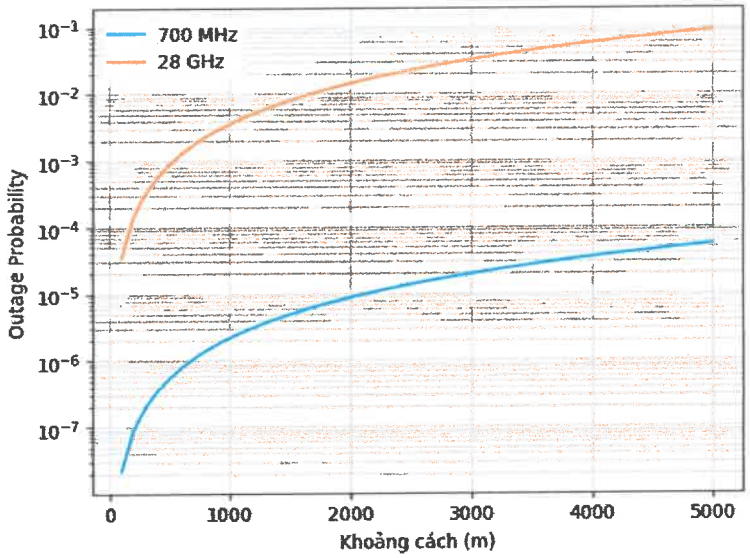
Với ngưỡng SNR γ_{th} đã chọn, xác suất dừng được định nghĩa là:

$$P_{out} = Pr\{\gamma < \gamma_{th}\} \tag{3.5}$$

Trong kênh Rayleigh phẳng, SNR tức thời có phân bố mũ, do đó outage probability có thể viết dưới dạng:

$$P_{out} = 1 - e^{-\frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}}} \tag{3.6}$$

Hình 3.5 biểu diễn outage probability theo khoảng cách đối với 700 MHz và 28 GHz trong cùng cấu hình ngưỡng 0 dB. Đây là một góc nhìn bổ sung cho Hình 3.3: thay vì hỏi liên kết bị lỗi bit nhiều đến đâu, ta hỏi liên kết có rơi xuống dưới ngưỡng chấp nhận được hay không.



Hình 3.5: Xác suất dừng theo khoảng cách truyền đối với các băng tần 700 MHz và 28 GHz trong kênh Rayleigh.

(Nguồn: [1], [2].)

Đồ thị cho thấy outage probability tăng theo khoảng cách ở cả hai trường hợp, nhưng đường cong 28 GHz tăng nhanh hơn nhiều so với 700 MHz. Điều này hoàn toàn nhất quán với phân tích SNR và BER trước đó. Khi SNR trung bình giảm, vùng phân bố của SNR tức thời cũng dịch xuống, làm xác suất rơi dưới ngưỡng tăng mạnh. Nói cách khác, outage là biểu hiện xác suất của cùng một cơ chế vật lý đã thấy ở Hình 3.3 và Hình 3.4.

Về ý nghĩa mạng, outage probability có liên hệ trực tiếp với trải nghiệm người dùng ở vùng biên tế bào. Một liên kết có BER trung bình chưa quá xấu nhưng outage lớn vẫn là liên kết khó khai thác ổn định, vì các đợt suy giảm sâu có thể làm gián đoạn truyền dẫn hoặc buộc bộ lập lịch phải hạ chế độ điều chế - mã hóa. Do đó, kết quả outage giúp phần thảo luận cuối chương chuyển từ bình diện vật lý sang bình diện vận hành mạng.

3.3.3. Nhận xét về chất lượng liên kết vô tuyến

Tổng hợp ba chỉ tiêu FSPL, SNR và BER cho thấy chất lượng liên kết trong mô hình đang xét phụ thuộc trước hết vào khoảng cách và lớp phổ tần. Ở FR1, liên kết duy trì được trạng thái vận hành ổn định trên miền khoảng cách rộng hơn, phản ánh qua SNR cao hơn, BER thấp hơn và outage nhỏ hơn. Ngược lại, FR2 chỉ duy trì được liên kết tốt trong vùng cự ly ngắn hơn hoặc khi có thêm các cơ chế hỗ trợ không được đưa vào mô hình cơ sở.

Từ góc độ mô phỏng, điểm mạnh của kết quả là các chỉ tiêu đều kể cùng một câu chuyện vật lý. Không xuất hiện mâu thuẫn giữa SNR, BER và outage. Điều này cho thấy bộ mô hình đang nhất quán nội tại. Trong một luận văn theo hướng đánh giá hiệu năng, sự nhất quán này quan trọng không kém giá trị tuyệt đối của từng chỉ tiêu riêng lẻ, vì nó bảo đảm rằng kết luận rút ra là kết luận của hệ thống chứ không phải của một đồ thị đơn lẻ.

Tuy nhiên, cũng cần nhìn nhận rõ giới hạn của độ tin cậy trong mô hình hiện tại. Các kết quả trên mới phản ánh đường xuống một ăng-ten, chưa xét đến phân tập không gian, mã hóa kênh thích nghi, beamforming hay lập lịch phụ thuộc chất lượng kênh. Do đó, nếu áp dụng các kỹ thuật này, đường cong BER và outage thực tế có thể cải thiện đáng kể. Phần mô phỏng ở đây vì vậy nên được xem là nền cơ sở để so sánh chứ chưa phải trần hiệu năng của 5G NR.

3.4. So sánh hiệu năng OFDMA và NOMA

3.4.1. Mô hình so sánh và các giả thiết

Phần này chuyển trọng tâm từ đặc tính liên kết đơn sang cơ chế khai thác tài nguyên vô tuyến. Kịch bản so sánh được xây dựng cho hai người dùng có chất lượng kênh khác nhau rõ rệt, tức kịch bản near-far. Đây là bối cảnh điển hình để phân biệt OFDMA và NOMA, vì OFDMA phân chia tài nguyên trực giao còn NOMA dựa vào chồng công suất và SIC để khai thác sự khác biệt kênh.

Để bảo đảm công bằng, tổng băng thông và tổng công suất phát được giữ không đổi giữa hai phương án. OFDMA cấp phát mỗi người dùng một nửa tài nguyên thời gian - tần số, trong khi NOMA phục vụ đồng thời hai người dùng trên cùng tài nguyên và phân bổ công suất ưu tiên cho người dùng xa. Theo logic thiết kế này, NOMA chỉ thực sự có lợi khi chênh lệch kênh đủ lớn và quá trình SIC ở người dùng gần hoạt động hiệu quả.

Bảng 3.2: Các giả thiết so sánh giữa OFDMA và NOMA

Nội dung	Cấu hình	Mục đích
Số người dùng	2 UE	Làm rõ trực tiếp hiệu ứng near-far mà không làm mô hình quá phức tạp
Phân bố kênh	Một UE gần, một UE xa	Tạo chênh lệch kênh cho so sánh OFDMA - NOMA

Nội dung	Cấu hình	Mục đích
OFDMA	Chia đều 50% tài nguyên cho mỗi UE	Giữ trực giao và tránh nhiễu đồng tài nguyên
NOMA	Phục vụ đồng thời trên cùng tài nguyên	Khai thác chồng công suất và SIC
Phân bổ công suất NOMA	UE xa nhận công suất lớn hơn	Bù cho bất lợi đường truyền của UE xa
SIC	Giả thiết lý tưởng ở cấu hình cơ sở	Tập trung vào bản chất cơ chế trước khi xét lỗi SIC
Chỉ tiêu chính	Sum-rate và BER	Đánh giá đồng thời hiệu quả phổ và độ tin cậy

Mô hình so sánh được chọn theo hướng tối giản nhưng đủ đại diện. Nếu đưa quá nhiều người dùng, quá nhiều lớp lập lịch hoặc quá nhiều cơ chế thích nghi vào cùng lúc, sẽ khó tách được đóng góp riêng của OFDMA và NOMA. Ngược lại, cấu hình hai người dùng near-far giúp chỉ ra đúng bản chất của bài toán: NOMA có tận dụng được sự không đối xứng kênh hay không.

3.4.2. So sánh thông lượng

Từ góc nhìn thông lượng, OFDMA và NOMA khác nhau ngay ở cách sử dụng tài nguyên. Với OFDMA, thông lượng của mỗi người dùng tỷ lệ với phần tài nguyên được cấp. Nếu β_k là phần tài nguyên của người dùng k, tốc độ lý thuyết có thể viết:

$$R_k^{OFDMA} = \beta_k Blog2(1 + \gamma_k) \tag{3.7}$$

Với bài toán hai người dùng chia đều tài nguyên, tổng thông lượng của OFDMA trở thành:

$$R_{sum}^{OFDMA} = \sum_k \beta_k \, Blog2(1 + \gamma_k), \beta_1 = \beta_2 = \frac{1}{2} \tag{3.8}$$

Đối với NOMA miền công suất, hai người dùng cùng sử dụng một khối tài nguyên. Người dùng xa được ưu tiên công suất để bảo đảm khả năng giải điều chế, còn người dùng gần thực hiện SIC trước khi giải mã dữ liệu của chính mình. Trong cấu hình hai người dùng, thông lượng có thể diễn giải theo dạng:

$$R_{sum}^{NOMA} = Blog2\left(1 + SNR_{far}\right) + Blog2(1 + SNR_{near}, post - SIC) \tag{3.9}$$

Từ các biểu thức trên có thể thấy NOMA có tiềm năng tăng sum-rate khi chất lượng kênh giữa hai người dùng khác nhau đủ lớn. Khi đó, việc cấp nhiều công suất hơn cho UE xa không làm triệt tiêu hoàn toàn lợi thế của UE gần, bởi UE gần vẫn có thể thu được tốc độ khá cao sau SIC. Ngược lại, nếu kênh của hai UE gần giống nhau hoặc SIC không đủ tốt, lợi ích sum-rate của NOMA thu hẹp nhanh và OFDMA trở thành phương án ổn định hơn.

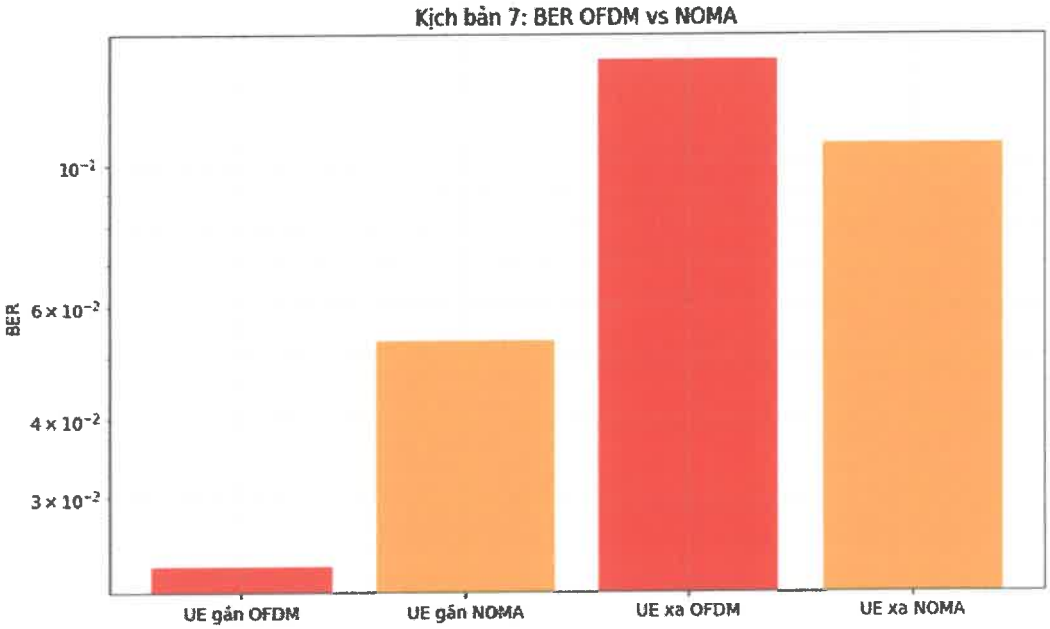
Do cấu hình mô phỏng gốc của đề án không trình bày riêng một đồ thị sum-rate chi tiết, phần này được diễn giải theo đúng các giả thiết và công thức đã xây dựng. Về mặt khoa học, cách trình bày này vẫn có giá trị vì nó chỉ ra rõ điều kiện để NOMA có thể vượt OFDMA: phải tồn tại sự phân hóa kênh, phải có phân bổ công suất hợp lý và phải chấp nhận độ phức tạp SIC ở phía thu. Nếu một trong ba điều kiện này không thỏa, ưu thế thông lượng của NOMA sẽ suy giảm.

Nói cách khác, thông lượng không nên được diễn giải như một thuộc tính mặc định của kỹ thuật truy nhập. Nó là kết quả của tương tác giữa kỹ thuật truy nhập, cấu hình công suất và cấu trúc người dùng trong ô. Nhận xét này có ý nghĩa thực tiễn vì nó nhắc rằng NOMA không phải lựa chọn thay thế tuyệt đối cho OFDMA, mà là lựa chọn có điều kiện triển khai.

3.4.3. So sánh BER

Bên cạnh thông lượng, đề án đánh giá thêm BER để kiểm tra xem lợi ích phổ của NOMA có phải đánh đổi bằng độ tin cậy hay không. Kịch bản mô phỏng sử dụng điều chế QPSK trên kênh Rayleigh với hai người dùng có chất lượng kênh khác nhau. Ở OFDMA, mỗi người dùng được phục vụ trên phần tài nguyên riêng; ở NOMA, người dùng xa nhận công suất lớn hơn và người dùng gần thực hiện SIC.

Hình 3.6 thể hiện BER của hai kỹ thuật đối với UE gần và UE xa trong cấu hình hai người dùng. Đây là đồ thị quan trọng vì nó cho phép đánh giá đồng thời hai phía của đánh đổi: bên nào hưởng lợi, bên nào chịu chi phí khi chuyển từ trực giao sang chồng công suất.



Hình 3.6: So sánh BER giữa OFDMA và NOMA đối với UE gần và UE xa trong kịch bản hai người dùng.

(Nguồn: tác giả mô phỏng bằng MATLAB")

Kết quả cho thấy NOMA cải thiện BER của UE xa so với OFDMA trong cấu hình đang xét. Đây là hệ quả trực tiếp của việc UE xa được cấp công suất lớn hơn, tức được bù một phần bất lợi đường truyền bằng thiết kế truy nhập. Trong khi đó, BER của UE gần trong NOMA có thể cao hơn so với OFDMA vì phải chia sẻ công suất và chịu ràng buộc bởi bước SIC. Như vậy, NOMA không xóa bỏ đánh đổi về độ tin cậy mà tái phân bổ đánh đổi đó theo hướng có lợi hơn cho người dùng yếu.

Từ góc nhìn hệ thống, đây là điểm khác biệt quan trọng giữa OFDMA và NOMA. OFDMA có xu hướng đối xử trung tính hơn với các người dùng, nhưng trong kịch bản near-far, tính trung tính đó lại khiến UE xa khó đạt chất lượng tốt. NOMA chủ động phá vỡ tính đối xứng bằng phân bổ công suất để kéo chất lượng của UE xa lên. Chính vì vậy, NOMA đặc biệt có ý nghĩa trong các tình huống người dùng trong cùng ô có mức suy hao rất khác nhau.

3.4.4 So sánh theo người dùng gần và người dùng xa

Khi tách riêng theo vị trí người dùng, có thể thấy hai kỹ thuật phục vụ hai nhóm UE theo những triết lý khác nhau. OFDMA thuận lợi với UE gần vì người dùng này đã có kênh tốt và không cần chia sẻ công suất hay xử lý SIC. Tuy nhiên, UE xa trong OFDMA chịu bất lợi kép: vừa có kênh yếu, vừa chỉ nhận một phần tài nguyên như UE

gần. Trong môi trường Rayleigh, bất lợi này chuyển trực tiếp thành BER lớn hơn và thông lượng hiệu dụng thấp hơn.

Ngược lại, NOMA được thiết kế để xử lý chính tình huống phân hóa đó. UE xa nhận công suất cao hơn, vì thế chất lượng liên kết được cải thiện so với OFDMA. UE gần phải gánh thêm độ phức tạp SIC và có thể không còn đạt BER tốt như trong OFDMA, nhưng do kênh vốn đã mạnh, UE gần vẫn duy trì được chất lượng chấp nhận được. Nói cách khác, NOMA dịch một phần lợi thế của UE gần sang UE xa nhằm tăng công bằng và tận dụng tốt hơn tài nguyên chung.

Nhận xét này cho thấy không nên đánh giá OFDMA và NOMA chỉ bằng một chỉ tiêu sum-rate duy nhất. Nếu chỉ nhìn tổng thông lượng, có thể bỏ qua việc một kỹ thuật nào đó đang đẩy chất lượng của một nhóm người dùng xuống thấp hơn mức chấp nhận được. Vì vậy, so sánh theo người dùng gần và người dùng xa là bước cần thiết để bảo đảm rằng kết luận về hiệu năng có ý nghĩa vận hành, chứ không chỉ có ý nghĩa lý thuyết.

3.4.5 Thảo luận về ưu điểm và hạn chế của từng kỹ thuật

Từ toàn bộ phần so sánh có thể rút ra rằng OFDMA có ưu điểm nổi bật ở tính đơn giản, tính trực giao và độ ổn định trong các điều kiện kênh không thuận lợi cho SIC. Đây vẫn là lý do căn bản khiến OFDMA trở thành cơ chế nền trong đường xuống của 5G NR. Khi mục tiêu chính là vận hành ổn định, dễ lập lịch và dễ kiểm soát giao thoa, OFDMA là phương án hợp lý.

Trong khi đó, ưu điểm của NOMA xuất hiện mạnh hơn ở các kịch bản người dùng không đồng đều về chất lượng kênh. Khi có hiệu ứng near-far rõ, NOMA có thể nâng chất lượng cho UE xa và cải thiện hiệu quả khai thác phổ, với điều kiện việc phân bổ công suất được thiết kế phù hợp và SIC đủ tin cậy. NOMA vì thế mang tính cơ hội nhiều hơn: nó không phải luôn tốt hơn, nhưng có thể tốt hơn đáng kể trong đúng bối cảnh.

Hạn chế của NOMA cũng cần được nêu thẳng. Lợi ích của NOMA không miễn phí, mà đổi lại bằng độ phức tạp thu, độ nhạy với lỗi SIC, yêu cầu ước lượng kênh chính xác hơn và khó mở rộng khi số lớp chồng công suất tăng. Từ góc nhìn triển khai, đây là lý do khiến NOMA dù giàu tiềm năng về nghiên cứu vẫn cần được chọn lọc kịch bản ứng dụng thay vì xem là cơ chế thay thế phổ quát cho OFDMA.

3.5. Thảo luận kết quả và hàm ý triển khai

3.5.1. Liên hệ giữa mô hình kênh và kết quả mô phỏng

Một điểm mạnh của bộ kết quả trong chương này là các đồ thị đều có thể giải thích nhất quán từ mô hình kênh đã xây dựng trước đó. FSPL và suy hao do mưa làm công suất thu giảm theo khoảng cách và tần số; fading Rayleigh làm SNR tức thời dao động; còn AWGN xác lập nền nhiễu của hệ thống. Từ chuỗi tác động đó, SNR trung bình suy giảm, BER tăng và outage probability tăng. Sự nhất quán này cho thấy các nhận xét ở Chương 3 bám sát mô hình nghiên cứu chứ không chỉ dựa trên quan sát rời rạc từ từng đồ thị.

Điều này đặc biệt quan trọng trong các luận văn theo hướng mô phỏng, vì đồ thị đẹp chưa đủ để tạo ra kết luận có giá trị. Giá trị khoa học nằm ở chỗ đồ thị phải kể lại đúng hành vi đã được dự đoán bởi mô hình. Trong chương này, các kết quả không mâu thuẫn với cấu trúc lý thuyết. Đây là cơ sở để tin rằng phần so sánh OFDMA - NOMA cũng được đặt trên một nền mô hình hợp lệ.

Một hệ quả khác là khi cần cải thiện hiệu năng, ta cũng có thể truy ngược lại đúng lớp nguyên nhân. Nếu vấn đề chính là suy hao đường truyền của FR2, các cơ chế cần ưu tiên là beamforming, mật độ trạm và quản lý vùng phủ. Nếu vấn đề chính là phân hóa chất lượng người dùng, các cơ chế như NOMA hoặc lập lịch bất đối xứng mới trở nên có ý nghĩa. Sự tách lớp nguyên nhân này giúp chương thảo luận không rơi vào khuyến nghị chung chung.

3.5.2. Ý nghĩa đối với triển khai thực tế

Ở góc nhìn triển khai, kết quả mô phỏng gợi ra ba hàm ý rõ ràng. Thứ nhất, FR1 vẫn là lớp phổ nền cho vùng phủ rộng và tính sẵn sàng liên kết, đặc biệt đối với các dịch vụ yêu cầu kết nối ổn định. Thứ hai, FR2 chỉ nên được khai thác hiệu quả trong các kịch bản cự ly ngắn, hotspot hoặc khi có tăng ích anten đủ lớn để bù suy hao. Thứ ba, NOMA chỉ có ý nghĩa rõ rệt khi trong ô tồn tại sự phân hóa kênh đủ lớn giữa các UE.

Từ góc độ hoạch định vô tuyến, điều này dẫn đến một cách nhìn thực dụng hơn về 5G NR. Hệ thống không nên được tối ưu theo một trục duy nhất như chỉ tiêu tốc độ cực đại. Thay vào đó, cần phân lớp mục tiêu: lớp vùng phủ cần ưu tiên FR1 và cấu hình ổn định; lớp dung lượng cục bộ có thể dùng FR2; lớp phục vụ người dùng không đồng đều có thể cân nhắc NOMA hoặc các cơ chế lập lịch có nhận thức chất lượng kênh. Đó là cách kết quả mô phỏng trong chương này chuyển hóa thành hàm ý thiết kế mạng.

Một hệ quả vận hành nữa là việc đánh giá hiệu năng nên được thực hiện bằng bộ chỉ tiêu đa chiều thay vì chỉ một chỉ tiêu duy nhất. Ví dụ, một cấu hình có sum-rate cao nhưng outage lớn ở vùng biên tế bào chưa chắc là cấu hình phù hợp cho triển khai diện rộng. Tương tự, một cơ chế làm lợi cho UE xa nhưng làm suy giảm quá mạnh UE gần cũng cần được xem xét lại dưới góc độ công bằng và chất lượng trải nghiệm tổng thể.

3.5.3. Giới hạn của mô hình nghiên cứu

Ba giới hạn của mô hình nghiên cứu được nêu ra không nhằm làm suy yếu kết quả của đề án, mà để xác định đúng phạm vi hiệu lực của kết luận. Giới hạn thứ nhất là kênh được rút gọn về Rayleigh phẳng NLOS, chưa phản ánh đầy đủ cấu trúc không gian - thời gian của các mô hình 3GPP như TR 38.901. Giới hạn thứ hai là mô hình chưa kích hoạt các cơ chế trọng yếu của 5G như beamforming, Massive MIMO, HARQ và lập lịch phụ thuộc CSI. Giới hạn thứ ba là phần so sánh NOMA mới dừng ở cấu hình hai người dùng với SIC lý tưởng.

Ý nghĩa của việc nêu rõ các giới hạn này là để chỉ ra hướng khắc phục trong các bước nghiên cứu tiếp theo. Cụ thể, có thể mở rộng mô hình sang kênh Rician hoặc kênh chuẩn hóa theo 3GPP để tăng mức độ gần thực tế; bổ sung beamforming, MIMO và mã hóa thích nghi để đánh giá lại vị thế tương đối giữa FR1 và FR2; đồng thời mô hình hóa sai số CSI và SIC không hoàn hảo để kiểm tra độ bền thực sự của NOMA. Nói cách khác, các giới hạn được nêu ra nhằm định vị đề án như một nghiên cứu nền tảng ở cấp liên kết, đồng thời mở ra lộ trình phát triển rõ ràng hơn.

Với cách hiểu đó, phần giới hạn của mô hình có vai trò hai mặt: một mặt, nó nhắc rằng kết luận hiện tại chỉ đúng trong phạm vi cấu hình đã khảo sát; mặt khác, nó chỉ ra trực tiếp những thành phần cần được bổ sung nếu muốn tiến tới một bộ đánh giá hệ thống hoàn chỉnh hơn.

Việc xác định rõ phạm vi hiệu lực và hướng khắc phục làm cho phần thảo luận có tính khoa học chặt chẽ hơn. Trong nghiên cứu mô phỏng, một kết luận được giới hạn đúng và có lộ trình mở rộng rõ ràng luôn có giá trị hơn một kết luận bao quát nhưng vượt quá năng lực giải thích của mô hình.

Việc nêu rõ giới hạn không làm suy yếu kết quả của chương mà ngược lại giúp xác định đúng phạm vi hiệu lực của kết luận. Trong nghiên cứu mô phỏng, một kết luận được giới hạn đúng luôn có giá trị hơn một kết luận bao quát nhưng vượt ngoài mô hình.

Đây cũng là điểm giúp Chương 3 giữ được tính học thuật chặt chẽ và liền mạch với hai chương trước.

3.6. Kết luận chương 3

Chương 3 đã xây dựng và triển khai một hệ kịch bản mô phỏng nhất quán để đánh giá hiệu năng đường xuống 5G NR trong kênh Rayleigh NLOS. Kết quả cho thấy suy hao đường truyền tăng theo khoảng cách và tần số là nguyên nhân nền dẫn tới suy giảm SNR, tăng BER và tăng outage probability. Trên cơ sở đó, sự khác biệt giữa FR1 và FR2 được bộc lộ rõ: FR1 phù hợp hơn cho vùng phủ rộng và độ ổn định liên kết, trong khi FR2 nhạy với suy hao hơn và cần các cơ chế bù như beamforming hoặc mật độ trạm dày để khai thác hiệu quả.

Phần so sánh OFDMA và NOMA cho thấy hai cơ chế không đối lập tuyệt đối mà phù hợp với các điều kiện khác nhau. OFDMA có ưu thế về tính ổn định và đơn giản, còn NOMA thể hiện lợi ích rõ hơn khi tồn tại chênh lệch kênh near-far và khi hệ thống có thể chấp nhận độ phức tạp SIC. Từ kết quả này, có thể rút ra hàm ý rằng đánh giá hiệu năng 5G NR cần được thực hiện trong một khung đa chỉ tiêu và gắn chặt với bối cảnh triển khai thực tế, thay vì tách rời theo từng kỹ thuật đơn lẻ.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Đề án này đã hoàn thành ba mục tiêu nghiên cứu đã đặt ra. Thứ nhất, đề án đã hệ thống hóa được cơ sở lý thuyết liên quan đến đường xuống 5G NR, làm rõ vai trò của OFDMA như kỹ thuật nền của 5G NR, vị trí nghiên cứu của NOMA và cơ sở lựa chọn mô hình kênh Rayleigh cho một bài toán so sánh ở cấp liên kết. Thứ hai, đề án đã xây dựng được một mô hình mô phỏng nhất quán giữa kênh truyền, cơ chế đa truy nhập và các chỉ tiêu đánh giá chính. Thứ ba, trên cơ sở mô phỏng, đề án đã rút ra được các nhận xét định lượng về ảnh hưởng của khoảng cách, băng tần và cơ chế truy nhập đối với SNR, BER, outage probability và thông lượng.

Kết quả nghiên cứu cho thấy suy hao đường truyền tăng theo khoảng cách và tần số là nguyên nhân nền làm suy giảm chất lượng liên kết đường xuống. Trong cấu hình khảo sát, FR1 cho vùng phủ và độ ổn định liên kết tốt hơn FR2; còn FR2 muốn khai thác hiệu quả cần có thêm các cơ chế bù suy hao như beamforming hoặc mật độ trạm cao hơn. Đối với bài toán đa truy nhập, OFDMA thể hiện ưu thế về tính ổn định, độ đơn giản phía thu và tính phù hợp triển khai; trong khi NOMA chỉ bộc lộ lợi ích rõ hơn trong những tình huống có chênh lệch kênh near-far đủ lớn và khi hệ thống chấp nhận được độ phức tạp SIC.

Về ý nghĩa khoa học và ứng dụng, đề án không đưa ra một khẳng định tuyệt đối rằng NOMA thay thế OFDMA trong 5G NR, mà làm rõ logic đánh đổi giữa trực giao và phi trực giao trong một môi trường fading chuẩn nền. Điểm có giá trị của kết quả là đã chỉ ra được điều kiện mà mỗi kỹ thuật phù hợp hơn, đồng thời cung cấp một khung so sánh có thể dùng làm nền cho các nghiên cứu mở rộng về MIMO, beamforming, lỗi CSI hoặc các mô hình kênh chuẩn hóa hơn.

Bên cạnh các kết quả đạt được, đề án vẫn còn ba hạn chế chính: mô hình kênh chưa mở rộng sang các cấu trúc gần thực tế hơn như Rician hoặc TR 38.901; mô hình hệ thống chưa xét beamforming, Massive MIMO, HARQ và lập lịch thích nghi; và phần so sánh NOMA mới xét cấu hình hai người dùng với SIC lý tưởng. Các hạn chế này cần được nhìn nhận như ranh giới hiệu lực của kết luận hiện tại, đồng thời là các hướng mở rộng trực tiếp cho nghiên cứu tiếp theo.

Từ đó, kiến nghị nghiên cứu trong giai đoạn tiếp theo, học viên sẽ tiếp tục mở rộng bộ mô hình sang các kênh và cơ chế gần thực tế hơn; đánh giá lại OFDMA và NOMA dưới điều kiện CSI không hoàn hảo; khảo sát ảnh hưởng của nhiều người dùng hơn và của các chiến lược ghép cặp/phân bổ công suất; đồng thời gắn kết chặt hơn giữa kết quả cấp liên kết với các chỉ tiêu hệ thống. Theo nghĩa đó, đề án hiện tại đã hoàn thành vai trò của một nghiên cứu nền tảng, đủ cơ sở để phát triển thành các bước đánh giá sâu hơn và có tính ứng dụng cao hơn.

DANH MỤC TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] ITU-R, *Recommendation M.2083-0, IMT Vision - Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond,* 2015.

[2] ITU-R, *Report M.2410-0, Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface(s)*, 2017.

[3] 3GPP TS 38.300, *NR; NR and NG-RAN Overall description; Stage-2, Release 17, tài liệu chuẩn hóa 3GPP/ETSI.*

[4] 3GPP, *5G System Overview*, tài liệu tổng quan kỹ thuật liên kết với TS 23.501 và TS 23.502, tra cứu trực tuyến từ cổng công nghệ 3GPP.

[5] 3GPP, *TR 38.901, Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz, Release 16.*

[6] D. Tse and P. Viswanath, *Fundamentals of Wireless Communication*, Cambridge University Press, 2005.

[7] S. M. Riazul Islam, M. Zeng, O. A. Dobre, and K.-S. Kwak, *Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA): How It Meets 5G and Beyond*, 2019.

[8] C. E. Shannon, *A Mathematical Theory of Communication*, Bell System Technical Journal, vol. 27, pp. 379-423 and 623-656, 1948.

[9] A. Goldsmith, *Wireless Communications*, Cambridge University Press, 2005.

[10] D. Tse and P. Viswanath, *Fundamentals of Wireless Communication*, Cambridge University Press, 2005.

[11] 3GPP TS 38.300, *NR and NG-RAN Overall description*; Stage-2, Release 18, tài liệu chuẩn hóa 3GPP/ETSI được tra cứu trực tuyến.

[12] 3GPP TS 38.211, *NR; Physical channels and modulation, Release 17*, tài liệu chuẩn hóa 3GPP/ETSI được tra cứu trực tuyến.

[13] 3GPP TR 38.901, *Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz*, tài liệu kỹ thuật 3GPP dùng cho mô hình hóa kênh.

[14] ITU-R Recommendation P.525, *Calculation of free-space attenuation*, phiên bản được tra cứu trực tuyến từ cổng khuyến nghị ITU-R.

[15] ITU-R Recommendation P.838-3, *Specific attenuation model for rain for use in prediction methods*, 2005.

[16] M. K. Simon and M.-S. Alouini, *Digital Communication over Fading Channels*, 2nd ed., Wiley, 2005.

[17] L. Dai, B. Wang, Z. Ding, Z. Wang, S. Chen and L. Hanzo, *A Survey of Non-Orthogonal Multiple Access for 5G*, IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 20, no. 3, pp. 2294-2323, 2018.

[18] M. Aldababsa, M. Toka, S. Gökçeli, G. K. Kurt and O. Kucur, *A Tutorial on Nonorthogonal Multiple Access for 5G and Beyond*, Wireless Communications and Mobile Computing, 2018.

[19] C. E. Shannon, *"A Mathematical Theory of Communication,"* Bell System Technical Journal, vol. 27, pp. 379-423 và 623-656, 1948.

[20] A. Goldsmith, *Wireless Communications*, Cambridge University Press, 2005.

[21] D. Tse và P. Viswanath, *Fundamentals of Wireless Communication*, Cambridge University Press, 2005.

[22] M. K. Simon và M.-S. Alouini, *Digital Communication over Fading Channels*, 2nd ed., Wiley, 2005.

[23] 3GPP TS 38.300, *NR; NR and NG-RAN Overall Description; Stage-2*, phiên bản được tra cứu trực tuyến từ cổng 3GPP.

[24] 3GPP TS 38.211, *NR; Physical Channels and Modulation*, phiên bản được tra cứu trực tuyến từ cổng 3GPP.

[25] 3GPP TR 38.901, *Study on Channel Model for Frequencies from 0.5 to 100 GHz*, tài liệu kỹ thuật 3GPP về mô hình hóa kênh.

[26] ITU-R Recommendation P.525, *Calculation of Free-Space Attenuation*, phiên bản hiện hành được tra cứu trực tuyến từ cổng khuyến nghị ITU-R.

[27] ITU-R Recommendation P.838-3, *Specific Attenuation Model for Rain for Use in Prediction Methods*, 2005.

[28] 3GPP TS 38.521-1, *NR; User Equipment (UE) Conformance Specification; Radio Transmission and Reception; Part 1*, dùng làm mốc đối chiếu phân chia FR1 và FR2.

[29] L. Dai, B. Wang, Z. Ding, Z. Wang, S. Chen và L. Hanzo, "*A Survey of Non-Orthogonal Multiple Access for 5G,*" IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 20, no. 3, pp. 2294-2323, 2018.

[30] M. Aldababsa, M. Toka, S. Gökçeli, G. K. Kurt và O. Kucur, "*A Tutorial on Nonorthogonal Multiple Access for 5G and Beyond*," Wireless Communications and Mobile Computing, 2018.

KiểmTraTàiLiệu

BÁO CÁO KIỂM TRA TRÙNG LẶP

Thông tin tài liệu

Tên tài liệu:	DE_AN 20.3.2026(HA)
Tác giả:	Nguyen Thi Thu Ha
Điểm trùng lặp:	4
Thời gian tải lên:	21:10 22/03/2026
Thời gian sinh báo cáo:	21:12 22/03/2026
Các trang kiểm tra:	78/78 trang

Kết quả kiểm tra trùng lặp



Có 4% nội dung trùng lặp



Có 96% nội dung không trùng lặp



Có 0% nội dung người dùng loại trừ



Có 0% nội dung hệ thống bỏ qua

Nguồn trùng lặp tiêu biểu

123docz.net tailieu.vn arxiv.org

Học viên thực hiện

Nguyễn Thị Thu Hà

Giảng viên hướng dẫn

PGS, TS. Hoàng Trọng Minh

BỘ KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ
HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ
BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG

CỘNG HÒA XÃ HỘI CHỦ NGHĨA VIỆT NAM
Độc lập - Tự do - Hạnh phúc

BÁO CÁO GIẢI TRÌNH
SỬA CHỮA, HOÀN THIỆN ĐỀ ÁN TỐT NGHIỆP

Họ và tên học viên: **Nguyễn Thị Thu Hà**

Chuyên ngành: **Kỹ thuật Viễn thông**

Khóa: ...2023 đợt 2.

Tên đề tài: **Đánh giá hiệu năng 5G đường xuống với OFDMA và NOMA theo mô hình kênh Rayleigh**

Người hướng dẫn khoa học: **PGS.TS. Hoàng Trọng Minh**

Ngày bảo vệ: 27/03/2026

Trước tiên, Học viên xin trân trọng cám ơn những nhận xét, ý kiến đóng góp của quý Thầy, Cô. Sau khi nhận được nhận xét của Thầy/cô, Học viên đã nghiêm túc tiếp thu, xin ý kiến của người hướng dẫn khoa học để bổ sung và hoàn thiện đề án theo ý kiến kết luận của Thầy/cô trong hội đồng. Cụ thể như sau:

TT	Ý kiến hội đồng	Tiếp thu, bổ sung hoàn thiện trong đề án
1	Chỉnh sửa lỗi soạn thảo, lỗi chính tả, lỗi trình bày; rà soát đánh số hình/bảng, trích nguồn và danh mục chữ viết tắt.	Học viên đã rà soát toàn bộ đề án, sửa các lỗi chính tả, lỗi diễn đạt, lỗi trình bày; thống nhất lại cách đánh số hình/bảng, bổ sung nguồn cho các hình và bảng cần thiết, đồng thời sắp xếp lại danh mục ký hiệu và chữ viết tắt theo thứ tự phù hợp.
2	Tên một số chương, đề mục còn đặt chung chung; Chương 1 cần tập trung hơn vào tổng quan 5G đường xuống, còn các nội dung mục tiêu, phạm vi, phương pháp nên đưa về phần mở đầu hoặc trình bày rõ logic.	Học viên đã hiệu chỉnh lại tên các mục, tiểu mục theo hướng phản ánh sát nội dung hơn; đồng thời tinh gọn và cấu trúc lại phần đầu của đề án để làm rõ bối cảnh nghiên cứu, mục tiêu, đối tượng, phạm vi và phương pháp nghiên cứu.
3	Làm rõ lý do lựa chọn OFDMA và NOMA để nghiên cứu;	Học viên đã bổ sung phần giải trình về lý do chọn OFDMA và NOMA: OFDMA được chọn vì đây là kỹ thuật đa truy nhập nền của đường xuống 5G NR và là mốc so sánh bắt buộc đối với mọi phương án khác. NOMA được chọn vì là hướng truy nhập phi trực giao có tiềm năng cải thiện hiệu quả phổ trong các kịch bản chênh lệch kênh rõ.

TT	Ý kiến hội đồng	Tiếp thu, bổ sung hoàn thiện trong đề án
		Do đó, việc đặt OFDMA và NOMA vào cùng một mô hình kênh cho phép đánh giá một cách có hệ quy chiếu, thay vì so sánh các kỹ thuật không cùng vị thế chuẩn hóa. (Chi tiết tại mục 1.3.3 trang 18-19).
4	Trình bày ba loại dịch vụ cơ bản của 5G NR và làm rõ NOMA phù hợp hoặc chưa phù hợp với loại dịch vụ nào.	Về ba nhóm dịch vụ cơ bản của 5G NR và mức độ phù hợp của NOMA: eMBB ưu tiên thông lượng cao; uRLLC ưu tiên độ trễ cực thấp và độ tin cậy rất cao; mMTC ưu tiên kết nối mật độ lớn. Trong các nhóm này, NOMA có ý nghĩa hơn đối với một số tình huống eMBB quá tải và mMTC mật độ lớn, nơi việc tăng hiệu quả phổ hoặc phục vụ đồng thời nhiều người dùng có thể đem lại lợi ích. Ngược lại, NOMA kém phù hợp hơn với uRLLC nghiêm ngặt do cơ chế SIC làm tăng độ phức tạp thu và độ nhạy với lỗi.
5	Giải thích tại sao chọn kênh Rayleigh trong mô hình mô phỏng mà không chọn loại kênh khác.	Học viên đã bổ sung giải trình và chỉnh sửa nội dung liên quan để làm rõ rằng kênh Rayleigh được chọn, cụ thể: Rayleigh được sử dụng như mô hình fading chuẩn nền cho môi trường NLOS, đủ đơn giản để xây dựng mô phỏng lặp lại nhưng vẫn đủ nghiêm ngặt để bộc lộ ảnh hưởng của fading lên SNR, BER, outage probability và khả năng khai thác của OFDMA/NOMA. Đề án cũng đã nêu rõ đây không phải là mô hình bao trùm cho mọi kịch bản 5G, mà là lựa chọn có chủ đích để phục vụ một phép so sánh công bằng ở cấp liên kết. (Chi tiết tại mục 1.4.3 trang 23-24).
6	Làm rõ nguồn gốc hình vẽ và bảng biểu trong đồ án?	Học viên đã bổ sung giải thích rõ hơn về nguồn gốc hình vẽ và bảng biểu trong đề án, cụ thể: các bảng tổng hợp lý thuyết trong đề án được tác giả xây dựng lại từ các tài liệu tham khảo đã dẫn; các đồ thị kết quả ở Chương 3 là kết quả mô phỏng MATLAB của tác giả; các hình minh họa mang tính bối cảnh hoặc tổng quan đã được ghi rõ nguồn ngay dưới hình. Việc hiệu chỉnh bản thảo đã bổ sung và làm rõ hơn nguyên tắc ghi nguồn này trong nội dung đề án.
7	Làm rõ sự đồng nhất giữa mục tiêu, kết quả và kết luận của đề tài?	Học viên đã rà soát lại toàn bộ tuyến lập luận của đề án để bảo đảm sự thống nhất giữa mục tiêu nghiên cứu, mô hình đánh giá, kết quả mô phỏng

TT	Ý kiến hội đồng	Tiếp thu, bổ sung hoàn thiện trong đề án
		và các nhận xét rút ra. Đồng thời học viên đã viết lại toàn bộ phần Kết luận và kiến nghị theo đúng trọng tâm của đề án. Phần mới đã nêu rõ các kết quả chính đạt được, điều kiện mà OFDMA và NOMA thể hiện ưu thế, các giới hạn của mô hình nghiên cứu, ý nghĩa khoa học và ý nghĩa ứng dụng của kết quả, đồng thời bổ sung định hướng nghiên cứu và hoàn thiện trong thời gian tiếp theo.
8	Mục đích nêu ra 3 giới hạn trong mô hình nghiên cứu là gì ?	Các hàm ý triển khai ở Mục 3.5 là nhận định của tác giả rút ra từ kết quả mô phỏng và đối chiếu với mô hình lý thuyết, không phải các phát biểu chung chung tách rời khỏi kết quả. Ba giới hạn của mô hình được nêu ra nhằm xác định đúng phạm vi hiệu lực của kết luận và chỉ ra hướng khắc phục trực tiếp như mở rộng sang kênh 3GPP, bổ sung beamforming - MIMO, xét CSI không hoàn hảo và SIC không lý tưởng.

Hà Nội, ngày 13 tháng 04 năm 2026

CHỦ TỊCH HỘI ĐỒNG CHẤM ĐỀ ÁN	THƯ KÝ HỘI ĐỒNG	NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC	HỌC VIÊN
Lê Nhật Thăng	Nguyễn Thị Thu Hà	PGS.TS. Hoàng Trọng Minh	Nguyễn Thị Thu Hà

BỘ KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ
HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ
BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG

CỘNG HOÀ XÃ HỘI CHỦ NGHĨA VIỆT NAM
Độc lập - Tự do - Hạnh phúc

BIÊN BẢN
HỌP HỘI ĐỒNG CHẤM ĐỀ ÁN TỐT NGHIỆP THẠC SĨ

Căn cứ quyết định số Quyết định số 572/QĐ-HV ngày 18 tháng 03 năm 2026 của Giám đốc Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông về việc thành lập Hội đồng chấm đề án tốt nghiệp thạc sĩ. Hội đồng đã họp vào hồi 14 giờ 00 phút, ngày 27 tháng 03 năm 2026 tại Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông để chấm đề án tốt nghiệp thạc sĩ cho:

Học viên: **Nguyễn Thị Thu Hà**

Tên đề án tốt nghiệp: **Đánh giá hiệu năng 5G đường xuống với OFDMA và NOMA theo mô hình kênh Rayleigh**

Ngành: **KTVT** Mã số: **8.52.02.08**

Các thành viên của Hội đồng chấm đề án tốt nghiệp có mặt: ...../ 05

TT	HỌ VÀ TÊN	TRÁCH NHIỆM TRONG HĐ	GHI CHÚ
1	**PGS.TS. Lê Nhật Thăng**	Chủ tịch	
2	**TS. Nguyễn Thị Thu Hiên**	Thư ký	
3	**TS. Vương Đức Hạnh**	Phản biện 1	
4	**TS. Nguyễn Hồng Thủy**	Phản biện 2	
5	**PGS.TS. Lê Hải Châu**	Uỷ viên	

Các nội dung thực hiện:

1. Chủ tịch Hội đồng điều khiển buổi họp. Công bố quyết định của Giám đốc Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông về việc thành lập Hội đồng chấm đề án tốt nghiệp thạc sĩ.
2. Người hướng dẫn khoa học hoặc thư ký đọc lý lịch khoa học và các điều kiện bảo vệ đề án tốt nghiệp của học viên. (có bản lý lịch khoa học và kết quả các môn học cao học của học viên kèm theo).
3. Học viên trình bày tóm tắt đề án tốt nghiệp.
4. Phản biện 1 đọc nhận xét (có văn bản kèm theo)
5. Phản biện 2 đọc nhận xét (có văn bản kèm theo)
6. Các câu hỏi của thành viên Hội đồng:

① Giải thích lý do lựa chọn OFDMA và NOMA để nghiên cứu?
② Tại sao chọn tên Rayleigh để mô phỏng?
③ Làm rõ nguồn gốc của hình vẽ và bảng biểu trong đề án
④ Làm rõ mục đích nhất quán mục tiêu, kết quả và kết luận của đề tài
⑤ Mục đích nêu ra? giới hạn trong mô hình nghiên cứu là gì?

7. Trả lời của học viên:

— Mạng 5G hỗ trợ cho 3 dịch vụ chính, dịch vụ phù hợp với NOMA với dịch vụ kết nối đồng loạt.

— Lý do chọn kênh Rayleigh: phù hợp điều kiện mô hình truyền thực tế.

— OFDMA & NOMA: do 2 kỹ thuật có góc nhìn các khác nhau; việc so sánh giúp có thể giữ 2 kỹ thuật này.

8. Thư ký đọc nhận xét về quá trình thực hiện đề án tốt nghiệp của học viên *(có văn bản kèm theo).*

9. Hội đồng họp riêng:

- Bầu Ban kiểm phiếu:
  1. Trưởng Ban kiểm phiếu: TS. Nguyễn Hồng Thuý
  2. Uỷ viên Ban kiểm phiếu: TS. Trần Đức Hạnh
  3. Uỷ viên Ban kiểm phiếu: TS. Nguyễn Thị Thu Hiền
- Hội đồng chấm đề án tốt nghiệp bằng bỏ phiếu kín.
- Ban kiểm phiếu làm việc:
- Trưởng Ban kiểm phiếu báo cáo kết quả kiểm phiếu *(có Biên bản họp Ban kiểm phiếu kèm theo)*
- **Điểm trung bình của đề án tốt nghiệp:** 7,0

Kết luận:

1. Các nội dung cần chỉnh sửa, hoàn thiện sau bảo vệ đề án tốt nghiệp:

— Rà soát lại trình bày nội dung đề án để trình bày mạch lạc và hợp lý hơn.

— Chỉnh sửa, hoàn thiện theo ý kiến đóng góp của các phản biện và thành viên hội đồng.

2. Đề nghị Học viện công nhận (~~hoặc không~~) và cấp bằng (~~hoặc không~~) thạc sĩ cho học viên: .....

3. Đề án tốt nghiệp có thể phát triển thành đề tài nghiên cứu cho NCS.....

Buổi làm việc kết thúc vào..... cùng ngày.

Chủ tịch

Lê Nhật Thăng

Thư ký

Nguyễn Thị Thu Hiền

CỘNG HÒA XÃ HỘI CHỦ NGHĨA VIỆT NAM
Độc lập – Tự do – Hạnh phúc

BẢN NHẬN XÉT ĐỀ ÁN TỐT NGHIỆP THẠC SĨ

(Dùng cho người phản biện)

Tên đề tài đề án tốt nghiệp: **Đánh giá hiệu năng 5G đường xuống với OFDMA và NOMA theo mô hình kênh Rayleigh**

Chuyên ngành: Kỹ thuật Viễn thông

Mã chuyên ngành: 8.52.02.08

Họ và tên học viên: **Nguyễn Thị Thu Hà**

Họ và tên người nhận xét: **Lê Hải Châu**

Học hàm, học vị: Phó giáo sư, Tiến sĩ

Chuyên ngành: Kỹ thuật điện và Khoa học máy tính

Cơ quan công tác: Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông

Số điện thoại: 0911465080; E-mail: chaulh@ptit.edu.vn

NỘI DUNG NHẬN XÉT

I/ Cơ sở khoa học và thực tiễn, tính cấp thiết của đề tài

Trong thời gian gần đây, mạng 5G đang được triển khai rộng rãi và hướng tới 6G, nhu cầu về tốc độ dữ liệu cực cao, độ trễ cực thấp và mật độ kết nối lớn đặt ra những thách thức chưa từng có. Công nghệ 5G đang ở giai đoạn mở rộng phủ sóng, trong khi các tiêu chuẩn cho 5G-Advanced (3GPP Release 18 trở đi) đã chính thức bắt đầu với mục tiêu nâng cao hiệu suất phổ tần, giảm độ trễ và hỗ trợ các dịch vụ mới như XR (thực tế mở rộng), AI/ML trong mạng. NOMA là một trong những công nghệ được xem xét để đưa vào các phiên bản tiếp theo. Vì vậy, việc nghiên cứu, so sánh hai kỹ thuật đa truy nhập nền tảng là OFDMA – kỹ thuật truyền thống trong 4G và 5G (giai đoạn đầu), và NOMA – kỹ thuật đầy hứa hẹn cho hiệu suất phổ tần cao hơn, và đánh giá chúng trên mô hình kênh Rayleigh – mô hình đặc trưng cho môi trường đa đường, không có tầm nhìn thẳng (NLOS) trong đô thị – mang ý nghĩa khoa học và thực tiễn cao, có tính cập nhật và phản ánh sát thực tế triển khai.

Bên cạnh đó, trong bối cảnh Việt Nam đang đẩy mạnh thương mại hóa 5G, các nghiên cứu trong nước về hiệu năng của NOMA so với OFDMA vẫn còn hạn chế và chủ yếu ở dạng bài báo tổng quan. Việc xây dựng một mô hình mô phỏng bài bản để lượng hóa được mức độ cải thiện (hay hạn chế) của NOMA về dung lượng, tỷ lệ lỗi bit (BER), ... trong điều kiện fading Rayleigh là rất cần thiết. Do vậy, đề án "Đánh giá hiệu năng 5G đường xuống với OFDMA và NOMA theo mô hình kênh Rayleigh" có ý nghĩa khoa học và thực tiễn rõ ràng, đáp ứng tốt yêu cầu cấp thiết trong bối cảnh hiện nay. Đề tài này có ý nghĩa thực tiễn cao, không chỉ giúp học viên nắm vững công nghệ lõi của 5G mà còn cung cấp luận cứ cho các nhà thiết kế mạng trong việc lựa chọn giải pháp đa truy nhập phù hợp với điều kiện kênh truyền thực tế.

II/ Nội dung của đề án tốt nghiệp, các kết quả đã đạt được

Nội dung của đề án được trình bày tương đối khoa học, logic trong tổng số 72 trang với 63 trang nội dung, và được kết cấu thành 3 chương:

Chương 1: Tổng quan về vấn đề nghiên cứu (24 trang) – Giới thiệu khái quát về công nghệ 5G, kỹ thuật đa truy nhập OFDMA và NOMA, các tham số hiệu năng (tiêu chí đánh giá) và bài toán nghiên cứu của đề án.

Chương 2: Cơ sở lý thuyết và mô hình hệ thống (19 trang) – Trình bày về mô hình kênh sử dụng OFDMA và mô hình kênh sử dụng NOMA, phân tích hiệu năng kênh truyền.

Chương 3: Mô phỏng và đánh giá hiệu năng (18 trang) – Trình bày chi tiết quá trình mô phỏng, đánh giá và so sánh hiệu năng của hệ thống kênh đường xuống sử dụng OFDMA và NOMA.

Nhìn chung, nội dung đề án cơ bản bám sát đề cương được duyệt, có bố cục chương mục logic, khối lượng nội dung phân bổ giữa các chương, mục khá hợp lý.

III/ Những vấn đề cần giải thích thêm

- Tên một số chương và đề mục còn đặt chung chung, chưa phản ánh chính xác nội dung.
- Nội dung Chương 1 cần tập trung giới thiệu được tổng quan về công nghệ 5G, đường xuống 5G với các kỹ thuật đa truy nhập được so sánh trong nội dung đề án, các nội dung đề cương (mục tiêu, phạm vi nghiên cứu, …) nên để ở Mở đầu (nếu cần thiết).
- Cần bổ sung thêm các thuật ngữ viết tắt cho đầy đủ hơn và sắp xếp theo quy định.
- Một số hình ảnh kết quả trình bày trong đề án đánh số chưa phù hợp (ví dụ: có 2 hình 3.1).
- Làm rõ tham số FSPL và các yếu tố ảnh hưởng của nó (trang 49), trên cơ sở đó, làm rõ mối liên hệ với chủ đề đề tài.
- Hiệu năng BER (trang 57) là khá cao ($>10^{-3}$), chưa thực sự phù hợp với thực tế.
- Nội dung Kết luận và kiến nghị còn tương đối sơ sài.
- Nội dung trình bày còn một số lỗi chính tả, trình bày,… (Ví dụ: công thức (2.19), trích nguồn ở Hình 3.2 trang 50, Hình 3.3 trang 52, Hình 3.1 trang 57, ...).

IV/ Kết luận:

- Đề án đáp ứng các yêu cầu cơ bản về nội dung và hình thức của đề án tốt nghiệp thạc sĩ chuyên ngành Kỹ thuật Viễn thông của Học viện CNBCVT. Tuy nhiên, học viên cần hoàn thiện đề án theo các vấn đề người phản biện đã nêu ở mục III và theo kết luận của Hội đồng.
- Đồng ý cho phép học viên bảo vệ đề án tốt nghiệp.

Hà Nội, ngày 24 tháng 03 năm 2026

NGƯỜI NHẬN XÉT



Lê Hải Châu

CỘNG HÒA XÃ HỘI CHỦ NGHĨA VIỆT NAM
Độc lập – Tự do – Hạnh phúc

BẢN NHẬN XÉT ĐỀ ÁN TỐT NGHIỆP THẠC SĨ
(*Dùng cho người phản biện*)

Tên đề tài đề án tốt nghiệp: **"ĐÁNH GIÁ HIỆU NĂNG 5G ĐƯỜNG XUỐNG VỚI OFDMA VÀ NOMA THEO MÔ HÌNH KÊNH RAYLEIGH"**

Chuyên ngành: Kỹ thuật viễn thông

Mã chuyên ngành: 8.52.02.08

Họ và tên học viên: Nguyễn Thị Thu Hà

Họ và tên người nhận xét: Nguyễn Hồng Thủy

Học hàm, học vị: Tiến sĩ

Chuyên ngành: Kỹ thuật viễn thông

Cơ quan công tác: Bộ Công an

Số điện thoại: 0981150266 . Email: Enzonguyen775@gmail.com

NỘI DUNG NHẬN XÉT

I/ Cơ sở khoa học và thực tiễn, tính cấp thiết của đề tài:

Đề tài có cơ sở khoa học, thực tiễn cao và cấp thiết vì:

- 5G là mạng Thông tin di động chủ chốt, rộng rãi hiện nay trên thế giới và Việt Nam, đã được tiêu chuẩn hóa. 5G cung cấp đa nền tảng dịch vụ, đặc biệt là các dịch vụ truyền thông cho điện toán đám mây, dữ liệu, trí tuệ nhân tạo, thực tại ảo, phụ vụ cho Cách mạng Công nghiệp 4.0 và tiến trình chuyển đổi số hiện nay ở Việt Nam.

- Các dịch vụ sử dụng 5G đòi hỏi chất lượng dịch vụ rất cao. Do vậy, truyền thông 5G đòi hỏi tối ưu hóa tốc độ, dung lượng, hiệu năng của đường xuống (chiếm phần lớn lưu lượng người dùng 5G). Do đó bài toán đánh giá hiệu năng đường xuống 5G là luôn cần thiết, nhất là trong điều kiện mạng 5G Việt Nam đang tăng trưởng rất nhanh chóng, đang sử dụng nhiều công nghệ, nhà cung cấp khác nhau (trong đó có công nghệ Việt Nam tự phát triển).

Việc sử dụng so sánh hai cơ chế truy nhập OFDMA và NOMA theo mô hình kênh Rayleigh để đánh giá hiệu năng đường xuống 5G là lựa chọn mang

tính thực tiễn ứng dụng của đề tài trong điều kiện, môi trường mạng, dịch vụ 5G hiện nay.

II/ Nội dung của đề án tốt nghiệp, các kết quả đã đạt được:

Nội dung cơ bản của đề án tốt nghiệp đã bám sát mục tiêu, yêu cầu và nội dung của đề cương đã được duyệt. Những kết quả nghiên cứu lý thuyết, cơ sở khoa học và kết quả mô phỏng có đủ căn cứ để học viên kết luận ứng dụng thực tế ***„FDMA và NOMA thể hiện ưu thế trong các điều kiện khác nhau, do đó việc lựa chọn kỹ thuật phù hợp cần dựa trên yêu cầu cụ thể của hệ thống, mức chênh lệch giữa người dùng và mục tiêu tối ưu cụ thể của bài toán“.***

III/ Những vấn đề cần giải thích thêm:

Tuy nhiên, học viên cần giải thích thêm và làm rõ một số vấn đề sau:

(1) Giải thích lý do chủ yếu của việc lựa chọn OFDMA và NOMA để nghiên cứu mà không phải là kỹ thuật đa truy nhập khác?

(2) Làm rõ nguồn của các hình vẽ và bảng biểu trong đề án.

(3) Tại thảo luận chương III (Mục 3.5):

+ Ai là người đưa ra các thảo luận và hàm ý triển khai này (mục 3.1 và 3.2)?

+ Việc nêu ra 3 giới hạn của mô hình nghiên cứu để làm gì? Có giải pháp nào khắc phục 3 giới hạn đó (mục 3.5.3).

(4) Học viên hãy làm rõ sự đồng nhất giữa mục tiêu, kết quả và kết luận của đề tài?

(5) Phần kết luận và kiến nghị là quá sơ sài (16 dòng):

+ Ai là người đưa ra kết luận và kiến nghị „học viên“, „đề án“, „tài liệu“ hay bên thứ ba? (Mở đầu kết luận ghi: „Tài liệu hợp nhất này đã đồng bộ ba chương...“).

+ Kết luận mới liệt kê tên và nội dung chủ yếu của ba chương (trong 1 câu), chưa nêu rõ kết quả đạt được là gì, đạt được gì trong 3 mục tiêu của đề tài đã đặt ra (Mục 1.2.1. Mục tiêu nghiên cứu). (Kết luận trình bày: „từ các kết quả đã đạt được có thể thấy...“ và kết luận quá đơn giản ngay như nêu ở trên).

+ Chưa nêu tính mới, tính khoa học, tính ứng dụng của kết quả đạt được.

+ Kết luận không có hạn chế nghiên cứu.

+ Không có kiến nghị.

Do vậy, cần phải xem lại các kết quả đạt được có đáp ứng 3 mục tiêu của đề tài hay không? Trên cơ sở đó, phần Kết luận và Kiến nghị phải được làm đầy đủ nội dung theo qui định, có tính logic, nêu rõ được các kết quả nghiên cứu, nêu rõ các hạn chế, nêu rõ tính khoa học, tính mới và ứng dụng cụ thể của đề tài, trên cơ sở đó đưa kiến nghị cụ thể.

IV/ Kết luận:

Đồng ý cho phép học viên bảo vệ đề án tốt nghiệp sau khi giải trích, làm rõ và chỉnh sửa, bổ sung các vấn đề nêu tại phần III trên.

Ngày 26 tháng 3 năm 2026

NGƯỜI NHẬN XÉT



Ts. Nguyễn Hồng Thủy

CỘNG HÒA XÃ HỘI CHỦ NGHĨA VIỆT NAM
Độc lập – Tự do – Hạnh phúc

BẢN NHẬN XÉT ĐỀ ÁN TỐT NGHIỆP THẠC SĨ
(Dùng cho người phản biện)

Tên đề tài đề án tốt nghiệp: **"Đánh giá hiệu năng 5G đường xuống với OFDMA và NOMA theo mô hình kênh Rayleigh".**

Chuyên ngành: Kỹ thuật Viễn thông

Mã số: 8.52.02.08

Họ và tên học viên: **Nguyễn Thị Thu Hà**

Họ và tên người nhận xét: Vương Đức Hạnh - Ủy viên Phản biện 1

Học hàm, học vị: Tiến sĩ

Chuyên ngành: Kỹ thuật điện tử

Cơ quan công tác: Tổng công ty Hạ tầng mạng VNPT Net.....

Số điện thoại: 0913213476.....E-mail: hanhvd@vnpt.vn.....

NỘI DUNG NHẬN XÉT

I/ Cơ sở khoa học và thực tiễn, tính cấp thiết của đề tài:

Đề tài có cơ sở khoa học, thực tiễn và cấp thiết vì:

Trong tiến trình phát triển của thông tin di động, 5G New Radio (5G NR) đánh dấu bước chuyển từ tư duy tăng tốc độ truyền dữ liệu đơn thuần sang tư duy tối ưu hóa đồng thời dung lượng, độ tin cậy, hiệu quả phổ,... và khả năng phục vụ nhiều loại dịch vụ. Trong bối cảnh đó, đánh giá hiệu năng đường xuống trở thành một bài toán có ý nghĩa thực tiễn rõ rệt, vì đây là hướng truyền chi phối phần lớn lưu lượng người dùng và chịu tác động trực tiếp của cơ chế đa truy nhập, điều kiện kênh truyền và phân bố tài nguyên vô tuyến.

Kỹ thuật đa truy nhập OFDMA đã được chuẩn hóa và sử dụng rộng rãi trong 5G NR, tuy nhiên kỹ thuật đa truy nhập NOMA được xem như một hướng đa truy nhập phi trực giao tiềm năng có thể cải thiện hiệu quả phổ trong một số điều kiện người dùng và phân bổ công suất thích hợp.

Mục tiêu của đề tài không phải là khẳng định một kỹ thuật luôn vượt trội trong mọi điều kiện, mà là làm rõ điều kiện mà mỗi kỹ thuật thể hiện ưu thế, mức đánh đổi về BER, outage probability, dung lượng kênh và thông lượng, cũng như ý nghĩa của các kết quả đó đối với triển khai thực tế.

II/ Nội dung của đề án tốt nghiệp, các kết quả đã đạt được:

Nội dung cơ bản của đề án tốt nghiệp đã bám sát mục tiêu, yêu cầu và nội dung của đề cương đã được duyệt, đó là đánh giá hiệu năng đường xuống 5G NR trên cơ sở so sánh kỹ thuật đa truy nhập OFDMA và NOMA trong môi trường kênh Rayleigh.

Chương I, học viên đã trình bày tổng quan vấn đề nghiên cứu, làm rõ vị trí của 5G NR, yêu cầu hiệu năng đường xuống, bài toán so sánh kỹ thuật đa truy nhập OFDMA - NOMA và cơ sở lựa chọn mô hình Rayleigh.

Chương II, học viên đã trình bày cơ sở lý thuyết, mô hình nghiên cứu và các chỉ tiêu đánh giá.

Chương III, học viên đã thực hiện mô phỏng, phân tích kết quả và rút ra các nhận xét triển khai.

Học viên đã sử dụng phần mềm MATLAB để mô phỏng, MATLAB phù hợp mô phỏng mô hình. Kịch bản, cấu hình, các tham số cài đặt, phân tích kết quả mô phỏng được mô tả rõ ràng, chi tiết; các kết quả mô phỏng phù hợp với kết quả nghiên cứu lý thuyết. Trên cơ sở đó, rút ra các nhận định định lượng về điều kiện mà mỗi phương thức hoạt động phù hợp hơn và những hàm ý kỹ thuật đối với bài toán đường xuống 5G NR.

Học viên cũng đã nêu một số hạn chế của mô hình mô phỏng so với thực tế.

III/ Những vấn đề cần giải thích thêm:

Tuy nhiên, học viên cần giải thích thêm và làm rõ một số vấn đề sau:

Danh mục ký hiệu và các chữ viết tắt (Trang vi) cần sắp xếp theo thứ tự A, B, C.

Trình bày 03 loại dịch vụ cơ bản của hệ thống thông tin di động 5G NR. Kỹ thuật đa truy nhập NOMA sẽ phù hợp và không phù hợp với loại dịch vụ nào ? Tại sao?

Giải thích tại sao chọn kênh Rayleigh trong mô hình mô phỏng mà không chọn loại kênh khác ?

IV/ Kết luận:

Đồng ý cho phép học viên bảo vệ đề án tốt nghiệp sau khi làm rõ và chỉnh sửa các vấn đề nêu tại phần III trên.

Ngày 24 tháng 03 năm 2026

NGƯỜI NHẬN XÉT

TS. Vương Đức Hạnh