HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG

Đặng Minh Tú

NGHIÊN CỨU ĐÁNH GIÁ HIỆU NĂNG ĐIỀU CHẾ TRONG HỆ THỐNG ROF ỨNG DỤNG TRONG QUÂN SỰ

ĐỀ ÁN TỐT NGHIỆP THẠC SĨ KỸ THUẬT

(Theo định hướng ứng dụng)

HÀ NỘI - 2026

HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG

Đặng Minh Tú

NGHIÊN CỨU ĐÁNH GIÁ HIỆU NĂNG ĐIỀU CHẾ TRONG HỆ THỐNG ROF ỨNG DỤNG TRONG QUÂN SỰ

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. NGUYỄN CHIẾN TRINH

HÀ NỘI - 2026

LỜI CAM ĐOAN

Tôi cam đoan đây là công trình nghiên cứu của riêng cá nhân tôi. Nội dung trình bày trong Đề án có tham khảo, sử dụng các tài liệu, thông tin được đăng tải trên những tạp chí khoa học và các trang web được liệt kê trong danh mục tài liệu tham khảo. Tất cả các tài liệu tham khảo đều có xuất xứ rõ ràng và được trích dẫn hợp pháp.

Tôi xin cam đoan và hoàn toàn chịu trách nhiệm, hình thức kỷ luật theo quy định cho lời cam đoan của mình.

Hà nội, ngày tháng năm 2026

Người cam đoan

Đặng Minh Tú

LỜI CẢM ƠN

Được sự đồng ý của Học Viện Công Nghệ Bưu Chính Viễn Thông, và của thầy giáo hướng dẫn PGS TS. Nguyễn Chiến Trinh, học viên đã thực hiện đề tài đề án tốt nghiệp Thạc sĩ: "*NGHIÊN CỨU ĐÁNH GIÁ HIỆU NĂNG ĐIỀU CHẾ TRONG HỆ THỐNG ROF ỨNG DỤNG TRONG QUÂN SỰ*".

Để hoàn thành đề án này, học viên xin chân thành cảm ơn các thầy cô giáo đã tận tình hướng dẫn, giảng dạy trong suốt quá trình học tập, nghiên cứu ở Học Viện Công Nghệ Bưu Chính Viễn Thông.

Học viên xin đặc biệt gửi lời cảm ơn đến PGS TS. Nguyễn Chiến Trinh, người thầy đã trực tiếp hướng dẫn trong quá trình thực hiện đề án tốt nghiệp này. Nhờ sự chỉ bảo tận tình của thầy trong thời gian qua đã giúp học viên vượt qua những khó khăn khi nghiên cứu để Đề án được hoàn thành.

Học viên đã có nhiều cố gắng để thực hiện đề án một cách hoàn chỉnh nhất.Tuy nhiên, do còn nhiều hạn chế về kiến thức và kinh nghiệm nên không thể tránh khỏi những sơ xuất và thiếu sót trong quá tình thực hiện đề án. Học viên rất mong nhận được sự góp ý của quý thầy, cô giáo để đề án được hoàn chỉnh hơn.

Học viên xin trân trọng cám ơn!

Hà Nội, ngày tháng năm 2026

Học viên

Đặng Minh Tú

MỤC LỤC

LỜI CAM ĐOAN ..... **i**
LỜI CẢM ƠN ..... **ii**
DANH MỤC CÁC TỪ VIẾT TẮT ..... **v**
DANH MỤC BẢNG BIỂU ..... **vii**
DANH MỤC HÌNH VẼ ..... **viii**
MỞ ĐẦU **1**
CHƯƠNG 1. MÔ HÌNH HỆ THỐNG RoF **2**
1.1. Khái niệm và nguyên lý hoạt động của hệ thống RoF **2**
1.1.1. Khái niệm RoF 2
1.1.2. Nguyên lý hoạt động cơ bản của RoF 3
1.1. Sơ đồ khối và mô hình kiến trúc RoF **5**
1.2. Ưu điểm và thách thức ứng dụng RoF trong quân sự **7**
1.2.1. Ưu điểm của công nghệ RoF 7
1.2.2. Thách thức đối với ứng dụng RoF 10
1.3. Các kỹ thuật điều chế sử dụng trong RoF **11**
1.3.1. Kỹ thuật điều chế DP-QPSK 11
1.3.2. Kỹ thuật điều chế 16-QAM 13
1.3.3. Kỹ thuật điều chế 64-QAM 14
1.3.4. Kỹ thuật điều chế OFDM 15
1.4. Ứng dụng thực tiễn của RoF trong quân sự. **16**
1.5. Kết luận chương 1 ..... **18**
CHƯƠNG 2. PHÂN TÍCH ĐÁNH GIÁ KÊNH TRUYỀN RoF SỬ DỤNG DP-QPSK, 16-QAM VÀ 64-QAM **20**
2.1. Mô hình kênh truyền trong RoF **20**
2.1.1. Biểu diễn toán học của mô hình kênh truyền 20
2.1.2. Mô hình hóa từng thành phần của kênh truyền 21
2.2. Các tham số đánh giá hiệu năng **23**
2.2.1. Tham số BER 23
2.2.2. Tham số SNR 24
2.2.3. Tham số OSNR 24
2.2.4. Tham số EVM 25
2.3. Ảnh hưởng của phi tuyến, nhiễu và suy hao **26**
2.4. So sánh hiệu năng DP-QPSK, 16-QAM và 64-QAM trên thông tin quang **26**
2.5. Định hướng lựa chọn kỹ thuật điều chế tối ưu **30**
2.6. Kết luận Chương 2 ..... **31**

CHƯƠNG 3. MÔ PHỎNG ĐÁNH GIÁ HIỆU NĂNG CÁC KỸ THUẬT ĐIỀU CHẾ HỆ THỐNG RoF 33
3.1. Giới thiệu về phần mềm OptiSystem 33
3.1.1. Đặc điểm nổi bật của OptiSystem 33
3.1.2. Ứng dụng trong mô phỏng hệ thống RoF 34
3.2. Thiết lập mô hình mô phỏng hệ thống RoF 34
3.2.1. Sơ đồ khối tổng quát của hệ thống RoF 34
3.2.2. Cấu hình thông số mô phỏng 36
3.3. Kịch bản mô phỏng cho DP-QPSK, 16-QAM và 64-QAM ứng dụng OFDM 38
3.3.1. Kịch bản mô phỏng cho DP-QPSK ứng dụng kỹ thuật OFDM 40
3.3.2. Kịch bản mô phỏng cho 16-QAM ứng dụng kỹ thuật OFDM 42
3.3.3. Kịch bản mô phỏng cho 64-QAM ứng dụng kỹ thuật OFDM 43
3.4. Phân tích kết quả mô phỏng 45
3.4.1 Phân tích quan hệ BER – OSNR 45
3.4.2. Phân tích quan hệ EVM – OSNR 47
3.4.3. Phân tích quan hệ BER – EVM 49
3.4.4. Phân tích quan hệ BER – DISTANCE 51
3.5. Đề xuất và khuyến nghị ứng dụng công nghệ RoF trong hệ thống quân sự 54
3.6. Kết luận Chương 3 56
KẾT LUẬN 58
DANH MỤC TÀI LIỆU THAM KHẢO 61
BẢN CAM ĐOAN 62

DANH MỤC CÁC TỪ VIẾT TẮT

Từ viết tắt	Tiếng Anh	Tiếng Việt
AMF	Access and Mobility Management Function	Chức năng quản lý truy cập và di động
APD	Avalanche Photodiode	Photodiode thác lũ
ASE	Amplified Spontaneous Emission	Nhiễu phát xạ tự phát khuếch đại
BER	Bit Error Rate	Tỷ lệ lỗi bit
BS	Base Station	Trạm gốc
CD	Chromatic Dispersion	Tán sắc sắc độ
CO / CS	Central Office / Central Station	Trạm trung tâm
CP	Cyclic Prefix	Tiền tố tuần hoàn
DAC	Digital-to-Analog Converter	Bộ chuyển đổi số – tương tự
DBP	Digital Back Propagation	Thuật toán bù phi tuyến số
DFB	Distributed Feedback Laser	Laser hồi tiếp phân bố
DSP	Digital Signal Processing	Xử lý tín hiệu số
DP-QPSK	Dual-Polarization QPSK	Điều chế QPSK phân cực kép
EDFA	Erbium-Doped Fiber Amplifier	Bộ khuếch đại sợi pha tạp Erbium
EVM	Error Vector Magnitude	Độ lớn vector lỗi
FEC	Forward Error Correction	Mã sửa lỗi tiên tiến
FFT	Fast Fourier Transform	Biến đổi Fourier nhanh
FWM	Four-Wave Mixing	Trộn bốn sóng
IF	Intermediate Frequency	Tần số trung gian
I/Q	In-Phase / Quadrature	Thành phần đồng pha / vuông pha
IM-DD	Intensity Modulation – Direct Detection	Điều chế cường độ – tách sóng trực tiếp
LD	Laser Diode	Đi-ốt laser
LO	Local Oscillator	Dao động nội
LTE	Long-Term Evolution	Mạng 4G LTE
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output	Nhiều đầu vào – nhiều đầu ra
MZM	Mach–Zehnder Modulator	Bộ điều chế Mach–Zehnder
NF	Noise Figure	Hệ số nhiễu
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing	Ghép kênh phân chia tần số trực giao
OSNR	Optical Signal-to-Noise Ratio	Tỷ số tín hiệu–nhiễu quang
OTDR	Optical Time Domain Reflectometer	Máy phản xạ miền thời gian quang

PD	Photodiode	Đi-ốt quang
PIN	Positive–Intrinsic–Negative Photodiode	Photodiode PIN
QAM	Quadrature Amplitude Modulation	Điều chế biên độ cầu phương
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying	Điều chế pha cầu phương
RAU	Remote Antenna Unit	Khối ăng-ten đầu xa
RF	Radio Frequency	Tần số vô tuyến
RIN	Relative Intensity Noise	Nhiễu cường độ tương đối
RoF	Radio over Fiber	Truyền vô tuyến qua sợi quang
SNR	Signal-to-Noise Ratio	Tỷ số tín hiệu trên nhiễu
SMF	Single Mode Fiber	Sợi quang đơn mode
SPM	Self-Phase Modulation	Tự điều chế pha
XPM	Cross-Phase Modulation	Điều chế pha chéo

DANH MỤC BẢNG BIỂU

Bảng 2.1: Quan hệ giữa SNR và BER cho các sơ đồ điều chế trong RoF 28
Bảng 2.2: Yêu cầu OSNR tối thiểu cho các sơ đồ điều chế 28
Bảng 2.3: Mức EVM cho phép đối với các sơ đồ điều chế.....29
Bảng 2.4: So sánh tổng thể các kỹ thuật điều chế trong hệ thống RoF.....29

DANH MỤC HÌNH VẼ

Hình 1.1: Tổng quan hệ thống RoF 2
Hình 1.2: Hệ thống RoF tách sóng trực tiếp (IM-DD) 5
Hình 1.3: Sơ đồ khối và mô hình kiến trúc của hệ thống RoF 6
Hình 1.4: Chòm sao của tín hiệu QPSK với mã Gray được gán cho các điểm.....12
Hình 1.5: Chòm sao của tín hiệu 16-QAM.....14
Hình 1.6: Chòm sao của tín hiệu 64-QAM.....15
Hình 2.1: Mô hình kênh truyền trong hệ thống RoF 20
Hình 3.1: Sơ đồ khối hệ thống RoF mô phỏng trên OptiSystem 35
Hình 3.2: Cấu hình mô phỏng hệ thống DP-QPSK OFDM 41
Hình 3.3: Cấu hình mô phỏng hệ thống 16-QAM OFDM 43
Hình 3.4: Cấu hình mô phỏng hệ thống 64-QAM OFDM 44
Hình 3.5: Quan hệ BER–OSNR của các kỹ thuật điều chế DP-QPSK, 16-QAM và 64-QAM trong hệ thống RoF (thang tuyến tính, ngưỡng BER = 10^{-3}) 45
Hình 3.6: Quan hệ BER–OSNR của các kỹ thuật điều chế DP-QPSK, 16-QAM và 64-QAM trong hệ thống RoF (thang logarit, ngưỡng BER = 10^{-3}).....45
Hình 3.7: Quan hệ EVM–OSNR của các kỹ thuật điều chế DP-QPSK, 16-QAM và 64-QAM trong hệ thống RoF.....48
Hình 3.8: Quan hệ BER–EVM của các kỹ thuật điều chế DP-QPSK, 16-QAM và 64-QAM trong hệ thống RoF (thang tuyến tính, ngưỡng BER = 10^{-3}) 49
Hình 3.9: Quan hệ BER–EVM của các kỹ thuật điều chế DP-QPSK, 16-QAM và 64-QAM trong hệ thống RoF (thang logarit, ngưỡng BER = 10^{-3}).....49
Hình 3.10: Quan hệ BER–DISTANCE của các kỹ thuật điều chế DP-QPSK, 16-QAM và 64-QAM trong hệ thống RoF (thang tuyến tính, ngưỡng BER = 10^{-3}).....52
Hình 3.11: Quan hệ BER–Distance của các kỹ thuật điều chế DP-QPSK, 16-QAM và 64-QAM trong hệ thống RoF (thang logarit, ngưỡng BER = 10^{-3}) 52

MỞ ĐẦU

Trong bối cảnh chuyển đổi số toàn cầu và sự phát triển mạnh mẽ của công nghệ 5G, việc xây dựng hạ tầng thông tin liên lạc quân sự linh hoạt, bảo mật và có độ tin cậy cao là yêu cầu mang tính chiến lược. Các hoạt động như chỉ huy – điều hành chiến thuật, điều khiển UAV/UGV, hệ thống radar phân tán hay tác chiến điện tử đòi hỏi truyền dữ liệu dung lượng lớn, độ trễ thấp và kết nối ổn định trong mọi điều kiện khắc nghiệt.

Trong bối cảnh đó, Radio over Fiber (RoF) nổi lên như giải pháp nền tảng cho hạ tầng truyền thông 5G quân sự, nhờ khả năng truyền tín hiệu vô tuyến (RF) trực tiếp qua sợi quang. RoF mang lại nhiều ưu điểm vượt trội:

- Mở rộng vùng phủ sóng đến địa hình phức tạp;
- Giảm suy hao và chống nhiễu tốt, thích ứng với môi trường tác chiến điện tử;
- Độ trễ thấp, hiệu quả phổ cao, đáp ứng yêu cầu điều khiển thời gian thực;
- Tăng cường bảo mật, khó bị gây nhiễu hoặc đánh chặn.

Tuy nhiên, hiệu năng của RoF phụ thuộc mạnh vào kỹ thuật điều chế tín hiệu. Các sơ đồ như DP-QPSK có độ ổn định và chống nhiễu tốt, trong khi 16-QAM và 64-QAM đạt dung lượng cao hơn nhưng yêu cầu chất lượng kênh truyền khắt khe hơn.. Do đó, cần có nghiên cứu đánh giá toàn diện hiệu năng điều chế trong hệ thống RoF nhằm lựa chọn phương án tối ưu cho từng môi trường ứng dụng quân sự khác nhau.

Đề tài "Nghiên cứu đánh giá hiệu năng điều chế trong hệ thống RoF ứng dụng trong quân sự" vì vậy mang ý nghĩa quan trọng, vừa góp phần bổ sung cơ sở khoa học cho lĩnh vực RoF, vừa phục vụ xây dựng hạ tầng thông tin quân sự hiện đại, ổn định và bảo mật cao.

Nội dung đề án được trình bày trong 3 chương chính:

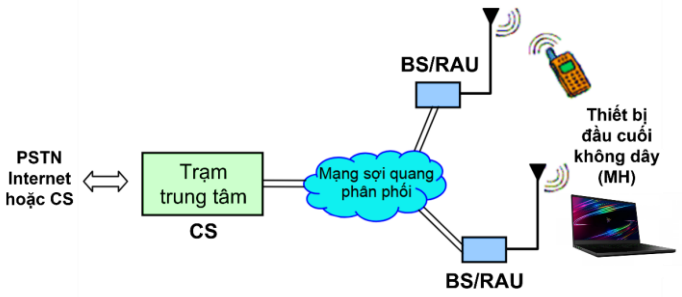
- Chương 1: Mô hình hệ thống RoF.
- Chương 2: Phân tích đánh giá kênh truyền ROF sử dụng DP-QPSK, 16-QAM và 64-QAM.
- Chương 3: Mô phỏng đánh giá hiệu năng các kỹ thuật điều chế hệ thống RoF.

CHƯƠNG 1. MÔ HÌNH HỆ THỐNG RoF

1.1. Khái niệm và nguyên lý hoạt động của hệ thống RoF

1.1.1. Khái niệm RoF

Truyền dẫn vô tuyến qua sợi quang (Radio over Fiber) (sau đây viết tắt là RoF) là công nghệ sử dụng các liên kết sợi quang để phân phối tín hiệu vô tuyến từ trạm đầu cuối trung tâm (CS - Central Station) tới các trạm gốc (BS - Base Station) hay các khối ăng-ten đầu xa (RAU - Remote Antenna Units) và ngược lại. Trong hệ thống thông tin băng hẹp và WLAN, các chức năng xử lý tín hiệu RF như nâng tần, điều chế sóng mang và ghép kênh ... được thực hiện ở các trạm gốc BS hoặc RAU và ngay sau đó được đưa tới ăng-ten để phát tín hiệu ra không gian. Đối với công nghệ RoF, các chức năng xử lý tín hiệu RF được tập trung tại một vị trí chung là trạm đầu cuối trung tâm (CS). Sau đó, tín hiệu được phân phối tới các trạm gốc BS thông qua sợi quang có suy hao thấp (khoảng 0,3 dB/km cho bước sóng 1550 nm, 0,5 dB/km cho bước sóng 1310 nm) để phân phối tín hiệu RF tới các trạm gốc BS như minh họa trong Hình 1.1 Nhờ vậy, RAU được đơn giản hóa đáng kể, vì chúng chỉ cần thực hiện các chức năng biến đổi quang-điện và khuếch đại. Việc tập trung hóa các chức năng xử lý tín hiệu RF còn cho phép dùng chung thiết bị, phân bổ tài nguyên linh hoạt, cũng như đơn giản hóa vận hành và bảo trì hệ thống. Những lợi ích này có thể chuyển hóa thành tiết kiệm lớn về chi phí lắp đặt và vận hành, đặc biệt trong các hệ thống thông tin vô tuyến băng rộng vùng phủ rộng, nơi cần mật độ trạm BS/RAU cao như đã thảo luận ở trên.



Hình 1.1: Tổng quan hệ thống RoF

Một tuyến quang sử dụng công nghệ RoF bao gồm một số thành phần cơ bản như: Mobile Host (MH), Base Station (BS), Central Station (CS) và sợi quang.

Mobile Host (MH): Là các thiết bị di động trong mạng, đóng vai trò là thiết bị đầu cuối. Các MH có thể là điện thoại di động, máy tính xách tay, PDA hoặc các thiết bị chuyên dụng khác có tích hợp chức năng truy nhập vào mạng không dây.

Base Station (BS): Có nhiệm vụ phát sóng vô tuyến nhận được từ CS tới các MH và thu tín hiệu vô tuyến từ MH để truyền ngược về CS. Mỗi BS phục vụ một microcell. BS không thực hiện xử lý tín hiệu, mà chỉ đảm nhiệm chức năng chuyển đổi tín hiệu điện–quang và ngược lại. Thành phần quan trọng nhất của BS bao gồm anten và khối chuyển đổi quang–điện hoạt động ở tần số RF. Tùy theo bán kính phục vụ, mỗi BS có thể bao phủ một vùng từ vài chục đến vài trăm mét và phục vụ từ vài chục đến vài trăm MH. Trong kiến trúc mạng RoF, BS được thiết kế đơn giản nhằm giảm chi phí và dễ triển khai.

Central Station (CS): Là trạm xử lý trung tâm của hệ thống. Tùy theo khả năng của kỹ thuật RoF, mỗi CS có thể phục vụ các BS ở khoảng cách lên tới hàng chục kilômét, do đó một CS có thể kết nối với nhiều BS. Nhờ kiến trúc mạng tập trung, các chức năng như định tuyến, cấp phát kênh và xử lý tín hiệu RF được thực hiện tại CS. Vì vậy, CS được xem là thành phần quan trọng nhất trong mạng RoF, tương tự như trạm HUB trong hệ thống thông tin vệ tinh. CS thường được kết nối tới các tổng đài hoặc máy chủ (server) khác.

Sợi quang: Là môi trường truyền tải thông tin giữa các CS và BS dưới dạng ánh sáng lan truyền trong sợi quang (sợi đơn mode hoặc đa mode), dựa trên hiện tượng phản xạ toàn phần [1].

1.1.2. Nguyên lý hoạt động cơ bản của RoF

Hệ thống RoF hoạt động dựa trên nguyên lý truyền tín hiệu vô tuyến (RF) qua sợi quang học. Thay vì truyền trực tiếp tín hiệu vô tuyến bằng cáp đồng trục như trong các hệ thống thông tin di động truyền thống (như GSM hoặc 3G), công nghệ RoF sử dụng sợi quang để mang tín hiệu RF đi xa hơn với suy hao rất thấp.

Ở phía phát, tín hiệu vô tuyến được tạo ra từ nguồn RF hoặc từ khối xử lý tín hiệu gốc (baseband). Tín hiệu này được sử dụng để điều chế cường độ ánh sáng phát ra từ nguồn laser, quá trình này gọi là điều chế cường độ (Intensity Modulation – IM). Nói cách khác, cường độ của chùm sáng laser thay đổi theo biên độ của tín hiệu RF, khiến tín hiệu vô tuyến được "mang" trên sóng ánh sáng. Ánh sáng đã điều chế sau đó được đưa vào sợi quang để truyền đi đến các trạm thu phát vô tuyến từ xa (Remote Antenna Unit – RAU hoặc Radio Access Point – RAP).

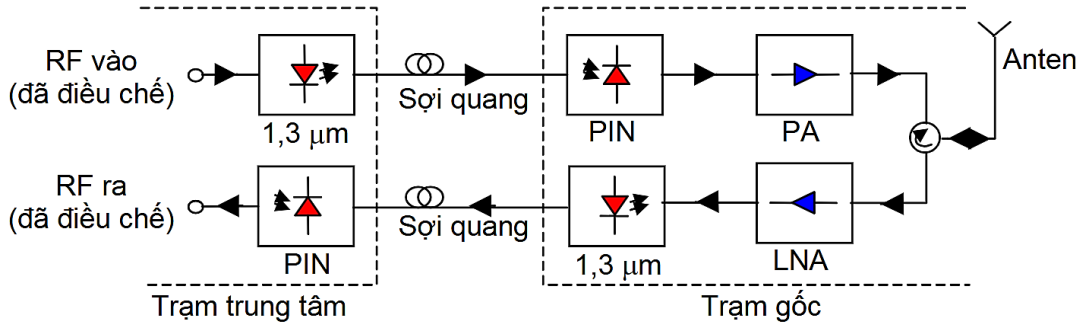
Trong quá trình truyền, tín hiệu quang mang thông tin RF di chuyển trong sợi quang với suy hao cực nhỏ, chỉ khoảng 0,2 dB/km, cho phép truyền đi hàng chục kilomet mà không cần khuếch đại điện. Nếu cần, hệ thống có thể sử dụng bộ khuếch đại quang (EDFA) để tăng cường công suất tín hiệu quang trên đường truyền.
Khi tín hiệu đến trạm thu phát từ xa, nó được tách sóng trực tiếp – Direct Detection (DD) bằng photodiode (PD). Photodiode có nhiệm vụ biến đổi dao động cường độ ánh sáng thành dòng điện tương ứng với tín hiệu RF ban đầu. Tín hiệu này sau đó được khuếch đại bằng bộ khuếch đại RF, rồi đưa tới anten để phát ra không gian, phục vụ các thiết bị người dùng.

Ở chiều ngược lại (uplink), tín hiệu vô tuyến thu được từ anten cũng được chuyển đổi sang dạng quang bằng một laser hoặc bộ điều chế tương tự, rồi truyền ngược về trung tâm qua sợi quang. Tại đây, tín hiệu quang được tách sóng và xử lý trong khối trung tâm để khôi phục lại dữ liệu gốc.

Như vậy, nguyên lý cơ bản của hệ thống RoF là chuyển đổi qua lại giữa tín hiệu vô tuyến và tín hiệu quang nhằm tận dụng ưu điểm của sợi quang trong truyền dẫn đường dài. Nhờ đó, phần lớn các chức năng xử lý phức tạp có thể được tập trung tại trạm trung tâm, trong khi các trạm đầu xa chỉ đảm nhiệm chức năng phát và thu tín hiệu RF. Cấu trúc này giúp đơn giản hóa trạm vô tuyến, giảm chi phí đầu tư, dễ bảo trì, đồng thời đảm bảo tín hiệu truyền ổn định, ít méo và suy hao thấp.

Một trong những triển khai tiên phong của hệ thống RoF được minh họa ở Hình 1.2. Hệ thống như vậy có thể dùng, chẳng hạn, để phân phối tín hiệu GSM. Tín hiệu RF được dùng để điều chế trực tiếp đi-ốt laser tại trạm trung tâm. Tín hiệu quang

được điều chế theo cường độ thu được sẽ được truyền qua chiều dài sợi quang đến Trạm Gốc (BS/RAU). Tại RAU, tín hiệu RF đã truyền được khôi phục bằng tách sóng trực tiếp trong photodiode PIN. Sau đó tín hiệu được khuếch đại và phát xạ bởi anten. Tín hiệu đường lên từ thiết bị di động (MH) cũng được đưa từ RAU về CS theo cách tương tự. Phương pháp truyền tín hiệu RF qua sợi này gọi là Điều chế theo cường độ với Tách sóng trực tiếp (IM-DD), và là dạng đơn giản nhất của liên kết RoF.



Hình 1.2: Hệ thống RoF tách sóng trực tiếp (IM-DD)

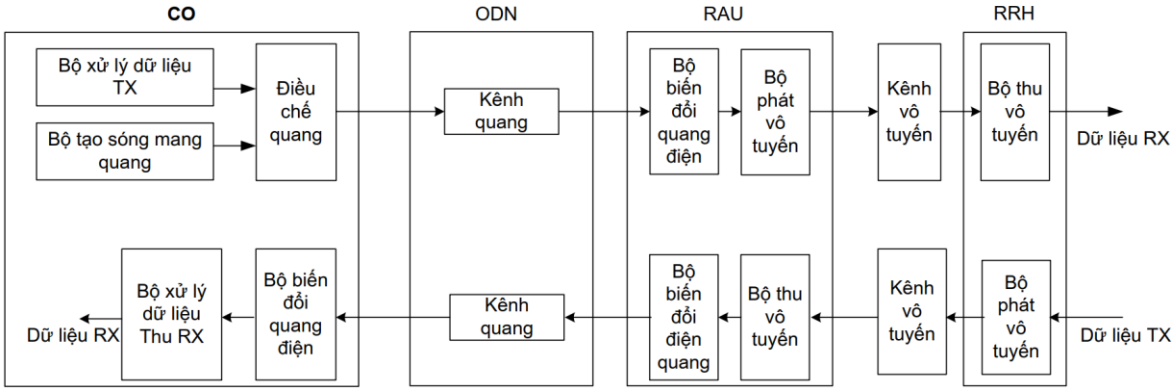
Mặc dù Hình 1.2 minh họa việc truyền tín hiệu RF ở chính tần số của nó, nhưng không phải lúc nào cũng cần làm như vậy. Chẳng hạn, nếu có dao động nội (LO), ta có thể dùng nó để hạ tần sóng mang đường lên xuống tần số trung gian (IF) ngay tại RAU. Cách này cho phép sử dụng các linh kiện tần số thấp cho nhánh đường lên ở RAU — từ đó tiết kiệm chi phí hệ thống. Thay vì đặt một LO riêng trong RAU, LO có thể được vận chuyển từ CS đến RAU qua hệ thống RoF. Khi LO đã sẵn có ở RAU, nó có thể được dùng để thực hiện hạ tần cho các tín hiệu đường lên. Điều này dẫn đến một RAU đơn giản hơn rất nhiều.

Trong cấu hình này, đường xuống trở thành phần then chốt của RoF vì nó phải truyền các tín hiệu tần số cao. Việc truyền tín hiệu tần số cao thách thức hơn do đòi hỏi linh kiện tần số cao và băng thông liên kết lớn. Điều đó có nghĩa là các tín hiệu tần số cao dễ bị ảnh hưởng bởi các suy hao/lỗi của máy phát, máy thu và đường truyền [1].

1.1. Sơ đồ khối và mô hình kiến trúc RoF

Hình 1.3 minh họa sơ đồ khối và mô hình kiến trúc của một tuyến RoF điển hình. Như đã đề cập ở trên, một hệ thống truyền sóng vô tuyến qua sợi quang bao

gồm các phân hệ chính như: phân hệ trạm trung tâm CS (Central Station), phân hệ mạng phân phối quang ODN (Optical Distribution Network), phân hệ trạm BS/RAU, kênh truyền vô tuyến và các thiết bị thu phát vô tuyến.



Hình 1.3: Sơ đồ khối và mô hình kiến trúc của hệ thống RoF

Phân hệ trung tâm CS : Phân hệ trạm trung tâm CS đảm nhiệm các chức năng xử lý dữ liệu và tạo tín hiệu quang cho đường xuống. Quá trình này bao gồm hai bước chính là tạo sóng mang quang và điều chế dữ liệu đường xuống. Các bước này có thể được thực hiện đồng thời hoặc tách biệt, tùy thuộc vào kiến trúc hệ thống và công nghệ sử dụng.

Phân hệ mạng truyền tải quang ODN: Mạng phân phối quang thực hiện kết nối để truyền tín hiệu từ trạm trung tâm đến các BS đầu xa và ngược lại. Thành phần chủ yếu trong ODN này là cáp sợi quang và có thể có các bộ khuếch đại quang.

Về cấu trúc, ODN phải cung cấp độ tin cậy và tính linh hoạt cao cùng với khả năng mở rộng mạng lớn. Các cấu hình có thể sử dụng cho mạng RoF gồm hình sao, hình vòng, vòng đa cấp, hình sao đa cấp, hỗn hợp vòng-sao đa cấp và vòng-sao.

Các bộ khuếch đại quang được sử dụng trong phân hệ ODN để bù lại suy hao lan truyền ở khoảng cách truyền lớn và suy hao do rẽ nhánh trong mạng truy cập. Việc sử dụng các bộ khuếch đại quang cho phép phân phối tín hiệu quang từ CS qua khoảng cách lớn tới các BS và cho phép tăng số lượng các BS. Những khả năng này là cần thiết cho sự linh hoạt và khả năng mở rộng của mạng, chúng có tác động lớn trong việc xác định tính toàn vẹn của truyền dẫn. Các loại bộ khuếch đại quang được sử dụng trong hệ thống RoF gồm bộ khuếch đại sợi quang pha Erbium (Erbium-

Doped Fiber Amplifier - EDFA), bộ khuếch đại Raman và bộ khuếch đại quang bán dẫn (Semiconductor Optical Amplifier - SOA).

Phân hệ BS: Mục tiêu của kiến trúc sử dụng RoF là để có BS/RAU (Radio Access Unit) càng đơn giản càng tốt. Đơn giản hơn cả là BS chỉ đóng vai trò chuyển đổi tín hiệu quang sang tín hiệu điện, sau đó chuyển tới anten phát và ngược lại, chuyển tín hiệu điện thu từ anten thu sang tín hiệu quang rồi truyền về CS qua sợi quang. Như vậy, phân hệ BS cho đường xuống gồm các thành phần là bộ tách sóng quang, bộ lọc và bộ khuếch đại.

Đối với đường lên, cấu hình BS có thể sử dụng laser hoặc không sử dụng laser. Khi sử dụng laser tại BS, phương pháp điều chế trực tiếp hoặc điều chế ngoài có thể được sử dụng. Khi CS cung cấp một sóng mang quang cho truyền dẫn đường lên, BS không cần có laser. Theo cách này, tín hiệu quang từ CS là một sóng mang quang được sử dụng để điều chế với dữ liệu đường lên và truyền đến CS [4].

1.2. Ưu điểm và thách thức ứng dụng RoF trong quân sự

1.2.1. Ưu điểm của công nghệ RoF

- *Suy hao thấp:* Việc phân phối các tín hiệu vi ba tần số cao bằng điện, dù là trong không gian tự do hay qua đường truyền dẫn, đều gặp nhiều vấn đề và tốn kém. Trong không gian tự do, tổn hao do hấp thụ và phản xạ tăng theo tần số. Trong các đường truyền dẫn, trở kháng cũng tăng theo tần số, dẫn đến tổn hao đáng kể. Do đó, việc phân phối các tín hiệu vô tuyến tần số cao bằng phương pháp điện trên khoảng cách dài thường đòi hỏi các thiết bị tái tạo tín hiệu có chi phí cao. Đối với sóng mm, việc phân phối qua các đường truyền dẫn thậm chí không khả thi ngay cả ở khoảng cách ngắn.

Giải pháp thay thế cho bài toán này là phân phối tín hiệu băng gốc (baseband) hoặc tín hiệu ở tần số trung gian thấp (IF) từ trung tâm chuyển mạch (CS) đến trạm gốc (BS). Các tín hiệu băng gốc hoặc IF sau đó sẽ được nâng tần lên tần số vi ba hoặc mm-wave (sóng milimet) yêu cầu tại mỗi trạm gốc, khuếch đại rồi phát xạ. Cấu hình hệ thống này giống với cấu hình dùng trong phân phối các hệ thống thông tin di động

băng hẹp như minh họa ở Hình 1.3. Vì cần các bộ dao động nội (LO) hiệu năng cao để nâng tần tại từng trạm gốc, cách bố trí này dẫn đến trạm gốc phức tạp với các yêu cầu hiệu năng nghiêm ngặt. Tuy nhiên, do sợi quang có suy hao rất thấp, công nghệ RoF có thể vừa đạt được phân phối sóng mm với tổn hao thấp, vừa đơn giản hóa RAU cùng lúc.

Các sợi quang đơn mode chuẩn (SMF) thương mại làm từ thủy tinh (silica) có suy hao dưới 0,2 dB/km ở cửa sổ 1550 nm và 0,5 dB/km ở cửa sổ 1300 nm**.** Sợi quang polymer (POF) – một loại sợi quang mới hơn – có suy hao cao hơn, trong khoảng 10–40 dB/km ở vùng 500–1300 nm. Các mức suy hao này thấp hơn rất nhiều so với, chẳng hạn, cáp đồng trục, vốn có suy hao cao hơn đến ba bậc độ lớn ở tần số cao. Ví dụ, suy hao của cáp đồng trục ½ inch (RG-214) có thể vượt quá 500 dB/km với tần số trên 5 GHz. Vì vậy, bằng cách truyền các tín hiệu vi ba ở dạng quang, khoảng cách truyền dẫn có thể tăng lên gấp nhiều lần và công suất truyền yêu cầu giảm đi đáng kể**.**

- *Băng thông lớn:* Sợi quang cung cấp băng thông khổng lồ. Có ba "cửa sổ" truyền dẫn chính với suy hao thấp, tương ứng các bước sóng 850 nm, 1310 nm và 1550 nm. Với một sợi quang đơn mode, tổng băng thông của ba cửa sổ này vượt quá 50 THz [15]. Tuy nhiên, các hệ thống thương mại hiện đại ngày nay mới chỉ khai thác một phần dung lượng này **(**1,6 THz). Các nghiên cứu nhằm tận dụng nhiều dung lượng quang hơn trên một sợi vẫn đang tiếp tục. Những động lực chính mở khóa ngày càng nhiều băng thông từ sợi quang gồm có sợi tán sắc thấp (hoặc dịch tán sắc), bộ khuếch đại sợi pha tạp erbium (EDFA) cho cửa sổ 1550 nm, và việc sử dụng các kỹ thuật ghép kênh tiên tiến như OFDM.

Băng thông quang khổng lồ còn mang lại các lợi ích khác ngoài khả năng truyền tải dung lượng vi ba đáng kể**.** Băng thông quang cao cho phép xử lý tín hiệu tốc độ cao mà đôi khi khó hoặc không thể thực hiện trong hệ điện tử. Nói cách khác, một số chức năng vi ba "nặng" như lọc, trộn tần, nâng/hạ tần có thể được thực hiện trong miền quang. Ví dụ, lọc sóng mm có thể được thực hiện bằng cách chuyển đổi tín hiệu điện cần lọc sang tín hiệu quang, sau đó lọc bằng các linh kiện quang như giao thoa kế Mach–Zehnder (MZI) hoặc lưới sợi Bragg (FBG), rồi chuyển ngược tín

hiệu đã lọc về miền điện. Hơn nữa, xử lý trong miền quang cho phép sử dụng các linh kiện quang băng thông thấp hơn (như đi-ốt laser và bộ điều chế) mà vẫn có thể xử lý các tín hiệu băng thông rất rộng.

Việc khai thác băng thông khổng lồ của sợi quang bị hạn chế nghiêm trọng bởi băng thông của các hệ thống điện tử, vốn là nguồn phát và thiết bị thu dữ liệu truyền dẫn. Vấn đề này được gọi là "nút thắt cổ chai điện tử" (electronic bottleneck). Giải pháp vượt qua nút thắt là ghép kênh hiệu quả. Các kỹ thuật OTDM và DWDM được dùng trong hệ thống quang số. Với hệ thống quang tương tự bao gồm công nghệ RoF, Ghép kênh theo sóng mang con (SCM) được sử dụng để tăng mức độ tận dụng băng thông sợi quang. Trong SCM, nhiều sóng mang con vi ba được điều chế bằng dữ liệu số hoặc tương tự, rồi kết hợp lại để điều chế tín hiệu quang, sau đó truyền trên một sợi duy nhất. Cách làm này giúp hệ thống RoF có chi phí hiệu quả**.**

- *Khả năng miễn nhiễm với nhiễu tần số vô tuyến:* Khả năng miễn nhiễm với nhiễu điện từ (EMI) là một đặc tính rất đáng giá của truyền thông bằng sợi quang, đặc biệt đối với truyền dẫn vi ba. Lý do là vì tín hiệu được truyền dưới dạng ánh sáng bên trong sợi quang. Nhờ khả năng miễn nhiễm này, cáp quang thường được ưu tiên sử dụng ngay cả cho các kết nối ngắn ở dải mm-wave. Liên quan đến miễn nhiễm EMI còn là khả năng chống nghe lén, vốn là một đặc trưng quan trọng của truyền thông sợi quang vì nó mang lại tính riêng tư và an toàn.

- *Dễ lắp đặt và bảo trì:* Trong các hệ thống RoF, thiết bị phức tạp và đắt tiền được đặt tại trung tâm (CS), nhờ đó RAU trở nên đơn giản hơn. Ví dụ, phần lớn các kỹ thuật RoF loại bỏ nhu cầu phải có dao động nội (LO) và các thiết bị liên quan ở RAU. Trong những trường hợp như vậy, một photodetector (PD), một khuếch đại RF và một anten là đủ để cấu thành RAU. Các thiết bị điều chế và chuyển mạch được đặt tại CS và dùng chung cho nhiều RAU. Cách bố trí này giúp RAU nhỏ gọn và nhẹ hơn, qua đó giảm chi phí lắp đặt và bảo trì. Việc lắp đặt dễ dàng và chi phí bảo trì thấp của RAU đặc biệt quan trọng đối với các hệ mm-wave, do cần triển khai **số** lượng RAU lớn. Trong các ứng dụng mà RAU khó tiếp cận, việc giảm nhu cầu bảo trì còn

dẫn đến tiết kiệm chi phí vận hành đáng kể. RAU nhỏ hơn cũng góp phần giảm tác động môi trường.

- *Giảm tiêu thụ điện năng:* Mức tiêu thụ điện năng thấp là hệ quả của RAU đơn giản với ít thiết bị. Phần lớn thiết bị phức tạp được đặt tại CS tập trung. Trong một số ứng dụng, RAU có thể hoạt động thụ động. Chẳng hạn, một số hệ Fibre-Radio 5 GHz sử dụng pico-cell có thể vận hành RAU ở chế độ thụ động. Giảm tiêu thụ điện tại RAU là rất quan trọng vì đôi khi RAU được đặt ở vị trí xa, không có lưới điện.

- *Hỗ trợ đa nhà mạng và đa dịch vụ:* RoF mang lại tính linh hoạt vận hành cho hệ thống. Tùy thuộc kỹ thuật tạo sóng vi ba, hệ phân phối RoF có thể được thiết kế trong suốt theo định dạng tín hiệu (signal-format transparent). Ví dụ, kỹ thuật IM-DD (Điều chế theo cường độ và tách sóng trực tiếp) có thể vận hành như một hệ tuyến tính, do đó trong suốt với nhiều định dạng. Điều này đạt được bằng cách dùng sợi tán sắc thấp (SMF) kết hợp với các sóng mang con RF đã được điều chế sẵn (SCM). Khi đó, cùng một mạng RoF có thể dùng để phân phối lưu lượng đa nhà mạng và đa dịch vụ, đem lại tiết kiệm kinh tế lớn.

- *Phân bổ tài nguyên động:* Vì các chức năng chuyển mạch, điều chế và các chức năng RF khác được thực hiện tại CS tập trung, ta có thể phân bổ dung lượng một cách động. Chẳng hạn, trong một hệ phân phối RoF cho lưu lượng GSM, có thể cấp nhiều dung lượng hơn cho một khu vực (ví dụ trung tâm mua sắm) vào giờ cao điểm, rồi tái phân bổ sang các khu vực khác khi giờ thấp điểm (ví dụ khu dân cư đông đúc vào buổi tối). Việc này có thể thực hiện bằng cách cấp phát các bước sóng quang thông qua WDM theo nhu cầu phát sinh. Phân bổ dung lượng động theo nhu cầu giúp tránh phải cấp phát cố định vốn lãng phí khi lưu lượng thay đổi thường xuyên với biên độ lớn. Hơn nữa, CS tập trung còn tạo điều kiện hợp nhất các chức năng xử lý tín hiệu khác như quản lý di động và truyền đa dạng vĩ mô.

1.2.2. Thách thức đối với ứng dụng RoF

Hệ thống RoF về bản chất là một liên kết truyền dẫn tương tự, trong đó tín hiệu vô tuyến (RF) được điều chế và phát hiện trực tiếp trên miền quang. Do đó, chất lượng truyền dẫn của RoF chịu ảnh hưởng mạnh bởi các yếu tố nhiễu, méo phi tuyến

và tán sắc sợi quang, vốn đặc trưng của các hệ thống truyền dẫn tương tự. Các hiệu ứng này làm suy giảm hệ số nhiễu và dải động của liên kết, ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu năng toàn hệ thống.

Trong mạng di động, công suất tín hiệu thu tại trạm gốc có thể biến thiên tới 80 dB, đòi hỏi liên kết RoF phải có dải động rộng để xử lý đồng thời các tín hiệu yếu và mạnh mà không gây méo. Các nguồn nhiễu chủ yếu gồm nhiễu cường độ tương đối (RIN), nhiễu pha của laser, Nhiễu dòng lượng tử và nhiễu nhiệt của photodiode, cùng tán sắc sắc độ (chromatic dispersion) trong sợi đơn mode (SMF), vốn gây lệch pha và giới hạn chiều dài truyền.

Bên cạnh đó, phi tuyến của các linh kiện điện–quang (E/O) như bộ điều chế Mach–Zehnder (MZM) và photodiode có thể gây méo xuyên điều chế (IMD) và méo biên độ–pha (AM–PM), đặc biệt nghiêm trọng với các điều chế đa mức như QAM hoặc OFDM. Ở các hệ thống mmWave-RoF, chỉ vài kilomet sợi quang đã có thể gây hiệu ứng fading do tán sắc, đòi hỏi áp dụng điều chế một biên (SSB) hoặc bù tán sắc quang (DCF) [5].

Ngoài ra, các thách thức khác bao gồm độ ổn định tần số và nhiễu pha của laser, giới hạn băng thông của modulator/photodiode, và vấn đề đồng bộ thời gian giữa trạm trung tâm (CS) và RAU trong các mạng quy mô lớn như C-RAN hoặc PON-RoF. Bên cạnh các yếu tố kỹ thuật, chi phí thiết bị quang, điều khiển nhiệt và bảo mật vật lý cũng là rào cản đáng kể trong việc triển khai thực tế các hệ thống RoF.

1.3. Các kỹ thuật điều chế sử dụng trong RoF

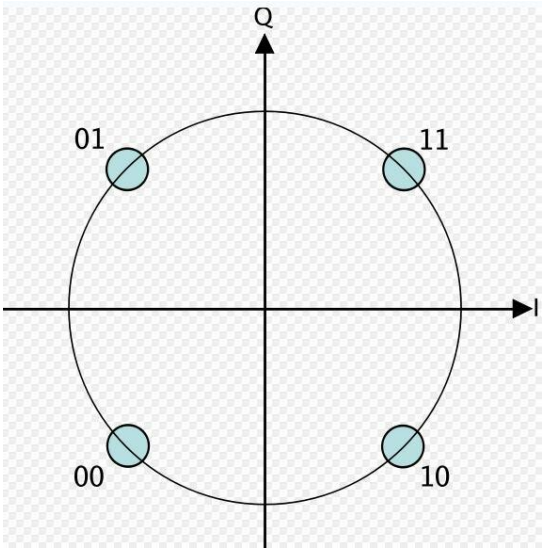
1.3.1. Kỹ thuật điều chế DP-QPSK

QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) là kỹ thuật điều chế pha cầu phương, trong đó mỗi ký hiệu (symbol) biểu diễn hai bit dữ liệu, nhờ đó nâng cao hiệu suất băng thông so với điều chế pha nhị phân (BPSK). Trong QPSK, tín hiệu sóng mang được biểu diễn dưới bốn pha khác nhau: 0°, 90°, 180° và 270°, tương ứng với bốn tổ hợp bit (00), (01), (11) và (10).

Biểu thức tổng quát của tín hiệu QPSK được viết như sau:

$$s_i(t)=A\cos(2\pi f_c t+\theta_i), \qquad i=1,2,3,4 \tag{1.1}$$

trong đó: A là biên độ sóng mang, f_c là tần số sóng mang, $\theta_i \in \{0, \pi/2, \pi, 3\pi/2\}$ là pha tương ứng với từng tổ hợp bit.



Hình 1.4: Chòm sao của tín hiệu QPSK với mã Gray được gán cho các điểm

Tín hiệu QPSK có thể viết dưới dạng hai thành phần trực giao (I và Q):

$$s(t) = I(t)\cos(2\pi f_c t) - Q(t)\sin(2\pi f_c t) \tag{1.2}$$

với I(t) và Q(t) là hai chuỗi dữ liệu nhị phân được lấy mẫu xen kẽ (bit chẵn và lẻ), rồi điều chế lên hai sóng mang vuông pha.

Trên mặt phẳng biên độ–pha (I–Q), bốn tín hiệu QPSK tạo thành chòm sao điều chế (constellation) gồm bốn điểm phân bố đều trên vòng tròn đơn vị, mỗi điểm cách nhau 90°. Để giảm xác suất lỗi khi truyền, mã Gray thường được sử dụng để ánh xạ bit, đảm bảo hai điểm liền kề chỉ sai khác một bit.

Điều chế DP-QPSK (Dual Polarization Quadrature Phase Shift Keying) dựa trên việc kết hợp hai kỹ thuật: điều chế pha cầu phương (QPSK) và phân cực kép của sóng ánh sáng trong truyền dẫn quang. Trong điều chế QPSK thông thường, mỗi ký hiệu được biểu diễn bằng một trong bốn pha khác nhau của sóng mang quang thường là 0°, 90°, 180° và 270°. Mỗi pha tương ứng với hai bit dữ liệu, do đó mỗi ký hiệu QPSK có thể mang được 2 bit thông tin.

Tuy nhiên, trong DP-QPSK, hệ thống tận dụng đặc tính phân cực của sóng ánh sáng cụ thể là hai trạng thái phân cực trực giao: phân cực ngang (X) và phân cực dọc (Y). Mỗi phân cực sẽ truyền một tín hiệu QPSK độc lập, nghĩa là hai luồng dữ liệu riêng biệt được điều chế và phát đồng thời trên cùng một sóng mang quang nhưng khác phân cực. Nhờ vậy, tổng lượng dữ liệu được truyền sẽ tăng gấp đôi, từ 2 bit/ký hiệu trong QPSK lên 4 bit/ký hiệu trong DP-QPSK, mà không cần tăng băng thông quang.

1.3.2. Kỹ thuật điều chế 16-QAM

16-QAM (Quadrature Amplitude Modulation) là kỹ thuật điều chế biên độ–pha cầu phương, trong đó cả biên độ và pha của sóng mang được thay đổi đồng thời để biểu diễn thông tin. Khác với PSK chỉ thay đổi pha, QAM sử dụng nhiều mức biên độ khác nhau, giúp tăng đáng kể hiệu suất băng thông của hệ thống.

Trong 16-QAM, mỗi ký hiệu (symbol) biểu diễn 4 bit dữ liệu vì $16 = 2^4$. Do đó, tốc độ truyền dữ liệu cao hơn gấp đôi so với QPSK (2 bit/ký hiệu) mà không cần tăng băng thông kênh.

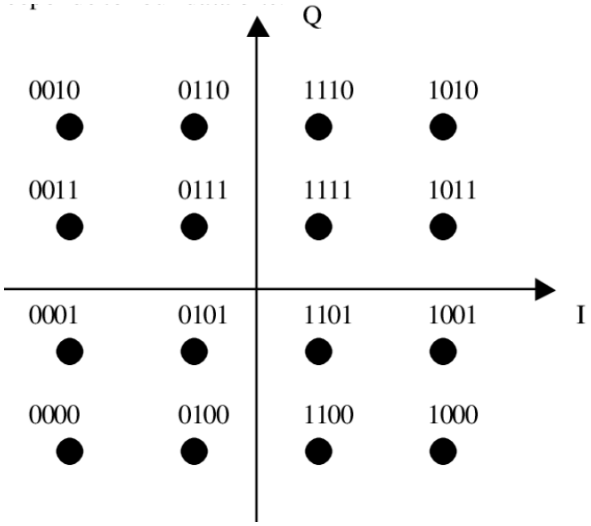
Tín hiệu 16-QAM có thể biểu diễn dưới dạng:

$$s(t) = I(t)\cos(2\pi f_c t) - Q(t)\sin(2\pi f_c t) \qquad (1.3)$$

trong đó:

- I(t) và Q(t) là hai thành phần biên độ tín hiệu (In-phase và Quadrature),
- Mỗi thành phần có thể nhận bốn mức biên độ khác nhau, thường được chọn theo tập giá trị $\{\pm 1, \pm 3\}$ (chuẩn hóa theo công suất trung bình).

Tập hợp các điểm tín hiệu trong mặt phẳng I–Q tạo thành chòm sao điều chế 16 điểm, được sắp xếp theo ma trận 4×4 như minh họa trong Hình 1.14. Các điểm được gán mã Gray nhằm giảm xác suất lỗi bit khi tín hiệu bị nhiễu.



Hình 1.5: Chòm sao của tín hiệu 16-QAM

Năng lượng trung bình của một ký hiệu 16-QAM được xác định theo công thức:

$$E_s = \frac{2}{3}(M-1)E_b \quad (1.4)$$

trong đó Eb là năng lượng trung bình trên mỗi bit và M=16.

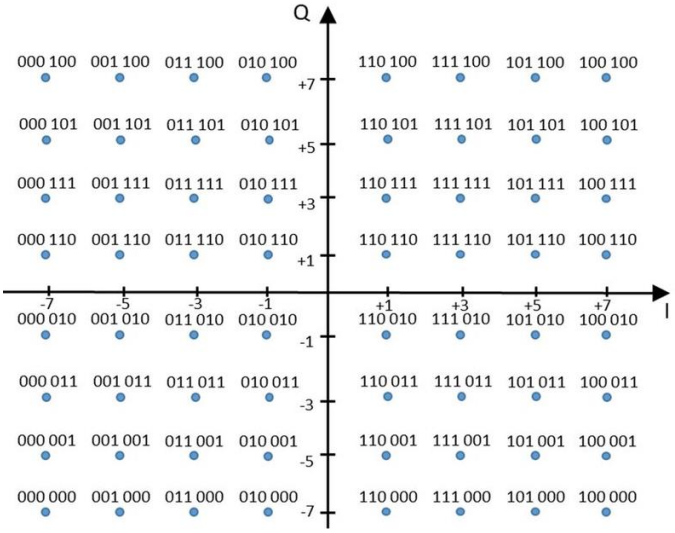
Về đặc tính, 16-QAM có hiệu suất phổ cao (4 bit/s/Hz) nhưng nhạy nhiễu hơn so với QPSK do khoảng cách giữa các điểm chòm sao nhỏ hơn. Vì vậy, kỹ thuật này yêu cầu tỷ số SNR hoặc OSNR cao hơn để duy trì cùng mức BER.

1.3.3. Kỹ thuật điều chế 64-QAM

Nguyên lý điều chế 64-QAM tương tự như 16-QAM. Với M= 64 = 2^6, mỗi ký hiệu (symbol) mang 6 bit dữ liệu**,** giúp tăng gấp ba lần hiệu suất phổ so với QPSK (2 bit/symbol) và gấp rưỡi so với 16-QAM (4 bit/symbol).

Với mật độ tín hiệu dày đặc, 64-QAM có hiệu suất phổ cao nhất trong các dạng điều chế QAM phổ biến, đạt 6 bit/s/Hz, nhưng độ nhạy nhiễu cao do khoảng cách giữa các điểm tín hiệu nhỏ. Điều này yêu cầu hệ thống có SNR hoặc OSNR rất cao và độ tuyến tính tốt để đảm bảo tỷ lệ lỗi bit (BER) thấp.

Trong các hệ thống RoF, 64-QAM được sử dụng cho ứng dụng truyền dữ liệu dung lượng lớn như mạng lõi 5G, radar độ phân giải cao, hoặc liên lạc băng rộng quân sự. Tuy nhiên, để đạt hiệu năng tối ưu, cần bù tán sắc, giảm phi tuyến, và duy trì ổn định công suất quang, đặc biệt trong các tuyến truyền xa.



Hình 1.6: Chòm sao của tín hiệu 64-QAM

1.3.4. Kỹ thuật điều chế OFDM

Trong kỹ thuật OFDM, băng tần tổng được phân chia thành N băng tần tổng cho N kênh, mỗi kênh sử dụng một sóng mang con và N sóng mang con này trực giao với nhau. Kỹ thuật OFDM không cần băng tần bảo vệ, cho phép tăng hiệu quả sử dụng băng tần. Để đảm bảo trực giao, N sóng mang con trong OFDM phải có tần số như sau $f_k = k/T_{sym}$ với k = 0, 1,…, N-1 và T_{sym} là chu kì của tín hiệu OFDM. Trong các hệ thống OFDM, để tăng cường hơn nữa hiệu quả sử dụng phổ tần, các phương pháp điều chế M-PSK (Phase Shift Keying), M-QAM (Quadrature Amplitude Modulation), … được sử dụng để điều chế chuỗi bit dữ liệu lên các sóng mang con. Giả sử chuỗi bit ban đầu có tốc độ R_b lớn, chu kì bit Ts tương ứng rất nhỏ. Chuỗi bit này sau khi đưa vào điều biến PSK/QAM được chuyển đổi thành N chuỗi dữ liệu song song và gán lên N sóng mang con. Đặt $Xl[k]$ là biểu diễn cho kí hiệu thứ l được gán trên sóng mang con thứ k của tín hiệu OFDM, với k = 0, 1, … , N - 1 và l = 0, 1, … , ∞, khi đó chu kì của kí hiệu sẽ tăng lên là NTs, đúng bằng chu kì tín hiệu OFDM, $T_{sym} = NT$s. Lúc này, tín hiệu OFDM tổng dưới dạng tương đương thông thấp sẽ là

$$x(t) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{N-1} X_l[k] e^{j2\pi f_k (t - lT_{sym})} \qquad (1.5)$$

Biểu thức (1.5) cho thấy x(t) biểu diễn dạng sóng tín hiệu OFDM trong miền thời gian liên tục tại đầu ra bộ DAC (Digital to Analog Converter), thu được từ biến đổi Fourier ngược rời rạc của các kí hiệu PSK/QAM. Nói cách khác, nếu gán N kí hiệu PSK/QAM lên N đầu vào của bộ IFFT (Inverse Fast Fourier Transform) N điểm thì tại lối ra của bộ IFFT ta sẽ thu được các mẫu rời rạc trong miền thời gian của một tín hiệu OFDM gồm N sóng mang con. Ở phía thu, quá trình khôi phục các kí hiệu Xlk cũng được thực hiện tương tự dựa trên biến đổi Fourier thuận rời rạc FFT (Fast Fourier Transform).

Như vậy, tín hiệu OFDM hoàn toàn có thể tạo và khôi phục một cách đơn giản nhờ các bộ IFFT/FFT trong miền số sẽ giúp cho bộ thu/ phát tín hiệu OFDM quang trở nên đơn giản hơn, đồng thời giải quyết được các thách thức về tính trực giao và sự nhạy cảm về nhiễu pha. Kỹ thuật vi mạch với những tiến bộ mạnh mẽ gần đây, cung cấp các mạch xử lý tín hiệu OFDM tốc độ rất cao, tạo điều kiện thuận lợi để kỹ thuật OFDM được ứng dụng rộng rãi trong nhiều hệ thống truyền thông tín hiệu điện và tín hiệu quang.

1.4. Ứng dụng thực tiễn của RoF trong quân sự.

Trong các hoạt động quân sự hiện đại, yêu cầu về một hệ thống truyền thông an toàn, đáng tin cậy và có hiệu suất cao đóng vai trò then chốt trong việc đảm bảo thành công của mọi nhiệm vụ tác chiến. Sự phát triển nhanh chóng của chiến tranh điện tử (Electronic Warfare – EW), sự gia tăng các mối đe dọa mạng, cùng nhu cầu truyền dữ liệu dung lượng lớn theo thời gian thực đã thúc đẩy việc ứng dụng các công nghệ truyền dẫn tiên tiến. Cùng với môi trường tác chiến quân sự luôn được đặc trưng bởi tính khắc nghiệt, biến động nhanh và nguy cơ bị tấn công điện tử cao. Do đó, hệ thống truyền thông quân sự phải đồng thời đáp ứng nhiều tiêu chí nghiêm ngặt như bảo mật, độ tin cậy, phạm vi truyền xa và tính cơ động cao. Về mặt bảo mật, các hệ thống truyền dẫn RF truyền thống có thể bị đối phương chặn thu hoặc gây nhiễu, làm lộ thông tin hoặc gián đoạn liên lạc. Về mặt truyền dẫn, tín hiệu RF suy giảm mạnh khi khoảng cách tăng hoặc gặp vật cản địa hình, trong khi đó môi trường chiến trường lại chứa nhiều nguồn phát nhiễu điện từ như radar, thiết bị tác chiến điện tử và các

nguồn năng lượng cao. Ngoài ra, yêu cầu về khả năng triển khai nhanh chóng ở nhiều môi trường khác nhau – từ chiến trường mặt đất, không quân, đến hải quân cũng là thách thức lớn đối với các hệ thống truyền thông truyền thống.

Trong điều kiện này, RoF nổi lên như một giải pháp hiệu quả nhờ cơ chế truyền dẫn độc đáo. Về nguyên lý hoạt động, tín hiệu RF được chuyển đổi thành tín hiệu quang tại đầu phát, sau đó truyền qua sợi quang, rồi được chuyển ngược lại thành tín hiệu RF tại đầu thu. Cấu trúc này cho phép tận dụng băng thông rộng và suy hao cực thấp của sợi quang để truyền tín hiệu RF đi xa mà vẫn giữ nguyên đặc tính pha và biên độ. So với các phương thức truyền dẫn khác, hệ thống RoF mang lại nhiều ưu thế kỹ thuật nổi bật, đặc biệt trong các ứng dụng quân sự.

Trước hết, RoF mang lại mức độ bảo mật truyền thông rất cao. Do tín hiệu được truyền dưới dạng quang học thay vì sóng RF phát tán trong không khí, nên việc phát hiện, gây nhiễu hoặc chặn thu gần như không thể thực hiện bằng các thiết bị thu vô tuyến thông thường. Ngoài ra, công nghệ này còn cho phép áp dụng các cơ chế mã hóa quang học và mã hóa dữ liệu ngay trên đường truyền, giúp tăng cường khả năng chống tấn công mạng và ngăn rò rỉ thông tin nhạy cảm.

Bên cạnh đó, RoF có khả năng truyền tín hiệu đi xa với suy hao cực thấp. Sợi quang chỉ có tổn hao trung bình khoảng 0,2 dB/km, thấp hơn hàng trăm lần so với cáp đồng trục, cho phép kết nối ổn định giữa các căn cứ, trạm radar hoặc hệ thống UAV cách xa nhau hàng chục kilomet mà vẫn duy trì độ trung thực của tín hiệu RF.

Một ưu điểm quan trọng khác là tính miễn nhiễm với nhiễu điện từ (EMI). Vì tín hiệu được truyền dưới dạng ánh sáng, hệ thống hoàn toàn không chịu ảnh hưởng của trường điện từ hay xung điện từ (EMP). Đây là đặc điểm có ý nghĩa chiến lược trong tác chiến điện tử, nơi mà các hệ thống RF truyền thống thường bị ảnh hưởng nặng nề bởi nhiễu nền.

Ngoài ra, RoF còn mang lại tính linh hoạt và cơ động cao. Cáp quang nhẹ hơn rất nhiều so với cáp đồng, cho phép triển khai nhanh chóng trên địa hình phức tạp hoặc trong môi trường chiến đấu di động. Các mô-đun RoF có thể tích hợp trực tiếp vào thiết bị chiến thuật như UAV, xe chiến đấu, tàu ngầm, trạm radar cơ động hoặc

trạm chỉ huy dã chiến, giúp giảm khối lượng, đơn giản hóa cấu hình và tăng độ cơ động của toàn hệ thống.

Nhờ những ưu điểm này, RoF đã và đang được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực quân sự trọng yếu**.** Trong hệ thống chỉ huy và kiểm soát (C2), công nghệ này đóng vai trò như kênh kết nối tốc độ cao, an toàn giữa các đơn vị, hỗ trợ truyền dữ liệu, hình ảnh và video chiến thuật theo thời gian thực. Trong hệ thống radar và giám sát chiến trường, RoF giúp truyền tín hiệu radar tần số cao qua sợi quang mà vẫn duy trì độ chính xác về pha và biên độ, đảm bảo khả năng đo xa và đo góc chính xác. Ở mảng thông tin vệ tinh (SATCOM), RoF giúp cải thiện chất lượng liên lạc uplink và downlink ngay cả trong điều kiện nhiễu mạnh. Trong tác chiến điện tử (EW), công nghệ này được tích hợp vào các hệ thống thu, phát và gây nhiễu để phân tích phổ, phát hiện tín hiệu đối phương và triển khai các biện pháp chống nhiễu chủ động. Hải quân và tàu ngầm cũng sử dụng RoF để thiết lập liên kết truyền dẫn chống nhiễu trong môi trường nước mặn có độ dẫn điện cao, nơi sóng RF thông thường bị suy giảm mạnh. Đặc biệt, trong các hệ thống UAV hoặc UCAV, RoF giúp truyền tải dữ liệu cảm biến, hình ảnh và tín hiệu điều khiển với độ trễ cực thấp qua các kết nối quang nhẹ, đảm bảo phản ứng tức thời và bảo mật trong môi trường tác chiến.

Như vậy, trong kỷ nguyên số và chiến tranh điện tử hiện đại, RoF đang trở thành nền tảng trọng yếu cho hệ thống truyền thông quân sự an toàn, đáng tin cậy và băng thông cao**.** Nhờ khả năng chống nhiễu, phạm vi truyền mở rộng, bảo mật vượt trội và tính linh hoạt trong triển khai, RoF đang được xem là một thành phần không thể thiếu trong các mạng chiến thuật thế hệ mới (Tactical Networks), hệ thống radar phân tán, mạng điều khiển UAV, và hệ thống C4ISR (Command, Control, Communications, Computers, Intelligence, Surveillance and Reconnaissance) của tương lai.

1.5. *Kết luận chương 1*

Trong Chương 1, đề án đã trình bày một cách hệ thống các cơ sở lý thuyết và nền tảng kỹ thuật của công nghệ RoF, làm tiền đề cho việc phân tích và đánh giá hiệu năng ở các chương tiếp theo. Trước hết, khái niệm RoF cùng nguyên lý hoạt động cơ bản đã được giới

thiệu, qua đó làm rõ cơ chế truyền dẫn tín hiệu vô tuyến thông qua sợi quang cũng như những khác biệt cơ bản so với các hệ thống truyền dẫn RF truyền thống.

Tiếp theo, cấu trúc hệ thống RoF và các thành phần chính như trạm trung tâm (CS), mạng phân phối quang (ODN), trạm đầu xa (BS/RAU) và môi trường truyền dẫn sợi quang đã được phân tích chi tiết. Việc tập trung các chức năng xử lý tín hiệu tại CS giúp đơn giản hóa cấu trúc RAU, nâng cao tính linh hoạt trong triển khai, đồng thời giảm chi phí lắp đặt và bảo trì hệ thống. Bên cạnh đó, các ưu điểm nổi bật của RoF như suy hao truyền dẫn thấp, băng thông lớn, khả năng miễn nhiễm với nhiễu điện từ và tính linh hoạt trong phân bổ tài nguyên đã được làm rõ, đồng thời chỉ ra những thách thức kỹ thuật liên quan đến nhiễu, phi tuyến, tán sắc sợi quang và yêu cầu cao về chất lượng linh kiện quang.

Chương này cũng đã trình bày các kỹ thuật điều chế thường được sử dụng trong hệ thống RoF, bao gồm DP-QPSK, 16-QAM, 64-QAM và OFDM. Mỗi kỹ thuật được phân tích về nguyên lý, đặc điểm chòm sao, hiệu suất phổ cũng như yêu cầu về tỷ số tín hiệu trên nhiễu, qua đó cho thấy sự đánh đổi giữa dung lượng truyền dẫn và độ bền vững trước nhiễu. Đặc biệt, các kỹ thuật điều chế bậc cao và OFDM cho phép nâng cao đáng kể hiệu suất phổ, nhưng đồng thời đòi hỏi chất lượng kênh truyền và độ tuyến tính hệ thống cao hơn, nhất là trong các tuyến RoF truyền xa.

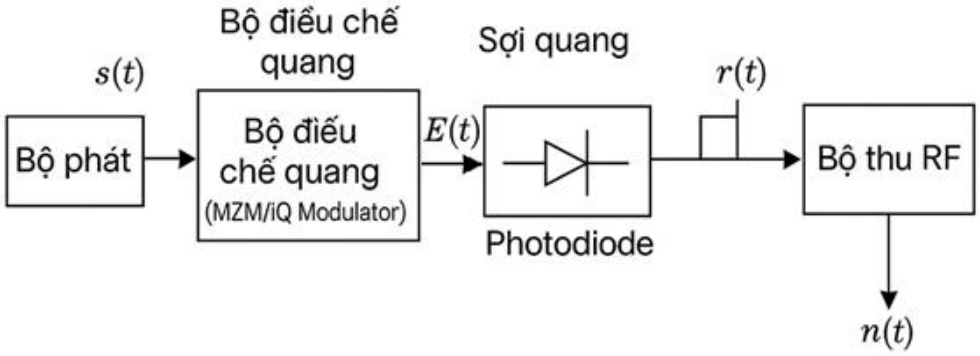
Cuối cùng, các ứng dụng thực tiễn của RoF trong lĩnh vực quân sự đã được phân tích, cho thấy công nghệ này có tiềm năng lớn trong các hệ thống chỉ huy – điều khiển, radar, thông tin vệ tinh, tác chiến điện tử và mạng điều khiển UAV. Với các ưu điểm về bảo mật, khả năng chống nhiễu, phạm vi truyền dẫn rộng và tính cơ động cao, RoF được xem là một giải pháp phù hợp cho các hệ thống truyền thông quân sự hiện đại và tương lai.

Từ những phân tích trên, có thể khẳng định rằng RoF là một nền tảng công nghệ truyền dẫn đầy triển vọng, đặc biệt khi kết hợp với các kỹ thuật điều chế tiên tiến. Những nội dung lý thuyết được trình bày trong Chương 1 là cơ sở quan trọng cho việc xây dựng mô hình và đánh giá hiệu năng của các kỹ thuật điều chế trong hệ thống RoF, sẽ được nghiên cứu và phân tích chi tiết trong Chương 2 của đề án.

CHƯƠNG 2. PHÂN TÍCH ĐÁNH GIÁ KÊNH TRUYỀN RoF SỬ DỤNG DP-QPSK, 16-QAM VÀ 64-QAM

2.1. Mô hình kênh truyền trong RoF

Hệ thống RoF là công nghệ truyền dẫn trong đó tín hiệu vô tuyến (RF) được điều chế lên sóng quang và truyền qua sợi quang tới các trạm thu phát từ xa (RAU). Trong cấu trúc này, sợi quang đóng vai trò kênh truyền dẫn chính giữa trạm trung tâm (CS) và trạm thu phát RAU. Kênh RoF mang tính lai giữa kênh quang học và kênh điện vô tuyến, do tín hiệu RF được truyền trong miền quang rồi phục hồi ở miền điện. Vì vậy, mô hình kênh phải mô tả đầy đủ các hiện tượng vật lý như suy hao**,** tán sắc, phi tuyến và nhiễu.



Hình 2.1: Mô hình kênh truyền trong hệ thống RoF

Tại phía phát, tín hiệu RF s(t) được điều chế lên sóng quang thông qua bộ điều chế quang; tín hiệu quang truyền qua sợi quang và được chuyển đổi trở lại thành tín hiệu RF r(t) tại đầu thu bằng photodiode (PD).

2.1.1. Biểu diễn toán học của mô hình kênh truyền

Kênh RoF có thể được mô hình hóa như một hệ tuyến tính bất biến theo thời gian trong phạm vi phân tích, khi hệ thống làm việc trong miền tuyến tính. Khi đó, tín hiệu thu r(t) là kết quả của phép chập giữa tín hiệu phát và đáp ứng xung của kênh, cộng với nhiễu tổng hợp:

$$r(t)=s(t)*h_{opt}(t)*h_{ele}(t)+n(t) \quad (2.1)$$

Trong đó *s(t)* là tín hiệu vô tuyến được điều chế quang tại đầu phát; $h_{opt}(t)$ là đáp ứng xung của kênh quang (bao gồm đặc tính của sợi quang, bộ khuếch đại và bộ lọc quang, nếu có); $h_{ele}(t)$ là đáp ứng xung của khối thu điện (photodiode và bộ khuếch đại RF); *n(t)* là nhiễu tổng hợp dạng nhiễu cộng, giả thiết độc lập với tín hiệu; và *r(t)* là tín hiệu thu sau khi qua kênh truyền.

Khi xét trong miền tần số, biểu thức trên được viết lại dưới dạng:

$$R(f) = S(f) \cdot H_{opt}(f) \cdot H_{ele}(f) + N(f) \quad (2.2)$$

Trong đó $H_{opt}(f)$ và $H_{ele}(f)$ lần lượt là hàm truyền tần số của kênh quang và khối thu điện.

2.1.2. Mô hình hóa từng thành phần của kênh truyền

2.1.2.1. Tín hiệu phát s(t)

Trong hệ thống RoF, tín hiệu RF được điều chế lên sóng quang bằng các sơ đồ điều chế như DP-QPSK, 16-QAM hoặc 64-QAM. Tín hiệu quang đầu ra của bộ điều chế có thể biểu diễn dưới dạng:

$$E_{in}(t) = E_0[1 + m \cdot s(t)]e^{j2\pi f_c t} \quad (2.3)$$

trong đó:

E_0: biên độ sóng quang phát ra từ laser, m: chỉ số điều chế, f_c: tần số sóng mang quang (khoảng 193 THz tương ứng 1550 nm).

Khi tín hiệu *s(t)* là dạng phức *s(t) = I(t) + jQ(t)*, nó biểu diễn dữ liệu điều chế theo pha và biên độ, tương ứng với các sơ đồ QPSK hoặc QAM.

Với giả thiết $m|s(t)| \ll 1$ để đảm bảo hệ thống làm việc trong miền tuyến tính.

2.1.2.2. Đáp ứng kênh quang $h_{opt}(t)$

Đáp ứng của kênh quang bao gồm ảnh hưởng của suy hao quang, tán sắc, phi tuyến sợi quang**.**

Trong miền tần số, đặc tính truyền quang được mô tả bởi:

$$H_{opt}(f) = e^{-\alpha L} \cdot e^{-j\beta(f)L} \quad (2.4)$$

Trong đó:

α: hệ số suy hao quang (dB/km); L: chiều dài sợi quang; $\beta(f)$: hằng số pha lan truyền, được khai triển theo chuỗi Taylor quanh tần số trung tâm f_0:

$$\beta(f) \approx \beta_0 + \beta_1(f-f_0) + \frac{1}{2}\beta_2(f-f_0)^2 \quad (2.5)$$

trong đó β_2 thể hiện tán sắc nhóm.

Như vậy, thành phần $e^{-j\frac{1}{2}\beta_2 L(f-f_0)^2}$ gây ra sự lệch pha theo tần số, làm méo pha tín hiệu RF, hiện tượng này gọi là RF fading trong RoF.

Nếu xét đến phi tuyến quang, trường quang đầu ra còn chịu thêm pha phi tuyến:

$$E_{\text{out}}(t) = E_{\text{in}}(t)e^{j\gamma|E_{\text{in}}(t)|^2 L} \quad (2.6)$$

với γ là hệ số phi tuyến của sợi ($W^{-1}\cdot km^{-1}$). Hiệu ứng phi tuyến này trở nên đáng kể khi công suất quang cao và chiều dài sợi lớn. Khi công suất tín hiệu tăng cao, hiệu ứng này gây méo biên độ và pha, đặc biệt nghiêm trọng đối với điều chế bậc cao như 64-QAM.

2.1.2.3. Đáp ứng phần điện $h_{ele}(t)$

Tại phía thu, photodiode (PD) thực hiện chuyển đổi quang-điện theo nguyên lý:

$$i(t)=R|E_{out}(t)|^2 \quad (2.7)$$

với R là độ nhạy quang (A/W). Tín hiệu điện thu được sau PD được khuếch đại và lọc trong dải tần RF mong muốn.

Hàm truyền điện của phần này được mô tả:

$$H_{ele}(f) = \frac{1}{1+j\frac{f}{fc,PD}} \quad (2.8)$$

trong đó *fc,PD* là tần số cắt -3 dB của photodiode và mạch thu RF.

Băng thông hạn chế của PD và bộ khuếch đại có thể gây suy giảm tín hiệu ở các tần số cao, ảnh hưởng đến SNR và EVM.

2.1.2.4. Nhiễu trong hệ thống n(t)

Tổng nhiễu trong hệ thống RoF bao gồm nhiều nguồn:

$$n(t)=n_{shot}(t)+n_{thermal}(t)+n_{ASE}(t)+n_{RIN}(t) \quad (2.9)$$

Trong đó:

Nhiễu dòng lượng tử do dao động lượng tử của dòng điện quang:

$$Pshot=2qIB \quad (2.10)$$

Trong đó B là băng thông nhiễu.

Nhiễu nhiệt do điện trở tải và khuếch đại:

$$P_{thermal}=4kTB/R_L \quad (2.11)$$

Nhiễu cường độ tương đối: do dao động công suất laser,

Nhiễu phát xạ tự phát khuếch đại: phát sinh khi sử dụng bộ khuếch đại quang EDFA.

Tổng công suất nhiễu P_{noise} ảnh hưởng trực tiếp đến tỷ số tín hiệu trên nhiễu (SNR) và tỷ số tín hiệu trên nhiễu quang (OSNR).

Các nguồn nhiễu được giả thiết là nhiễu Gaussian trắng và độc lập với tín hiệu.

2.2. Các tham số đánh giá hiệu năng

2.2.1. Tham số BER

Tỷ lệ lỗi bit **(**Bit Error Rate – BER**)** là thông số định lượng độ chính xác của hệ thống truyền dữ liệu. BER được định nghĩa là tỉ lệ giữa số bit nhận sai trên tổng số bit truyền đi trong một khoảng thời gian nhất định:

$$BER = \frac{N_{error}}{N_{total}} \quad (2.12)$$

Với kênh Gaussian, BER có thể tính theo hàm Q (hàm tail Gaussian):

$$BER = Q\left(\sqrt{2\frac{E_b}{N_0}}\right) \quad (2.13)$$

Trong đó: E_b: năng lượng trên mỗi bit; N_0: mật độ phổ công suất nhiễu.

Quan hệ giữa SNR và BER phụ thuộc vào sơ đồ điều chế:

- Với BPSK/QPSK:

$$BER = Q\left(\sqrt{2SNR}\right) \quad (2.14)$$

- Với M-QAM (M = 16, 64):

$$BER \approx \frac{4}{\log_2(M)}\left(1-\frac{1}{\sqrt{M}}\right) Q\left(\sqrt{\frac{3\log_2(M)}{M-1}SNR}\right) \quad (2.15)$$

Từ (2.8) có thể thấy khi bậc điều chế M tăng (như 64-QAM), hệ thống yêu cầu SNR cao hơn đáng kể để duy trì cùng mức BER. Điều này giải thích vì sao DP-QPSK thường có BER thấp hơn trong cùng điều kiện kênh so với 16-QAM hay 64-QAM.

Các biểu thức BER trên được suy ra với giả thiết kênh AWGN và giải điều chế tối ưu.

2.2.2. Tham số SNR

Tỷ số tín hiệu trên nhiễu (Signal-to-Noise Ratio – SNR) là đại lượng cơ bản nhất dùng để đánh giá độ tin cậy của kênh truyền.

SNR biểu thị tỉ lệ giữa công suất tín hiệu mong muốn và công suất nhiễu trong cùng băng tần.

$$\mathrm{SNR} = \frac{P_{Signal}}{P_{Noise}} \tag{2.16}$$

hoặc dưới dạng logarit:

$$SNR_{dB} = 10\log_{10}\left(\frac{P_{Signal}}{P_{Noise}}\right) \tag{2.17}$$

Trong hệ thống RoF, P_{signal} là công suất của tín hiệu RF thu được sau photodiode, còn P_{noise} là tổng công suất nhiễu gồm nhiễu quang và nhiễu điện.

SNR có mối liên hệ trực tiếp với chất lượng điều chế và BER. Khi SNR giảm (do suy hao, nhiễu hoặc phi tuyến), tín hiệu chòm sao bị giãn và chồng lấn, dẫn tới tăng tỉ lệ lỗi bit.

2.2.3. Tham số OSNR

Tỷ số tín hiệu trên nhiễu quang (Optical Signal-to-Noise Ratio – OSNR) đặc trưng cho mức nhiễu trong miền quang học. Đây là thông số đo phổ biến trong các hệ thống truyền quang có bộ khuếch đại (EDFA).

$$\mathrm{OSNR} = \frac{P_{Signal,Optical}}{P_{Noise,Optical}} \tag{2.18}$$

Khi tính toán, OSNR thường được đo trong băng thông chuẩn 0,1 nm:

$$OSNR_{dB} = 10\log_{10}\left(\frac{P_{Signal,Optical}}{P_{Noise,Optical}}\right) \tag{2.19}$$

Trong hệ thống RoF, OSNR tỉ lệ thuận với công suất phát của nguồn laser và tỉ lệ nghịch với chiều dài sợi quang hoặc số tầng khuếch đại. Giá trị OSNR cao thể hiện tín hiệu quang có độ sạch tốt, do đó sau khi biến đổi quang-điện, tín hiệu RF thu được cũng có SNR cao và BER thấp.

Mối quan hệ giữa OSNR và BER được xác định thông qua hàm truyền của kênh với B_{opt} là băng thông quang đo, B_{ele} là băng thông tín hiệu điện là khi OSNR tăng, thì ($\sqrt{2 \cdot \frac{B_{opt}}{B_{ele}} \cdot OSNR}$) tăng làm hàm Q giảm dẫn đến BER giảm và ngược lại.

2.2.4. Tham số EVM

EVM (Error Vector Magnitude) là chỉ tiêu trực quan đánh giá độ méo của tín hiệu điều chế trong miền chòm sao. EVM được định nghĩa là tỉ lệ giữa sai lệch trung bình giữa các điểm tín hiệu thu và điểm lý tưởng so với biên độ tín hiệu chuẩn hóa:

$$EVM(\%) = \frac{\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} |S_{rx,k} - S_{\text{ideal},k}|^2}}{\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} |S_{\text{ideal},k}|^2}} \times 100\% \quad (2.20)$$

Trong đó:

$S_{rx,k}$: điểm tín hiệu thu thứ k,

$S_{ideal,k}$: điểm tín hiệu lý tưởng (trước khi có nhiễu, méo),

N: tổng số ký tự điều chế quan sát.

EVM càng nhỏ thì chòm sao càng "gọn" dẫn đến hệ thống có độ tuyến tính và SNR cao.

EVM bị ảnh hưởng bởi các yếu tố:

- Nhiễu: làm phân tán các điểm trong chòm sao.
- Phi tuyến: làm biến dạng hình dạng chòm sao.
- Suy hao và tán sắc: làm lệch biên độ và pha tín hiệu.

Giữa EVM và SNR tồn tại mối liên hệ gần đúng:

$$EVM_{rms} \approx \frac{1}{\sqrt{SNR}} \quad (2.21)$$

Khi SNR giảm 3 dB, EVM tăng xấp xỉ 41%, phản ánh độ suy giảm chất lượng truyền dẫn.

2.3. Ảnh hưởng của phi tuyến, nhiễu và suy hao

Trong hệ thống RoF, tín hiệu RF truyền qua sợi quang chịu ảnh hưởng của suy hao, nhiễu và phi tuyến, làm giảm SNR/OSNR, tăng EVM và dẫn đến tăng BER. Việc phân tích các yếu tố này giúp đánh giá giới hạn hiệu năng và đề xuất giải pháp tối ưu hệ thống.

Suy hao là sự suy giảm công suất tín hiệu theo chiều dài sợi do hấp thụ và tán xạ, làm giảm SNR/OSNR và làm suy giảm chất lượng tín hiệu. Do đó, cần sử dụng khuếch đại quang, lựa chọn bước sóng tối ưu (1550 nm) và bố trí tuyến hợp lý để bù suy hao.

Nhiễu trong hệ thống gồm nhiễu quang và nhiễu điện, làm suy giảm SNR, tăng EVM và BER. Để giảm nhiễu, cần sử dụng nguồn laser nhiễu thấp, tối ưu khuếch đại EDFA và giới hạn băng thông phù hợp.

Phi tuyến phát sinh chủ yếu do hiệu ứng Kerr, gây méo chòm sao tín hiệu, làm tăng EVM và BER, đặc biệt với điều chế bậc cao. Các giải pháp gồm giảm công suất phát, sử dụng sợi diện tích lớn và áp dụng kỹ thuật xử lý số để bù phi tuyến.

Tóm lại, suy hao, nhiễu và phi tuyến là các yếu tố chính quyết định chất lượng truyền dẫn trong hệ thống RoF, cần được kiểm soát đồng thời để đảm bảo hiệu năng tối ưu.

2.4. So sánh hiệu năng DP-QPSK, 16-QAM và 64-QAM trên thông tin quang

Trong hệ thống truyền dẫn RoF, kỹ thuật điều chế đóng vai trò then chốt, ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu năng, hiệu suất phổ và độ ổn định của quá trình truyền tín hiệu. Các phương pháp điều chế phổ biến hiện nay gồm có DP-QPSK, 16-QAM, và 64-QAM, mỗi loại có ưu điểm và giới hạn riêng, được lựa chọn tùy thuộc vào yêu cầu về tốc độ dữ liệu, độ tin cậy, công suất phát và chiều dài tuyến truyền.

Ba kỹ thuật điều chế này khác nhau chủ yếu ở số lượng bit được mã hóa trên mỗi ký tự, khoảng cách giữa các điểm chòm sao điều chế trong mặt phẳng biên độ – pha (I–Q), và độ nhạy của hệ thống đối với nhiễu và phi tuyến.

Đối với DP-QPSK, mỗi ký tự biểu diễn hai bit dữ liệu thông qua bốn trạng thái pha khác nhau (0°, 90°, 180°, 270°) và truyền song song trên hai phân cực quang trực giao. Nhờ cơ chế truyền kép theo phân cực, DP-QPSK có thể đạt tốc độ dữ liệu gấp đôi so với QPSK thông thường mà không cần mở rộng băng thông quang. Ưu điểm lớn nhất của phương pháp này là độ bền vững với nhiễu và suy hao cao, do khoảng cách giữa các điểm chòm sao lớn, cho phép truyền xa với BER rất thấp ngay cả khi công suất phát không lớn. Tuy nhiên, kỹ thuật này đòi hỏi bộ thu phát coherent phức tạp và các mạch xử lý tín hiệu số mạnh để giải điều chế chính xác pha và phân cực. Nhờ khoảng cách Euclid giữa các điểm chòm sao lớn, DP-QPSK có biên độ dự trữ nhiễu cao, đặc biệt phù hợp với các tuyến RoF dài và môi trường có suy hao, nhiễu lớn.

Kỹ thuật 16-QAM lại kết hợp điều chế cả pha và biên độ, cho phép mã hóa bốn bit trên mỗi ký tự. Với 16 điểm chòm sao, phương pháp này có hiệu suất phổ cao hơn gấp đôi so với QPSK. Tuy nhiên, khoảng cách giữa các điểm chòm sao nhỏ hơn, khiến tín hiệu dễ bị sai lệch khi gặp nhiễu hoặc phi tuyến. Để đạt được tỷ lệ lỗi bit BER ở mức 10^{-9}, hệ thống cần duy trì tỷ số tín hiệu trên nhiễu vào khoảng 18 – 20 dB. 16-QAM được xem là giải pháp trung hòa giữa tốc độ và độ tin cậy, phù hợp cho các tuyến RoF có chiều dài trung bình (khoảng 10–40 km), nơi có thể sử dụng khuếch đại quang và kỹ thuật bù tán sắc để duy trì chất lượng tín hiệu.

Trong khi đó, 64-QAM là kỹ thuật điều chế bậc cao, mã hóa 6 bit trên mỗi ký tự với 64 điểm chòm sao phân bố dày đặc trong mặt phẳng I–Q. Hiệu suất phổ của 64-QAM rất cao, cho phép truyền tải dung lượng dữ liệu cực lớn, nhưng đồng thời lại đòi hỏi độ tuyến tính và SNR rất cao để đảm bảo khả năng nhận dạng chính xác các mức biên độ và pha. Để đạt được BER tương tự như DP-QPSK, 64-QAM cần SNR cao hơn khoảng 14–16 dB, tức phải đạt mức 26–28 dB. Do đó, kỹ thuật này chỉ phù hợp trong các tuyến RoF ngắn (dưới 10–15 km) hoặc trong môi trường kiểm soát tốt, chẳng hạn như mạng RoF nội bộ trạm gốc 5G hoặc liên kết trong trung tâm dữ liệu, nơi điều kiện nhiễu, tán sắc và phi tuyến được kiểm soát nghiêm ngặt.

Bảng 2.1: Quan hệ giữa SNR và BER cho các sơ đồ điều chế trong RoF

Sơ đồ điều chế	BER mục tiêu	SNR yêu cầu (dB)	Độ nhạy nhiễu	Nhận xét
DP-QPSK	10^{-9}	≈ 12 dB	Tốt nhất	Ổn định trong kênh nhiễu và suy hao
16-QAM	10^{-9}	≈ 20 dB	Trung bình	Hiệu suất cao, cần bù nhiễu
64-QAM	10^{-9}	≈ 26–28 dB	Kém	Hiệu suất cực cao nhưng rất nhạy nhiễu

Các giá trị SNR yêu cầu trong Bảng 2.1 được xác định dựa trên mô hình kênh AWGN lý tưởng và kết quả mô phỏng điển hình trong hệ thống RoF, mang tính tham khảo tương đối để so sánh giữa các sơ đồ điều chế.

Khi so sánh định lượng, có thể nhận thấy rằng DP-QPSK đạt hiệu năng tốt nhất ở mức SNR thấp, chỉ cần khoảng 12 dB để duy trì BER = 10^{-9}, trong khi 16-QAM cần tới 20 dB và 64-QAM phải đạt xấp xỉ 27 dB. Điều này cho thấy DP-QPSK có ưu thế rõ rệt về độ tin cậy và khả năng chống nhiễu, đặc biệt khi truyền trên các tuyến RoF dài có nhiều tầng khuếch đại quang.

Bảng 2.2: Yêu cầu OSNR tối thiểu cho các sơ đồ điều chế

Sơ đồ	OSNR yêu cầu (dB/0.1 nm)	Ghi chú
DP-QPSK	≈ 10–12	Có thể bù bằng FEC dễ dàng
16-QAM	≈ 18	Cần nguồn quang công suất cao
64-QAM	≈ 24–26	Yêu cầu EDFA nhiễu thấp, tuyến tính cao

Xét trong miền quang học, tỷ số tín hiệu – nhiễu quang OSNR cũng là một chỉ tiêu quan trọng phản ánh hiệu năng truyền dẫn. DP-QPSK yêu cầu OSNR khoảng 10–12 dB/0.1 nm để đạt BER trước FEC ở mức 10^{-3}, trong khi 16-QAM và 64-QAM yêu cầu OSNR cao hơn đáng kể. Điều này có nghĩa là khi hệ thống có suy hao lớn hoặc nhiều tầng khuếch đại EDFA, DP-QPSK vẫn duy trì được tín hiệu ổn định, trong khi 64-QAM sẽ nhanh chóng vượt ngưỡng BER cho phép, làm giảm hiệu năng nghiêm trọng.

Bảng 2.3: Mức EVM cho phép đối với các sơ đồ điều chế

Sơ đồ	EVM tối đa (%)	Mức EVM thực tế (RoF 20 km)	Nhận xét
DP-QPSK	≤ 17.5	~8–10	Bền với méo pha, phi tuyến thấp
16-QAM	≤ 12.5	~14–16	Méo nhẹ, có thể bù tuyến tính
64-QAM	≤ 8	~18–22	Dễ méo, cần bù phi tuyến số

Kết quả EVM cho thấy DP-QPSK có độ bền cao nhất trước tác động của tán sắc và phi tuyến sợi quang, trong khi 64-QAM có biên độ EVM lớn, đòi hỏi điều kiện kênh và công suất quang được kiểm soát nghiêm ngặt.

Ngoài ra, nếu xét theo độ méo vector lỗi EVM, DP-QPSK có EVM trung bình khoảng 8–10%, thấp hơn đáng kể so với 16-QAM (14–16%) và 64-QAM (18–22%). Khi chiều dài sợi quang tăng hoặc công suất phát cao, EVM của 64-QAM tăng mạnh do ảnh hưởng của tán sắc và phi tuyến quang, khiến tín hiệu bị méo và sai lệch vị trí chòm sao.

Bảng 2.4: So sánh tổng thể các kỹ thuật điều chế trong hệ thống RoF

Chiều dài sợi (km)	**BER (DP-QPSK)**	**BER (16-QAM)**	**BER (64-QAM)**
10	1×10^{-11}	3×10^{-9}	6×10^{-7}
20	5×10^{-10}	2×10^{-7}	1×10^{-4}
40	2×10^{-8}	8×10^{-5}	$>10^{-2}$ (mất tín hiệu)
Tiêu chí	**DP-QPSK**	**16-QAM**	**64-QAM**
Bit/symbol	4 (với DP)	4	6
Hiệu suất phổ	Trung bình (4 bit/sym)	Cao (4 bit/sym)	Rất cao (6 bit/sym)
SNR yêu cầu (BER 10^{-9})	≈12 dB	≈20 dB	≈27 dB
OSNR yêu cầu (dB)	10–12	18	24–26
Độ nhạy nhiễu	Thấp	Trung bình	Rất cao
EVM điển hình	8–10%	14–16%	18–22%

Khả năng chịu phi tuyến	Tốt	Trung bình	Kém
Khoảng cách truyền RoF ổn định	>40 km	20–30 km	<15 km
Độ phức tạp thiết bị	Cao (cần IQ modulator & coherent receiver)	Trung bình	Cao
Ứng dụng điển hình	Mạng RoF đường dài, 5G fronthaul, mạng metro	Liên kết trung bình, indoor RoF	Mạng ngắn tốc độ cao, data center

Phân tích so sánh cho thấy, khi truyền trên tuyến sợi quang dài 40 km, DP-QPSK vẫn duy trì BER < 10^{-8}, trong khi 16-QAM và đặc biệt là 64-QAM suy giảm mạnh do ảnh hưởng tổng hợp của suy hao, nhiễu và phi tuyến. Điều này khẳng định DP-QPSK là lựa chọn tối ưu cho các tuyến RoF dài và yêu cầu độ tin cậy cao.

2.5. Định hướng lựa chọn kỹ thuật điều chế tối ưu

Từ các phân tích và kết quả đánh giá ở trên, có thể rút ra một số định hướng lựa chọn kỹ thuật điều chế quan trọng cho hệ thống RoF.

DP-QPSK là lựa chọn tối ưu cho các hệ thống RoF yêu cầu độ tin cậy cao, truyền xa và hoạt động ổn định trong môi trường có suy hao, nhiễu và phi tuyến lớn. Mặc dù đòi hỏi cấu trúc thu phát coherent tương đối phức tạp, kỹ thuật này mang lại hiệu năng vượt trội về OSNR và BER, đặc biệt phù hợp cho các tuyến RoF dài và các ứng dụng yêu cầu độ ổn định cao.

Kỹ thuật 16-QAM mang lại sự cân bằng hợp lý giữa tốc độ dữ liệu và độ tin cậy, phù hợp cho các tuyến RoF có chiều dài trung bình (khoảng 10 - 40 km). Khi được kết hợp với các kỹ thuật bù tán sắc và khuếch đại quang hợp lý, 16-QAM có thể đạt BER thấp với mức công suất phát chấp nhận được.

Trong khi đó, 64-QAM đạt hiệu suất phổ cao nhất nhưng rất nhạy với nhiễu và phi tuyến. Do đó, kỹ thuật này chỉ nên áp dụng cho các liên kết RoF ngắn, có độ

tuyến tính cao và môi trường truyền dẫn được kiểm soát tốt, chẳng hạn như mạng RoF nội bộ trạm gốc hoặc các liên kết RoF trong trung tâm dữ liệu.

Từ những phân tích trên có thể kết luận rằng, việc lựa chọn kỹ thuật điều chế trong hệ thống RoF cần dựa trên sự cân bằng giữa dung lượng truyền dẫn, khoảng cách, công suất phát và mức độ tuyến tính của kênh quang. Trong đó, DP-QPSK phù hợp cho các hệ thống đường dài, 16-QAM thích hợp cho các tuyến trung bình, còn 64-QAM chỉ nên sử dụng cho các ứng dụng truyền tốc độ cực cao trong phạm vi ngắn.

2.6. Kết luận Chương 2

Trong chương này, đề án đã tập trung phân tích và đánh giá đặc tính kênh truyền của hệ thống RoF, đồng thời so sánh hiệu năng của các kỹ thuật điều chế phổ biến gồm DP-QPSK, 16-QAM và 64-QAM khi áp dụng trong truyền dẫn quang mang tín hiệu vô tuyến.

Trước hết, mô hình kênh truyền RoF đã được xây dựng dựa trên chuỗi xử lý quang–điện–vô tuyến, trong đó xem xét đầy đủ các yếu tố vật lý ảnh hưởng đến chất lượng truyền dẫn như suy hao sợi quang, tán sắc, nhiễu và các hiệu ứng phi tuyến. Các biểu thức toán học của kênh truyền và từng khối chức năng đã được trình bày nhằm làm rõ mối quan hệ giữa tín hiệu phát, tín hiệu thu và các nguồn suy giảm hiệu năng trong hệ thống.

Tiếp theo, các tham số đánh giá hiệu năng quan trọng của hệ thống RoF gồm tỷ lệ lỗi bit BER, tỷ số tín hiệu trên nhiễu SNR, tỷ số tín hiệu trên nhiễu quang OSNR và độ méo véc-tơ lỗi EVM đã được phân tích chi tiết. Mối quan hệ giữa các tham số này cho thấy chất lượng truyền dẫn RoF chịu ảnh hưởng mạnh bởi nhiễu quang, nhiễu điện, tán sắc và đặc biệt là phi tuyến sợi quang khi công suất phát hoặc chiều dài tuyến tăng lên.

Trên cơ sở đó, đề án đã tiến hành so sánh định lượng và định tính hiệu năng của các kỹ thuật điều chế DP-QPSK, 16-QAM và 64-QAM. Kết quả phân tích cho thấy DP-QPSK có độ bền cao nhất trước tác động của suy hao, nhiễu và phi tuyến, phù hợp cho các tuyến RoF dài và các hệ thống yêu cầu độ tin cậy cao. Kỹ thuật 16-

QAM thể hiện sự cân bằng hợp lý giữa hiệu suất phổ và độ ổn định, thích hợp cho các tuyến RoF có chiều dài trung bình. Trong khi đó, 64-QAM đạt hiệu suất phổ cao nhất nhưng rất nhạy với nhiễu và phi tuyến, chỉ phù hợp cho các liên kết RoF ngắn trong môi trường truyền dẫn được kiểm soát tốt.

Cuối cùng, từ các kết quả phân tích, chương này đã đề xuất định hướng lựa chọn kỹ thuật điều chế tối ưu cho hệ thống RoF dựa trên các tiêu chí về dung lượng truyền dẫn, khoảng cách, công suất phát và mức độ tuyến tính của kênh truyền quang. Những kết luận này đóng vai trò là cơ sở lý thuyết quan trọng cho việc xây dựng mô hình mô phỏng và đánh giá hiệu năng hệ thống RoF trong chương tiếp theo.

CHƯƠNG 3. MÔ PHỎNG ĐÁNH GIÁ HIỆU NĂNG CÁC KỸ THUẬT ĐIỀU CHẾ HỆ THỐNG RoF

Chương này tập trung ứng dụng phần mềm mô phỏng để kiểm chứng các phân tích lý thuyết đã trình bày ở Chương 2. Nội dung chính của chương bao gồm: giới thiệu phần mềm mô phỏng OptiSystem; thiết lập mô hình hệ thống RoF và các kịch bản mô phỏng cho các kỹ thuật điều chế DP-QPSK, 16-QAM và 64-QAM; trình bày và phân tích kết quả mô phỏng; so sánh hiệu năng giữa các kỹ thuật điều chế; từ đó đưa ra nhận xét và đề xuất định hướng ứng dụng thực tiễn. Các kết quả mô phỏng nhằm kiểm chứng các đánh giá lý thuyết và đề xuất giải pháp lựa chọn kỹ thuật điều chế tối ưu cho hệ thống RoF trong bối cảnh ứng dụng quân sự.

3.1. Giới thiệu về phần mềm OptiSystem

OptiSystem là phần mềm mô phỏng quang học chuyên dụng do hãng Optiwave Systems Inc. (Canada) phát triển, được sử dụng rộng rãi trong nghiên cứu và thiết kế các hệ thống truyền dẫn quang hiện đại. Phần mềm hỗ trợ mô phỏng toàn bộ quá trình truyền tín hiệu từ tầng vật lý đến tầng hệ thống, cho phép phân tích các hiện tượng vật lý quan trọng như suy hao, tán sắc, Nhiễu phát xạ tự phát khuếch đại, phi tuyến Kerr, cũng như các kỹ thuật điều chế quang và xử lý tín hiệu số.

OptiSystem cung cấp giao diện trực quan dựa trên nguyên tắc kéo–thả các khối chức năng như nguồn laser, bộ điều chế quang MZM/IQ, sợi quang, bộ khuếch đại EDFA, photodiode và các công cụ đo lường như BER Analyzer, Eye Diagram Analyzer, Optical Spectrum Analyzer, v.v. Điều này cho phép xây dựng nhanh chóng các mô hình mô phỏng phức tạp và đánh giá hiệu năng hệ thống một cách hiệu quả.

3.1.1. Đặc điểm nổi bật của OptiSystem

- Thư viện mô-đun phong phú với hơn 400 khối chức năng, hỗ trợ nhiều kỹ thuật điều chế tiên tiến như NRZ, RZ, QPSK, QAM, OFDM, DP-QPSK, thu coherent, WDM-PON và FSO.

- Hỗ trợ mô phỏng hệ thống RoF, cho phép đánh giá các chỉ tiêu hiệu năng như SNR, OSNR, BER, EVM và Q-factor theo chiều dài sợi quang hoặc công suất phát.
- Khả năng tích hợp cao với các công cụ khác như MATLAB, OptiSPICE và OptiBPM, hỗ trợ xử lý tín hiệu và phân tích thống kê.
- Hỗ trợ tối ưu hóa tự động thông qua các công cụ Parametric Sweep, Optimization và Monte Carlo Analysis nhằm xác định cấu hình tối ưu cho hệ thống.
- Khả năng hiển thị trực quan các dạng phổ quang, chòm sao điều chế, giản đồ mắt, phổ RF và dạng sóng trong miền thời gian, phục vụ cả phân tích định tính và định lượng.

3.1.2. Ứng dụng trong mô phỏng hệ thống RoF

Trong hệ thống RoF, OptiSystem cho phép mô phỏng đầy đủ các thành phần chính của tuyến truyền, bao gồm:

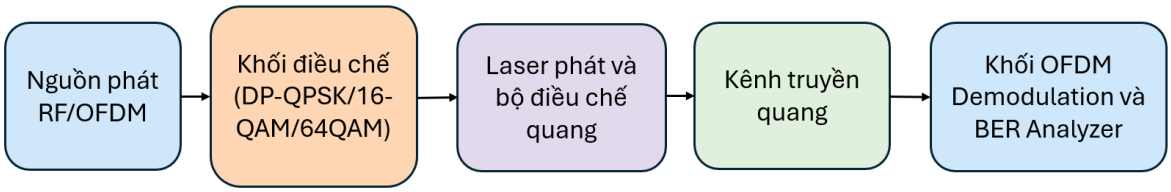
- Nguồn phát: laser DFB kết hợp với bộ điều chế quang MZM/IQ để tạo tín hiệu RF được điều chế lên sóng quang.
- Kênh truyền: sợi quang đơn mode SMF với các tham số suy hao, tán sắc và phi tuyến, kết hợp bộ khuếch đại quang EDFA để bù công suất.
- Bộ thu: photodiode PIN hoặc bộ thu coherent, kết hợp xử lý tín hiệu số (DSP) để phục hồi tín hiệu.
- Phân tích: đo và đánh giá các chỉ tiêu như BER, Q-factor, OSNR và phổ tín hiệu quang.

Nhờ đó, OptiSystem được sử dụng trong đề án này để xây dựng mô hình mô phỏng và so sánh hiệu năng của ba kỹ thuật điều chế DP-QPSK, 16-QAM và 64-QAM trong hệ thống RoF, làm cơ sở đề xuất cấu hình điều chế tối ưu cho các ứng dụng thông tin quân sự.

3.2. Thiết lập mô hình mô phỏng hệ thống RoF

3.2.1. Sơ đồ khối tổng quát của hệ thống RoF

Hệ thống RoF mô phỏng trên OptiSystem được tổ chức theo kiến trúc tuyến tính gồm các khối chức năng liên kết chặt chẽ nhằm tái tạo đầy đủ quá trình phát, truyền và thu tín hiệu RF qua đường truyền quang. Mỗi khối đóng một vai trò riêng trong việc xử lý tín hiệu, từ giai đoạn sinh dạng sóng OFDM, điều chế quang, lan truyền qua sợi quang cho đến giải điều chế và đánh giá BER. Sơ đồ khối tổng quát của hệ thống được thể hiện trong Hình 3.1 và mô tả như sau:



Hình 3.1: Sơ đồ khối hệ thống RoF mô phỏng trên OptiSystem

Sơ đồ khối tổng quát của hệ thống RoF trong mô phỏng bao gồm các khối chức năng chính sau:

- Khối phát tín hiệu RF/OFDM: tạo tín hiệu băng cơ sở theo kỹ thuật OFDM, sử dụng các sơ đồ điều chế DP-QPSK, 16-QAM hoặc 64-QAM.
- Khối điều chế quang: thực hiện biến đổi tín hiệu điện sang tín hiệu quang thông qua nguồn laser và bộ điều chế quang (IQ Modulator hoặc Mach–Zehnder Modulator).
- Kênh truyền quang: gồm sợi quang đơn mode SMF mô phỏng suy hao, tán sắc và các hiệu ứng truyền dẫn; có thể tích hợp bộ khuếch đại quang EDFA để bù suy hao.
- Khối thu quang: sử dụng photodiode (đối với thu trực tiếp) hoặc bộ thu coherent (đối với DP-QPSK/OFDM), thực hiện chuyển đổi quang–điện.
- Khối xử lý tín hiệu số: gồm lọc, loại bỏ CP, FFT, cân bằng kênh, bù pha và giải điều chế để khôi phục chuỗi dữ liệu ban đầu.
- Khối đánh giá hiệu năng: đo BER, EVM, OSNR và hiển thị chòm sao điều chế.

Mô hình này phản ánh đúng cấu trúc hệ thống RoF thực tế và cho phép đánh giá toàn diện ảnh hưởng của kênh truyền quang tới tín hiệu vô tuyến.

3.2.2. Cấu hình thông số mô phỏng

Để đảm bảo tính nhất quán và khả năng so sánh giữa các kỹ thuật điều chế, các tham số mô phỏng được lựa chọn theo các giá trị tiêu chuẩn, phù hợp với hệ thống RoF ứng dụng trong thông tin quân sự.

Trong mô hình mô phỏng hệ thống RoF, học viên lựa chọn dải tần RF thuộc băng S và băng C (khoảng 2–8 GHz). Đây là các dải tần được sử dụng phổ biến trong nhiều hệ thống thông tin và radar quân sự nhờ khả năng cân bằng tốt giữa băng thông, suy hao truyền và độ ổn định tín hiệu.

Cụ thể, băng S (2–4 GHz) thường được sử dụng trong các hệ thống radar giám sát và liên lạc tầm trung do có khả năng xuyên môi trường tốt, ít bị suy hao bởi thời tiết. Trong khi đó, băng C (4–8 GHz) được ứng dụng rộng rãi trong các hệ thống radar độ phân giải cao và truyền dẫn dữ liệu tốc độ lớn nhờ băng thông rộng hơn.

Việc lựa chọn băng tần RF trong khoảng này không chỉ phù hợp với các ứng dụng thực tế trong quân sự mà còn đảm bảo khả năng mô phỏng chính xác các hiệu ứng vật lý trong hệ thống RoF. Ở các tần số cao, đặc biệt khi tiến tới dải mmWave, ảnh hưởng của tán sắc sợi quang và phi tuyến trở nên rõ rệt hơn, dẫn đến hiện tượng fading và méo tín hiệu RF sau khi tách sóng. Do đó, việc lựa chọn băng S/C cho phép đánh giá hệ thống trong điều kiện vừa thực tế vừa đảm bảo tính ổn định của mô hình mô phỏng.

Để tăng tính thực tiễn, các kịch bản mô phỏng trong đề án có thể được gắn với các nhiệm vụ quân sự cụ thể như sau:

Truyền tín hiệu radar từ anten về trung tâm xử lý: Trong kịch bản này, hệ thống RoF được sử dụng để truyền tín hiệu RF thu được từ anten radar đặt xa về trung tâm xử lý thông qua sợi quang. Yêu cầu chính là BER thấp, độ trễ nhỏ và độ ổn định cao nên kỹ thuật điều chế DP-QPSK phù hợp nhất.

Hệ thống chỉ huy – điều hành: Trong các mạng thông tin chỉ huy di động, RoF có thể được sử dụng để phân phối tín hiệu vô tuyến từ trung tâm đến các trạm đầu xa. Yêu cầu đặt ra là cân bằng giữa tốc độ truyền và độ tin cậy, do đó kỹ thuật 16-QAM là lựa chọn phù hợp.

Kết nối UAV/UCAV và truyền dữ liệu giám sát: Đối với các ứng dụng yêu cầu băng thông lớn như truyền video thời gian thực hoặc dữ liệu cảm biến, kỹ thuật 64-QAM có thể được sử dụng nhằm tối ưu hiệu suất phổ.

Tham số nguồn và điều chế

Tham số	Giá trị
Kiểu điều chế	DP-QPSK / 16-QAM / 64-QAM
Kỹ thuật đa sóng mang	OFDM
Số điểm FFT	128
Số sóng mang sử dụng	80
Tiền tố tuần hoàn (CP)	1/8 chu kỳ OFDM
Tốc độ dữ liệu	Thiết lập theo điều chế
Số pilot	6–10 (phục vụ ước lượng kênh)

Tham số nguồn quang và điều chế quang

Tham số	**Giá trị**
Loại laser	Laser DFB
Bước sóng	1550 nm
Công suất phát	0 – 10 dBm
Độ rộng phổ (linewidth)	100 kHz
Bộ điều chế	IQ Modulator / MZM
Chế độ điều chế	Tuyến tính

Tham số kênh truyền quang

Tham số	Giá trị
Loại sợi	SMF
Chiều dài sợi	12 km (có thể thay đổi)
Suy hao	0,2 dB/km
Tán sắc	16 ps/nm/km

Phi tuyến	Có xét (Kerr)
Bộ khuếch đại quang	EDFA
Gain EDFA	10 dB
Noise Figure	4 dB

Tham số khối thu và DSP

Tham số	Giá trị
Kiểu thu	Thu coherent
Photodiode	PIN
Dao động nội (LO)	Đồng bộ pha
Xử lý DSP	FFT, equalizer, bù pha
Chỉ tiêu đánh giá	BER, EVM, OSNR

Mô hình mô phỏng được thiết lập có tính linh hoạt cao, cho phép thay đổi các tham số như chiều dài sợi, công suất phát, OSNR và sơ đồ điều chế để đánh giá hiệu năng hệ thống trong nhiều kịch bản khác nhau. Việc sử dụng cùng một cấu hình nền cho cả ba kỹ thuật điều chế giúp đảm bảo tính khách quan khi so sánh kết quả.

Mô hình này là cơ sở để triển khai các kịch bản mô phỏng trong các mục tiếp theo, phục vụ phân tích định lượng ảnh hưởng của điều chế DP-QPSK, 16-QAM và 64-QAM tới hiệu năng hệ thống RoF ứng dụng trong quân sự.

3.3. Kịch bản mô phỏng cho DP-QPSK, 16-QAM và 64-QAM ứng dụng OFDM

Mục này xây dựng ba kịch bản mô phỏng tương ứng ba kỹ thuật điều chế khác nhau gồm DP-QPSK, 16-QAM và 64-QAM, đều được kết hợp với kỹ thuật OFDM nhằm đánh giá toàn diện hiệu năng truyền dẫn trên hệ thống RoF. Việc lựa chọn các dạng điều chế này là có chủ đích: DP-QPSK đại diện cho nhóm điều chế bền vững, ít nhạy nhiễu; 16-QAM đại diện cho nhóm điều chế có hiệu suất cao và mức độ nhạy nhiễu trung bình; 64-QAM đại diện cho nhóm điều chế bậc cao nhất trong nghiên cứu, mang lại tốc độ rất cao nhưng yêu cầu OSNR lớn. Mỗi kịch bản sẽ sử dụng

chung cấu hình hệ thống mô phỏng (phần 3.2) nhưng thay đổi mô-đun điều chế và các tham số liên quan để phản ánh đúng đặc tính từng kỹ thuật.

Trong hệ thống RoF sử dụng kỹ thuật OFDM, tín hiệu tại đầu vào và đầu ra của khối điều chế có các đặc trưng kỹ thuật khác nhau, cần được mô tả rõ để phục vụ cho việc phân tích phổ và đánh giá hiệu năng hệ thống.

Tín hiệu đầu vào khối điều chế OFDM

Tín hiệu đầu vào của khối OFDM là chuỗi dữ liệu số nhị phân với tốc độ bit xác định (ví dụ 40 Gbit/s). Chuỗi bit này được ánh xạ thành các ký hiệu điều chế theo các sơ đồ như QPSK, 16-QAM hoặc 64-QAM. Sau quá trình ánh xạ, tín hiệu được biểu diễn dưới dạng các ký hiệu phức trong miền I/Q.

Các thông số kỹ thuật chính của tín hiệu đầu vào bao gồm:

- Tốc độ bit (Bit rate)
- Bậc điều chế (M-QAM)
- Tốc độ ký hiệu (Symbol rate)
- Số sóng mang con (subcarriers)

Tín hiệu đầu ra khối OFDM

Sau khi thực hiện biến đổi IFFT, tín hiệu OFDM được tạo ra trong miền thời gian dưới dạng tín hiệu số phức (complex baseband signal). Tín hiệu này là tổng của nhiều sóng mang con trực giao, mỗi sóng mang mang một phần dữ liệu.

Đặc điểm của tín hiệu đầu ra:

- Là tín hiệu baseband (tần số từ 0 Hz đến B)
- Có dạng tổng hợp đa sóng mang
- Có hệ số đỉnh – trung bình cao
- Sau DAC sẽ trở thành tín hiệu tương tự
- Có thể được trộn lên tần số RF trước khi đưa vào khối điều chế quang

Băng thông của tín hiệu OFDM xấp xỉ: $B \approx Rs$

Trong đó Rs là tốc độ symbol.

Tín hiệu sau OFDM là tín hiệu baseband dạng đa sóng mang. Spectrum Analyzer được dùng để quan sát phổ nhằm kiểm tra băng thông và cấu trúc sóng mang trước khi truyền qua kênh quang.

Ba phần dưới đây mô tả chi tiết quá trình xây dựng mô hình, cấu hình tham số, yêu cầu xử lý tín hiệu và tiêu chí đánh giá cho từng kỹ thuật.

3.3.1. Kịch bản mô phỏng cho DP-QPSK ứng dụng kỹ thuật OFDM

Trong kịch bản mô phỏng DP-QPSK–OFDM, khối BER Test Set được sử dụng để sinh chuỗi bit kiểm tra giả ngẫu nhiên, phục vụ cho việc đánh giá hiệu năng truyền dẫn của hệ thống. Chuỗi bit này trước hết được đưa vào khối chuyển đổi nối tiếp–song song nhằm chia dữ liệu thành hai luồng song song, tương ứng với hai phân cực trực giao X và Y của tín hiệu quang.

Hai luồng dữ liệu song song sau đó được đưa lần lượt vào hai khối PSK Sequence Generator, mỗi khối thực hiện ánh xạ dữ liệu sang các ký hiệu QPSK cho một phân cực riêng biệt. Việc sử dụng hai bộ phát PSK độc lập cho hai phân cực cho phép mô phỏng chính xác sơ đồ điều chế DP-QPSK, trong đó mỗi phân cực mang một luồng dữ liệu độc lập.

Tín hiệu QPSK trên mỗi phân cực tiếp tục được đưa vào hai khối OFDM Modulation, tại đây quá trình điều chế đa sóng mang được thực hiện nhằm tăng hiệu quả sử dụng phổ và nâng cao khả năng chống nhiễu chọn lọc tần số. Sau điều chế OFDM, các tín hiệu được đưa qua hai khối Low Pass Rectangle Filter, có nhiệm vụ giới hạn băng thông và loại bỏ các thành phần ngoài dải sinh ra trong quá trình xử lý số.

Các tín hiệu sau lọc tiếp tục được đưa vào hai khối lọc kết hợp RF-to-Optical Upconverter (RTO), trong đó tín hiệu điện OFDM được điều chế lên sóng mang quang thông qua bộ điều chế Mach–Zehnder, thực hiện chức năng chuyển đổi điện–quang đặc trưng của hệ thống RoF.

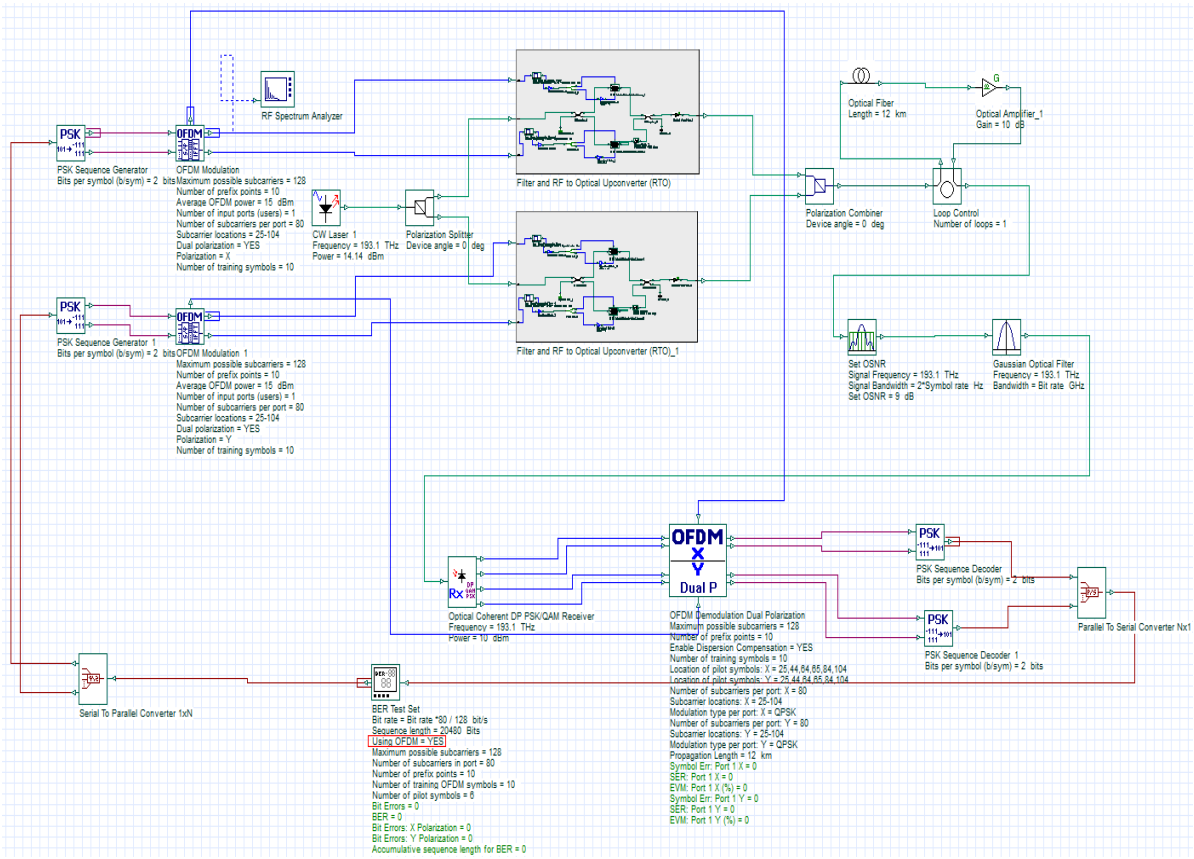
Tín hiệu quang sau điều chế được truyền qua kênh sợi quang, trong đó khối Set OSNR được sử dụng để điều chỉnh tỷ số tín hiệu trên nhiễu quang, mô phỏng các điều kiện chất lượng kênh truyền khác nhau. Sau khi truyền qua tuyến quang, tín hiệu

tiếp tục đi qua khối Gaussian Optical Filter, nhằm giới hạn băng thông quang và giảm nhiễu ngoài dải trước khi đưa vào bộ thu.

Ở phía thu, tín hiệu quang được xử lý bởi khối Optical Coherent DP PSK/QAM Receiver, thực hiện thu kết hợp, tách hai phân cực trực giao và chuyển đổi quang–điện. Các tín hiệu điện thu được sau đó được đưa vào khối OFDM Demodulation Dual Polarization để giải điều chế OFDM cho từng phân cực.

Kết quả giải điều chế tiếp tục được đưa qua hai khối PSK Sequence Decoder, thực hiện giải mã các ký hiệu QPSK để khôi phục dữ liệu nhị phân. Hai luồng dữ liệu song song sau đó được ghép lại thông qua khối chuyển đổi song song–nối tiếp nhằm tái tạo chuỗi bit hoàn chỉnh.

Cuối cùng, chuỗi bit thu được được đưa trở lại khối BER Test Set để đánh giá các tham số chất lượng truyền dẫn của hệ thống, bao gồm tỷ lệ lỗi bit (BER) và độ lệch vector lỗi (EVM).



Hình 3.2: Cấu hình mô phỏng hệ thống DP-QPSK OFDM

3.3.2. Kịch bản mô phỏng cho 16-QAM ứng dụng kỹ thuật OFDM

Trong kịch bản mô phỏng 16-QAM–OFDM, khối BER Test Set được sử dụng để sinh chuỗi bit kiểm tra giả ngẫu nhiên nhằm phục vụ đánh giá hiệu năng truyền dẫn của hệ thống. Chuỗi bit này được đưa trực tiếp vào khối QAM Sequence Generator, tại đây dữ liệu nhị phân được ánh xạ thành các ký hiệu 16-QAM, trong đó mỗi ký hiệu mang 4 bit thông tin.

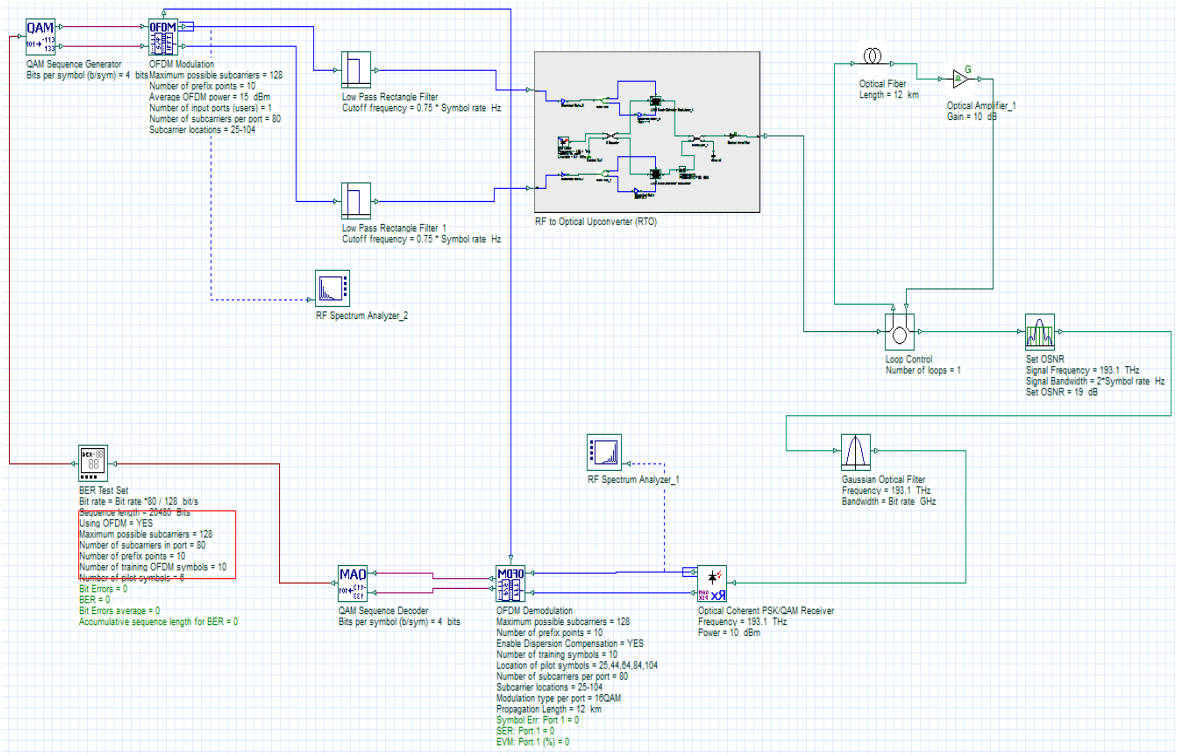
Các ký hiệu 16-QAM sau đó được đưa vào khối OFDM Modulation, thực hiện điều chế đa sóng mang nhằm tăng hiệu quả sử dụng phổ và cải thiện khả năng chống nhiễu chọn lọc tần số. Tín hiệu OFDM thu được tiếp tục đi qua hai khối Low Pass Rectangle Filter, có nhiệm vụ giới hạn băng thông tín hiệu và loại bỏ các thành phần ngoài dải phát sinh trong quá trình điều chế số.

Sau khi lọc, tín hiệu được đưa vào khối RF-to-Optical Upconverter (RTO), trong đó tín hiệu điện OFDM được điều chế lên sóng mang quang thông qua bộ điều chế Mach–Zehnder, thực hiện quá trình chuyển đổi điện–quang đặc trưng của hệ thống RoF.

Tín hiệu quang sau điều chế được truyền qua kênh sợi quang, trong đó khối Set OSNR được sử dụng để điều chỉnh tỷ số tín hiệu trên nhiễu quang, mô phỏng các điều kiện chất lượng kênh truyền khác nhau. Sau khi truyền qua tuyến quang, tín hiệu tiếp tục đi qua khối Gaussian Optical Filter nhằm giới hạn băng thông quang và giảm nhiễu ngoài dải trước khi đưa vào bộ thu.

Ở phía thu, tín hiệu quang được xử lý bởi khối Optical Coherent PSK/QAM Receiver, thực hiện thu kết hợp và chuyển đổi quang–điện. Tín hiệu điện thu được sau đó được đưa vào khối OFDM Demodulation để giải điều chế OFDM và khôi phục các ký hiệu 16-QAM ban đầu.

Các ký hiệu này tiếp tục được đưa qua khối QAM Sequence Decoder, thực hiện giải mã và tái tạo chuỗi dữ liệu nhị phân. Cuối cùng, chuỗi bit thu được được đưa trở lại khối BER Test Set để phục vụ đánh giá các tham số chất lượng truyền dẫn của hệ thống, bao gồm tỷ lệ lỗi bit (BER), độ lệch vector lỗi (EVM) và chòm sao tín hiệu.



Hình 3.3: Cấu hình mô phỏng hệ thống 16-QAM OFDM

3.3.3. Kịch bản mô phỏng cho 64-QAM ứng dụng kỹ thuật OFDM

Trong kịch bản mô phỏng 64-QAM–OFDM, khối BER Test Set được sử dụng để sinh chuỗi bit kiểm tra giả ngẫu nhiên nhằm phục vụ đánh giá chất lượng truyền dẫn của hệ thống. Chuỗi dữ liệu nhị phân này được đưa trực tiếp vào khối QAM Sequence Generator, tại đó dữ liệu được ánh xạ thành các ký hiệu 64-QAM, với mỗi ký hiệu mang 6 bit thông tin.

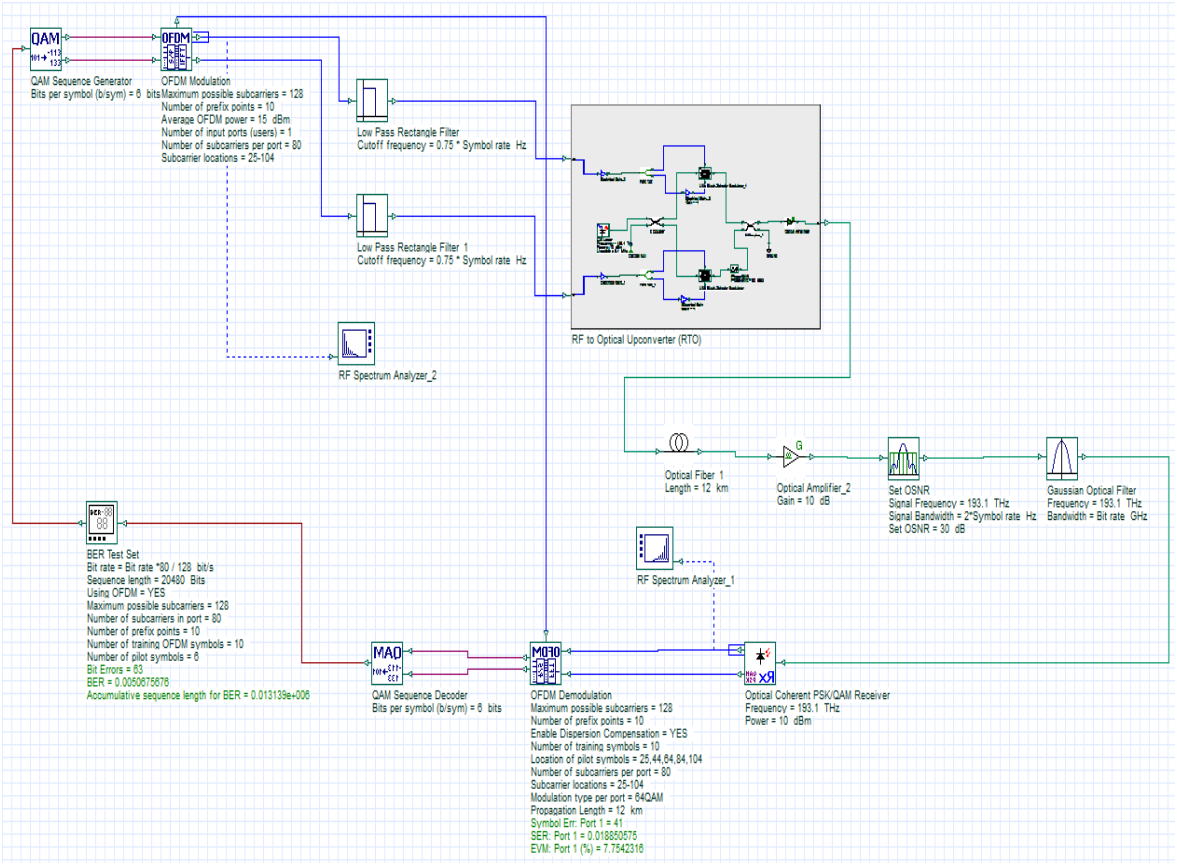
Các ký hiệu 64-QAM sau đó được đưa vào khối OFDM Modulation, thực hiện điều chế đa sóng mang nhằm nâng cao hiệu suất sử dụng phổ và tăng khả năng chống nhiễu chọn lọc tần số. Tín hiệu OFDM thu được tiếp tục đi qua hai khối Low Pass Rectangle Filter, có nhiệm vụ giới hạn băng thông tín hiệu và loại bỏ các thành phần ngoài dải phát sinh trong quá trình xử lý số.

Sau khi lọc, tín hiệu được đưa vào khối RF-to-Optical Upconverter (RTO), trong đó tín hiệu điện OFDM được điều chế lên sóng mang quang thông qua bộ điều chế Mach–Zehnder, thực hiện quá trình chuyển đổi điện–quang đặc trưng của hệ thống RoF.

Tín hiệu quang sau điều chế được truyền qua kênh sợi quang, trong đó khối Set OSNR được sử dụng để điều chỉnh tỷ số tín hiệu trên nhiễu quang, mô phỏng các điều kiện chất lượng kênh truyền khác nhau. Sau khi truyền qua tuyến quang, tín hiệu tiếp tục được đưa qua khối Gaussian Optical Filter nhằm giới hạn băng thông quang và giảm nhiễu ngoài dải trước khi đến bộ thu.

Ở phía thu, tín hiệu quang được xử lý bởi khối Optical Coherent PSK/QAM Receiver, thực hiện thu kết hợp và chuyển đổi quang–điện. Tín hiệu điện thu được sau đó được đưa vào khối OFDM Demodulation để giải điều chế OFDM và khôi phục các ký hiệu 64-QAM.

Các ký hiệu này tiếp tục được đưa qua khối QAM Sequence Decoder, thực hiện giải mã và tái tạo chuỗi dữ liệu nhị phân. Cuối cùng, chuỗi bit thu được được đưa trở lại khối BER Test Set để phục vụ đánh giá các tham số chất lượng truyền dẫn của hệ thống, bao gồm tỷ lệ lỗi bit (BER), độ lệch vector lỗi (EVM) và chòm sao tín hiệu.

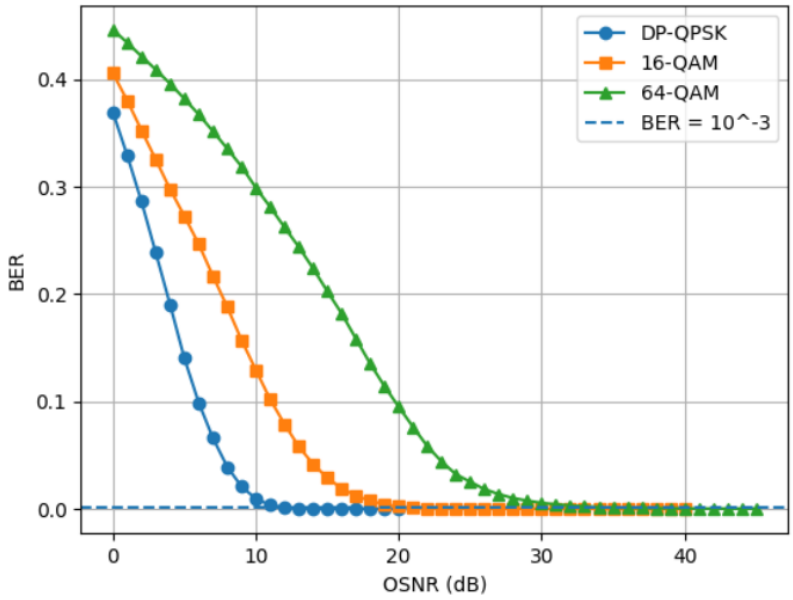


Hình 3.4: Cấu hình mô phỏng hệ thống 64-QAM OFDM

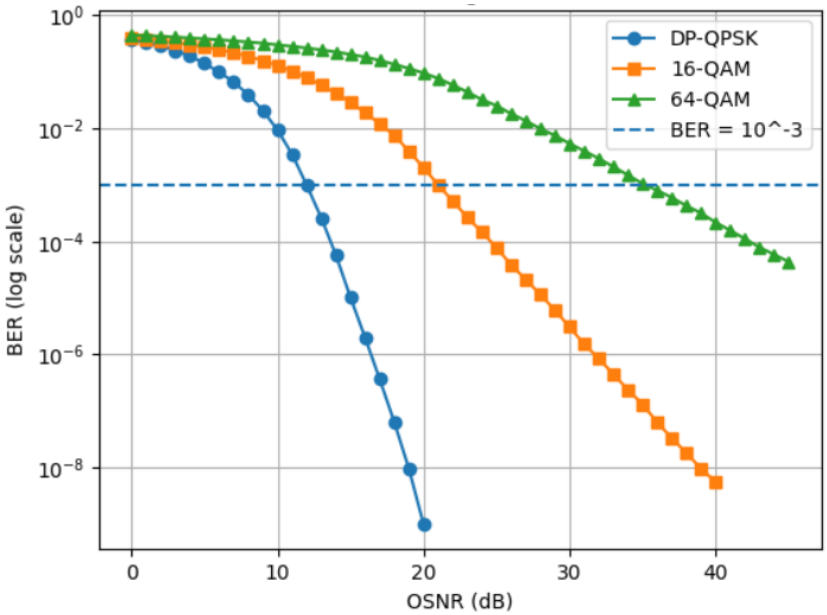
3.4. Phân tích kết quả mô phỏng

3.4.1 Phân tích quan hệ BER – OSNR

Đường cong BER–OSNR là tiêu chí quan trọng để đánh giá năng lực truyền dẫn.



Hình 3.5: Quan hệ BER–OSNR của các kỹ thuật điều chế DP-QPSK, 16-QAM và 64-QAM trong hệ thống RoF (thang tuyến tính, ngưỡng BER = 10^{-3})



Hình 3.6: Quan hệ BER–OSNR của các kỹ thuật điều chế DP-QPSK, 16-QAM và 64-QAM trong hệ thống RoF (thang logarit, ngưỡng BER = 10^{-3})

Hình 3.5 và Hình 3.6 biểu diễn mối quan hệ giữa tỷ lệ lỗi bit (BER) và tỷ số tín hiệu trên nhiễu quang (OSNR) của các kỹ thuật điều chế DP-QPSK, 16-QAM và 64-QAM trong hệ thống RoF. Kết quả mô phỏng được thể hiện trên cả thang tuyến tính và thang logarit nhằm làm rõ xu hướng biến thiên BER trong toàn bộ miền giá trị OSNR.

Quan sát đồ thị cho thấy, khi OSNR tăng, BER của cả ba kỹ thuật điều chế đều giảm mạnh, phản ánh mối quan hệ nghịch đặc trưng giữa chất lượng kênh truyền quang và xác suất lỗi bit. Tuy nhiên, tốc độ suy giảm BER và mức OSNR yêu cầu để đạt chất lượng truyền dẫn chấp nhận được là khác nhau đối với từng kỹ thuật điều chế.

Đối với DP-QPSK, đường BER giảm nhanh nhất và đạt ngưỡng BER = 10^{-3} tại mức OSNR thấp nhất, xấp xỉ 12 dB. Điều này chứng tỏ DP-QPSK có khả năng chống nhiễu và suy hao rất tốt, đặc biệt phù hợp cho các kịch bản truyền dẫn xa hoặc môi trường nhiễu điện từ mạnh – những đặc trưng thường gặp trong thông tin quân sự và tác chiến điện tử.

Trong khi đó, 16-QAM yêu cầu OSNR cao hơn để đạt cùng mức BER. Cụ thể, ngưỡng BER = 10^{-3} đạt được khi OSNR vào khoảng 21 dB. Kết quả này cho thấy 16-QAM là giải pháp trung gian, đạt được sự cân bằng giữa hiệu suất phổ và độ tin cậy truyền dẫn, phù hợp cho các mạng chiến thuật cần tốc độ dữ liệu tương đối cao nhưng vẫn đảm bảo độ ổn định.

Đối với 64-QAM, đường BER suy giảm chậm nhất và chỉ đạt ngưỡng BER = 10^{-3} khi OSNR tăng lên khoảng 34–35 dB. Điều này phản ánh rõ nhược điểm của điều chế bậc cao: mặc dù mang lại hiệu suất phổ và dung lượng truyền dẫn vượt trội, nhưng 64-QAM rất nhạy cảm với nhiễu, suy hao và các hiệu ứng phi tuyến trong sợi quang. Do đó, kỹ thuật này chỉ phù hợp cho các kịch bản khoảng cách ngắn, môi trường truyền dẫn được kiểm soát tốt hoặc các hệ thống yêu cầu dung lượng cực lớn.

Đồ thị trên thang logarit cho phép quan sát rõ hơn vùng BER nhỏ (10^{-3} đến 10^{-9}), cho thấy DP-QPSK không chỉ đạt ngưỡng BER chấp nhận sớm hơn mà còn duy trì tốc độ suy giảm BER nhanh hơn so với 16-QAM và 64-QAM khi OSNR tiếp

tục tăng. Điều này khẳng định ưu thế về độ ổn định và độ tin cậy của DP-QPSK trong hệ thống RoF.

Tổng hợp các kết quả trên cho thấy, việc lựa chọn kỹ thuật điều chế trong hệ thống RoF cần dựa trên yêu cầu cụ thể của ứng dụng quân sự. DP-QPSK phù hợp cho các hệ thống đòi hỏi độ tin cậy cao và khả năng chống nhiễu mạnh; 16-QAM thích hợp cho các mạng chiến thuật cân bằng giữa tốc độ và chất lượng; trong khi 64-QAM phù hợp cho các kịch bản truyền dẫn dung lượng lớn trong điều kiện kênh truyền tốt. Kết quả mô phỏng hoàn toàn phù hợp với phân tích lý thuyết đã trình bày ở Chương 2, qua đó khẳng định tính đúng đắn của mô hình và phương pháp nghiên cứu của đề tài.

3.4.2. Phân tích quan hệ EVM – OSNR

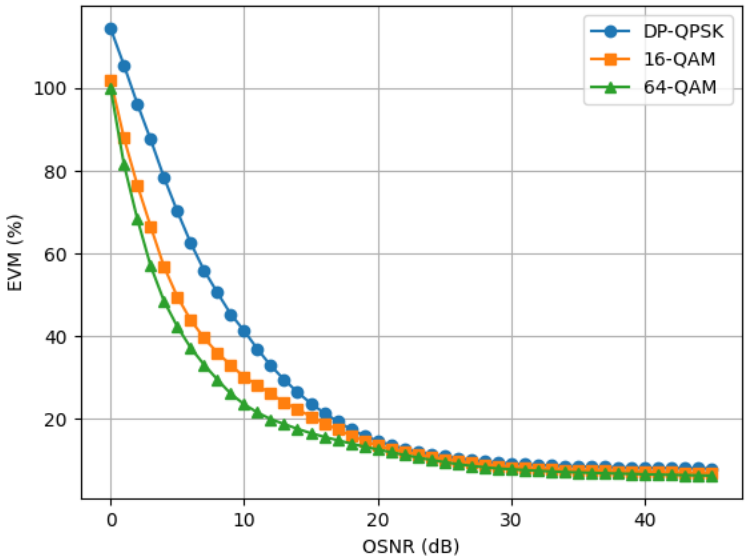
Hình 3.7 trình bày mối quan hệ giữa độ lệch vector lỗi (EVM) và tỷ số tín hiệu trên nhiễu quang (OSNR) của các kỹ thuật điều chế DP-QPSK, 16-QAM và 64-QAM trong hệ thống RoF. Kết quả mô phỏng cho thấy EVM của cả ba kỹ thuật đều giảm mạnh khi OSNR tăng, phản ánh sự cải thiện chất lượng tín hiệu khi nhiễu trong kênh truyền quang được giảm thiểu.

Ở vùng OSNR thấp (0–10 dB), EVM có giá trị đáng kể, đặc biệt đối với DP-QPSK và 16-QAM, cho thấy tín hiệu chịu ảnh hưởng nghiêm trọng của nhiễu, suy hao và méo pha. Trong vùng này, sự khác biệt giữa các kỹ thuật điều chế thể hiện rõ: DP-QPSK có EVM lớn nhất, tiếp theo là 16-QAM và nhỏ nhất là 64-QAM. Điều này phù hợp với đặc điểm lý thuyết, khi điều chế bậc thấp có biên độ tín hiệu lớn hơn nhưng lại nhạy với nhiễu pha ở điều kiện OSNR thấp.

Khi OSNR tăng từ 10 dB đến khoảng 25 dB, EVM của cả ba kỹ thuật giảm nhanh, cho thấy đây là vùng làm việc hiệu quả của hệ thống RoF. Trong khoảng OSNR này, sự chênh lệch EVM giữa các kỹ thuật vẫn còn rõ rệt, với DP-QPSK duy trì EVM cao hơn so với 16-QAM và 64-QAM, phản ánh mối quan hệ đánh đổi giữa độ bền nhiễu và mật độ chòm sao điều chế.

Tại OSNR lớn (trên 30 dB), EVM của cả ba kỹ thuật có xu hướng tiệm cận và gần như bão hòa, đạt giá trị nhỏ và ổn định (khoảng 7–9%). Điều này cho thấy khi

nhiễu kênh truyền đã được giảm đến mức thấp, các yếu tố giới hạn hiệu năng chủ yếu đến từ méo phi tuyến, nhiễu phần cứng và giới hạn của khối điều chế – giải điều chế trong hệ thống.



Hình 3.7: Quan hệ EVM–OSNR của các kỹ thuật điều chế DP-QPSK, 16-QAM và 64-QAM trong hệ thống RoF

So sánh giữa các kỹ thuật cho thấy:

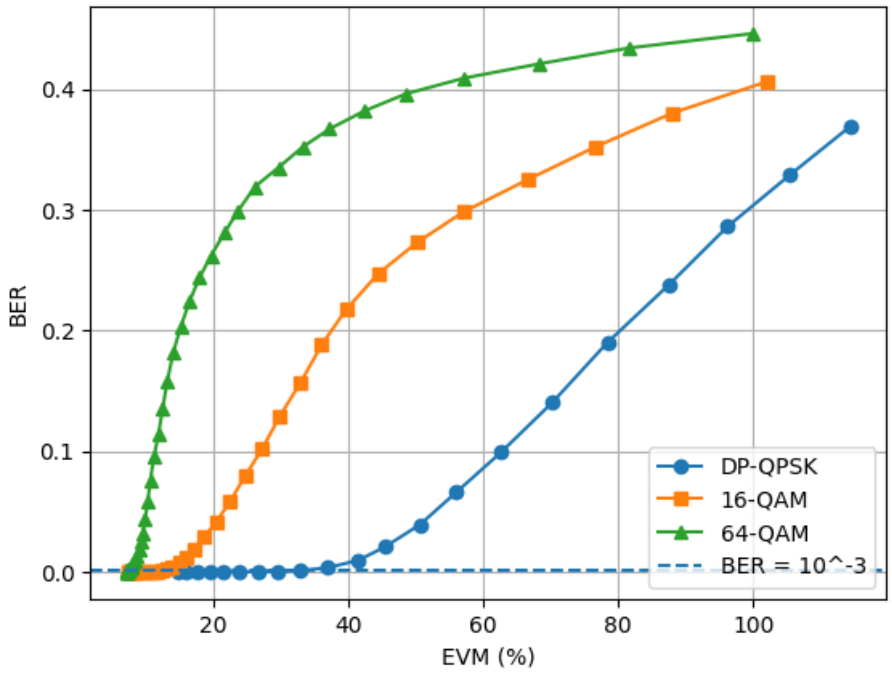
DP-QPSK có EVM lớn hơn tại cùng một giá trị OSNR, nhưng bù lại có khả năng chịu nhiễu tốt và phù hợp cho các kịch bản truyền dẫn xa, môi trường nhiễu mạnh.

16-QAM đạt được sự cân bằng giữa EVM và hiệu suất phổ, phù hợp cho các mạng chiến thuật yêu cầu tốc độ dữ liệu cao hơn trong điều kiện kênh truyền tương đối ổn định.

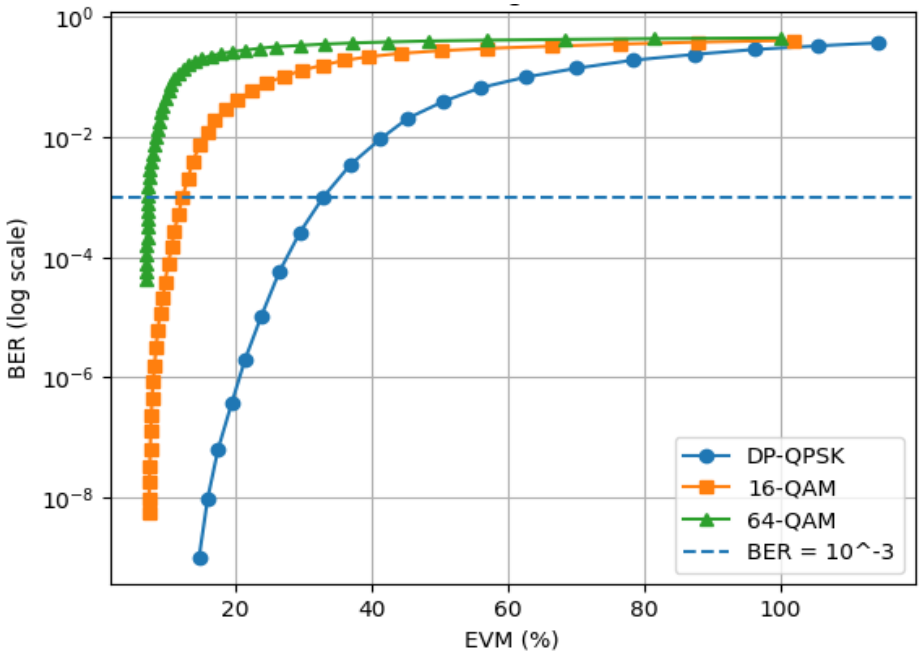
64-QAM có EVM nhỏ nhất tại cùng OSNR, tuy nhiên điều này chỉ đạt được khi OSNR đủ lớn, cho thấy kỹ thuật này đòi hỏi chất lượng kênh truyền cao và phù hợp cho các kịch bản dung lượng lớn, khoảng cách ngắn.

Kết quả đồ thị EVM theo OSNR hoàn toàn phù hợp với các kết quả BER theo OSNR và BER theo EVM đã trình bày trước đó, qua đó khẳng định EVM là tham số trung gian quan trọng phản ánh trực tiếp chất lượng truyền dẫn và ảnh hưởng mạnh mẽ đến BER trong hệ thống RoF.

3.4.3. Phân tích quan hệ BER – EVM



Hình 3.8: Quan hệ BER–EVM của các kỹ thuật điều chế DP-QPSK, 16-QAM và 64-QAM trong hệ thống RoF (thang tuyến tính, ngưỡng BER = 10^{-3})



Hình 3.9: Quan hệ BER–EVM của các kỹ thuật điều chế DP-QPSK, 16-QAM và 64-QAM trong hệ thống RoF (thang logarit, ngưỡng BER = 10^{-3})

Hình 3.8 và Hình 3.9 trình bày mối quan hệ giữa tỷ lệ lỗi bit (BER) và độ lệch vector lỗi (EVM) của các kỹ thuật điều chế DP-QPSK, 16-QAM và 64-QAM trong hệ thống RoF. Đồ thị được biểu diễn trên cả thang tuyến tính và thang logarit nhằm đánh giá toàn diện ảnh hưởng của chất lượng điều chế đến hiệu năng truyền dẫn.

Từ kết quả mô phỏng có thể nhận thấy rằng BER tăng khi EVM tăng đối với cả ba kỹ thuật điều chế. Điều này phản ánh đúng bản chất vật lý của EVM, trong đó EVM càng lớn thì mức méo biên độ và pha của tín hiệu càng nghiêm trọng, dẫn đến xác suất lỗi bit tăng cao.

Đối với DP-QPSK, đường BER tăng chậm nhất theo EVM. Kỹ thuật này đạt ngưỡng BER = 10^{-3} tại giá trị EVM tương đối lớn, xấp xỉ 30–35%, cho thấy khả năng chịu méo và chống nhiễu vượt trội. Điều này xuất phát từ việc DP-QPSK sử dụng điều chế bậc thấp kết hợp phân cực kép, giúp giảm mật độ điểm chòm sao và tăng khoảng cách Euclid giữa các ký hiệu. Do đó, DP-QPSK đặc biệt phù hợp cho các hệ thống truyền dẫn xa và môi trường nhiễu mạnh trong thông tin quân sự.

Trong khi đó, 16-QAM thể hiện mức độ nhạy trung gian đối với EVM. Ngưỡng BER = 10^{-3} đạt được khi EVM vào khoảng 18–20%, cho thấy 16-QAM yêu cầu chất lượng tín hiệu tốt hơn so với DP-QPSK nhưng vẫn đảm bảo sự cân bằng hợp lý giữa hiệu suất phổ và độ tin cậy truyền dẫn. Đây là lựa chọn phù hợp cho các mạng chiến thuật cần tốc độ dữ liệu cao hơn trong điều kiện kênh truyền tương đối ổn định.

Đối với 64-QAM, đường BER tăng nhanh nhất theo EVM và đạt ngưỡng BER = 10^{-3} tại giá trị EVM nhỏ nhất, khoảng 7–8%. Điều này cho thấy 64-QAM rất nhạy cảm với méo tín hiệu và nhiễu, do mật độ điểm chòm sao lớn và khoảng cách giữa các ký hiệu nhỏ. Vì vậy, mặc dù mang lại hiệu suất phổ cao nhất, 64-QAM chỉ phù hợp cho các kịch bản truyền dẫn khoảng cách ngắn hoặc môi trường kênh truyền được kiểm soát tốt.

Đồ thị trên thang logarit cho phép quan sát rõ hơn vùng BER thấp (10^{-3} đến 10^{-9}), cho thấy DP-QPSK duy trì tốc độ suy giảm BER ổn định hơn khi EVM giảm, trong khi 16-QAM và đặc biệt là 64-QAM yêu cầu EVM rất nhỏ để đạt được BER

thấp. Điều này khẳng định mối quan hệ đánh đổi giữa hiệu suất phổ và độ bền nhiễu của các kỹ thuật điều chế bậc cao.

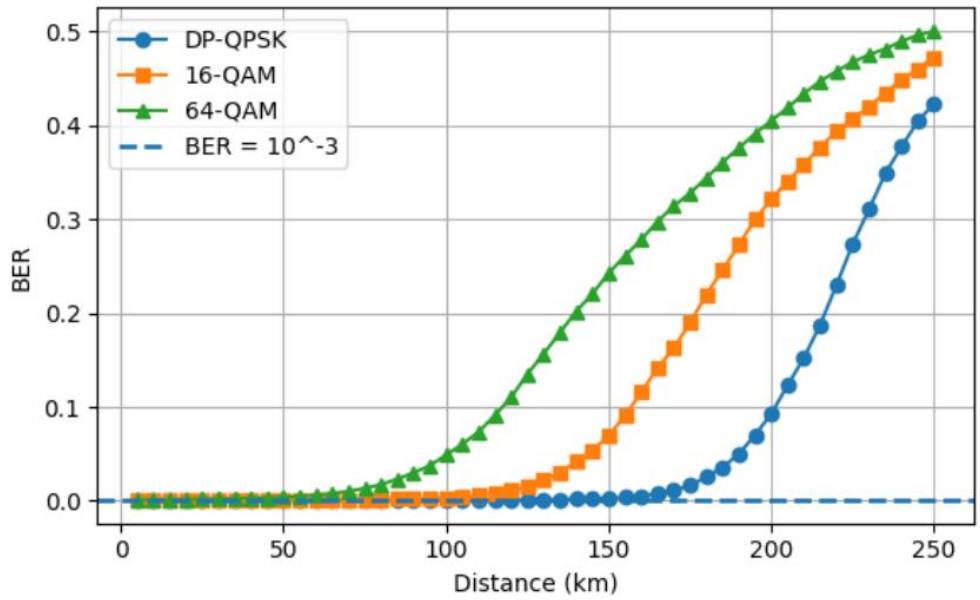
Tổng hợp các kết quả trên cho thấy, EVM là chỉ tiêu đánh giá trực tiếp và hiệu quả chất lượng điều chế trong hệ thống RoF. Việc lựa chọn kỹ thuật điều chế cần dựa trên mức EVM cho phép của hệ thống: DP-QPSK phù hợp với các hệ thống yêu cầu độ tin cậy cao; 16-QAM phù hợp cho các ứng dụng cân bằng giữa dung lượng và chất lượng; trong khi 64-QAM chỉ nên sử dụng khi hệ thống đảm bảo EVM nhỏ và điều kiện kênh truyền tốt. Kết quả mô phỏng hoàn toàn phù hợp với phân tích lý thuyết và các kết quả BER theo OSNR đã trình bày trước đó.

3.4.4. Phân tích quan hệ BER – DISTANCE

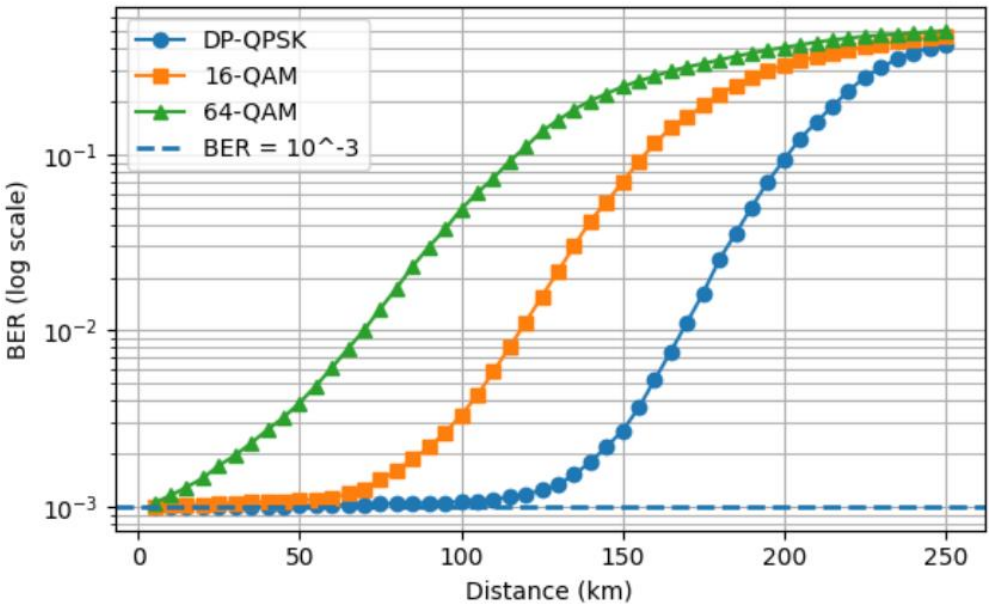
Hình 3.10 và Hình 3.11 trình bày mối quan hệ giữa tỷ lệ lỗi bit (BER) và khoảng cách truyền dẫn của các kỹ thuật điều chế DP-QPSK, 16-QAM và 64-QAM trong hệ thống RoF. Đồ thị được biểu diễn trên cả thang tuyến tính và thang logarit nhằm đánh giá toàn diện ảnh hưởng của chiều dài tuyến truyền đến hiệu năng của hệ thống.

Từ kết quả mô phỏng có thể nhận thấy rằng BER tăng khi khoảng cách truyền dẫn tăng đối với cả ba kỹ thuật điều chế. Điều này phản ánh đúng bản chất vật lý của quá trình truyền dẫn trong sợi quang, khi suy hao công suất, nhiễu tích lũy và các hiệu ứng méo phi tuyến gia tăng theo chiều dài tuyến truyền, làm suy giảm chất lượng tín hiệu thu và dẫn đến xác suất lỗi bit tăng cao.

Đối với DP-QPSK, đường BER tăng chậm nhất theo khoảng cách truyền dẫn. Kỹ thuật này duy trì BER xấp xỉ 10^{-3} trong một dải khoảng cách lớn và chỉ vượt ngưỡng BER = 10^{-3} khi khoảng cách truyền dẫn đạt khoảng 130–140 km. Điều này cho thấy DP-QPSK có khả năng chống suy hao và nhiễu vượt trội. Nguyên nhân là do DP-QPSK sử dụng điều chế bậc thấp kết hợp phân cực kép, giúp giảm mật độ điểm chòm sao và tăng khoảng cách Euclid giữa các ký hiệu. Do đó, DP-QPSK đặc biệt phù hợp cho các hệ thống truyền dẫn xa và môi trường nhiễu mạnh trong thông tin quân sự.



Hình 3.10: Quan hệ BER–Distance của các kỹ thuật điều chế DP-QPSK, 16-QAM và 64-QAM trong hệ thống RoF (thang tuyến tính, ngưỡng BER = 10^{-3})



Hình 3.11: Quan hệ BER–Distance của các kỹ thuật điều chế DP-QPSK, 16-QAM và 64-QAM trong hệ thống RoF (thang logarit, ngưỡng BER = 10^{-3})

Trong khi đó, 16-QAM thể hiện mức độ nhạy trung gian đối với khoảng cách truyền dẫn. Ngưỡng BER = 10^{-3} đạt được khi khoảng cách vào khoảng 90–100 km, cho thấy 16-QAM yêu cầu điều kiện kênh truyền tốt hơn so với DP-QPSK nhưng vẫn đảm bảo sự cân bằng hợp lý giữa hiệu suất phổ và độ tin cậy truyền dẫn. Đây là lựa

chọn phù hợp cho các mạng chiến thuật cần tốc độ dữ liệu cao hơn trong điều kiện tuyến truyền có chiều dài trung bình.

Đối với 64-QAM, đường BER tăng nhanh nhất theo khoảng cách truyền dẫn và đạt ngưỡng BER = 10^{-3} tại khoảng cách ngắn nhất, chỉ khoảng 30–40 km. Điều này cho thấy 64-QAM rất nhạy cảm với suy hao và nhiễu, do mật độ điểm chòm sao lớn và khoảng cách giữa các ký hiệu nhỏ. Vì vậy, mặc dù mang lại hiệu suất phổ cao nhất, 64-QAM chỉ phù hợp cho các kịch bản truyền dẫn khoảng cách ngắn hoặc môi trường kênh truyền được kiểm soát tốt.

Đồ thị trên thang logarit cho phép quan sát rõ hơn vùng BER nhỏ (10^{-3} đến 10^{-1}), cho thấy DP-QPSK duy trì mức BER thấp ổn định hơn khi khoảng cách tăng, trong khi 16-QAM và đặc biệt là 64-QAM có tốc độ suy giảm chất lượng nhanh hơn. Điều này tiếp tục khẳng định mối quan hệ đánh đổi giữa hiệu suất phổ và độ bền nhiễu của các kỹ thuật điều chế bậc cao.

Dựa trên kết quả Hình 3.11, có thể thấy không tồn tại một kỹ thuật điều chế tối ưu cho mọi điều kiện kênh. Do đó, kỹ thuật điều chế thích nghi (Adaptive Modulation) được đề xuất như một giải pháp hiệu quả.

Nguyên lý của điều chế thích nghi là lựa chọn bậc điều chế phù hợp dựa trên chất lượng kênh (SNR/OSNR hoặc khoảng cách truyền):

- Khi kênh tốt (OSNR cao, khoảng cách ngắn): sử dụng 64-QAM để tối đa hóa tốc độ truyền
- Khi kênh trung bình: sử dụng 16-QAM để cân bằng hiệu năng
- Khi kênh kém (khoảng cách xa, nhiễu lớn): chuyển sang DP-QPSK để đảm bảo độ tin cậy

Quá trình này được thực hiện động thông qua phản hồi kênh, giúp hệ thống luôn hoạt động ở trạng thái tối ưu giữa hiệu suất phổ và chất lượng truyền dẫn.

Tổng hợp các kết quả trên cho thấy, khoảng cách truyền dẫn là tham số quan trọng ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu năng hệ thống RoF. Việc lựa chọn kỹ thuật điều chế cần dựa trên chiều dài tuyến truyền cho phép của hệ thống: DP-QPSK phù hợp với các hệ thống yêu cầu truyền xa và độ tin cậy cao; 16-QAM phù hợp cho các ứng

dụng cân bằng giữa dung lượng và chất lượng; trong khi 64-QAM chỉ nên sử dụng khi khoảng cách truyền dẫn ngắn và điều kiện kênh truyền thuận lợi. Kết quả mô phỏng hoàn toàn phù hợp với phân tích lý thuyết và các kết quả BER theo OSNR, EVM và SNR đã trình bày trước đó.

3.4. Đề xuất và khuyến nghị ứng dụng công nghệ RoF trong hệ thống quân sự

Trên cơ sở các kết quả mô phỏng trong Chương 3 về mối quan hệ giữa BER với các tham số OSNR, SNR, EVM và khoảng cách truyền dẫn, có thể khẳng định rằng hiệu năng của hệ thống RoF phụ thuộc chặt chẽ vào việc lựa chọn kỹ thuật điều chế phù hợp với điều kiện kênh truyền và yêu cầu nhiệm vụ. Các kết quả cho thấy tồn tại rõ ràng mối quan hệ đánh đổi giữa hiệu suất phổ và độ bền nhiễu: điều chế bậc thấp như DP-QPSK có khả năng chống nhiễu tốt, truyền xa ổn định, trong khi các điều chế bậc cao như 16-QAM và đặc biệt là 64-QAM cho phép tăng dung lượng nhưng yêu cầu điều kiện kênh tốt hơn và khoảng cách truyền dẫn ngắn hơn.

Từ các kết quả này, có thể đề xuất việc ứng dụng công nghệ RoF trong các hệ thống thông tin quân sự theo từng kịch bản cụ thể. Đối với các hệ thống thông tin chỉ huy – điều hành, nơi yêu cầu độ tin cậy cao, khả năng hoạt động trong môi trường nhiễu mạnh và khoảng cách truyền dẫn lớn, việc sử dụng RoF kết hợp với điều chế DP-QPSK là lựa chọn tối ưu. Kỹ thuật này cho phép duy trì BER ở mức thấp ngay cả khi OSNR và SNR không cao, đồng thời có khả năng truyền dẫn trên các tuyến dài hàng trăm kilômét thông qua hạ tầng sợi quang. Do đó, DP-QPSK phù hợp cho các tuyến truyền dẫn xương sống kết nối giữa sở chỉ huy, trung tâm tác chiến và các đơn vị trực thuộc.

Trong các mạng thông tin chiến thuật, nơi cần cân bằng giữa tốc độ truyền dẫn và độ tin cậy, điều chế 16-QAM kết hợp với RoF được đánh giá là phù hợp hơn. Kỹ thuật này cho phép tăng dung lượng truyền dẫn so với DP-QPSK trong khi vẫn đảm bảo BER trong ngưỡng cho phép ở các khoảng cách trung bình. Nhờ đó, 16-QAM có thể được triển khai trong các liên kết giữa các đơn vị cơ động, các trạm radar khu vực hoặc các mạng thông tin phân tán trong chiến trường.

Đối với các ứng dụng yêu cầu băng thông lớn như truyền video thời gian thực, dữ liệu radar độ phân giải cao hoặc thông tin từ các hệ thống không người lái (UAV), điều chế 64-QAM kết hợp với RoF có thể được sử dụng nhằm tối ưu hiệu suất phổ. Tuy nhiên, kết quả mô phỏng cho thấy kỹ thuật này chỉ phù hợp trong các kịch bản truyền dẫn khoảng cách ngắn và điều kiện kênh truyền tốt, do yêu cầu cao về SNR, OSNR và EVM. Trong môi trường tác chiến phức tạp, việc sử dụng 64-QAM cần được cân nhắc kỹ lưỡng hoặc kết hợp với các cơ chế điều chế thích nghi để đảm bảo chất lượng truyền dẫn.

Đối với các hệ thống cảm biến quân sự và giám sát chiến trường, nơi yêu cầu độ ổn định cao và tiêu thụ năng lượng thấp, DP-QPSK tiếp tục là lựa chọn phù hợp do khả năng chống nhiễu tốt và không yêu cầu điều kiện kênh truyền quá khắt khe. Trong khi đó, đối với các hệ thống tác chiến điện tử, việc lựa chọn điều chế cần linh hoạt theo từng tình huống cụ thể, trong đó DP-QPSK được ưu tiên cho thu thập tín hiệu trong môi trường nhiễu mạnh, còn 16-QAM hoặc 64-QAM có thể được sử dụng khi cần truyền dữ liệu tốc độ cao trong điều kiện thuận lợi.

Bên cạnh việc lựa chọn kỹ thuật điều chế, kiến trúc triển khai RoF cũng cần được thiết kế phù hợp với đặc thù quân sự. Mô hình mạng tập trung, tương tự kiến trúc C-RAN trong các hệ thống 4G/5G, có thể được áp dụng, trong đó các khối xử lý tín hiệu được đặt tại trung tâm chỉ huy, còn các đơn vị vô tuyến được phân tán và kết nối thông qua sợi quang. Cách tiếp cận này giúp giảm tải cho các trạm tiền phương, tăng cường khả năng bảo mật, đồng thời nâng cao hiệu quả quản lý và xử lý tín hiệu. Ngoài ra, RoF còn có thể được tích hợp trong các hệ thống cảm biến, radar, tác chiến điện tử và mạng IoT quân sự, phù hợp với xu hướng phát triển của các hệ thống thông tin hiện đại.

Về mặt chi phí và điều kiện triển khai, mặc dù công nghệ RoF đòi hỏi chi phí đầu tư ban đầu tương đối cao do yêu cầu về thiết bị quang và hạ tầng sợi quang, nhưng lại mang lại hiệu quả lâu dài nhờ khả năng mở rộng linh hoạt, giảm số lượng trạm vô tuyến và tiết kiệm năng lượng vận hành. Trong điều kiện Việt Nam, việc triển khai RoF vẫn còn gặp một số khó khăn như hạn chế về nguồn nhân lực chuyên sâu, chi

phí thiết bị và mức độ hoàn thiện của hạ tầng quang. Tuy nhiên, với việc các nhà mạng lớn đang đẩy mạnh triển khai 5G và phát triển hạ tầng số, RoF có nhiều tiềm năng được ứng dụng trong tương lai gần, đặc biệt trong các hệ thống yêu cầu độ tin cậy và bảo mật cao.

Trong lĩnh vực quốc phòng – an ninh tại Việt Nam, RoF hiện đang được nghiên cứu và thử nghiệm trong một số hệ thống thực tế. Công nghệ này được đánh giá là giải pháp hiệu quả để nâng cao khả năng truyền thông quân sự, giảm nhiễu điện từ và tăng cường bảo mật thông tin. Các ứng dụng tiềm năng bao gồm truyền dẫn tín hiệu vô tuyến mật mã, kết nối hệ thống radar với trung tâm tác chiến, mạng cảm biến chiến trường và các hệ thống tác chiến điện tử. Trong tương lai, với sự phát triển của công nghệ 5G/6G, trí tuệ nhân tạo và các hệ thống cảm biến thông minh, RoF được kỳ vọng sẽ đóng vai trò quan trọng trong việc xây dựng các hệ thống thông tin quân sự thế hệ mới.

Từ các phân tích trên có thể thấy rằng, việc ứng dụng công nghệ RoF trong quân sự cần được thực hiện theo hướng linh hoạt, lựa chọn kỹ thuật điều chế phù hợp với từng kịch bản cụ thể, đồng thời cân nhắc giữa yêu cầu kỹ thuật, chi phí và điều kiện triển khai. Kết quả mô phỏng trong đề án không chỉ xác nhận các phân tích lý thuyết mà còn cung cấp cơ sở thực tiễn quan trọng cho việc đề xuất và định hướng ứng dụng công nghệ RoF trong các hệ thống thông tin quân sự tại Việt Nam trong thời gian tới.

3.5. Kết luận Chương 3

Trong Chương 3, đề án đã tiến hành xây dựng mô hình và thực hiện mô phỏng hệ thống RoF nhằm đánh giá ảnh hưởng của các tham số đặc trưng như OSNR, SNR, EVM và khoảng cách truyền dẫn đến tỷ lệ lỗi bit (BER) đối với các kỹ thuật điều chế DP-QPSK, 16-QAM và 64-QAM. Các kết quả thu được cho thấy sự phù hợp chặt chẽ với lý thuyết truyền dẫn số, đồng thời làm rõ mối quan hệ đánh đổi giữa hiệu suất phổ và độ bền nhiễu của các kỹ thuật điều chế.

Cụ thể, khi OSNR và SNR tăng, BER của hệ thống giảm mạnh, trong khi khi EVM và khoảng cách truyền dẫn tăng, BER có xu hướng gia tăng rõ rệt. Kết quả mô

phỏng cũng chỉ ra rằng DP-QPSK có khả năng chống nhiễu tốt nhất và duy trì BER thấp trong điều kiện kênh truyền kém, cho phép truyền dẫn ở khoảng cách lớn. Ngược lại, 64-QAM đạt hiệu suất phổ cao nhưng rất nhạy cảm với nhiễu và suy hao, chỉ phù hợp trong điều kiện kênh truyền tốt và khoảng cách ngắn. 16-QAM đóng vai trò trung gian, cân bằng giữa dung lượng và độ tin cậy.

Từ các phân tích định lượng này, đề án đã đề xuất các khuyến nghị ứng dụng cụ thể trong mục 3.5. Theo đó, việc lựa chọn kỹ thuật điều chế trong hệ thống RoF cần được thực hiện linh hoạt theo từng kịch bản sử dụng. DP-QPSK được khuyến nghị cho các hệ thống thông tin chỉ huy – điều hành yêu cầu độ tin cậy cao và truyền dẫn xa; 16-QAM phù hợp cho các mạng thông tin chiến thuật cần cân bằng giữa tốc độ và chất lượng; trong khi 64-QAM chỉ nên áp dụng cho các ứng dụng dung lượng lớn trong điều kiện kênh truyền thuận lợi. Đồng thời, kiến trúc triển khai RoF theo hướng tập trung, tương tự mô hình C-RAN, được đánh giá là phù hợp cho các hệ thống quân sự nhờ khả năng quản lý hiệu quả và tăng cường bảo mật.

Bên cạnh các yếu tố kỹ thuật, đề án cũng đã xem xét các điều kiện triển khai thực tế, bao gồm chi phí đầu tư, hạ tầng sợi quang và nguồn nhân lực. Mặc dù RoF đòi hỏi chi phí ban đầu tương đối cao, nhưng mang lại lợi ích lâu dài về khả năng mở rộng, tiết kiệm năng lượng và nâng cao hiệu năng hệ thống. Trong bối cảnh Việt Nam đang phát triển mạnh mẽ hạ tầng viễn thông và các công nghệ 5G/6G, RoF có tiềm năng lớn để ứng dụng trong cả lĩnh vực dân sự và quốc phòng.

Tổng hợp các kết quả nghiên cứu cho thấy, công nghệ RoF kết hợp với lựa chọn kỹ thuật điều chế phù hợp có thể trở thành giải pháp truyền dẫn hiệu quả cho các hệ thống thông tin hiện đại, đặc biệt trong môi trường quân sự yêu cầu cao về độ tin cậy, bảo mật và khả năng triển khai linh hoạt. Các kết quả của chương này không chỉ có ý nghĩa về mặt học thuật mà còn cung cấp cơ sở thực tiễn quan trọng cho việc nghiên cứu, thiết kế và ứng dụng công nghệ RoF trong tương lai.

KẾT LUẬN VÀ KHUYẾN NGHỊ

Trong bối cảnh nhu cầu truyền dẫn dữ liệu tốc độ cao, độ tin cậy lớn và khả năng chống nhiễu ngày càng gia tăng, công nghệ RoF đã nổi lên như một giải pháp tiềm năng, kết hợp ưu điểm của truyền thông quang và vô tuyến. Đề án đã tập trung nghiên cứu một cách hệ thống các cơ sở lý thuyết, mô hình kênh và đánh giá hiệu năng của hệ thống RoF thông qua các kỹ thuật điều chế tiêu biểu.

Trong Chương 1, đề án đã trình bày tổng quan về công nghệ RoF, bao gồm khái niệm, nguyên lý hoạt động, cấu trúc hệ thống và các ưu điểm nổi bật so với các hệ thống truyền dẫn RF truyền thống. Các kỹ thuật điều chế như DP-QPSK, 16-QAM, 64-QAM và OFDM cũng đã được phân tích, qua đó làm rõ đặc điểm, hiệu suất phổ và khả năng chống nhiễu của từng phương pháp. Đồng thời, các thách thức kỹ thuật như suy hao, nhiễu, phi tuyến và tán sắc trong hệ thống RoF cũng được đề cập, tạo nền tảng cho việc phân tích chuyên sâu ở các chương tiếp theo.

Trong Chương 2, đề án đã xây dựng mô hình kênh truyền RoF và phân tích các tham số đánh giá hiệu năng quan trọng như BER, SNR, OSNR và EVM. Các mối quan hệ giữa các tham số này đã được làm rõ thông qua các biểu thức toán học và phân tích lý thuyết. Kết quả cho thấy hiệu năng hệ thống chịu ảnh hưởng mạnh bởi suy hao sợi quang, nhiễu quang – điện và các hiệu ứng phi tuyến. Đồng thời, chương này đã thực hiện so sánh chi tiết giữa các kỹ thuật điều chế DP-QPSK, 16-QAM và 64-QAM, qua đó chỉ ra sự đánh đổi giữa hiệu suất phổ và độ bền nhiễu. DP-QPSK có độ ổn định cao nhất, phù hợp cho truyền xa; 16-QAM cân bằng giữa dung lượng và độ tin cậy; trong khi 64-QAM đạt hiệu suất phổ cao nhưng yêu cầu điều kiện kênh truyền nghiêm ngặt.

Trong Chương 3, đề án đã sử dụng phần mềm OptiSystem để xây dựng mô hình mô phỏng hệ thống RoF và đánh giá định lượng hiệu năng của các kỹ thuật điều chế. Các kịch bản mô phỏng đã xem xét ảnh hưởng của OSNR, SNR, EVM và khoảng cách truyền dẫn đến BER. Kết quả mô phỏng phù hợp chặt chẽ với phân tích lý thuyết, cho thấy:

- BER giảm khi OSNR và SNR tăng, nhưng tăng khi EVM và khoảng cách truyền dẫn tăng.
- DP-QPSK duy trì BER thấp trong điều kiện kênh kém và truyền xa.
- 16-QAM đạt hiệu năng trung gian, phù hợp cho các tuyến truyền trung bình.
- 64-QAM nhạy với nhiễu và phi tuyến, chỉ phù hợp cho khoảng cách ngắn và kênh truyền tốt.

Các tham số đánh giá hiệu năng như BER, OSNR, EVM và khoảng cách truyền dẫn cần được xem xét trong mối liên hệ với từng kịch bản ứng dụng:

- Với hệ thống radar và chỉ huy: yêu cầu BER $\leq 10^{-3}$, độ ổn định cao
- Với truyền dữ liệu tốc độ cao: ưu tiên băng thông và hiệu suất phổ
- Với hệ thống giám sát: yêu cầu cân bằng giữa độ tin cậy và dung lượng

Kết quả mô phỏng trong đề án đã phản ánh rõ mối quan hệ giữa các tham số này, từ đó cho phép lựa chọn kỹ thuật điều chế phù hợp theo từng điều kiện cụ thể.

Trên cơ sở đó, đề án đã đề xuất định hướng lựa chọn kỹ thuật điều chế phù hợp cho từng kịch bản ứng dụng, đặc biệt trong lĩnh vực quân sự. DP-QPSK được khuyến nghị cho các hệ thống yêu cầu độ tin cậy cao và truyền dẫn xa; 16-QAM phù hợp cho các mạng chiến thuật cần cân bằng giữa tốc độ và chất lượng; trong khi 64-QAM thích hợp cho các ứng dụng dung lượng lớn trong điều kiện kênh thuận lợi. Ngoài ra, kiến trúc RoF tập trung theo mô hình C-RAN cũng được đánh giá là hướng triển khai hiệu quả, giúp nâng cao khả năng quản lý, bảo mật và tối ưu tài nguyên hệ thống.

Bên cạnh các kết quả đạt được, đề án vẫn còn một số hạn chế nhất định. Mô hình kênh chủ yếu được xây dựng dựa trên giả thiết lý tưởng (AWGN), chưa xét đầy đủ các yếu tố môi trường thực tế như biến động nhiệt độ, rung động cơ học hay ảnh hưởng của hệ thống đa người dùng. Ngoài ra, các kỹ thuật xử lý tín hiệu nâng cao như bù phi tuyến bằng DSP, điều chế thích nghi hoặc tích hợp trí tuệ nhân tạo chưa được khai thác sâu.

Trong thời gian tới, các hướng nghiên cứu có thể tiếp tục phát triển bao gồm:

- Nghiên cứu mô hình kênh RoF trong điều kiện thực tế phức tạp và môi trường quân sự. Trong thực tế, môi trường quân sự có đặc trưng là tồn tại nhiều nguồn nhiễu phức tạp như nhiễu điện từ mạnh (EMI), nhiễu chủ động từ các hệ thống tác chiến điện tử (EW) hoặc nhiễu đa đường trong môi trường đô thị và chiến trường.

Trong mô hình hiện tại, nhiễu được giả thiết là nhiễu Gaussian trắng (AWGN), đây là mô hình phổ biến nhằm đơn giản hóa phân tích. Tuy nhiên, để tăng tính thực tế, có thể mở rộng mô hình theo các hướng sau:

Bổ sung nhiễu phi Gaussian hoặc nhiễu xung, xét ảnh hưởng của nhiễu gây nhiễu chủ động, mô hình hóa suy hao và fading trong môi trường đa đường

Việc đưa các yếu tố này vào mô phỏng sẽ giúp đánh giá chính xác hơn hiệu năng hệ thống RoF trong các điều kiện tác chiến thực tế.

- Ứng dụng các kỹ thuật điều chế thích nghi (Adaptive Modulation) nhằm tối ưu hiệu năng theo điều kiện kênh.

- Tích hợp các phương pháp xử lý tín hiệu số tiên tiến và trí tuệ nhân tạo để bù nhiễu và phi tuyến.

- Mở rộng nghiên cứu RoF trong các hệ thống 5G/6G, mạng cảm biến và tác chiến điện tử.

Tổng thể, kết quả của đề án đã khẳng định rằng công nghệ RoF kết hợp với lựa chọn kỹ thuật điều chế phù hợp là một giải pháp truyền dẫn hiệu quả, có tiềm năng ứng dụng cao trong các hệ thống thông tin hiện đại, đặc biệt trong lĩnh vực quốc phòng – an ninh. Những đóng góp của đề tài không chỉ có ý nghĩa về mặt học thuật mà còn mang giá trị thực tiễn trong việc định hướng nghiên cứu, thiết kế và triển khai các hệ thống RoF trong tương lai.

DANH MỤC TÀI LIỆU THAM KHẢO

Tiếng Việt

[1] Nguyễn Văn Tuấn (2021). Hệ thống thông tin quang – Cơ sở và ứng dụng. NXB Khoa học và Kỹ thuật

[2] Viện Tiêu chuẩn Viễn thông Việt Nam (2023). *Tổng quan tiêu chuẩn mạng 5G và lộ trình triển khai tại Việt Nam.*

[3] Tập đoàn VNPT (2023). *Báo cáo nghiên cứu và thử nghiệm mạng 5G tại Việt Nam*

Tiếng Anh

[4] Li, X., Xie, X., El-Hajjar, M., & Hanzo, L. (2021). Analogue RoF for Next-Generation RAN: Challenges and Opportunities. arXiv.

[5] Al-Zubaidi, S., et al. (2021). Optically Powered Radio-over-Fiber Systems in Support of 5G Cellular Networks and IoT. IEEE Journal of Lightwave Technology.

[6] Effendi, A., et al. (2022). Design of RoF System with 16-QAM Modulation for 5G Fronthaul Network Implementation in Indonesia. IAICT.

[7] Sarkar, S., et al. (2025). Optimization of QAM modulated 16-channel DWDM-RoF system for multi-gigabit long-haul transmission. Journal of Optics.

[8] Wei, H., et al. (2022). Real-Time Transmission of 125.52 Gb/s PDM-QPSK Signal in RoF System. Acta Optica Sinica.

[9] Sharma, V., Rawat, M., & Singh, R. (2022). *Performance Analysis of DP-QPSK, 16-QAM, and OFDM in RoF Systems for 5G Applications.* IEEE Access.

[10] Vyas, N. & Agrawal (2016). *BER Performance of 64-QAM RoF System.*

[11] Ali, F., & Wadday, A. (2020). *Performance Evaluation of RoF with OFDM using 64-QAM.* EAI.

[12] Noor, J., et al. (2024). *Performance analysis of 64-QAM OFDM RoF for 5G mmWave.* Journal of Optical Communications.

BẢN CAM ĐOAN

Tôi cam đoan đã thực hiện việc kiểm tra mức độ tương đồng nội dung Đề án qua phần mềm một cách trung thực và đạt kết quả mức độ tương đồng nhỏ hơn **20%** toàn bộ nội dung Đề án. Đề án này sau khi đã kiểm tra qua phần mềm và bản cứng Đề án đã nộp để bảo vệ trước hội đồng. Nếu sai tôi xin chịu các hình thức kỷ luật theo quy định hiện hành của Học viện.

Hà Nội, ngày tháng năm 2026

Tác giả Đề án

Đặng Minh Tú