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

TÓM TẮT ĐỀ ÁN TỐT NGHIỆP THẠC SĨ

HÀ NỘI – NĂM 2026

Đề án tốt nghiệp được hoàn thành tại:

HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG

Người hướng dẫn khoa học: PGS TS. Nguyễn Chiến Trinh

Phản biện 1: PGS.TS. Lê Hải Châu

Phản biện 2: TS. Vương Đức Hạnh

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

Vào lúc: 15h00 ngày 27 tháng 3 năm 2026

Có thể tìm hiểu đề án tại:

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

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

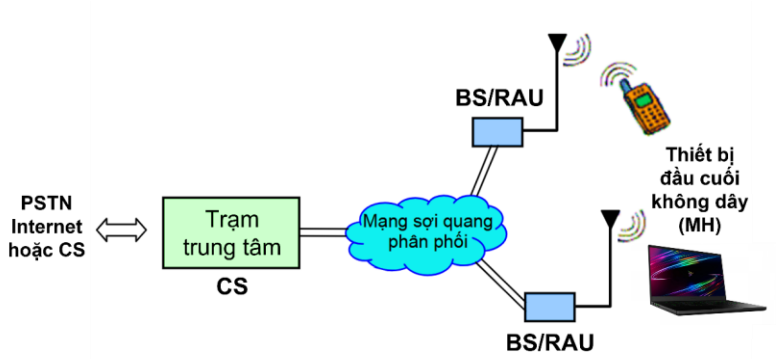
1.1. Khái niệm và nguyên lý hoạt động của hệ thống RoF

1.1.1. Khái niệm RoF

Radio over Fiber (RoF) là công nghệ truyền dẫn tín hiệu vô tuyến thông qua sợi quang, trong đó các chức năng xử lý tín hiệu RF được tập trung tại trạm trung tâm (CS) và phân phối tới các trạm gốc (BS/RAU). Nhờ sử dụng sợi quang có suy hao thấp, RoF cho phép truyền tín hiệu RF đi xa với chất lượng cao, đồng thời đơn giản hóa cấu trúc trạm gốc.

Kiến trúc RoF giúp tập trung hóa xử lý, cho phép dùng chung thiết bị, phân bổ tài nguyên linh hoạt và giảm chi phí triển khai, vận hành, đặc biệt phù hợp với các hệ thống vô tuyến băng rộng có mật độ trạm cao.

Một hệ thống RoF cơ bản gồm các thành phần chính: thiết bị đầu cuối (MH), trạm gốc (BS), trạm trung tâm (CS) và sợi quang. Trong đó, MH là thiết bị người dùng; BS thực hiện chuyển đổi quang–điện và phát/thu tín hiệu vô tuyến; CS đảm nhiệm toàn bộ xử lý và điều khiển hệ thống; còn sợi quang đóng vai trò môi trường truyền dẫn chính với suy hao thấp và băng thông lớn.



Hình 1.1: Tổng quan hệ thống RoF

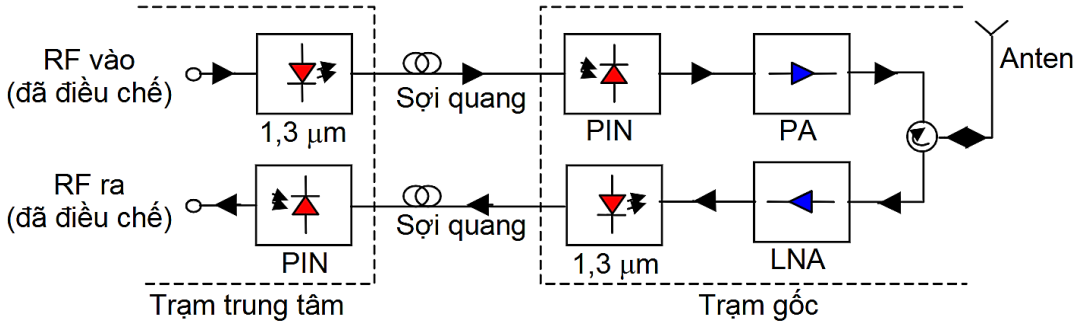
1.1.2. Nguyên lý hoạt động cơ bản của RoF

Hệ thống RoF hoạt động dựa trên nguyên lý truyền tín hiệu vô tuyến (RF) thông qua sợi quang nhằm giảm suy hao và tăng khoảng cách truyền dẫn. Ở phía phát, tín hiệu RF được dùng để điều chế cường độ ánh sáng từ nguồn laser (IM), sau đó tín hiệu quang được truyền qua sợi quang tới các trạm đầu xa.

Tại trạm thu, tín hiệu quang được tách sóng trực tiếp (DD) bằng photodiode để khôi phục lại tín hiệu RF, sau đó khuếch đại và phát qua anten. Ở chiều ngược lại, tín hiệu RF từ người dùng cũng được chuyển đổi sang dạng quang và truyền về trạm trung tâm để xử lý.

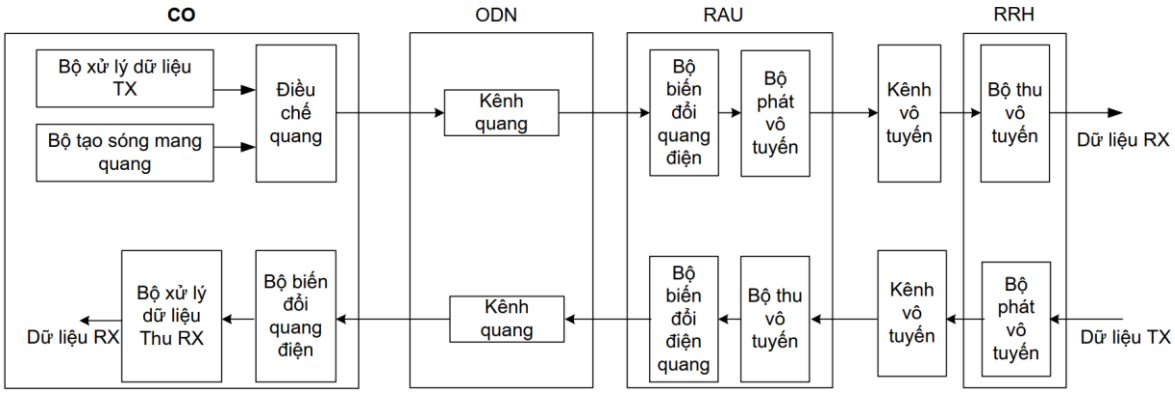
Phương pháp truyền này gọi là điều chế cường độ – tách sóng trực tiếp (IM-DD), là dạng đơn giản và phổ biến nhất của hệ thống RoF. Nhờ đó, các chức năng xử lý phức tạp được tập trung tại trạm trung tâm, trong khi các trạm đầu xa được đơn giản hóa, giúp giảm chi phí và dễ triển khai.

Ngoài ra, hệ thống có thể sử dụng tín hiệu dao động nội (LO) để hạ tần tín hiệu xuống tần số trung gian (IF) tại trạm đầu xa, giúp giảm yêu cầu về linh kiện tần số cao. Tuy nhiên, việc truyền tín hiệu tần số cao trên tuyến quang vẫn đặt ra yêu cầu khắt khe về băng thông và chất lượng truyền dẫn.



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

1.1. Sơ đồ khối và mô hình kiến trúc RoF



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

Hệ thống RoF điển hình gồm các phân hệ chính: trạm trung tâm (CS), mạng phân phối quang (ODN), trạm gốc (BS/RAU), kênh vô tuyến và thiết bị đầu cuối. Kiến trúc này cho phép truyền tín hiệu vô tuyến qua sợi quang với hiệu quả cao và linh hoạt trong triển khai.

Phân hệ CS đảm nhiệm xử lý tín hiệu và tạo tín hiệu quang cho đường xuống thông qua quá trình điều chế. Mạng ODN đóng vai trò truyền dẫn tín hiệu giữa CS và các BS, sử dụng sợi quang

và có thể kết hợp các bộ khuếch đại quang (như EDFA, Raman, SOA) để bù suy hao và mở rộng phạm vi truyền dẫn. Các cấu trúc mạng phổ biến gồm hình sao, vòng hoặc kết hợp nhằm đảm bảo tính linh hoạt và khả năng mở rộng.

Phân hệ BS/RAU được thiết kế đơn giản, chủ yếu thực hiện chuyển đổi quang–điện và phát/thu tín hiệu vô tuyến. Ở đường lên, BS có thể sử dụng hoặc không sử dụng nguồn laser, tùy thuộc vào kiến trúc hệ thống. Việc đơn giản hóa BS giúp giảm chi phí triển khai và dễ dàng mở rộng mạng.

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

1.2.1. Ưu điểm của công nghệ RoF

Công nghệ RoF có nhiều ưu điểm nổi bật so với các phương thức truyền dẫn truyền thống. Trước hết, sợi quang có suy hao rất thấp (khoảng 0,2 dB/km), cho phép truyền tín hiệu RF, kể cả ở dải tần cao như mmWave, trên khoảng cách xa với tổn hao nhỏ hơn nhiều so với cáp đồng trục.

Bên cạnh đó, RoF tận dụng băng thông rất lớn của sợi quang (hàng chục THz), cho phép truyền tải dung lượng lớn và hỗ trợ các kỹ thuật ghép kênh như SCM, WDM nhằm nâng cao hiệu quả sử dụng tài nguyên.

Hệ thống RoF còn có khả năng miễn nhiễm với nhiễu điện từ (EMI), giúp tăng độ tin cậy và bảo mật thông tin. Đồng thời, nhờ kiến trúc tập trung, các trạm đầu xa (RAU) được đơn giản hóa, giúp giảm chi phí lắp đặt, bảo trì và tiêu thụ điện năng.

Ngoài ra, RoF hỗ trợ đa dịch vụ, đa nhà mạng và cho phép phân bổ tài nguyên linh hoạt theo nhu cầu, góp phần tối ưu hóa hiệu năng và nâng cao hiệu quả khai thác mạng.

1.2.2. Thách thức đối với ứng dụng RoF

Hệ thống RoF là liên kết truyền dẫn tương tự nên chịu ảnh hưởng lớn của nhiễu, phi tuyến và tán sắc sợi quang, làm suy giảm SNR và dải động, từ đó ảnh hưởng đến chất lượng truyền dẫn. Trong mạng di động, tín hiệu thu biến thiên lớn (tới khoảng 80 dB), đòi hỏi hệ thống có dải động cao để xử lý đồng thời tín hiệu mạnh và yếu.

Các nguồn nhiễu chính gồm RIN, nhiễu pha laser, nhiễu dòng lượng tử và nhiễu nhiệt, cùng với tán sắc sợi quang gây lệch pha và giới hạn khoảng cách truyền. Ngoài ra, phi tuyến của các linh kiện như MZM và photodiode gây méo tín hiệu (IMD, AM–PM), đặc biệt nghiêm trọng với các điều chế bậc cao.

Đối với hệ thống mmWave-RoF, tán sắc có thể gây fading ngay cả trên khoảng cách ngắn, đòi hỏi các kỹ thuật bù như SSB hoặc DCF. Bên cạnh đó, các vấn đề về ổn định laser, giới hạn băng thông thiết bị, đồng bộ hệ thống và chi phí triển khai cũng là những thách thức lớn trong ứng dụng thực tế.

1.3. Các kỹ thuật điều chế sử dụng trong RoF

1.3.1. Kỹ thuật điều chế DP-QPSK

QPSK là kỹ thuật điều chế pha, trong đó mỗi ký hiệu biểu diễn 2 bit dữ liệu thông qua 4 trạng thái pha khác nhau (0°, 90°, 180°, 270°), giúp nâng cao hiệu suất băng thông so với BPSK. Tín hiệu QPSK có thể biểu diễn dưới dạng hai thành phần trực giao I–Q, tạo thành chòm sao gồm 4 điểm phân bố đều, thường sử dụng mã Gray để giảm lỗi bit.

DP-QPSK là mở rộng của QPSK trong truyền dẫn quang, khai thác hai trạng thái phân cực trực giao của ánh sáng (X và Y) để truyền đồng thời hai tín hiệu QPSK độc lập. Nhờ đó, dung lượng truyền được tăng gấp đôi, từ 2 lên 4 bit/ký hiệu, mà không cần mở rộng băng thông, phù hợp với các hệ thống truyền dẫn tốc độ cao.

1.3.2. Kỹ thuật điều chế 16-QAM

16-QAM là kỹ thuật điều chế biên độ–pha, trong đó cả biên độ và pha của sóng mang được thay đổi để biểu diễn thông tin. Mỗi ký hiệu mang 4 bit dữ liệu, giúp tăng hiệu suất băng thông so với QPSK mà không cần mở rộng băng thông kênh.

Tín hiệu 16-QAM được biểu diễn qua hai thành phần trực giao I–Q với nhiều mức biên độ khác nhau, tạo thành chòm sao gồm 16 điểm sắp xếp dạng ma trận 4×4. Việc sử dụng mã Gray giúp giảm xác suất lỗi bit khi có nhiễu.

Mặc dù có hiệu suất phổ cao, 16-QAM nhạy với nhiễu hơn do khoảng cách giữa các điểm chòm sao nhỏ, vì vậy yêu cầu SNR/OSNR cao hơn để đảm bảo chất lượng truyền dẫn.

1.3.3. Kỹ thuật điều chế 64-QAM

64-QAM là kỹ thuật điều chế biên độ–pha với mỗi ký hiệu mang 6 bit dữ liệu, cho hiệu suất phổ cao (6 bit/s/Hz), vượt trội so với QPSK và 16-QAM. Các điểm tín hiệu được phân bố dày đặc trên mặt phẳng I–Q, tạo thành chòm sao 64 điểm.

Tuy nhiên, do khoảng cách giữa các điểm nhỏ, 64-QAM rất nhạy với nhiễu và phi tuyến, đòi hỏi SNR/OSNR cao và hệ thống có độ tuyến tính tốt để đảm bảo BER thấp.

Trong hệ thống RoF, 64-QAM phù hợp với các ứng dụng yêu cầu dung lượng lớn như mạng 5G, radar và truyền thông băng rộng, nhưng cần áp dụng các kỹ thuật bù tán sắc và giảm phi tuyến để đạt hiệu năng tối ưu.

1.3.4. Kỹ thuật điều chế OFDM

OFDM là kỹ thuật đa sóng mang, trong đó băng tần được chia thành nhiều sóng mang con trực giao, giúp tăng hiệu quả sử dụng phổ mà không cần băng bảo vệ. Mỗi sóng mang con được điều chế bằng các kỹ thuật như PSK hoặc QAM, cho phép truyền dữ liệu tốc độ cao.

Chuỗi dữ liệu tốc độ lớn được chia thành nhiều luồng song song và gán lên các sóng mang con, làm tăng thời gian ký hiệu và giảm ảnh hưởng của nhiễu liên ký hiệu. Tín hiệu OFDM được tạo và khôi phục thông qua các phép biến đổi IFFT/FFT trong miền số, giúp đơn giản hóa cấu trúc hệ thống.

Nhờ khả năng tận dụng băng thông hiệu quả và dễ triển khai bằng xử lý số, OFDM được ứng dụng rộng rãi trong các hệ thống truyền thông hiện đại, bao gồm cả hệ thống RoF.

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

Trong các hệ thống quân sự hiện đại, yêu cầu về truyền thông an toàn, tin cậy và băng thông cao ngày càng cấp thiết do sự phát triển của chiến tranh điện tử và các mối đe dọa mạng. Tuy nhiên, các hệ thống RF truyền thống còn nhiều hạn chế như dễ bị nhiễu, chặn thu và suy hao lớn trong môi trường tác chiến phức tạp.

Công nghệ Radio over Fiber (RoF) nổi lên như một giải pháp hiệu quả nhờ khả năng truyền tín hiệu RF qua sợi quang với suy hao thấp, băng thông lớn và độ ổn định cao. Nhờ truyền dẫn trong môi trường quang, RoF có tính bảo mật cao, miễn nhiễm nhiễu điện từ (EMI) và khó bị gây nhiễu hoặc nghe lén.

Bên cạnh đó, RoF cho phép truyền tín hiệu đi xa hàng chục km với chất lượng ổn định, đồng thời có khả năng triển khai linh hoạt trong nhiều môi trường như mặt đất, không quân và hải quân. Các trạm đầu xa được đơn giản hóa, giúp giảm chi phí, khối lượng và tăng tính cơ động.

Nhờ những ưu điểm này, RoF được ứng dụng rộng rãi trong các hệ thống quân sự như chỉ huy – điều khiển (C2), radar, thông tin vệ tinh (SATCOM), tác chiến điện tử (EW), mạng UAV và hệ thống C4ISR. Công nghệ này được xem là nền tảng quan trọng cho các mạng truyền thông quân sự thế hệ mới, đáp ứng yêu cầu bảo mật, độ tin cậy và hiệu năng cao.

1.5. *Kết luận chương 1*

Chương 1 trình bày cơ sở lý thuyết và nền tảng kỹ thuật của công nghệ Radio over Fiber (RoF). Trước hết, khái niệm và nguyên lý hoạt động của RoF được giới thiệu, làm rõ cơ chế truyền tín hiệu vô tuyến qua sợi quang và sự khác biệt so với hệ thống RF truyền thống.

Tiếp theo, cấu trúc hệ thống RoF gồm các thành phần chính như trạm trung tâm (CS), mạng phân phối quang (ODN) và trạm đầu xa (BS/RAU) được phân tích. Kiến trúc tập trung giúp đơn giản hóa RAU, tăng tính linh hoạt và giảm chi phí triển khai. Đồng thời, các ưu điểm của RoF như suy hao thấp, băng thông lớn, miễn nhiễm nhiễu điện từ cũng như các thách thức về nhiễu, phi tuyến và tán sắc được làm rõ.

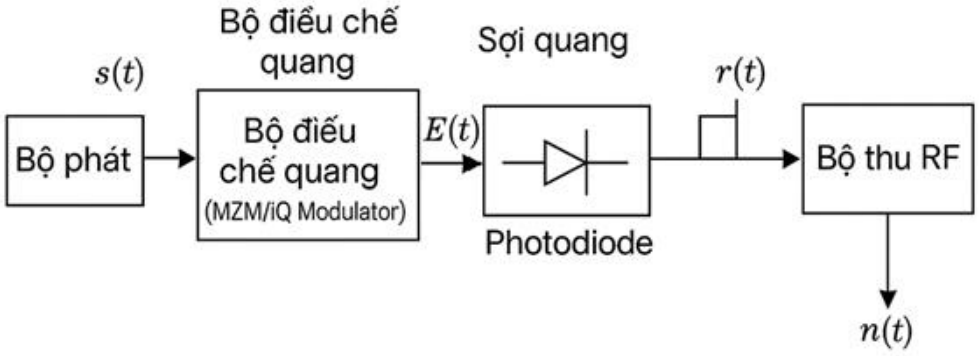
Chương này cũng trình bày các kỹ thuật điều chế như DP-QPSK, 16-QAM, 64-QAM và OFDM, cho thấy sự đánh đổi giữa hiệu suất phổ và khả năng chống nhiễu. Ngoài ra, tiềm năng ứng dụng của RoF trong quân sự được đề cập, đặc biệt trong các hệ thống chỉ huy, radar và tác chiến điện tử.

Nhìn chung, RoF là công nghệ truyền dẫn đầy triển vọng, làm cơ sở cho việc xây dựng mô hình và đánh giá hiệu năng ở các chương tiếp theo.

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 0.1: 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

Trong hệ thống RoF, tín hiệu RF được điều chế lên sóng quang, có dạng:

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

trong đó s(t) là tín hiệu điều chế phức (I/Q). Hệ thống được giả thiết hoạt động trong miền tuyến tính.

Kênh truyền quang được đặc trưng bởi suy hao, tán sắc và phi tuyến. Hàm truyền có dạng:

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

trong đó tán sắc gây lệch pha theo tần số (RF fading), còn phi tuyến gây méo tín hiệu khi công suất lớn.

Ở phía thu, photodiode thực hiện chuyển đổi quang–điện theo quan hệ:

$$i(t)=R|E_{out}(t)|^2 \quad (2.5)$$

Băng thông giới hạn của phần điện có thể gây suy giảm tín hiệu tần số cao, ảnh hưởng đến SNR và EVM.

Nhiễu trong hệ thống gồm nhiễu dòng lượng tử, nhiễu nhiệt, nhiễu cường độ tương đối và nhiễu phát xạ tự phát khuếch đại. Tổng nhiễu làm suy giảm SNR/OSNR và ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu năng hệ thống.

2.2. Các tham số đánh giá hiệu năng

2.2.1. Tham số BER

Tỷ lệ lỗi bit (BER) là tham số đánh giá độ chính xác của hệ thống truyền dẫn, được xác định bằng tỉ lệ giữa số bit lỗi và tổng số bit truyền. Trong kênh Gaussian (AWGN), BER có thể biểu diễn thông qua hàm Q và phụ thuộc vào năng lượng trên mỗi bit và mức nhiễu.

BER có mối quan hệ chặt chẽ với SNR và thay đổi theo sơ đồ điều chế. Đối với các điều chế đơn giản như BPSK/QPSK, BER giảm nhanh khi SNR tăng. Trong khi đó, với các điều chế bậc cao như 16-QAM và 64-QAM, BER cao hơn trong cùng điều kiện do khoảng cách giữa các điểm chòm sao nhỏ hơn, nên yêu cầu SNR lớn hơn để đảm bảo chất lượng truyền dẫn.

Như vậy, khi tăng bậc điều chế, hệ thống đạt hiệu suất phổ cao hơn nhưng phải đánh đổi bằng việc yêu cầu chất lượng kênh tốt hơn để duy trì BER thấp.

2.2.2. Tham số SNR

Tỷ số tín hiệu trên nhiễu (SNR) là đại lượng đánh giá độ tin cậy của kênh truyền, được xác định bằng tỉ lệ giữa công suất tín hiệu và công suất nhiễu trong cùng băng tần. Trong hệ thống RoF, công suất tín hiệu là tín hiệu RF sau photodiode, còn nhiễu bao gồm cả nhiễu quang và nhiễu điện.

SNR có ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng truyền dẫn. Khi SNR giảm, tín hiệu bị méo và chồng lấn trên giản đồ chòm sao, làm tăng tỷ lệ lỗi bit (BER). Do đó, duy trì SNR cao là điều kiện quan trọng để đảm bảo hiệu năng của hệ thống, đặc biệt với các sơ đồ điều chế bậc cao.

2.2.3. Tham số OSNR

OSNR là tham số đặc trưng cho chất lượng tín hiệu trong miền quang, được định nghĩa là tỉ lệ giữa công suất tín hiệu quang và công suất nhiễu quang, thường được đo trong băng thông chuẩn 0,1 nm.

Trong hệ thống RoF, OSNR phụ thuộc vào công suất phát của laser và suy hao trên tuyến truyền. OSNR cao cho thấy tín hiệu quang "sạch", từ đó giúp tín hiệu RF sau khi tách sóng có SNR cao và BER thấp.

Ngược lại, khi OSNR giảm (do suy hao hoặc nhiễu ASE từ EDFA), chất lượng tín hiệu suy giảm, làm tăng BER. Vì vậy, OSNR là thông số quan trọng để đánh giá và tối ưu hiệu năng hệ thống RoF.

2.2.4. Tham số EVM

EVM (Error Vector Magnitude) là tham số đánh giá độ méo của tín hiệu điều chế trên giản đồ chòm sao, được xác định dựa trên sai lệch giữa tín hiệu thu và tín hiệu lý tưởng.

EVM càng nhỏ thì các điểm chòm sao càng tập trung, thể hiện hệ thống có độ tuyến tính cao, SNR lớn và chất lượng truyền dẫn tốt. Ngược lại, EVM tăng khi tín hiệu chịu ảnh hưởng của nhiễu, phi tuyến hoặc suy hao – tán sắc, làm các điểm tín hiệu bị phân tán và biến dạng.

Giữa EVM và SNR tồn tại quan hệ nghịch, do đó khi SNR giảm thì EVM tăng, kéo theo suy giảm chất lượng hệ thống và tăng BER.

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

Trong hệ thống RoF, tín hiệu RF khi 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.

Suy hao gây giảm công suất tín hiệu theo chiều dài sợi, làm suy giảm chất lượng truyền dẫn, do đó cần bù bằng khuếch đại quang và lựa chọn bước sóng tối ưu. Nhiễu (quang và điện) làm giảm SNR và tăng sai lệch tín hiệu, cần được hạn chế bằng cách tối ưu nguồn phát và băng thông hệ thống. Phi tuyến, chủ yếu do hiệu ứng Kerr, gây méo chòm sao và ảnh hưởng mạnh đến các điều chế bậc cao, có thể giảm bằng cách điều chỉnh công suất và áp dụng kỹ thuật bù số.

Như vậy, việc kiểm soát đồng thời suy hao, nhiễu và phi tuyến là yếu tố then chốt để đảm bảo hiệu năng và độ tin cậy của hệ thống RoF.

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

Trong hệ thống RoF, kỹ thuật điều chế ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu năng, hiệu suất phổ và độ tin cậy truyền dẫn. Các phương pháp phổ biến gồm DP-QPSK, 16-QAM và 64-QAM, với sự khác biệt về số bit/ký hiệu, khoảng cách chòm sao và độ nhạy nhiễu.

DP-QPSK có độ bền cao trước nhiễu và suy hao, yêu cầu SNR thấp, phù hợp cho các tuyến truyền dài. 16-QAM đạt hiệu suất phổ cao hơn nhưng nhạy nhiễu hơn, thích hợp cho các tuyến trung bình. Trong khi đó, 64-QAM có hiệu suất phổ cao nhất nhưng yêu cầu SNR và OSNR rất lớn, chỉ phù hợp với các tuyến ngắn và môi trường ít nhiễu.

Kết quả so sánh cho thấy khi tăng bậc điều chế, hiệu suất phổ tăng nhưng độ nhạy nhiễu và yêu cầu chất lượng kênh cũng tăng theo. Trong các tuyến RoF dài, DP-QPSK là lựa chọn tối ưu về độ tin cậy, trong khi 16-QAM và 64-QAM phù hợp hơn cho các hệ thống dung lượng cao ở khoảng cách ngắn.

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

Từ các kết quả phân tích, việc lựa chọn kỹ thuật điều chế trong hệ thống RoF cần cân bằng giữa hiệu suất phổ và độ tin cậy truyền dẫn.

DP-QPSK là phương pháp phù hợp cho các tuyến RoF dài, yêu cầu độ ổn định cao và khả năng chống nhiễu tốt. 16-QAM mang lại sự cân bằng giữa tốc độ và độ tin cậy, thích hợp cho các tuyến trung bình. Trong khi đó, 64-QAM có hiệu suất phổ cao nhất nhưng chỉ phù hợp với các tuyến ngắn và môi trường truyền dẫn được kiểm soát tốt.

Như vậy, lựa chọn kỹ thuật điều chế cần dựa trên yêu cầu cụ thể về khoảng cách truyền, chất lượng kênh và dung lượng hệ thống nhằm đảm bảo hiệu năng tối ưu.

2.6. Kết luận Chương 2

Chương 2 tập trung phân tích đặc tính kênh truyền và đánh giá hiệu năng của hệ thống RoF. Mô hình kênh được xây dựng dựa trên chuỗi xử lý quang–điện–vô tuyến, trong đó xem xét các yếu tố ảnh hưởng như suy hao, tán sắc, nhiễu và phi tuyến.

Các tham số đánh giá hiệu năng gồm BER, SNR, OSNR và EVM được phân tích, cho thấy chất lượng hệ thống phụ thuộc mạnh vào nhiễu và điều kiện truyền dẫn. Trên cơ sở đó, luận văn tiến hành so sánh các kỹ thuật điều chế DP-QPSK, 16-QAM và 64-QAM.

Kết quả cho thấy DP-QPSK có độ bền cao, phù hợp cho tuyến dài; 16-QAM cân bằng giữa tốc độ và độ tin cậy; trong khi 64-QAM đạt hiệu suất cao nhưng chỉ phù hợp với tuyến ngắn. Từ đó, chương đưa ra định hướng lựa chọn điều chế phù hợp theo yêu cầu hệ thống.

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

Chương 3 trình bày việc sử dụng phần mềm OptiSystem để mô phỏng và kiểm chứng các phân tích lý thuyết của hệ thống RoF. Nội dung bao gồm xây dựng mô hình hệ thống, thiết lập các kịch bản mô phỏng cho các kỹ thuật điều chế DP-QPSK, 16-QAM và 64-QAM.

Kết quả mô phỏng được phân tích và so sánh nhằm đánh giá hiệu năng của từng kỹ thuật điều chế. Trên cơ sở đó, chương đưa ra nhận xét và định hướng lựa chọn phương pháp điều chế phù hợp, góp phần xác thực các kết quả lý thuyết và đề xuất ứng dụng trong thực tế, đặc biệt trong lĩnh vực quân sự.

1.6. Giới thiệu về phần mềm OptiSystem

OptiSystem là phần mềm mô phỏng quang học chuyên dụng, được sử dụng rộng rãi trong nghiên cứu và thiết kế hệ thống truyền dẫn quang. Phần mềm cho phép mô phỏng toàn bộ quá trình truyền tín hiệu và phân tích các hiệu ứng như suy hao, tán sắc, nhiễu ASE và phi tuyến.

Với giao diện trực quan dạng kéo–thả, OptiSystem hỗ trợ xây dựng nhanh các mô hình hệ thống RoF thông qua các khối chức năng như nguồn laser, bộ điều chế, sợi quang, EDFA và photodiode. Đồng thời, các công cụ đo lường như BER Analyzer hay Eye Diagram giúp đánh giá hiệu năng hệ thống một cách hiệu quả.

3.1.1. Đặc điểm nổi bật của OptiSystem

OptiSystem cung cấp thư viện mô-đun phong phú với nhiều kỹ thuật điều chế tiên tiến như QPSK, QAM, OFDM và DP-QPSK. Phần mềm hỗ trợ mô phỏng hệ thống RoF và đánh giá các chỉ tiêu hiệu năng như SNR, OSNR, BER và EVM.

Bên cạnh đó, OptiSystem có khả năng tích hợp với các công cụ khác như MATLAB, hỗ trợ tối ưu hóa hệ thống thông qua các phương pháp tự động. Các chức năng hiển thị trực quan như phổ quang, giản đồ mắt và chòm sao điều chế giúp phân tích hiệu năng một cách hiệu quả.

3.1.2. Ứng dụng trong mô phỏng hệ thống RoF

Trong hệ thống RoF, OptiSystem cho phép mô phỏng đầy đủ các khối chức năng gồm nguồn phát, kênh truyền và bộ thu. Nguồn phát sử dụng laser kết hợp bộ điều chế quang để

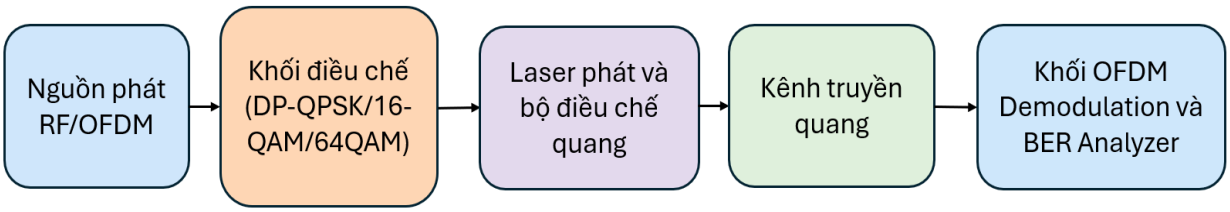
tạo tín hiệu RF trên sóng quang; kênh truyền gồm sợi quang và EDFA; bộ thu sử dụng photodiode hoặc thu coherent kết hợp xử lý số.

Phần mềm hỗ trợ đánh giá các chỉ tiêu hiệu năng như BER, Q-factor và OSNR, từ đó cho phép xây dựng mô hình mô phỏng và so sánh các kỹ thuật điều chế DP-QPSK, 16-QAM và 64-QAM. Kết quả là cơ sở để lựa chọn cấu hình tối ưu cho hệ thống RoF trong các ứng dụng thực tiễn.

1.7. 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 0.1: Sơ đồ khối hệ thống RoF mô phỏng trên OptiSystem

Mô hình hệ thống RoF trong mô phỏng bao gồm các khối chính: khối phát tín hiệu RF/OFDM, khối điều chế quang, kênh truyền quang, khối thu và khối xử lý tín hiệu số. Tín hiệu được điều chế lên sóng quang, truyền qua sợi quang (có suy hao, tán sắc và khuếch đại), sau đó được tách sóng và xử lý để khôi phục dữ liệu.

Hệ thống hỗ trợ các kỹ thuật điều chế như DP-QPSK, 16-QAM và 64-QAM, đồng thời đánh giá hiệu năng thông qua các chỉ tiêu như BER, EVM và OSNR. Mô hình phản ánh đúng cấu trúc thực tế, cho phép phân tích toàn diện ảnh hưởng của kênh truyền quang đến tín hiệu vô tuyến.

3.2.2. Cấu hình thông số mô phỏng

Các tham số mô phỏng được lựa chọn theo giá trị tiêu chuẩn nhằm đảm bảo tính nhất quán và khả năng so sánh giữa các kỹ thuật điều chế DP-QPSK, 16-QAM và 64-QAM trong hệ thống RoF.

Hệ thống sử dụng kỹ thuật OFDM với FFT 128 điểm, 80 sóng mang, tiền tố tuần hoàn 1/8 và số pilot 6–10. Nguồn quang là laser DFB bước sóng 1550 nm, công suất phát 0–10 dBm, kết hợp bộ điều chế IQ/MZM.

Kênh truyền sử dụng sợi quang SMF với suy hao 0,2 dB/km, tán sắc 16 ps/nm/km, có xét phi tuyến Kerr và sử dụng EDFA (gain 10 dB, NF 4 dB) để bù suy hao. Ở phía thu, sử dụng thu coherent kết hợp xử lý DSP (FFT, cân bằng kênh, bù pha) để khôi phục tín hiệu.

Mô hình cho phép thay đổi các tham số như chiều dài sợi, công suất phát và OSNR, đảm bảo đánh giá linh hoạt hiệu năng hệ thống. Việc sử dụng cùng cấu hình nền giúp so sánh khách quan giữa các kỹ thuật điều chế.

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

Mục này xây dựng ba kịch bản mô phỏng cho các kỹ thuật điều chế DP-QPSK, 16-QAM và 64-QAM kết hợp OFDM nhằm đánh giá hiệu năng hệ thống RoF. Mỗi kỹ thuật đại diện cho một mức độ đánh đổi giữa hiệu suất phổ và khả năng chống nhiễu.

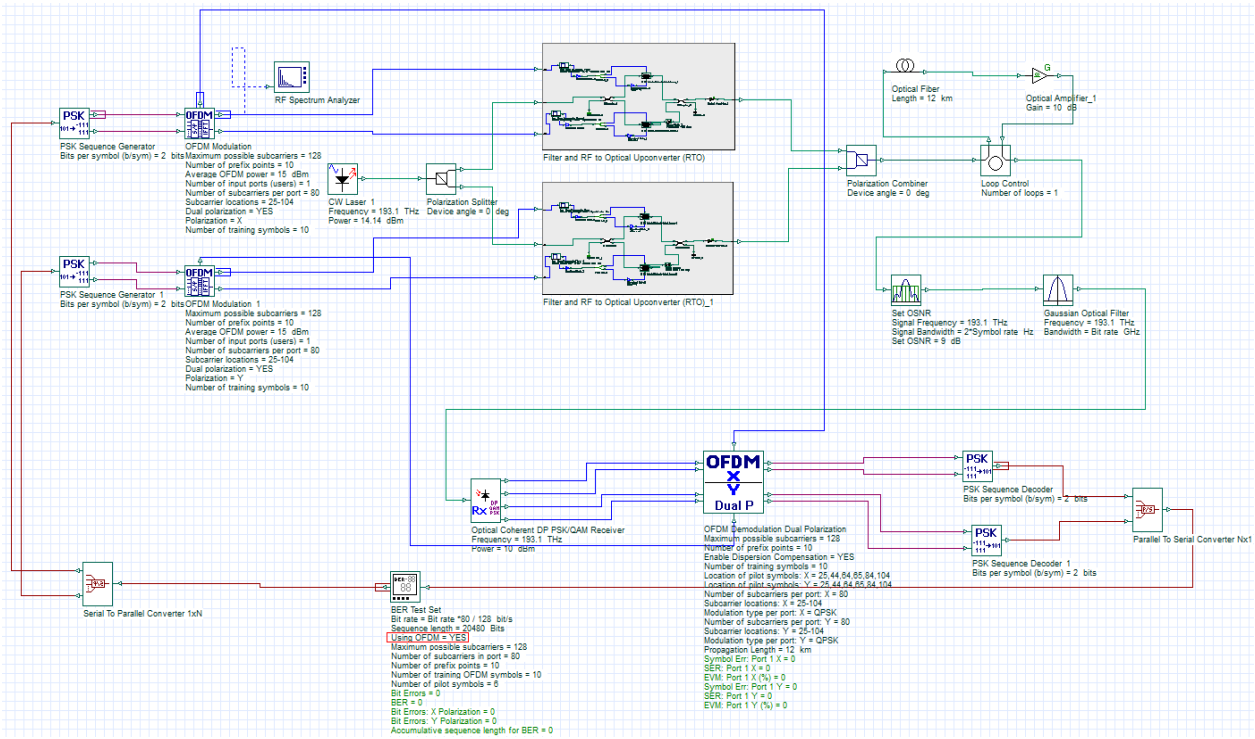
Tất cả các kịch bản sử dụng chung cấu hình hệ thống, chỉ thay đổi mô-đun điều chế và tham số liên quan để phản ánh đặc tính riêng. Các mô hình được thiết lập nhằm phục vụ so sánh hiệu năng và đánh giá ảnh hưởng của từng kỹ thuật điều chế trong hệ thống RoF.

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

Trong kịch bản này, chuỗi bit kiểm tra được tạo từ khối BER Test Set và chia thành hai luồng song song tương ứng với hai phân cực X và Y. Mỗi luồng được điều chế QPSK riêng biệt, sau đó thực hiện điều chế OFDM nhằm tăng hiệu quả phổ và khả năng chống nhiễu.

Tín hiệu sau điều chế được lọc, chuyển đổi điện–quang và truyền qua sợi quang, trong đó OSNR được điều chỉnh để mô phỏng các điều kiện kênh khác nhau. Ở phía thu, tín hiệu được thu coherent, tách phân cực, giải điều chế OFDM và giải mã QPSK để khôi phục dữ liệu.

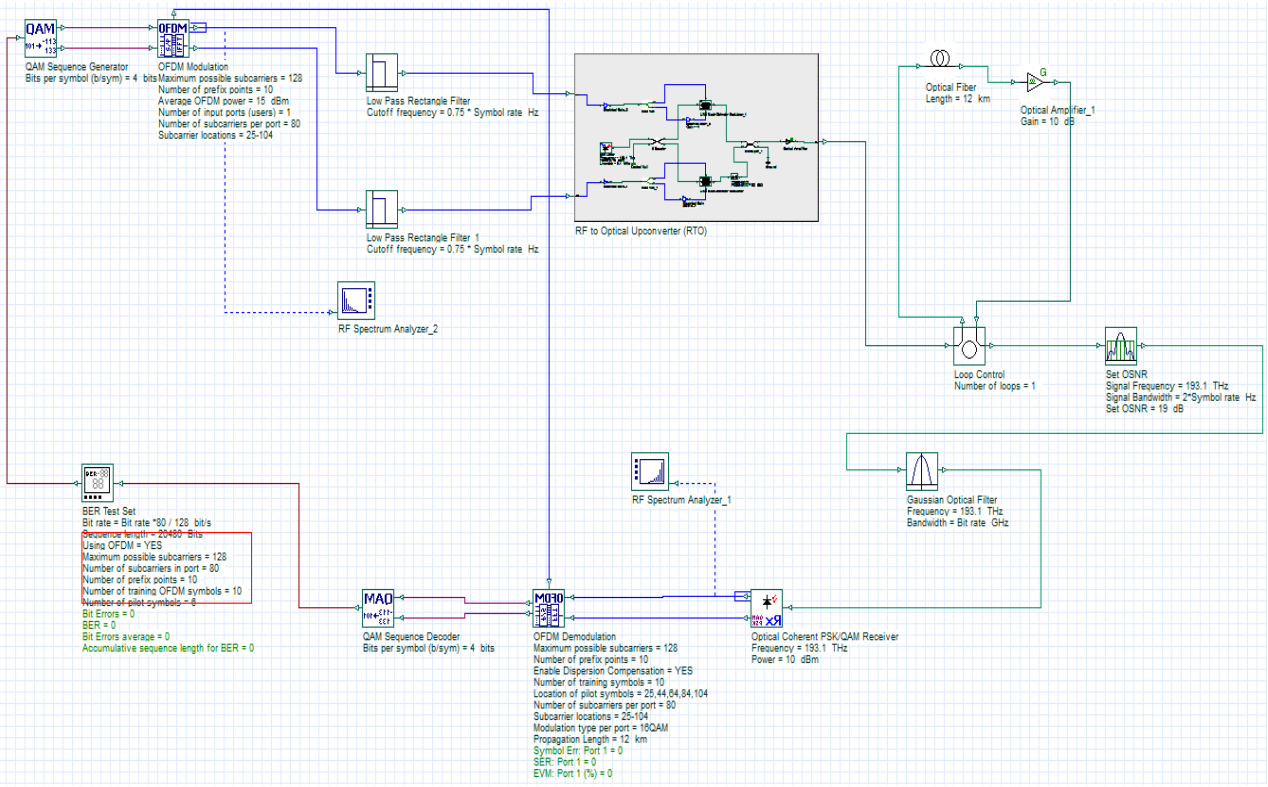
Cuối cùng, tín hiệu thu được so sánh với tín hiệu phát để đánh giá hiệu năng hệ thống thông qua các chỉ tiêu như BER và EVM.



Hình 0.2: 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 này, chuỗi bit kiểm tra được tạo từ khối BER Test Set và ánh xạ thành các ký hiệu 16-QAM (4 bit/ký hiệu). Tín hiệu sau đó được điều chế OFDM nhằm nâng cao hiệu quả sử dụng phổ và khả năng chống nhiễu.



Hình 0.3: Cấu hình mô phỏng hệ thống 16-QAM OFDM

Sau khi lọc và chuyển đổi điện–quang, tín hiệu được truyền qua sợi quang với OSNR được điều chỉnh để mô phỏng các điều kiện kênh khác nhau. Ở phía thu, tín hiệu được thu coherent, giải điều chế OFDM và giải mã 16-QAM để khôi phục dữ liệu ban đầu.

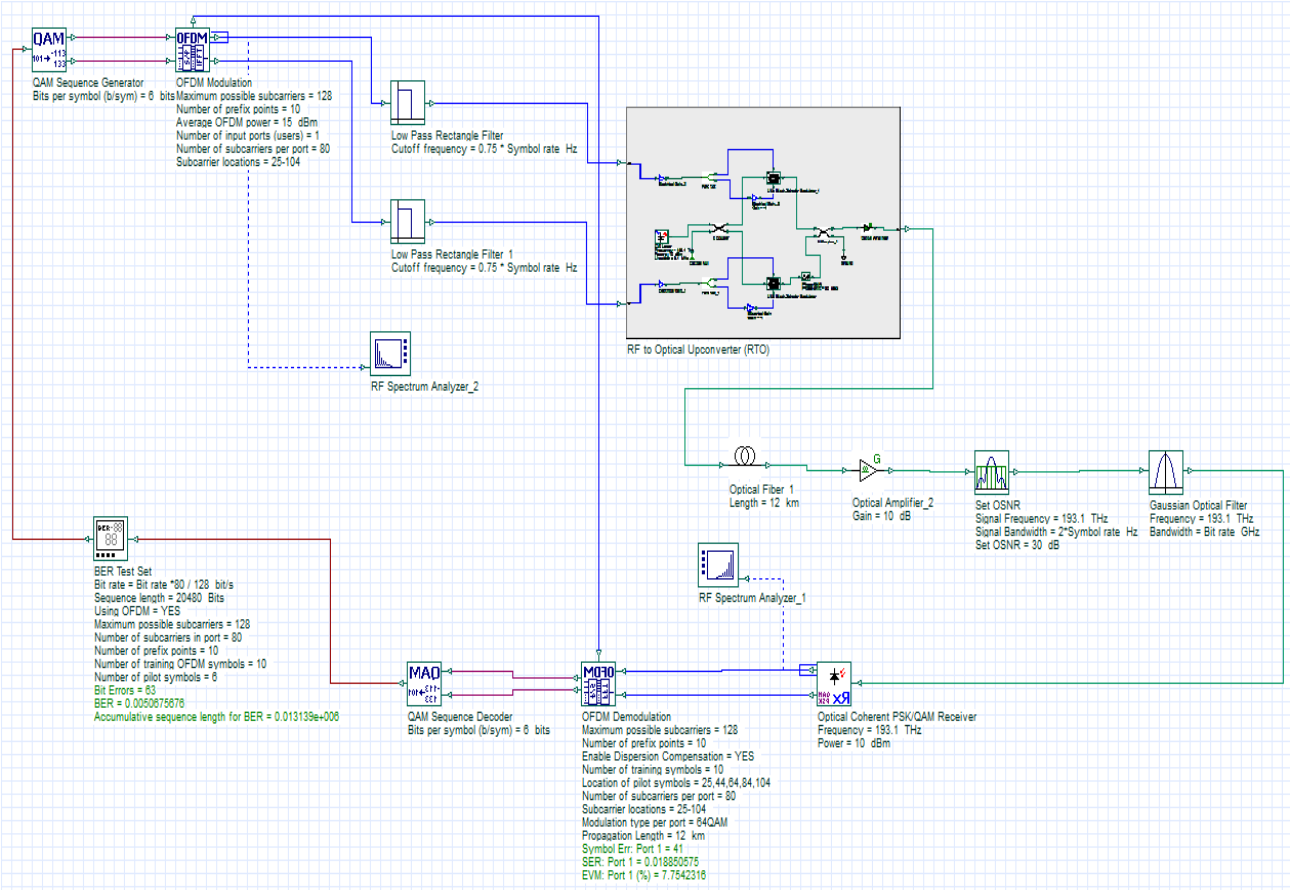
Cuối cùng, hệ thống đánh giá hiệu năng thông qua các chỉ tiêu như BER, EVM và chòm sao tín hiệu.

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

Trong kịch bản này, chuỗi bit kiểm tra được tạo từ khối BER Test Set và ánh xạ thành các ký hiệu 64-QAM (6 bit/ký hiệu). Tín hiệu sau đó được điều chế OFDM nhằm tối đa hóa hiệu suất phổ.

Sau khi lọc và chuyển đổi điện–quang, tín hiệu được truyền qua sợi quang với OSNR được điều chỉnh để mô phỏng các điều kiện kênh khác nhau. Ở phía thu, tín hiệu được thu coherent, giải điều chế OFDM và giải mã 64-QAM để khôi phục dữ liệu.

Cuối cùng, hiệu năng hệ thống được đánh giá thông qua các chỉ tiêu như BER, EVM và chòm sao tín hiệu.

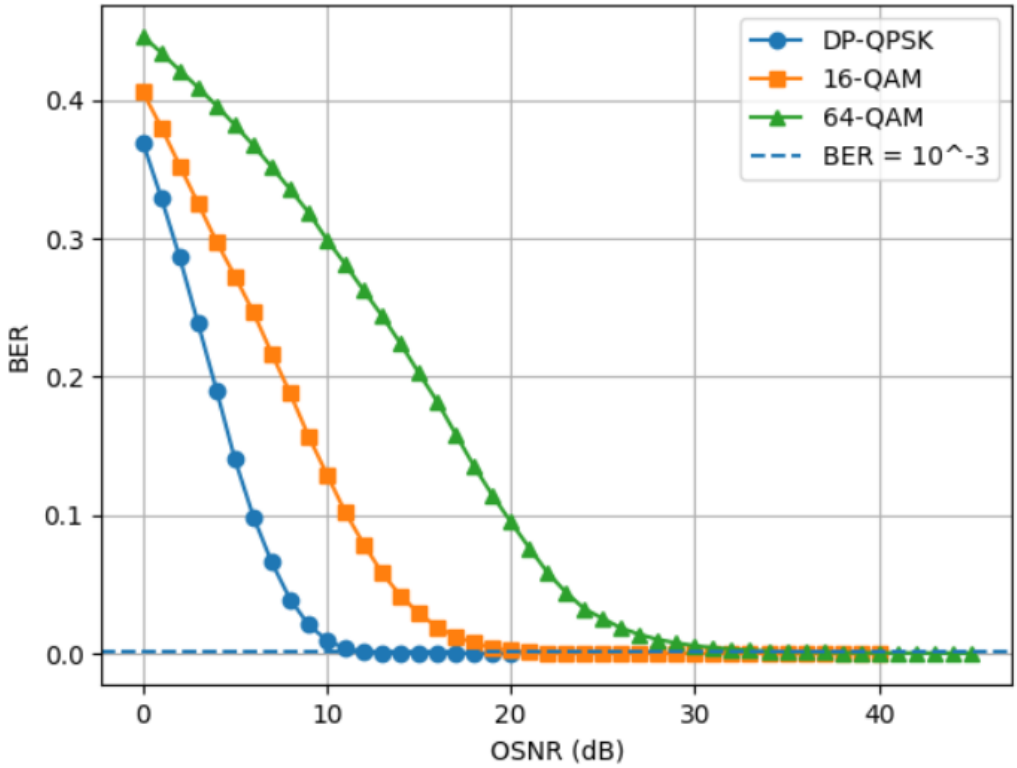


Hình 0.4: Cấu hình mô phỏng hệ thống 64-QAM OFDM

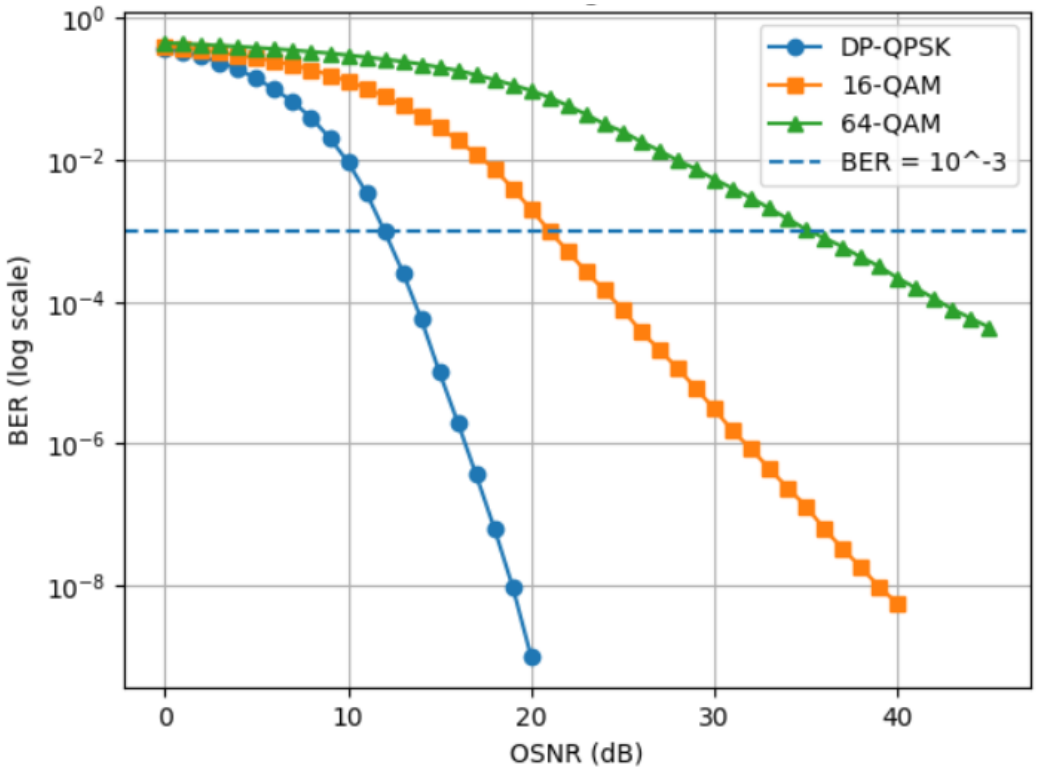
1.9. Phân tích kết quả mô phỏng

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 0.5: 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 0.6: 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})

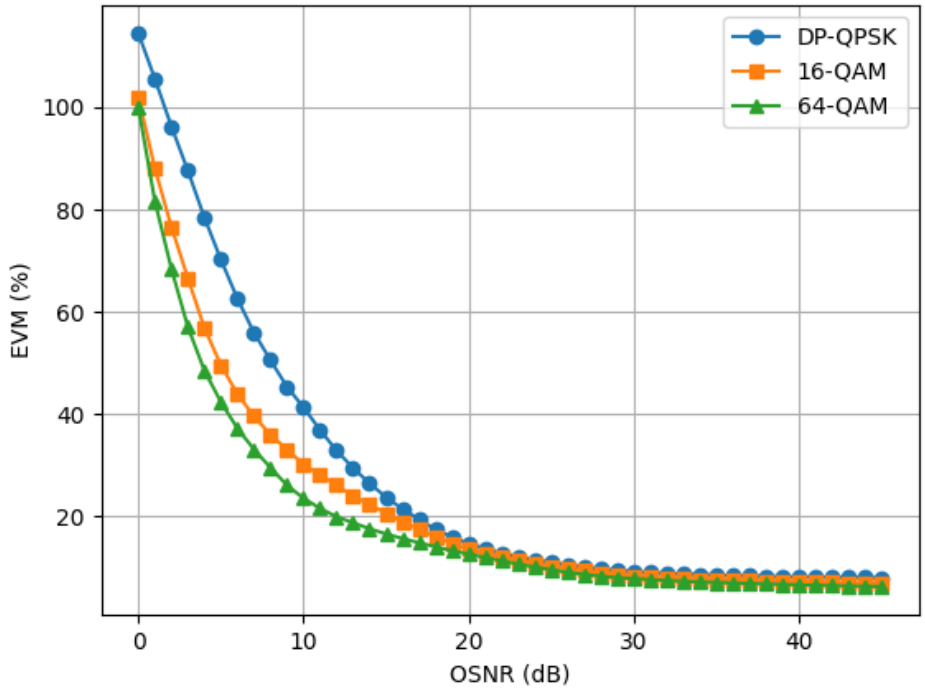
Kết quả mô phỏng cho thấy khi OSNR tăng, BER của các kỹ thuật điều chế đều giảm rõ rệt, phản ánh mối quan hệ nghịch giữa chất lượng kênh và xác suất lỗi.

DP-QPSK đạt BER = 10^{-3} ở mức OSNR thấp nhất (khoảng 12 dB), cho thấy khả năng chống nhiễu tốt và phù hợp cho truyền dẫn xa. 16-QAM yêu cầu OSNR trung bình (khoảng 21 dB), thể hiện sự cân bằng giữa tốc độ và độ tin cậy. Trong khi đó, 64-QAM cần OSNR rất cao (khoảng 34–35 dB), cho thấy độ nhạy nhiễu lớn và chỉ phù hợp cho khoảng cách ngắn.

Kết quả trên khẳng định DP-QPSK có độ ổn định cao nhất, còn 64-QAM đạt hiệu suất phổ cao nhưng yêu cầu điều kiện kênh tốt. Điều này phù hợp với lý thuyết và định hướng lựa chọn điều chế trong hệ thống RoF.

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.



Hình 0.7: Quan hệ EVM–OSNR của các kỹ thuật điều chế DP-QPSK, 16-QAM và 64-QAM trong hệ thống RoF

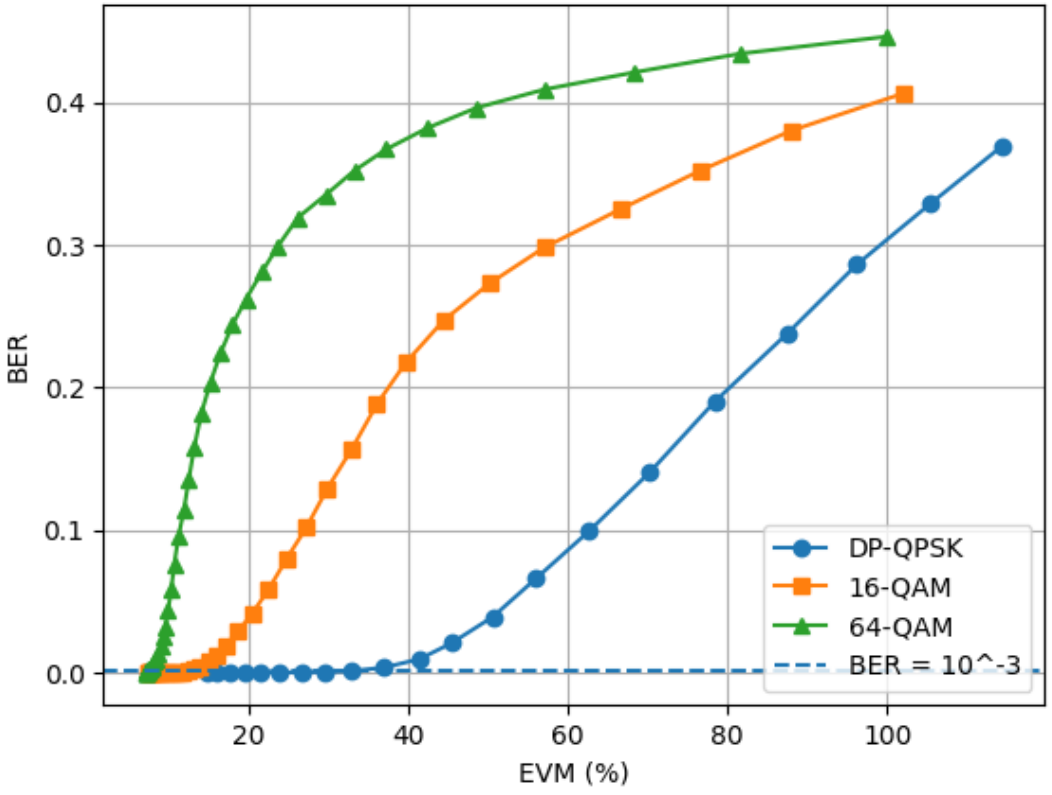
Kết quả cho thấy khi OSNR tăng, EVM của các kỹ thuật điều chế đều giảm và dần ổn định. Ở vùng OSNR thấp (0–10 dB), EVM lớn do nhiễu và suy hao mạnh; trong đó DP-QPSK có EVM cao nhất, tiếp đến là 16-QAM và thấp nhất là 64-QAM.

Trong khoảng OSNR trung bình (10–25 dB), EVM giảm nhanh, thể hiện vùng làm việc hiệu quả của hệ thống. Khi OSNR lớn (>30 dB), EVM của các kỹ thuật tiệm cận và ổn định ở mức thấp (khoảng 7–9%), khi nhiễu không còn là yếu tố chi phối chính.

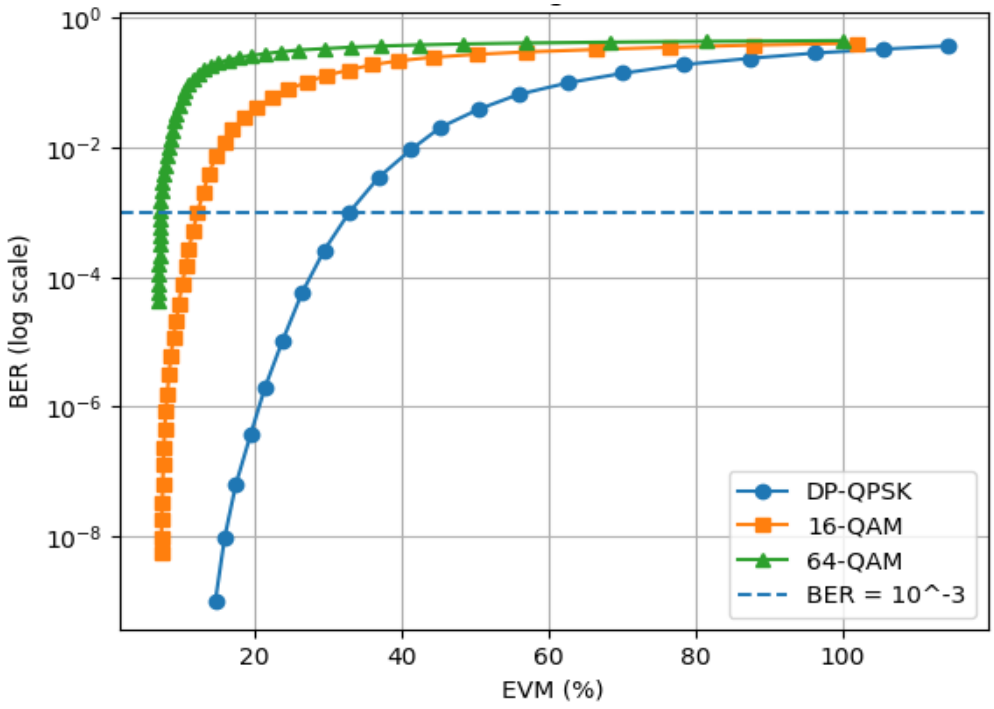
So sánh cho thấy DP-QPSK có độ bền nhiễu tốt, phù hợp truyền xa; 16-QAM cân bằng giữa hiệu suất và độ ổn định; còn 64-QAM đạt EVM thấp nhưng yêu cầu OSNR cao. Kết quả này phù hợp với phân tích BER và khẳng định EVM là tham số quan trọng đánh giá chất lượng hệ thống RoF.

3.4.3. Phân tích quan hệ BER – EVM

Kết quả mô phỏng cho thấy BER tăng khi EVM tăng đối với tất cả các kỹ thuật điều chế, phản ánh mối liên hệ trực tiếp giữa méo tín hiệu và lỗi bit.



Hình 0.8: 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 0.9: 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})

DP-QPSK có độ bền tốt nhất, đạt BER = 10^{-3} tại EVM lớn (khoảng 30–35%), phù hợp cho môi trường nhiễu mạnh và truyền xa. 16-QAM yêu cầu EVM thấp hơn (khoảng 18–20%), thể hiện sự cân bằng giữa hiệu suất và độ tin cậy. Trong khi đó, 64-QAM rất nhạy với méo, chỉ đạt BER = 10^{-3} khi EVM nhỏ (khoảng 7–8%), do mật độ chòm sao cao.

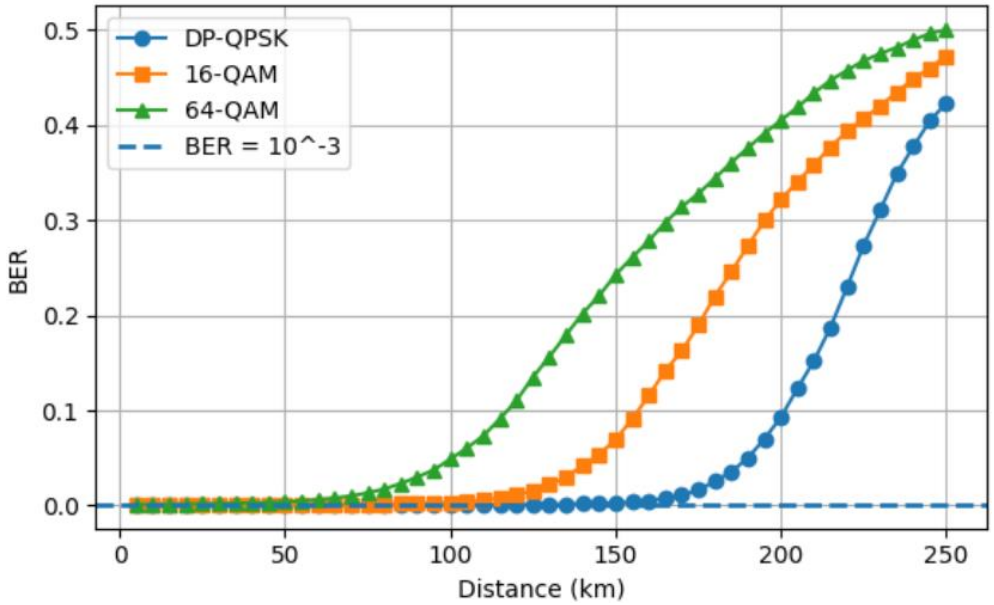
Kết quả cho thấy DP-QPSK ổn định nhất, còn 64-QAM yêu cầu điều kiện kênh tốt. EVM là tham số quan trọng phản ánh trực tiếp chất lượng điều chế và phù hợp với các kết quả BER–OSNR đã phân tích.

3.4.4. Phân tích quan hệ BER – DISTANCE

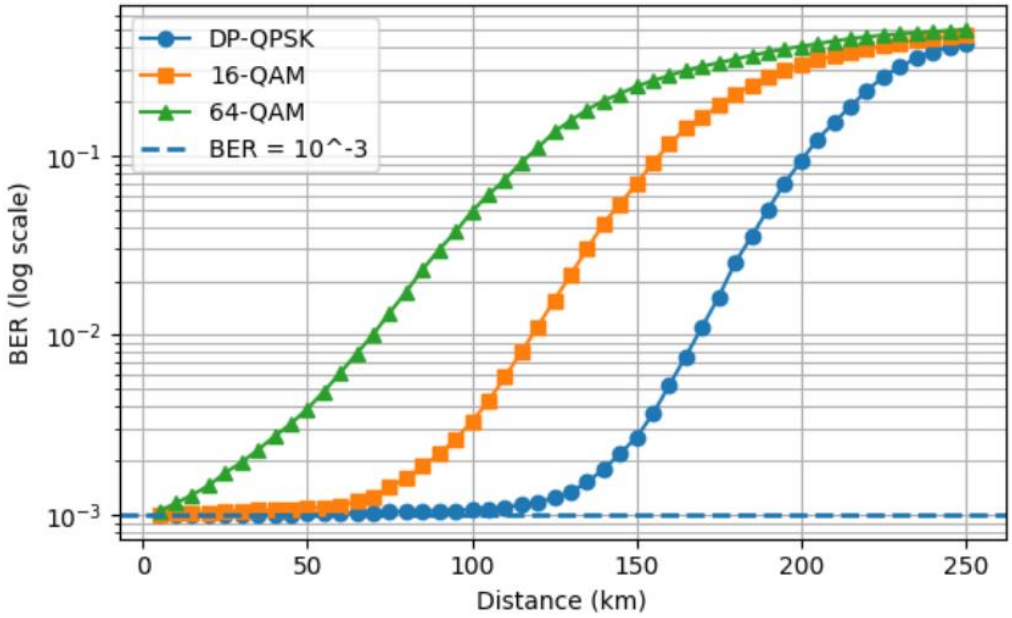
Kết quả mô phỏng cho thấy BER tăng theo khoảng cách truyền do suy hao, nhiễu và phi tuyến tích lũy trong sợi quang.

DP-QPSK có độ bền tốt nhất, duy trì BER thấp và chỉ vượt ngưỡng 10^{-3} ở khoảng cách lớn (khoảng 130–140 km), phù hợp cho truyền xa. 16-QAM đạt ngưỡng này ở khoảng 90–100 km, thể hiện sự cân bằng giữa hiệu suất và độ tin cậy. Trong khi đó, 64-QAM suy giảm nhanh nhất, chỉ phù hợp cho khoảng cách ngắn (khoảng 30–40 km).

Kết quả khẳng định DP-QPSK tối ưu cho tuyến dài, 16-QAM cho tuyến trung bình, còn 64-QAM chỉ phù hợp khi kênh truyền tốt và khoảng cách ngắn.



Hình 0.10: 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 0.11: 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})

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

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.

3.6. Kết luận Chương 3

Chương 3 đã xây dựng mô hình và mô phỏng hệ thống RoF nhằm đánh giá ảnh hưởng của các tham số OSNR, SNR, EVM và khoảng cách đến BER đối với các kỹ thuật điều chế DP-QPSK, 16-QAM và 64-QAM. Kết quả phù hợp với lý thuyết và cho thấy rõ mối quan hệ đánh đổi giữa hiệu suất phổ và độ bền nhiễu.

Cụ thể, BER giảm khi OSNR và SNR tăng, nhưng tăng theo EVM và khoảng cách truyền. DP-QPSK cho hiệu năng tốt nhất trong điều kiện kênh kém và truyền xa; 16-QAM đạt sự cân bằng giữa dung lượng và độ tin cậy; trong khi 64-QAM có hiệu suất cao nhưng chỉ phù hợp cho khoảng cách ngắn và kênh tốt.

Trên cơ sở đó, luận văn đề xuất lựa chọn điều chế linh hoạt theo từng kịch bản và áp dụng kiến trúc RoF tập trung (C-RAN) để nâng cao hiệu quả và bảo mật. Mặc dù còn thách thức về chi phí và hạ tầng, RoF có tiềm năng lớn trong bối cảnh phát triển 5G/6G tại Việt Nam.

Kết quả nghiên cứu là cơ sở quan trọng cho việc thiết kế và ứng dụng hệ thống RoF trong thực tế, đặc biệt trong các hệ thống thông tin quân sự.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN 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.