

**BỘ THÔNG TIN VÀ TRUYỀN THÔNG
HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG**



PHẠM VŨ MINH TÚ

**NGHIÊN CỨU CÔNG NGHỆ TRUYỀN DẪN LAI GHÉP FSO,
MMW VÀ SỢI QUANG CHO MẠNG BACKHAUL DI ĐỘNG**

Chuyên ngành: Kỹ thuật Viễn Thông

Mã số: 9.52.02.08

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

Hà Nội – 2023

Công trình được hoàn thành tại:

HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG

Người hướng dẫn khoa học:

- 1. PGS.TS. Đặng Thế Ngọc**
- 2. PGS.TS. Vũ Văn Sơn**

Phản biện 1:

Phản biện 2:

Phản biện 3:

Luận án được bảo vệ trước hội đồng chấm luận án cấp Học viện họp tại:

HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG

vào hồi:

Có thể tìm hiểu luận án tại:

- 1. Thư viện Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông**

MỞ ĐẦU

Trong những năm gần đây, nhu cầu sử dụng trong lĩnh vực công nghệ thông tin và truyền thông (ICT) trên toàn cầu đang tăng lên một cách nhanh chóng. Trong đó, truyền thông không dây là một trong những lĩnh vực phát triển nhanh nhất, quan trọng nhất trong chiến lược ICT hóa toàn cầu, làm nền tảng cho nhiều ngành công nghiệp khác. Sự thành công của truyền thông di động không dây được phản ánh bởi tốc độ đổi mới công nghệ nhanh chóng thông qua sự ra đời của các mạng 2G, 3G, 4G và 5G. Trong đó, mạng 5G là thế hệ tiếp theo của mạng truyền thông di động 4G, sử dụng các công nghệ mạng tiên tiến để cung cấp kết nối di động nâng cao. Trong thông tin di động, mạng backhaul đóng vai trò cung cấp kết nối giữa các trạm thu phát gốc và mạng lõi. Thực tế tại Việt Nam, số lượng các kết quả nghiên cứu về các vấn đề liên quan đến mạng và các công nghệ truyền tải backhaul còn hạn chế, tập trung chủ yếu về phân tích hiệu năng của hệ thống truyền sóng vô tuyến. So với các nghiên cứu về mạng backhaul mà các nhà khoa học của các nước tiên tiến đang thực hiện thì mức độ cập nhật của các nghiên cứu trong nước chưa cao, đặc biệt là nghiên cứu các công nghệ cho mạng backhaul di động thế hệ tiếp theo.

Một trong các yêu cầu quan trọng với mạng backhaul di động thế hệ tiếp theo là truyền tải một khối lượng khổng lồ lưu lượng dữ liệu từ các thiết bị di động tới mạng lõi và ngược lại. Chính vì thế, để mạng backhaul có khả năng mở rộng, đảm bảo dung lượng và chất lượng và chi phí, đồng thời có khả năng hồi phục và đảm bảo hiệu quả sử dụng năng lượng thì mạng backhaul lai ghép sử dụng cả kết nối sợi quang, kết nối không dây là một giải pháp hứa hẹn. Để đánh giá tính khả thi của giải pháp này đòi hỏi cần có một mô hình đánh giá một cách toàn diện ảnh hưởng của các công nghệ truyền dẫn, lai ghép cho mạng

backhaul di động. Bên cạnh đó, việc đề xuất các phương thức truyền dẫn quang và phương thức truyền dẫn trong mạng backhaul rất cần thiết. Xuất phát từ những phân tích trên, nghiên cứu sinh đã quyết định chọn đề tài: “Nghiên cứu công nghệ truyền dẫn lai ghép FSO, MMW và sợi quang cho mạng backhaul di động” cho luận án nghiên cứu của mình.

Mục tiêu nghiên cứu của luận án là đề xuất mô hình kiến trúc mạng backhaul di động thế hệ tiếp theo dựa trên mô hình lai ghép với khả năng truyền tải dung lượng cao; khả năng mở rộng; chi phí hiệu quả; cũng như khả năng triển khai và hoạt động trong nhiều điều kiện khác nhau. Nghiên cứu cũng hướng đến việc chứng minh khả năng triển khai của mô hình mạng backhaul đã được đề xuất thông qua việc phân tích hiệu năng và đề xuất các giải pháp cải thiện hiệu năng mạng backhaul.

Để đạt được các mục tiêu nêu trên, các nhiệm vụ cụ thể cần phải giải quyết bao gồm: (1) mạng backhaul di động, các đặc điểm, các công nghệ backhaul cũng như một số giải pháp trong việc phát triển mạng backhaul di động, (2) nghiên cứu về hệ thống truyền thông quang trong không gian tự do FSO và hệ thống truyền sóng milimet MMW trong việc cải thiện thông lượng mạng backhaul di động, (3) đề xuất giải pháp truyền dẫn backhaul di động dung lượng cao dựa trên mạng quang thụ động ghép kênh phân chia theo bước sóng với 3 kịch bản triển khai gồm thuần WDM-PON, lai ghép WDM-PON/FSO và lai ghép WDM-PON/MMW và (4) đề xuất giải pháp cải thiện hiệu năng mạng backhaul di động lai ghép WDM-PON/FSO dưới ảnh hưởng của hiệu ứng phi tuyến trộn bốn sóng.

Từ các nhiệm vụ nghiên cứu trên, phương pháp nghiên cứu của luận án là nghiên cứu lý thuyết kết hợp với mô phỏng kiểm chứng. Cụ

thể là, dựa trên nghiên cứu lý thuyết đề đề xuất mô hình kiến trúc và các công nghệ chủ chốt cho mạng backhaul trong thông tin di động 5G. Sử dụng lý thuyết thông tin, lý thuyết xác suất và các công cụ toán học để xây dựng mô hình giải tích phục vụ cho việc tính toán và phân tích hiệu năng của mạng backhaul đề xuất trong đề tài này. Từ đó, xây dựng mô hình mô phỏng và các chương trình mô phỏng nhằm kiểm chứng các kết quả nghiên cứu lý thuyết. Cuối cùng là đưa ra các khuyến nghị, nhận xét, đánh giá dựa trên các kết quả nghiên cứu lý thuyết và mô phỏng.

Luận án được bố cục thành bốn chương nội dung như sau:

Chương 1: Tổng quan về mạng backhaul di động

Chương 2: Công nghệ truyền dẫn backhaul lai ghép MMW/FSO

Chương 3: Các giải pháp truyền dẫn backhaul lai ghép dựa trên mạng quang thụ động

Chương 4: Giải pháp truyền dẫn backhaul lai ghép WDM-PON/FSO

CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN VỀ MẠNG BACKHAUL DI ĐỘNG

1.1. Tổng quan về mạng backhaul di động

Mạng backhaul di động đóng vai trò quan trọng trong việc cung cấp kết nối giữa các phần tử mạng di động trong hệ thống. Hiện nay, có nhiều giải pháp và công nghệ được sử dụng trong mạng backhaul di động. Các công nghệ không dây bao gồm kết nối điểm-điểm và điểm-đa điểm tại các dải tần số khác nhau, vệ tinh, TVWS (truy cập trắng không dây trên truyền hình), mmWave (dải tần số mm), và FSO (truyền thông quang không dây). Các công nghệ có dây bao gồm sợi quang và các phiên bản PON (Passive Optical Network) như GPON, NGPON, EPON, 10G-EPON, cũng như VDSL2, G.FAST và

DOCSIS. Các công nghệ này được sử dụng để đáp ứng yêu cầu truyền tải băng thông cao, nhiều mạng tế bào và giảm chi phí vận hành trong mạng backhaul di động.

1.2. Các yêu cầu, thách thức của mạng backhaul thế hệ tiếp theo (5G)

Yêu cầu của mạng backhaul thế hệ tiếp theo được kỳ vọng sẽ đáp ứng nhu cầu ngày càng tăng về kết nối di động nâng cao, mở ra toàn cảnh hoàn toàn mới về các dịch vụ di động. Theo thông số kỹ thuật, mạng 5G có thể hỗ trợ truyền dữ liệu ở tốc độ tải xuống cao nhất là 20 Gbps với độ trễ dưới 1ms. Thách thức mạng backhaul thế hệ tiếp theo chủ yếu là việc tăng tốc độ dữ liệu và mở rộng dung lượng mạng bằng cách tối ưu hóa năng lượng; khả năng mở rộng và tính linh hoạt; kênh đơn cho cả đường lên và đường xuống; xử lý nhiễu; thân thiện với môi trường; độ trễ thấp và độ tin cậy cao; truy cập hiệu năng mạng; sự di động và chuyển giao; và cuối cùng là bảo mật và quyền riêng tư của mạng và UE.

1.3. Các công trình nghiên cứu liên quan đến luận án

1.3.1 Các công trình nghiên cứu trong nước

Ở Việt Nam, số lượng các kết quả nghiên cứu về các vấn đề liên quan đến mạng và các công nghệ truyền tải backhaul còn hạn chế, điển hình là nghiên cứu về hệ thống truyền sóng vô tuyến qua sợi quang (RoF) hay hiệu năng và ứng dụng của hệ thống FSO nhưng chưa xét đến ứng dụng của công nghệ này trong mạng backhaul cũng như sự kết hợp của công nghệ FSO với các công nghệ truyền dẫn khác.

1.3.2. Các công trình nghiên cứu ngoài nước

- Các nghiên cứu về kiến trúc và công nghệ mạng backhaul lai ghép
- Các nghiên cứu về kiến trúc sử dụng nút chuyển tiếp
- Các nghiên cứu về việc sử dụng các mô hình chuyển đổi kết hợp

- Các nghiên cứu về việc tối ưu hóa các liên kết FSO và MMW

Các nghiên cứu về mạng backhaul lai ghép FSO/MMW đã đề xuất kết hợp truyền thông quang không dây (FSO) và truyền thông RF (RF) tại băng tần milimet (MMW) để khắc phục nhược điểm của cả hai công nghệ. Kết hợp này mang lại kết nối không dây tốc độ cao, linh hoạt và tiết kiệm chi phí. Các phương pháp chuyển đổi kết hợp, tối ưu hóa tài nguyên và sử dụng mô hình chuyển tiếp đã được nghiên cứu để cải thiện hiệu năng và độ tin cậy của hệ thống. Kết quả cho thấy sự kết hợp FSO/MMW tại băng tần MMW là một giải pháp khả thi cho mạng backhaul 5G và mang lại hiệu năng vượt trội.

1.4. Định hướng nghiên cứu

Dựa trên khảo sát và phân tích các nghiên cứu liên quan, nghiên cứu sinh vạch ra các hướng nghiên cứu của luận án là nghiên cứu khảo sát, đánh giá hiệu năng và đề xuất các giải pháp cải thiện hiệu năng cho mạng backhaul lai ghép sử dụng cả kết nối sợi quang, truyền thông quang trong không gian tự do FSO và truyền thông RF tại băng tần milimet MMW. Cụ thể như sau:

- Đề xuất xây dựng mô hình giải tích và mô phỏng khảo sát hiệu năng hệ thống truyền dẫn lai ghép hai chặng hai chiều kết hợp giữa truyền thông quang trong không gian tự do FSO và truyền thông RF sử dụng mã hoá mạng.

- Đề xuất xây dựng mô hình giải tích và mô phỏng khảo sát giải pháp truyền dẫn backhaul di động dung lượng cao dựa trên mạng quang thụ động ghép kênh phân chia theo bước sóng với 3 kịch bản triển khai gồm thuần WDM-PON, lai ghép WDM-PON/FSO và lai ghép WDM-PON/MMW.

- Đề xuất xây dựng mô hình giải tích phục vụ cho việc thiết kế và phân tích hiệu năng mạng backhaul di động lai ghép WDM-PON/FSO dưới ảnh hưởng của hiệu ứng phi tuyến trộn bốn sóng.

1.5. Tổng kết chương 1

Chương 1 của luận án trình bày chi tiết về mạng backhaul di động, công nghệ và giải pháp liên quan. Luận án cũng trình bày về mạng backhaul 5G và các thách thức phát triển. Cuối chương, luận án tóm tắt các công trình nghiên cứu về hệ thống truyền dẫn lai ghép sợi quang, FSO và MMW theo các hướng nghiên cứu khác nhau, bao gồm kiến trúc hệ thống, đánh giá hiệu năng hay hướng nghiên cứu cải thiện hiệu năng. Trên cơ sở khảo sát những nghiên cứu đã công bố từ đó hướng nghiên cứu của luận án được đề xuất.

CHƯƠNG 2: CÔNG NGHỆ TRUYỀN DẪN BACKHAUL LAI GHÉP FSO/MMW

2.1. Tổng quan về hệ thống truyền thông quang không dây FSO

Truyền thông quang không dây ngoài trời hay còn được gọi là Truyền thông quang học trong không gian tự do (FSO) là công nghệ mới với vô số lợi thế. Trong truyền thông quang học qua không gian tự do FSO, máy phát LED hoặc LD ở phía máy phát gửi dữ liệu kỹ thuật số như hình ảnh video, tệp dữ liệu thông qua chùm ánh sáng không định hướng trong không gian tự do thay vì qua sợi quang. Tại đầu tiếp nhận, những chùm ánh sáng được chụp bởi thấu kính nhận được nối với máy thu có độ nhạy cao. Những lợi thế như tốc độ cao của Gbps, băng thông lớn, phổ tần không phải đăng ký và bảo mật cao giúp mở rộng việc sử dụng nó trong các phạm vi lớn. Sóng mang quang hoạt động trong bước sóng IR được sử dụng để thiết lập kết nối giữa liên kết đất liền trong trái đất và giữa các vệ tinh liên kết (các liên

kết quang học trong không gian). Chính vì vậy, truyền thông quang không dây FSO đã thu hút được rất nhiều sự quan tâm nghiên cứu do tốc độ truyền cao thông qua băng thông không bị giới hạn và không cần đăng ký sử dụng. Mô hình kênh FSO bao gồm: Mô hình kênh nhiễu log chuẩn và Mô hình kênh nhiễu loạn Gamma-Gamma

2.2. Tổng quan về hệ thống truyền sóng milimet MMW

Hệ thống truyền sóng milimet được xem như một hệ thống tương đương cáp quang về mặt cung cấp băng thông, song lại không có những hạn chế về vận chuyển và chi phí khi triển khai. Sóng Milimet đại diện cho phổ tín hiệu RF giữa các tần số 20GHz và 300GHz với bước sóng từ 1 - 15mm, nhưng xét về khía cạnh mạng vô tuyến và các thiết bị thông tin, tên gọi truyền sóng Milimet MMW tương ứng với một số dải tần 24GHz, 38GHz, 60GHz và gần đây, các dải tần 70GHz, 80 GHz cũng đã được sử dụng cho mục đích thiết lập mạng và truyền thông vô tuyến. Mô hình kênh MMW bao gồm: Mô hình kênh fading Rayleigh và Mô hình kênh fading Rice

2.3. Giải pháp truyền dẫn lai ghép FSO/MMW

2.3.1. Đặt vấn đề

Đã có nhiều nghiên cứu về hệ thống kết hợp FSO/RF hai chặng. Các nghiên cứu này tập trung vào phân tích hiệu năng và các kỹ thuật khuếch đại và khuếch đại chuyển tiếp cố định. Tuy nhiên, hầu hết các nghiên cứu liên quan đến hệ thống kết hợp FSO/RF chỉ xem xét việc sử dụng chuyển tiếp một chiều.

Vì vậy, trong phần này luận án đề xuất áp dụng chuyển tiếp hai chiều (hoặc song hướng) cho các hệ thống kết hợp FSO / RF hai chặng. Đồng thời nghiên cứu hiệu năng của hệ thống truyền dẫn hai chặng hai chiều kết hợp FSO/RF sử dụng mã hoá mạng được đề xuất trên các kênh đối xứng, được mô hình hóa bởi các kênh fading Gamma-

Gamma/Rice và Gamma-Gamma/Rayleigh và ảnh hưởng của sai số định hướng đến liên kết FSO; Hiệu năng của hệ thống với tỷ lệ lỗi bit (BER) và xác suất dừng so với các tham số hệ thống. Luận án cũng trình bày về mô hình hệ thống truyền dẫn hai chặng hai chiều kết hợp FSO/RF sử dụng mã hoá mạng, giới thiệu các mô hình toán học của kênh FSO và RF từ đó rút ra biểu thức cho xác suất dừng, BER của hệ thống đề xuất và các kết quả phân tích hiệu năng.

2.3.2. Hệ thống truyền dẫn hai chặng hai chiều kết hợp FSO/RF sử dụng mã hoá mạng

Một hệ thống truyền dẫn hai chặng hai chiều kết hợp FSO/RF sử dụng mã hoá mạng bao gồm hai nút (Nút **A** và Nút **B**) và nút chuyển tiếp (Nút **R**). Trong hệ thống kết hợp này, các liên kết **A-R** và **R-B** được coi là các liên kết FSO và RF tương ứng, với liên kết FSO được mô hình hoá bằng phân phối Gamma-Gamma và liên kết RF được mô hình hoá bằng phân phối Rayleigh/Rice. Nút **R** ở đây được xây dựng với mô hình mã hoá mạng NC và có khả năng lai ghép quang cùng RF bao gồm nguồn quang, bộ tách sóng quang và máy thu phát RF.

2.3.3. Mô hình kênh của hệ thống

- Mô hình kênh FSO: Mô hình toán học của hệ số kênh được biểu thị như sau:

$$h = h_l h_a h_p, \quad (2.3)$$

trong đó h_l và h_a lần lượt là hệ số tổn thất kênh và dao động cường độ do nhiễu động khí quyển. h_p là phần năng lượng được thu thập bởi một bộ cảm biến quang (PD). Tham số này phụ thuộc vào khoảng cách tương đối giữa vị trí của PD và trung tâm của chùm tia quang nhận được, do đó nó đại diện cho ảnh hưởng của sai số định hướng.

- Mô hình kênh RF: Kênh RF có thể được mô hình hoá bằng phân phối Rice hoặc phân phối Rayleigh. Mô hình kênh Rice được sử dụng

để mô tả hiện tượng fading trong môi trường lan truyền RF mà có một đường truyền thẳng (LOS) trực tiếp mạnh mẽ giữa máy phát và máy thu. Hệ số khuếch đại công suất trung bình của liên kết RF được mô tả chi tiết như sau:

$$g_B [dB] = G_T + G_R - 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi L}{\lambda_B} \right) - \alpha_{oxy} L_{RF} - \alpha_{rain} L_{RF}, \quad (2.14)$$

2.3.4. Phân tích hiệu năng của hệ thống

- Xác suất dừng:

$$P_{out} = F_{\gamma_A}(\gamma_{th}) + F_{\gamma_B}(\gamma_{th}) - F_{\gamma_A}(\gamma_{th})F_{\gamma_B}(\gamma_{th}), \quad (2.20)$$

- Tỷ lệ lỗi bit:

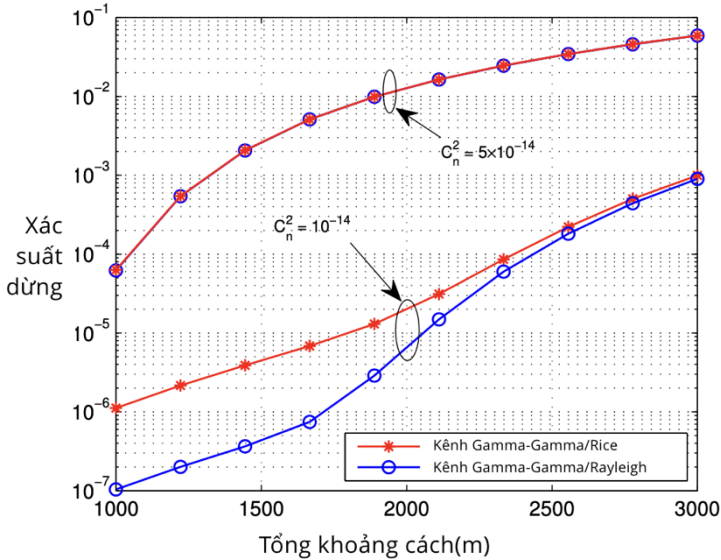
$$P_e = P_{FSO}(e)[1 - P_{RF}(e)] + P_{RF}(e)[1 - P_{FSO}(e)], \quad (2.23)$$

Với PRF được tính theo công thức:

$$P_{RF}(e) = \int_0^{\infty} Q(\sqrt{2\gamma_B}) f_{\gamma_B}(\gamma_B) d\gamma_B, \quad (2.28)$$

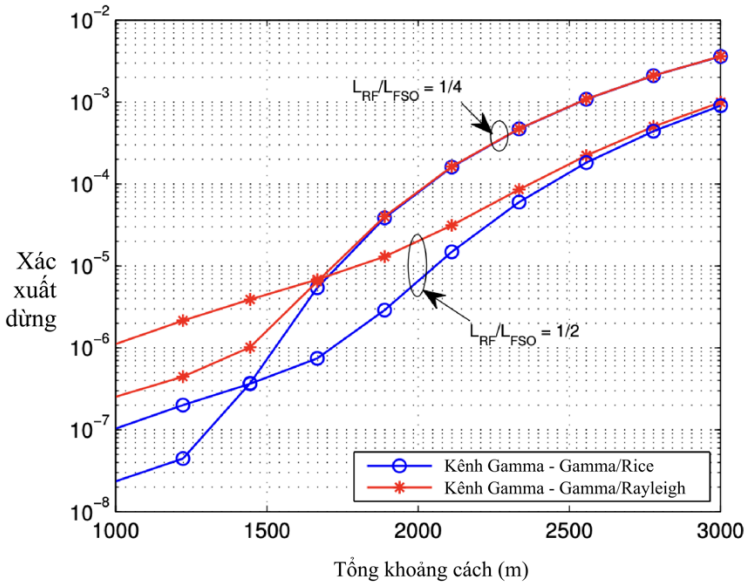
2.3.5. Kết quả phân tích hiệu năng của hệ thống

Xác suất dừng của hệ thống kết hợp FSO/RF hai chặng so với tổng khoảng cách giữa các Nút A và Nút B (thể hiện trong hình 2.5). Kết quả phân tích hiệu năng cho thấy rằng kênh fading Rice có hiệu năng cao hơn kênh fading Rayleigh do hiện tượng lan truyền sóng đa đường ảnh hưởng đến kênh Rayleigh nhiều hơn. Ngoài ra, khi khoảng cách của liên kết FSO đủ lớn, tác động của nhiễu loạn khí quyển đến liên kết FSO sẽ lớn hơn so với tác động của fading RF gây ra bởi liên kết RF. Kết quả là, không có sự khác biệt về hiệu năng giữa kênh fading Rice và kênh fading Rayleigh. Hiện tượng tương tự cũng xảy ra đối với trường hợp nhiễu loạn mạnh, khi $C_n^2 = 5 \times 10^{-14}$.



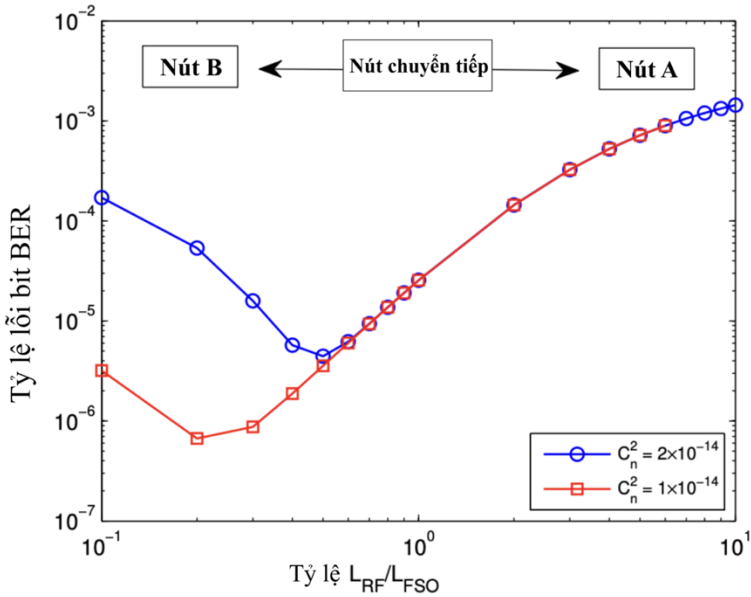
Hình 2. 1. Tương quan giữa xác suất dừng với tổng khoảng cách trong trường hợp $P_A = P_B = 10 \text{ dBm}$, $L_{RF}/L_{FSO} = 1/2$, $\gamma_{th} = 0 \text{ dB}$

Vị trí của nút chuyển tiếp được biểu thị bằng tỷ lệ giữa L_{RF}/L_{FSO} cũng ảnh hưởng đến hiệu năng của hệ thống kết hợp FSO/RF hai chặng (thể hiện trong hình 2.6). Khi tổng khoảng cách ngắn hơn một giá trị cụ thể, suy hao bị gây ra bởi hiện tượng fading và suy hao RF, do đó nên chọn tỷ lệ L_{RF}/L_{FSO} có giá trị nhỏ. Ngược lại, cần chọn tỷ lệ L_{RF}/L_{FSO} có giá trị lớn khi nó giúp rút ngắn liên kết FSO, từ đó làm giảm tác động của nhiễu loạn khí quyển.



Hình 2. 2. Tương quan giữa xác suất dừng với tổng khoảng cách trong trường hợp $P_A = P_B = 10 \text{ dBm}$, $C_n^2 = 10^{-14}$, và $\gamma_{th} = 0 \text{ dB}$

Trong hình 2.7, $L_{RF}/L_{FSO} = 1$ nghĩa là nút chuyển tiếp được đặt ở điểm giữa của liên kết **A - B**. Khi cường độ nhiễu loạn tăng, ví dụ C_n^2 tăng từ 10^{-14} đến 2×10^{-14} chúng ta nên rút ngắn khoảng cách của liên kết FSO, do đó vị trí tốt nhất của nút chuyển tiếp nên được chuyển dần sang nút A.



Hình 2. 3. BER so với tỷ lệ L_{RF}/L_{FSO} trong trường hợp fading Gamma-Gamma / Rayleigh với $P_A = P_B = 10$ dBm và $L = 2000m$

2.4. Tổng kết chương 2

Trong chương này, luận án đã nghiên cứu về hệ thống truyền thông quang trong không gian tự do FSO và hệ thống truyền thông sóng milimet MMW từ đó đưa ra giải pháp về công nghệ truyền dẫn lai ghép FSO/MMW ứng dụng cho mạng backhaul di động thế hệ sau. Trong phần này, luận án đã đề xuất một hệ thống kết hợp FSO/RF (MMW) hai chặng hai chiều sử dụng kỹ thuật chuyển tiếp mã hóa hai chặng và phân tích hiệu năng của các hệ thống được đề xuất. Kênh kết hợp hai chặng được mô hình hóa bằng fading Gamma-Gamma/Rice và

Gamma-Gamma/Rayleigh và đưa ra kết quả phân tích hiệu năng của hệ thống.

CHƯƠNG 3: CÁC GIẢI PHÁP TRUYỀN DẪN BACKHAUL LAI GHEP DỰA TRÊN MẠNG QUANG THỤ ĐỘNG

3.1. Đặt vấn đề

Do tăng trưởng lưu lượng đáng kể trong mạng di động, các nhà cung cấp dịch vụ đang đối mặt với nhiều thách thức như tốc độ dữ liệu cao hơn, dung lượng mạng lớn hơn và hiệu quả phổ và năng lượng cao hơn. Hai giải pháp chính để giải quyết vấn đề này là triển khai small cell và hệ thống băng tần milimet. Tuy nhiên, triển khai small cell gặp áp lực lớn đối với hạ tầng truyền dẫn, trong khi sử dụng sợi quang đất đỏ không phù hợp trong một số tình huống. Các liên kết không dây như sóng milimet và truyền thông quang không gian tự do được coi là giải pháp thay thế hấp dẫn, nhưng lại bị hạn chế do sự suy hao và phạm vi hạn chế. Vì thế, sự tích hợp giữa công nghệ MMW và truyền sóng vô tuyến qua sợi quang RoF viết tắt là MMW/RoF, có thể giúp khai thác lợi thế của cả công nghệ MMW và cáp quang nhằm mang đến các mạng truyền dẫn công suất cao, linh hoạt, tối ưu chi phí và năng lượng, đã trở thành một phương pháp đầy hứa hẹn và nhận được nhiều quan tâm. Ngoài ra, việc sử dụng mạng quang thụ động ghép kênh phân chia theo bước sóng (WDM-PON) cũng là một giải pháp tiết kiệm chi phí.

Trong chương này, luận án đề xuất cấu trúc truyền dẫn mới dựa trên WDM-PON, bao gồm các giải pháp truyền dẫn thuần PON, lai ghép PON/FSO và lai ghép PON/RF. Luận án cũng sẽ trình bày cấu trúc truyền dẫn, phân tích hiệu năng và kết quả phân tích hiệu năng của các giải pháp truyền dẫn.

3.2. Cấu trúc truyền dẫn dựa trên WDM-PON

Cấu trúc đề xuất dựa trên WDM-PON nhằm mang đến mạng truyền dẫn hiệu năng cao và linh hoạt. Ba giải pháp truyền dẫn là WDM-PON, WDM-PON/RF và WDM-PON/FSO. WDM-PON có hiệu năng tốt nhất, nhưng chi phí lắp đặt cao và khó triển khai ở vùng địa hình khó khăn. Do đó, để bổ sung cho những yếu điểm của giải pháp thuần WDM-PON, lai ghép WDM-PON/RF và lai ghép WDM-PON/FSO là lựa chọn tốt nhất trong bối cảnh hiện tại với mạng 5G với chi phí triển khai thấp và tính linh hoạt cao. Tuy nhiên, WDM-PON/RF gặp khó khăn với sự khan hiếm của quang phổ RF, trong khi WDM-PON/FSO yêu cầu kết nối đường truyền thẳng vì vậy không phải trong tất cả các trường hợp sẽ khả thi.

3.3. Phân tích hiệu năng của hệ thống

Mỗi hệ thống truyền dẫn đường xuống từ trạm trung tâm đến trạm gốc có thể chia thành hai chặng. Chặng đầu tiên từ trạm trung tâm đến bộ chia là một liên kết WDM. Trong chặng thứ hai, khoảng cách truyền của sợi quang. Trong phần này, luận án phát triển các mô hình toán học để phân tích hiệu năng của ba hệ thống truyền dẫn đường xuống là thuần WDM-PON, lai ghép WDM-PON/FSO và lai ghép WDM-PON/RF.

3.3.1. Hệ thống truyền dẫn backhaul WDM-PON

Thông thường, BER của hệ thống truyền dẫn đường xuống thuần WDM-PON được tính thông qua tham số Q như sau:

$$P_{WDM}(e) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right), \quad (3.8)$$

3.3.2. Hệ thống truyền dẫn backhaul lai ghép WDM-PON/FSO

BER của hệ thống truyền dẫn backhaul đường xuống lai ghép WDM-PON/FSO được tính theo công thức:

$$P_e = P_{FSO}(e)[1 - P_{WDM}(e)] + P_{WDM}(e)[1 - P_{FSO}(e)], \quad (3.26)$$

Với $P_{WDM}(e)$ được tính theo (3.8).

3.3.3. Hệ thống truyền dẫn backhaul lai ghép WDM-PON/RF

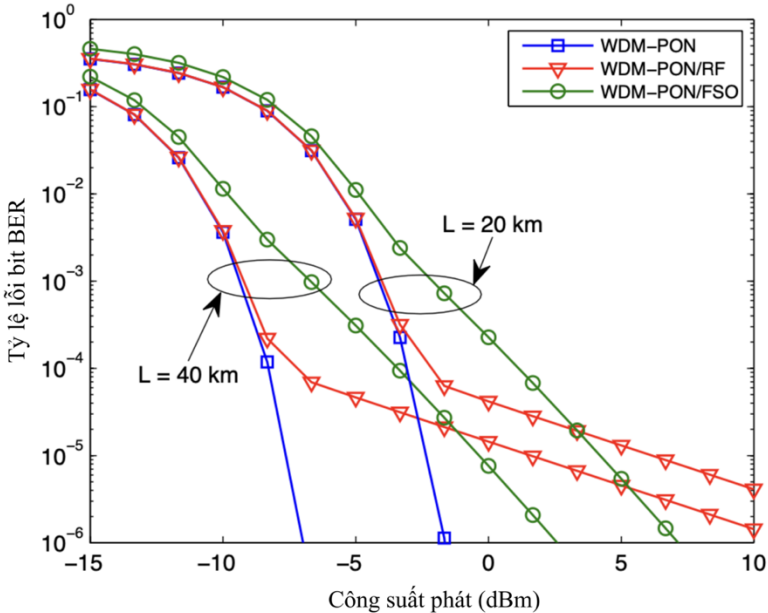
BER của Hệ thống truyền dẫn backhaul đường xuống lai ghép WDM-PON/RF được tính theo công thức:

$$P_e = P_{RF}(e)[1 - P_{WDM}(e)] + P_{WDM}(e)[1 - P_{RF}(e)], \quad (3.29)$$

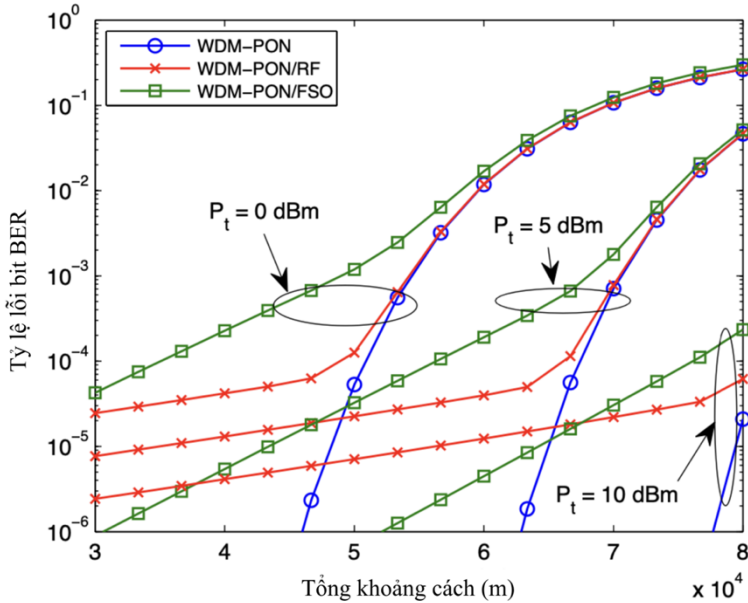
Với $P_{WDM}(e)$ được tính theo (3.8).

3.4. Kết quả phân tích hiệu năng của hệ thống

Từ hình 3.3 có thể thấy, hệ thống truyền dẫn lai ghép WDM-PON/FSO có hiệu năng tốt hơn WDM-PON/RF với BER nhỏ hơn 10^{-5} , mang đến một giải pháp trung gian, có thể đáp ứng BER cao, linh hoạt hơn trong khi chi phí triển khai thấp hơn.

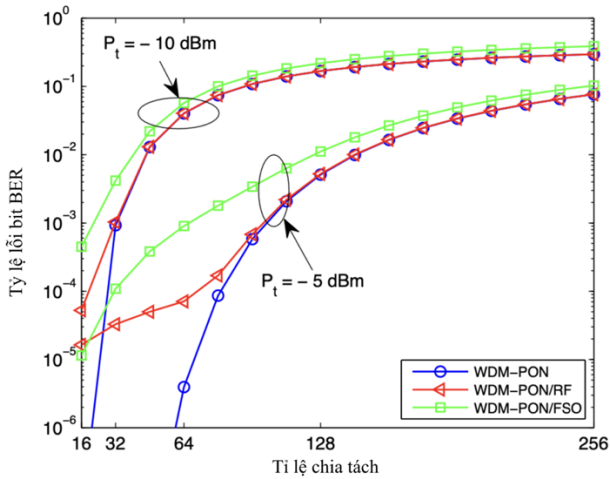


Hình 3. 3. So sánh hiệu năng của hệ thống truyền dẫn lai ghép WDM-PON/FSO, WDM-PON/RF và hệ thống NGPON2 với $R_b = 10$ Gbps và $L_{RF} = L_{FSO} = 800$ m

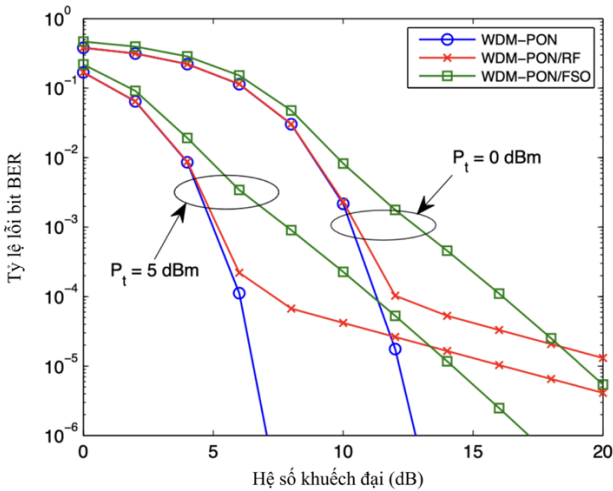


Hình 3. 4. BER so với tổng khoảng cách với các công suất phát khác nhau, $R_b = 10 \text{ Gbps}$ và $L_{FSO} = L_{RF} = 800 \text{ m}$

Dựa vào hình 3.4, giải pháp truyền dẫn WDM-PON cho thấy là lựa chọn tốt nhất xét về mặt BER nhưng truyền dẫn lai ghép WDM-PON/FSO hoặc WDM-PON/RF là những lựa chọn thay thế khác tối ưu hơn trong trường hợp phải đánh đổi giữa hiệu năng hoạt động với chi phí lắp đặt, tính lưu động và linh hoạt cho thể hệ mạng truyền dẫn tiếp theo.

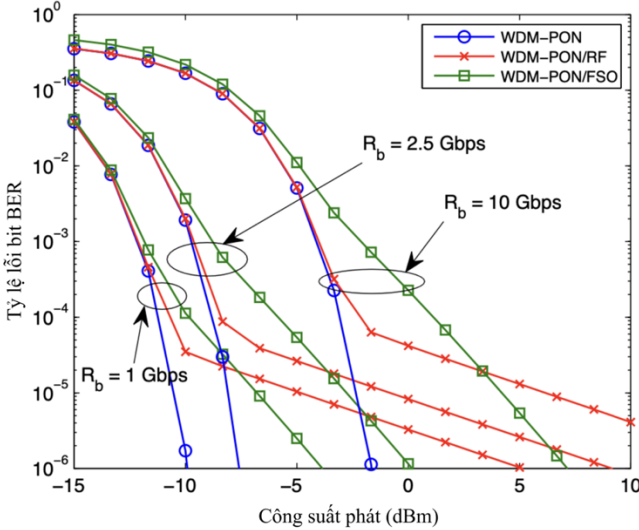


Hình 3. 5. BER so với công suất phát với tốc độ bit khác nhau, $L = 40$ km và $L_{FSO} = L_{RF} = 800$ m



Hình 3. 6. Ảnh hưởng của hệ số khuếch đại lên BER của truyền dẫn với $L = 40$ km, $R_b = 10$ Gbps và $L_{FSO} = L_{RF} = 800$ m

Hình 3.5 và hình 3.6 cho thấy tác động của các tham số chính của các phân liên kết sợi quang, như tỷ lệ chia tách và hệ số khuếch đại trong ba hệ thống truyền dẫn mà nghiên cứu đưa ra so sánh.



Hình 3. 7. BER so với công suất phát với tốc độ bit khác nhau, $L = 40$ km và $L_{FSO} = L_{RF} = 800$ m

Cuối cùng, hình 3.7 cho thấy hiệu năng hệ thống đạt được của ba hệ thống truyền dẫn với tốc độ bit khác nhau là 1 Gbps, 2.5 Gbps và 10 Gbps.

Các kết quả mô phỏng cho ta thấy rằng với tất cả tốc độ bit đã cho giải pháp truyền dẫn lai ghép WDM-PON/FSO chỉ vượt trội hơn so với giải pháp truyền dẫn lai ghép WDM-PON/RF nếu BER yêu cầu đủ nhỏ, tức là BER nhỏ hơn một giá trị cụ thể (5×10^{-4}) nhờ những lợi thế của công nghệ FSO so với công nghệ RF.

3.5. Tổng kết chương 3

Chương 3 nghiên cứu tập trung vào ba giải pháp truyền dẫn: WDM-PON, WDM-PON/FSO và WDM-PON/RF, nhằm tạo ra mạng truyền

dẫn di động dung lượng cao. Các giải pháp này kết hợp ưu điểm của công nghệ PON, FSO và RF để đạt hiệu năng cao, tính linh hoạt và tính di động. Đầu tiên, được phát triển các mô hình toán học cho các đường xuống của ba giải pháp. Sau đó, phân tích hiệu năng hệ thống dưới tác động của các tham số mạng và môi trường khác nhau. Kết quả cho thấy mỗi giải pháp có ưu và nhược điểm riêng. Kết hợp các phương pháp này có thể tạo ra một giải pháp linh hoạt và có khả năng đạt băng thông gigabit cho mạng truyền dẫn di động thế hệ tiếp theo.

CHƯƠNG 4: GIẢI PHÁP TRUYỀN DẪN BACKHAUL LAI GHÉP WDM-PON/FSO

4.1. Đặt vấn đề

Truyền thông không dây ngày càng tăng lên trong mạng di động, đặc biệt với 5G. Truyền thông không dây dung lượng cao và truyền thông quang là giải pháp linh hoạt và tiết kiệm chi phí. Truyền thông không dây truyền thống có nhược điểm, trong khi sử dụng truyền thông quang và FSO có nhiều lợi ích. Sử dụng sợi quang có chi phí cao, vì vậy nghiên cứu tập trung vào phân tích tác động của FWM và các hư hại khác đến hiệu năng của liên kết truyền dẫn OF/FSO qua WDM-PON. Mục tiêu là tìm ra giá trị công suất phát và hệ số khuếch đại để giảm tỷ lệ lỗi bit (BER) và cung cấp thông tin hữu ích cho thiết kế truyền dẫn OF/FSO qua WDM-PON.

4.2. Hệ thống truyền dẫn backhaul lai ghép OF/FSO qua WDM-PON

Hệ thống truyền dẫn backhaul lai ghép OF/FSO qua WDM-PON bao gồm tín hiệu từ máy phát được gửi đến máy thu thông qua sợi quang và FSO. Mạch ghép kênh WDM và khuếch đại quang pha tạp Erbium được sử dụng để điều chế và truyền tín hiệu. Tại máy thu, tín

hiệu được chia tách và khuếch đại trước khi gửi đến các trạm gốc BS qua kênh khí quyển. Tại các trạm gốc BS, tín hiệu quang được lọc và chuyển đổi thành dòng điện quang bằng APD, sau đó được khôi phục và xử lý. Hiệu năng truyền dẫn ảnh hưởng bởi nhiễu và FWM từ sợi quang và kênh khí quyển.

4.3. Phân tích hiệu năng của hệ thống

4.3.1. FWM trong sợi quang

Coi P_i^{FWM} là tổng hiệu năng của FWM được tạo ra ở tần số f_i và được tính bằng công thức:

$$P_i^{FWD} = \sum_{p,q,r} P_{pqr}, \quad (4.3)$$

Công suất của sóng mới được tạo ra bởi FWM có thể tính được theo công thức sau:

$$P_{pqr} = \eta_F (d_F \gamma L_{OF})^2 (P_c G_{EDFA})^3 \exp(-a_{OF} L_{OF}), \quad (4.1)$$

4.3.2. Kênh khí quyển

Phần này sẽ trình bày mô hình toán học cho hệ số kênh (h) của kênh khí quyển. Xem xét ảnh hưởng của hiệu ứng suy hao do khí quyển và nhiễu loạn khí quyển, hệ số kênh được xác định bởi hai tham số là h_l và h_a ; và được xác định bằng công thức:

$$h = h_l h_a, \quad (4.5)$$

Trong đó h_l là tổng suy hao đường truyền gây ra bởi sự lan truyền hình học và suy hao khí quyển được xác định:

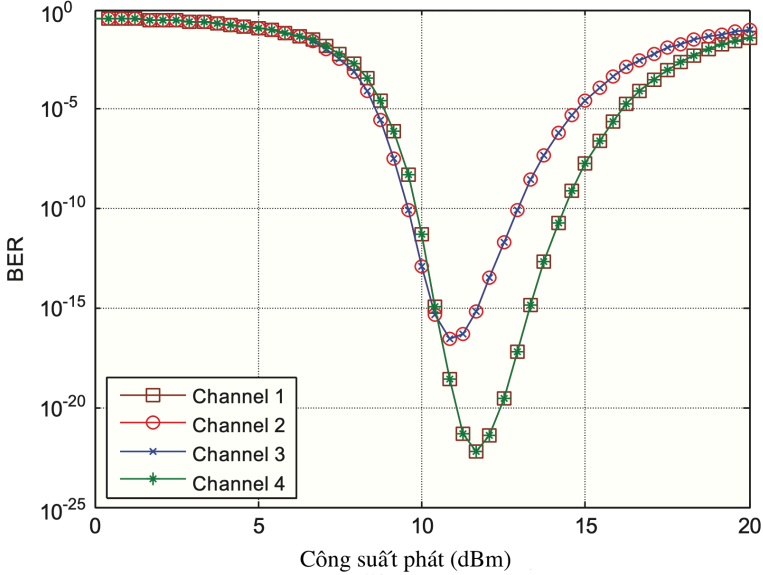
$$h_l = \frac{A}{\pi \left(\frac{\theta}{2} L_{FSO}\right)^2} \exp(-a_{FSO} L_{FSO}), \quad (4.6)$$

4.3.3. Tỷ lệ lỗi bit

BER trung bình của đường xuống đề xuất qua kênh khí quyển Gamma-Gamma được tính là:

$$BER = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{\gamma(h_a)}{2}} \right) f_{h_a}(h_a) dh_a, \quad (4.19)$$

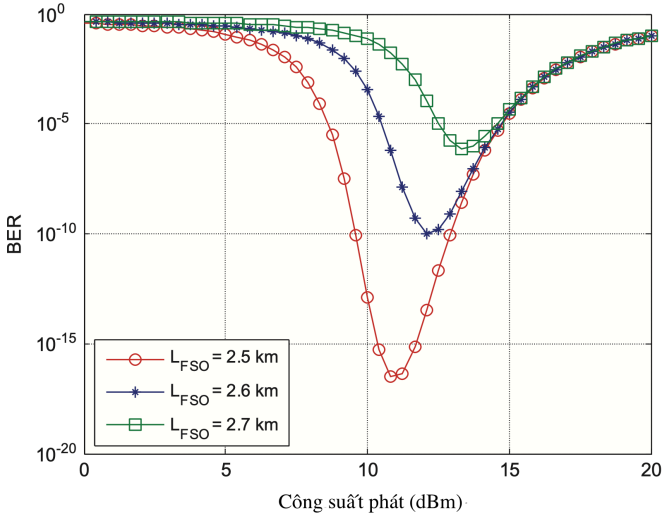
4.4. Kết quả phân tích hiệu năng hệ thống



Hình 4. 4. BER với tổng công suất phát với $G_{EDFA} = G_{PA} = 0$ dB, $M = 1$ và $L_{FSO} = 2,5$ km

Hình 4.4 cho thấy có một dải giá trị tổng công suất phát mà tại đó BER thấp hơn một giá trị cụ thể. Dải công suất truyền lớn sẽ tốt hơn vì nó giúp hệ thống hoạt động linh hoạt hơn.

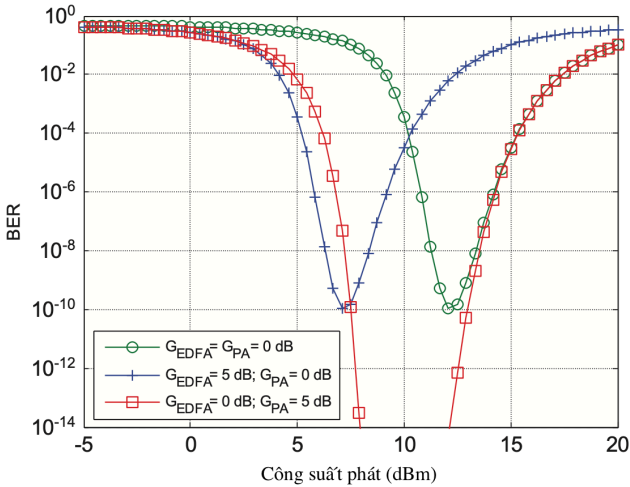
Tiếp theo, Hình 4.5 cho thấy BER so với tổng công suất truyền với các giá trị khác nhau của khoảng cách liên kết FSO. Khoảng cách liên kết của FSO cũng gây khó khăn (đối với trường hợp $L_{FSO} = 2,6$ km) hoặc không thể (đối với trường hợp $L_{FSO} = 2,7$ km) tìm ra tổng công suất truyền thích hợp để BER nhỏ hơn 10^{-10} .



Hình 4. 5. BER với tổng công suất phát cho các kênh 2 và 3

$$G_{EDFA} = G_{PA} = 0 \text{ dB, và } M = 1.$$

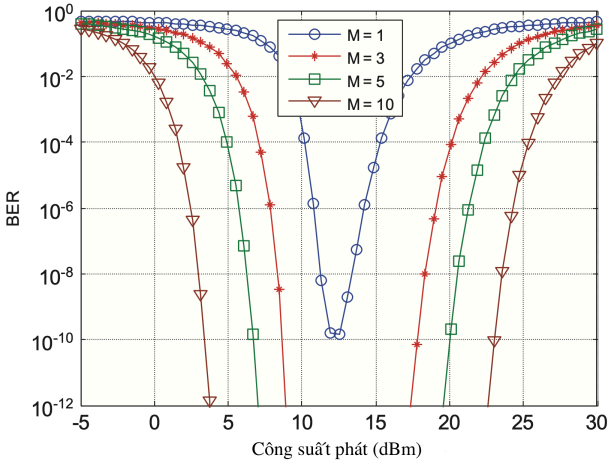
Mối quan hệ giữa BER và tổng công suất truyền cũng được kiểm tra trong Hình 4.6.



Hình 4. 6. BER với tổng công suất phát cho các kênh 2 và 3 với M

$$= 1 \text{ và } L_{FSO} = 2,6 \text{ km}$$

Kết quả là, đặc tính BER với EDFA dịch chuyển sang trái (so với điểm không có EDFA) và điểm thấp nhất của đặc tính BER không thay đổi. Như thể hiện trong hình, giá trị tối thiểu của BER bị giảm xuống dưới 10^{-10} và dải hiệu năng truyền có thể lựa chọn giữa 7,5 dBm và 12,5 dBm.



Hình 4. 7. BER với tổng công suất phát cho các kênh 2 và 3 với

$$G_{EDFA} = G_{PA} = 0 \text{ dB và } L_{FSO} = 2,6 \text{ km}$$

Cuối cùng, Hình 4.7 đánh giá ưu thế của việc sử dụng APD với BER được thể hiện so với tổng công suất truyền với một số giá trị của hệ số nhân APD. Tóm lại là, ta có thể chọn một dải công suất truyền rộng mà giúp thiết kế và thiết lập liên kết linh hoạt để có thể đạt được hiệu năng BER yêu cầu.

4.5. Tổng kết chương 4

Trong chương này, luận án đã phát triển một mô hình toán học để phân tích hiệu năng của truyền dẫn đường xuống lai ghép OF/FSO qua WDM-PON dưới tác động của hiệu ứng trộn bốn sóng FWM. Nhiều và hư hại vật lý khác như nhiễu bắn, nhiễu nhiệt, nhiễu nền, nhiễu bộ khuếch đại, nhiễu giao thoa, suy hao do khí quyển và nhiễu loạn khí

quyển cũng được xem xét. Để cải thiện hiệu năng truyền dẫn, luận án đã nghiên cứu ba phương pháp bao gồm sử dụng EDFA, PA hoặc APD. Kết quả phân tích cho thấy sử dụng PA hoặc APD là tốt hơn vì chúng không tăng cường tác động của FWM.

KẾT LUẬN

Nội dung luận án đã đạt được mục tiêu đề ra là nghiên cứu lý thuyết đề xuất mô hình kiến trúc và các công nghệ chủ chốt cho mạng backhaul trong thông tin di động 5G. Đồng thời phân tích hiệu năng của mạng backhaul đề xuất trong luận án này.

Các kết quả đóng góp mới về khoa học của luận án có thể phân thành ba nhóm như sau:

1. Đề xuất sử dụng mã hóa mạng cho giải pháp truyền dẫn lai ghép hai chặng hai chiều kết hợp giữa truyền thông quang trong không gian tự do FSO và truyền thông RF nhằm cải thiện thông lượng mạng backhaul di động.

2. Đề xuất giải pháp truyền dẫn backhaul di động dung lượng cao dựa trên mạng quang thụ động ghép kênh phân chia theo bước sóng với 3 kịch bản triển khai gồm thuần WDM-PON, lai ghép WDM-PON/FSO và lai ghép WDM-PON/MMW.

3. Xây dựng mô hình giải tích phục vụ cho việc thiết kế và phân tích hiệu năng mạng backhaul di động lai ghép WDM-PON/FSO dưới ảnh hưởng của hiệu ứng phi tuyến trộn bốn sóng.

CÁC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC ĐÃ CÔNG BỐ BÀI BÁO KHOA HỌC

[J1]. Phạm Vu Minh Tu, Nguyen Van Thang, Pham Thi Thuy Hien, Le Hai Chau, Dang The Ngoc, "A Performance Comparison of

Gigabit-Capable Backhauling Solutions for 5G Cellular Networks", *UDN Journal Of Science And Technology: Issue in Information And Communications Technology*, vol. 3, no. 1, pp. 38-45, Mar. 2017 (***Tạp chí Khoa học và công nghệ, Đại học Đà Nẵng***)

[J2]. Pham Vu Minh Tu, Nguyen Van Thang, Nguyen Thi Thu Nga, Pham Anh Thu, Pham Thi Thuy Hien, Dang The Ngoc "Performance Analysis of Hybrid Fiber/FSO Backhaul Downlink over WDM-PON Impaired by Four-Wave Mixing", *Journal of Optical Communications*, vol. 41, no. 1, 2020, pp.91-98. <https://doi.org/10.1515/joc-2017-0127> (***Tạp chí quốc tế ISI và SCOPUS***)

HỘI NGHỊ KHOA HỌC

[C1]. Pham Vu Minh Tu, Nguyen Van Thang, Pham Anh Thu, Pham Thi Thuy Hien, Dang The Ngoc, Pham Tuan Anh, "Performance Analysis of Network-Coded Two-Way Dual-Hop Mixed FSO/RF Systems," *In the Proc. of the IEEE 2016 International Conferences on Advanced Technologies for Communications (ATC 2016)*, Hanoi, Vietnam, Oct. 2016, pp. 70-75.