

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



PHẠM ANH THƯ

**GIẢI PHÁP NÂNG CAO HIỆU NĂNG HỆ THỐNG
TRUYỀN SÓNG MILIMET QUA SỢI QUANG CHO MẠNG
TRUY NHẬP VÔ TUYẾN BĂNG RỘNG**

Chuyên ngành: Kỹ thuật Viễn thông

Mã số: 9.52.02.08

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

Công trình hoàn thành tại:

HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG

Người hướng dẫn khoa học:

- 1. TS. Vũ Tuấn Lâm**
- 2. PGS.TS. Đặng Thế Ngọc**

Phản biện 1: PGS.TS Trương Vũ Bằng Giang

Phản biện 2: PGS.TS. Vũ Văn Yên

Phản biện 3: PGS.TS. Hồ Quang Quý

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 Quốc gia Việt Nam**
- 2. Thư viện Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông**

MỞ ĐẦU

Công nghệ truyền sóng vô tuyến qua sợi quang đã được tiến hành nghiên cứu và triển khai tại dải tần viba (microwave) khoảng 15 năm trước đây. Trong những năm gần đây, với sự xuất hiện của công nghệ truyền dẫn vô tuyến ở băng sóng milimet như là một ứng viên tiềm năng cho mạng truy nhập vô tuyến di động thế hệ thứ 5 (5G), các nghiên cứu về công nghệ RoF cho truyền sóng milimet cũng đang được nghiên cứu hết sức tích cực. Các nghiên cứu này thường tập trung vào mô hình kiến trúc, phân tích và đánh giá hiệu năng của tuyến truyền dẫn sợi quang sử dụng công nghệ RoF. Tuy nhiên, một số các yếu tố ảnh hưởng lên hiệu năng tuyến RoF như tán sắc và méo phi tuyến cũng chưa được tính đến đồng thời.

Ngoài ra, trên thực tế, việc triển khai các tuyến truyền dẫn sợi quang RoF tới từng trạm thu phát gốc là không linh hoạt, đòi hỏi chi phí cao và không phải lúc nào cũng có thể triển khai được, ví dụ ở những khu đô thị với mật độ xây dựng cao, những nơi địa hình hiểm trở như qua sông hay qua núi. Chính vì thế, để tiết kiệm chi phí, tăng tính linh hoạt và khả năng mở rộng khi ứng dụng công nghệ RoF trong việc truyền tải tín hiệu MMW tới các trạm thu phát gốc, một giải pháp tiếp cận mới đang được quan tâm nghiên cứu là triển khai các hệ thống truyền dẫn lai ghép MMW/RoF sử dụng cả đường truyền dẫn quang RoF và đường truyền dẫn vô tuyến MMW. Để đánh giá tính khả thi của giải pháp này đòi hỏi cần có một mô hình giải tích đánh giá một cách toàn diện ảnh hưởng của các tham số trong cả phân đoạn truyền dẫn sợi quang RoF và phân đoạn truyền dẫn vô tuyến MMW lên hiệu năng của hệ thống MMW/RoF. Bên cạnh đó, việc đề xuất các giải pháp nâng cao hiệu năng hệ thống MMW/RoF cũng hết sức cần thiết. Xuất phát từ các phân tích trên, nghiên cứu sinh đã quyết định chọn đề tài: “Giải pháp nâng cao hiệu năng của hệ thống truyền sóng milimet qua sợi quang cho mạng truy nhập vô tuyến băng rộng” cho luận án nghiên cứu của mình.

Mục tiêu nghiên cứu của luận án là nhằm phân tích được đồng thời các yếu tố ảnh hưởng đến hiệu năng của các hệ thống MMW/RoF với các kịch bản ứng dụng khác nhau trong mạng truy nhập vô tuyến. Kết quả mong muốn trong nghiên cứu là đưa ra được mô hình toán học mô tả sự phụ thuộc của các tham số hiệu năng của hệ thống vào các tham số lớp vật

lý. Nghiên cứu cũng hướng đến đề xuất các giải pháp kỹ thuật nhằm cải thiện hiệu năng của hệ thống MMW/RoF.

Để đạt được các mục tiêu nêu trên, các nhiệm vụ cụ thể cần phải giải quyết bao gồm: (1) nghiên cứu cấu trúc và nguyên lý hoạt động của các hệ thống MMW/RoF, (2) nghiên cứu các tham số ảnh hưởng đến hiệu năng của các hệ thống và mô hình hóa sự phụ thuộc của hiệu năng vào các tham số này, (3) Khảo sát hiệu năng hệ thống cho các kịch bản ứng dụng khác nhau bằng phân tích số và mô phỏng và (4) đề xuất giải pháp nhằm cải thiện hiệu năng hệ thống MMW/RoF.

Từ các nhiệm vụ nghiên cứu trên, phương pháp nghiên cứu của luận án là nghiên cứu lý thuyết kết hợp với mô phỏng. Cụ thể là, sử dụng lý thuyết truyền thông và công cụ toán học để tính toán, đánh giá hiệu năng các hệ thống MMW/RoF theo các tham số và các yếu tố ảnh hưởng khác nhau. Sau đó, sử dụng các công cụ phần mềm nhằm đưa ra các kết quả đánh giá hiệu năng một cách trực quan. Cuối cùng, đưa ra các nhận xét, đánh giá dựa trên các kết quả đạt được, đưa ra các khuyến nghị, các giải pháp cải thiện hiệu năng hệ thống.

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

Chương 1: Tổng quan về vấn đề nghiên cứu

Chương 2: Khảo sát hiệu năng của hệ thống MMW/RoF

Chương 3: Cải thiện hiệu năng của hệ thống MMW/RoF đơn hướng

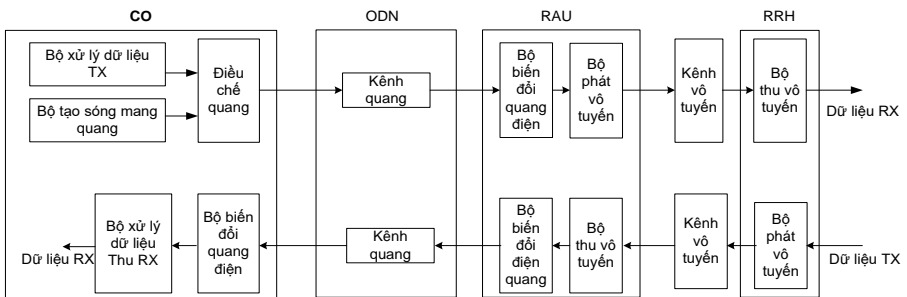
Chương 4: Đề xuất mô hình hệ thống MMW/RoF chuyển tiếp song hướng cho mạng truy nhập vô tuyến.

CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN VỀ VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU

1.1 HỆ THỐNG TRUYỀN TÍN HIỆU VÔ TUYẾN Ở BĂNG TẦN MILIMET QUÁ SỢI QUANG

Sơ đồ khối của một hệ thống MMW/RoF được thể hiện trên hình 1.5. Một hệ thống truyền sóng milimet qua sợi quang bao gồm các phân hệ chính như phân hệ trạm trung tâm CO (CS), phân hệ mạng phân phối quang ODN, phân hệ trạm BS, kênh truyền vô tuyến và bộ thu phát tín hiệu vô tuyến. Phân hệ CO trong hệ thống MMW/RoF đảm nhiệm các chức năng xử lý dữ liệu và tạo tín hiệu quang ở đường xuống. Việc tạo tín hiệu quang

này bao gồm hai quá trình là tạo sóng mang và điều chế dữ liệu đường xuống. Hai quá trình này có thể được thực hiện đồng thời hoặc thực hiện một cách tách biệt. Có nhiều kỹ thuật đã được đề xuất trong những năm gần đây để thực hiện chức năng này dựa trên các phương pháp tiếp cận khác nhau. 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. 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 CO qua khoảng cách lớn tới các BS và cho phép tăng số lượng các BS. Mục tiêu của kiến trúc sử dụng MMW/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 CO 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.



Hình 1.5. Sơ đồ khối hệ thống MMW/RoF

1.2 CÁC THAM SỐ ĐÁNH GIÁ HIỆU NĂNG HỆ THỐNG

- Tỷ số công suất tín hiệu trên nhiễu, SNR
- Tỷ lệ lỗi bit, BER
- Dung lượng kênh, C
- Thông lượng

1.3 CÁC YẾU TỐ ẢNH HƯỞNG LÊN HIỆU NĂNG HỆ THỐNG

- Các nguồn nhiễu

- Suy hao sợi quang
- Tán sắc sợi quang
- Các hiệu ứng quang phi tuyến
- Ảnh hưởng của kênh vô tuyến

1.4 CÁC THÁCH THỨC TRONG VIỆC NÂNG CAO HIỆU NĂNG CỦA HỆ THỐNG MMW/RoF

Các thách thức trong việc nâng cao hiệu năng hệ thống MMW/RoF chủ yếu xuất phát từ các ảnh hưởng lớp vật lý của kênh truyền quang, kênh truyền vô tuyến và các bộ thu phát.

1.5 CÁC CÔNG TRÌNH NGHIÊN CỨU LIÊN QUAN

1.5.1 Các công trình nghiên cứu trong nước

Tại Việt Nam các kết quả nghiên cứu liên quan đến hệ thống MMW/RoF còn khá hạn chế.

1.5.2 Các công trình nghiên cứu ngoài nước

1.5.2.1 Các nghiên cứu về kiến trúc và công nghệ được sử dụng trong hệ thống MMW/RoF

Các nghiên cứu về cấu trúc và công nghệ được sử dụng trong hệ thống MMW/RoF được xem xét tại ba phân hệ của hệ thống. Cấu trúc và công nghệ đường xuống tại CO gồm các nghiên cứu về các kỹ thuật điều chế, các nguồn laser được sử dụng và kỹ thuật tạo tín hiệu quang ở băng sóng MMW. Đã có nhiều nghiên cứu về các kiến trúc cũng như các công nghệ hỗ trợ cho ODN, cụ thể có rất nhiều loại sợi quang được đề xuất sử dụng cho hệ thống MMW/RoF như sợi đơn mode, sợi đa mode, sợi polymer hay sợi quang đa lõi; các cấu hình ODN và các công nghệ khuếch đại quang cũng được xem xét. Yếu tố chính để hệ thống MMW/RoF có thể được triển khai trong thực tế là việc triển khai BS phải có chi phí thấp và tiêu thụ công suất thấp. Điều này có thể thực hiện bằng cách sử dụng các cấu kiện tích hợp và đơn giản, với thiết bị điện và quang tối giản, có mức tiêu thụ công suất thấp nhất có thể. Một số cấu hình BS sử dụng các công nghệ tiên tiến đã được đề xuất để đạt được mục tiêu này.

1.5.2.2 Các nghiên cứu về đánh giá hiệu năng hệ thống MMW/RoF

Trong thời gian gần đây, nhiều nghiên cứu liên quan đến việc phân tích và đánh giá hiệu năng các hệ thống MMW/RoF đã được thực hiện. Hiệu năng của hệ thống này có thể được đánh giá dựa trên tham số tỉ lệ lỗi bit BER hoặc độ lớn vector lỗi (Error Vector Magnitude - EVM). BER được

định nghĩa là tỉ số lỗi bit trong truyền dẫn, còn EVM là trung bình sự sai khác về độ lớn giữa chòm sao tham chiếu và chòm sao nhận được tại một điểm xác định trong hệ thống. Một số tác giả đã kiểm chứng hiệu năng hệ thống RoF tại UE, có xét đến ảnh hưởng của kênh vô tuyến và kiến trúc UE trong khi một số tác giả khác lại chỉ tập trung vào ảnh hưởng của vùng RoF bằng cách tính toán và phân tích hiệu năng hệ thống tại đầu ra của PD tại BS.

1.5.2.3 Các nghiên cứu về giải pháp cải thiện hiệu năng của hệ thống

Nhằm giảm thiểu ảnh hưởng của các yếu tố trong kênh quang và kênh vô tuyến nói trên, nhiều giải pháp cải thiện hiệu năng đã được đề xuất. Các giải pháp cải thiện hiệu năng này có thể chia thành các nhóm giải pháp như *các kỹ thuật làm giảm nhiễu hệ thống, các kỹ thuật làm giảm ảnh hưởng của tán sắc sợi quang và các kỹ thuật cải thiện hiệu quả phổ tần quang.*

1.6 HƯỚNG NGHIÊN CỨU CỦA LUẬN ÁN

1.6.1 Nhận xét về công trình nghiên cứu của các tác giả khác

a) Hạn chế trong các nghiên cứu về cấu trúc hệ thống

- Ảnh hưởng của đường truyền vô tuyến mới được khảo sát ở cự ly rất hạn chế
- Thường tập trung đề xuất kiến trúc hệ thống MMW/RoF đơn hướng

b) Các nghiên cứu về phân tích và đánh giá hiệu năng

- Mới chỉ phân tích và đánh giá hiệu năng của hệ thống MMW/RoF dưới ảnh hưởng của một vài tham số riêng biệt mà chưa khảo sát đồng thời ảnh hưởng của đầy đủ các yếu tố trong truyền dẫn quang và vô tuyến.
- Phần ảnh hưởng của kênh vô tuyến cũng chưa được đánh giá cùng với các ảnh hưởng của kênh quang một cách đầy đủ.
- Hiệu năng của hệ thống MMW/RoF được đo thử nghiệm với điều kiện hạn chế của trang thiết bị dẫn đến các kết quả phân tích hiệu năng chưa đầy đủ với ít kịch bản ứng dụng.

c) Các nghiên cứu về cải thiện hiệu năng

- Giải pháp cải thiện hiệu năng đồng thời của cả tuyến RoF và tuyến MMW chưa được quan tâm nhiều. Mới chỉ tập trung cho tuyến RoF như cải thiện dung lượng sợi quang với kỹ thuật ghép kênh phân cực hoặc WDM.

- Chưa lượng hóa được các ảnh hưởng từ lớp vật lý của hệ thống MMW/RoF nên các tham số hiệu năng lớp cao hơn như thông lượng của hệ thống

1.6.2 Hướng nghiên cứu của luận án

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 hệ thống truyền dẫn hai chặng (sợi quang/vô tuyến) dựa trên công nghệ MMW/RoF ứng dụng trong mạng truy nhập vô tuyến băng rộng, cụ thể như sau:

- Xây dựng mô hình giải tích khảo sát hiệu năng hệ thống MMW/RoF dưới ảnh hưởng đồng thời của các tham số hệ thống, bao gồm các tham số của đường truyền quang, thiết bị thu phát quang, đường truyền vô tuyến và thiết bị thu phát vô tuyến.
- Đề xuất sử dụng ghép kênh không gian trong cả sợi quang và đường truyền vô tuyến nhằm cải thiện dung lượng hệ thống MMW/RoF. Xây dựng mô hình giải tích và mô phỏng khảo sát hiệu năng hệ thống MMW/RoF sử dụng ghép kênh không gian.
- Đề xuất mô hình kiến trúc hệ thống MMW/RoF song hướng ứng dụng trong mạng truy nhập vô tuyến băng rộng với giải pháp nâng cao thông lượng của hệ thống. Xây dựng mô hình giải tích đánh giá hiệu năng, cho thấy tính khả thi và ưu điểm của hệ thống đã đề xuất.

1.7 KẾT LUẬN CHƯƠNG 1

Nội dung Chương 1 đã trình bày tổng quan về cấu trúc, các tham số hiệu năng và các yếu tố ảnh hưởng lên hiệu năng của hệ thống MMW/RoF. Các công trình nghiên cứu trong và ngoài nước liên quan đến hệ thống MMW/RoF cũng đã được tổng kết. Qua khảo sát và phân tích các kết quả nghiên cứu đã công bố, những hạn chế trong các nghiên cứu này được chỉ ra. Từ đó, hướng nghiên cứu của luận án đã được vạch ra, đó là nghiên cứu khảo sát, đánh giá hiệu năng và đề xuất các giải pháp cải thiện hiệu năng của hệ thống truyền dẫn hai chặng dựa trên công nghệ MMW/RoF ứng dụng trong mạng truy nhập vô tuyến băng rộng trong tương lai.

CHƯƠNG 2: KHẢO SÁT HIỆU NĂNG CỦA HỆ THỐNG MMW/RoF

2.1 ĐẶT VẤN ĐỀ

Có thể thấy rằng hiệu năng của hệ thống MMW/RoF chịu ảnh hưởng của nhiều yếu tố khác nhau trong cả phân hệ quang và phân hệ vô tuyến, gồm các nguồn nhiễu sinh ra từ các bộ thu phát, méo phi tuyến trên sợi quang cũng như trên phần tử thu phát, tán sắc sợi quang, suy hao và fading kênh vô tuyến. Sự ảnh hưởng của từng yếu tố là khác nhau trong từng điều kiện truyền dẫn cụ thể. Do vậy, việc đánh giá hiệu năng hệ thống dưới ảnh hưởng của đồng thời các yếu tố này là rất quan trọng và khó khăn. Để có thể đánh giá hiệu năng hệ thống MMW/RoF dưới ảnh hưởng của đầy đủ hơn các tham số trong cả phân hệ quang và phân hệ vô tuyến. Trước hết, ảnh hưởng của các tham số lên hiệu năng hệ thống được phân tích. Tiếp đó, một mô hình hệ thống MMW/RoF đường xuống được đưa ra và từ đó hiệu năng hệ thống được phân tích đánh giá dưới tác động của các tham số này.

2.2 CÁC THAM SỐ ẢNH HƯỞNG LÊN HIỆU NĂNG CỦA HỆ THỐNG

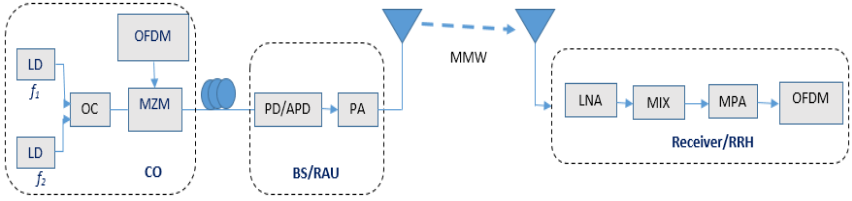
- Các tham số bộ thu: các nguồn nhiễu, phi tuyến
- Các tham số kênh quang: suy hao, tán sắc, phi tuyến
- Các tham số kênh vô tuyến: suy hao, fading

2.3 KHẢO SÁT HIỆU NĂNG CỦA HỆ THỐNG MMW/RoF

2.3.1 Mô hình hệ thống lai ghép MMW/RoF

Về cơ bản, hệ thống truyền sóng vô tuyến qua sợi quang ở băng tần millimet (MMW/RoF) bao gồm ba phân hệ con, phân hệ trung tâm (CO/CS), mạng phân phối quang (ODN) và các trạm gốc (BS). Phân hệ CO thực hiện rất nhiều chức năng phức tạp như điều chế, giải điều chế và tạo sóng mang ở băng tần millimet,... Ngược lại, BS cần thật đơn giản bởi số lượng lớn các BS được yêu cầu trong hệ thống này. Phân hệ CO kết nối với các trạm gốc BS qua ODN. Trong hệ thống này, việc truyền và tạo tín hiệu quang ở băng tần millimet là các vấn đề quan trọng, đã được rất nhiều các nhà nghiên cứu trên thế giới quan tâm. Đã có rất nhiều các nghiên cứu công bố về các phương pháp tạo tín hiệu quang, đó là phương pháp điều chế trực tiếp, điều chế ngoài, điều chế trộn các tần số và biến đổi bước sóng. Mỗi phương pháp có những ưu nhược điểm riêng của nó. Tuy nhiên, sơ đồ điều chế ngoài đang được sử dụng rộng rãi trong các thử nghiệm hệ thống

MMW/RoF. Chính vì vậy, sơ đồ điều chế ngoài sẽ được lựa chọn nghiên cứu (hình 2.3).



Hình 2.3. Mô hình hệ thống lai ghép MMW/RoF

2.3.2 Tỷ lệ lỗi bit BER

Hiệu năng của hệ thống MMW/RoF đường xuống đề xuất sẽ được phân tích tính toán tại Receiver/RRH (Hình 2.3). Trước tiên, tỉ số công suất tín hiệu trên nhiễu SNR và tỉ số SDR (signal-to-distortion ratio) được tính toán. Sau đó, tỉ số SNDR (signal-to-noise and distortion ratio) mô tả ảnh hưởng của cả nhiễu và méo được xem xét và được xác định như sau:

$$\frac{1}{SNDR} = \frac{1}{SNR} + \frac{1}{SDR}. \quad (2.28)$$

Tiếp theo, tỉ số lỗi bit BER sẽ được mô tả như một hàm của tỉ số SNDR cho trường hợp dữ liệu là tín hiệu QPSK hoặc QPSK - OFDM:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{SNDR}{2}} \right), \quad (2.29)$$

trong đó, $\operatorname{erfc}(\cdot)$ là hàm bù lỗi.

Cuối cùng, BER được đánh giá dưới ảnh hưởng của kênh vô tuyến trong hai mô hình kênh Rayleigh và Rice.

2.3.3 Tỷ số công suất tín hiệu trên nhiễu

Tỉ số SNR của hệ thống đề xuất được tính như sau:

$$SNR = \frac{P_s}{P_n} = \frac{(\mathfrak{R}M_A m P_r)^2 \sigma_d^2 G_P G_{Tx} G_{Rx} G_L G_M / P_L L_I}{\sigma_{TN}^2 G_P G_{Tx} G_{Rx} G_L G_M / P_L L_I + NF_{Rx} K_B T B_n}, \quad (2.42)$$

trong đó, NF_{Rx} là hệ số nhiễu tại bộ thu và σ_d^2 là công suất tín hiệu dữ liệu.

2.3.4 Tỉ số công suất tín hiệu trên nhiễu gây ra bởi méo

Tỉ số công suất tín hiệu trên nhiễu gây ra bởi méo sau APD, SDR , được tính như sau:

$$SDR = \frac{P_s}{P_y} = \frac{a_1^2 \sigma_d^2}{\frac{19}{8} a_2^2 \sigma_d^4} = \frac{8a_1^2}{19a_2^2 \sigma_d^2} = \frac{32}{19m^2 \sigma_d^2}. \quad (2.48)$$

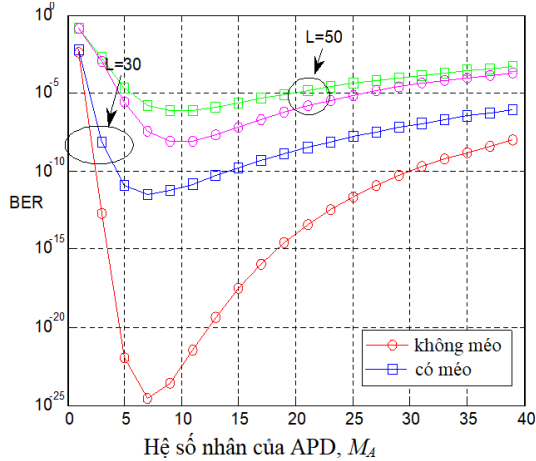
2.3.5 Ảnh hưởng của kênh vô tuyến

Kênh vô tuyến trong mô hình đề xuất như hình 2.1 sử dụng băng tần milimet có thể được mô hình hóa như là kênh LOS hoặc kênh NLOS. Đối với kênh vô tuyến LOS, truyền thông tầm nhìn thẳng và anten có hướng có hệ số khuếch đại cao được yêu cầu. Bên cạnh đó, trong các kịch bản ngoài trời, các anten thường được gắn trên các nóc nhà hoặc các cột cao. Do vậy, kênh truyền này có thể coi là môi trường truyền trong không gian tự do. Chính vì vậy, liên kết vô tuyến MMW này hầu như chỉ chịu ảnh hưởng của suy hao đường truyền, sự hấp thụ của khí quyển và suy hao do mưa. Đối với mô hình kênh vô tuyến NLOS, kênh sẽ được mô hình hóa như là phân bố Rayleigh. Kênh Rayleigh được sử dụng để mô tả ảnh hưởng của fading trong môi trường truyền sóng vô tuyến trong đó không có đường truyền trực tiếp nào giữa anten phát và anten thu. Tỉ lệ lỗi bit của kênh này được tính như sau:

$$P_b^{rayleigh} = \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma + 1}} \right). \quad (2.61)$$

2.3.6 Kết quả khảo sát hiệu năng hệ thống

Như chỉ ra trên đồ thị trong hình 2.6, BER giảm mạnh tới điểm đáy và sau đó lại tăng dần lên khi M_A tăng. Do đó, có thể tìm được giá trị M_A tối ưu để đạt được tỉ lệ lỗi bit thấp nhất. Đường cong BER phụ thuộc vào M_A có hình dạng như vậy là do khi M_A tăng lên thì không chỉ công suất tín hiệu tăng lên mà cả nhiễu nỏ của APD cũng tăng lên. Khi M_A lớn hơn một giá trị nào đó, ảnh hưởng của nhiễu nỏ tại APD trở lên rất lớn và làm cho hiệu năng hệ thống bị suy giảm.



Hình 2.6. BER phụ thuộc vào hệ số khuếch đại của APD với các giá trị chiều dài sợi quang khác nhau

2.7 KẾT LUẬN CHƯƠNG 2

Chương này đã phân tích đưa ra mô hình giải tích biểu diễn sự phụ thuộc của đầy đủ hơn các tham số hệ thống lên hiệu năng hệ thống MMW/RoF so với các nghiên cứu trước đây. Trong chương này, một mô hình giải tích khảo sát toàn diện hiệu năng hệ thống MMW/RoF dưới ảnh của đầy đủ hơn các tham số hệ thống bao gồm các tham số của đường truyền quang, thiết bị thu phát quang, đường truyền vô tuyến và thiết bị thu phát vô tuyến với các kịch bản ứng dụng khác nhau gồm kịch bản ứng dụng cho kết nối tới người dùng di động và kịch bản ứng dụng cho kết nối backhaul của mạng truy nhập vô tuyến đã được xây dựng.

CHƯƠNG 3: CẢI THIỆN HIỆU NĂNG HỆ THỐNG MMW/RoF ĐƠN HƯỚNG

3.1 ĐẶT VẤN ĐỀ

Cho đến nay, có một số nghiên cứu đã và đang quan tâm đến hệ thống MMW/RoF sử dụng MIMO. Một trong số các nghiên cứu đó đã đưa ra khái niệm hệ thống MIMO RoF sử dụng một sợi quang tách biệt cho mỗi trạm gốc BTS. Việc truyền tải tín hiệu ghép kênh phân chia theo tần số trực giao OFDM cho hệ thống đa anten MIMO trên mạng quang thụ động sử dụng kỹ thuật WDM cũng đã được thực hiện trong. Hệ thống MMW/RoF sử

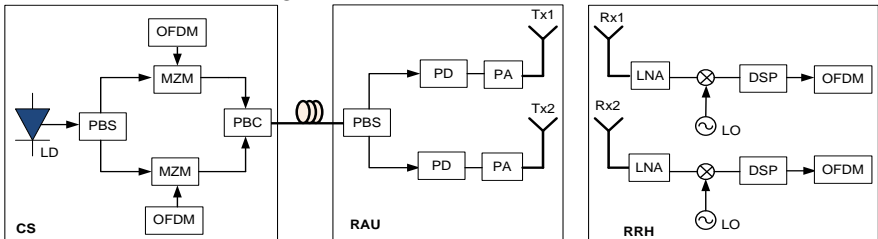
dụng ghép phân cực và MIMO để truyền số liệu tốc độ 5 Gb/s cũng được đề xuất trong. Tuy nhiên, hệ thống này sử dụng sơ đồ điều chế OOK với hiệu quả sử dụng phổ tần thấp. Năm 2012, Lei Deng và các tác giả đã đưa ra mô hình hệ thống truyền sóng vô tuyến 2x2 MIMO-OFDM qua mạng WDM-PON dựa trên kỹ thuật ghép phân chia theo phân cực và kỹ thuật đa anten MIMO. Tuy nhiên, nghiên cứu và các nghiên cứu nêu trên đều thực hiện dựa trên các mô hình thực nghiệm. Do đó, các kết quả đánh giá hiệu năng bị hạn chế bởi các điều kiện thử nghiệm như tốc độ, cự ly truyền dẫn. Hơn nữa, dưới các điều kiện thử nghiệm, rất khó để đánh giá riêng biệt ảnh hưởng của các tham số hệ thống.

Trong chương này, hai giải pháp cải thiện hiệu năng về mặt dung lượng kênh, bao gồm sử dụng ghép kênh phân cực kết hợp MIMO và sử dụng sợi quang đa lõi kết hợp MIMO được đưa ra và phân tích.

3.2 CẢI THIỆN HIỆU NĂNG HỆ THỐNG MMW/RoF SỬ DỤNG GHEP KÊNH PHÂN CỰC KẾT HỢP MIMO

3.2.1 Kiến trúc đường xuống của hệ thống MIMO MMW/RoF

Mô hình đường xuống của hệ thống OFDM MMW/RoF sử dụng MIMO 2x2 được minh họa trong hình 3.2.



Hình 3.2. Kiến trúc đường xuống của hệ thống MMW/RoF sử dụng MIMO và PDM

3.2.2 Tỷ số công suất tín hiệu trên nhiễu và nhiễu gây ra bởi méo

Tỷ số tín hiệu trên nhiễu (SNR) trong miền điện tại bộ thu được xác định theo công thức:

$$SNR = \frac{P_{Rec}}{P_N} = \frac{(m\mathcal{R}P_r)^2 \sigma_d^2 G_p G_L R_L / P_L}{4\sigma_N^2 G_p G_L R_L / P_L + KTB_n \cdot NF_{Rx}}, \quad (3.22)$$

trong đó, KTB_n là nhiễu nhiệt tại bộ thu tín hiệu RF, NF_{Rx} là hệ số nhiễu tại phía thu, σ_d^2 là công suất tín hiệu OFDM và P_L là suy hao trong không khí cho liên kết thẳng.

Giả sử hai tín hiệu OFDM chịu ảnh hưởng của méo phi tuyến là như nhau trên hai nhánh, ảnh hưởng của méo phi tuyến lên tín hiệu OFDM tại mỗi nhánh:

$$SDR = \frac{8a_1^2}{19a_2^2\sigma_d^2} = \frac{32}{19m^2\sigma_d^2}. \quad (3.24)$$

Cả méo và nhiễu đều ảnh hưởng đến hiệu năng hệ thống. Tỉ số công suất tín hiệu trên nhiễu và nhiễu gây ra bởi méo SNDR được công thức (2.28).

3.2.3 Dung lượng kênh

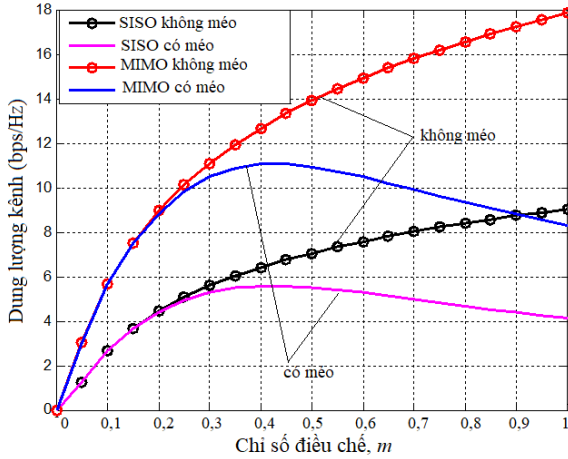
Giả thiết kênh ngẫu nhiên là quá trình Ergodic, dung lượng kênh của hệ thống phụ thuộc vào tỉ số SNDR như sau:

$$\begin{aligned} C &= E \left\{ \log_2 \left[\det \left(\mathbf{I}_{N_r} + \frac{\gamma}{N_t} \mathbf{H}\mathbf{H}^H \right) \right] \right\} \\ &= E \left\{ \log_2 \left[\det \left(\mathbf{I}_{N_r} + \frac{\gamma}{N_t} \mathbf{\Lambda} \right) \right] \right\}, \end{aligned} \quad (3.29)$$

trong đó, E là kỳ vọng được thực hiện theo phân bố của ma trận kênh ngẫu nhiên \mathbf{H} .

3.2.4 Kết quả khảo sát dung lượng kênh

Dung lượng kênh của hệ thống được xem xét dưới sự ảnh hưởng của chỉ số điều chế với cả hai trường hợp có xét đến méo và không xét đến méo. Như được chỉ ra trong hình 3.4, đối với trường hợp không xét đến ảnh hưởng của méo, dung lượng kênh tăng lên khi chỉ số điều chế tăng lên cho cả hai kênh MIMO và SISO. Tuy nhiên, khi xét đến ảnh hưởng của méo, dung lượng kênh giảm đi khi chỉ số điều chế vượt quá giá trị tối ưu của nó. Do vậy, có thể lựa chọn được các giá trị tối ưu cho chỉ số điều chế để đạt được dung lượng kênh tối đa hay làm cho ảnh hưởng của méo là nhỏ nhất. Khi chỉ số điều chế lớn hơn giá trị tối ưu đó, ảnh hưởng của méo sẽ lớn hơn rất nhiều so với ảnh hưởng của nhiễu và do đó dung lượng kênh giảm đi nhanh.



Hình 3.4. Dung lượng kênh phụ thuộc vào chỉ số điều chế

3.3 CẢI THIỆN HIỆU NĂNG CỦA HỆ THỐNG MMW/roF SỬ DỤNG MCF KẾT HỢP MIMO

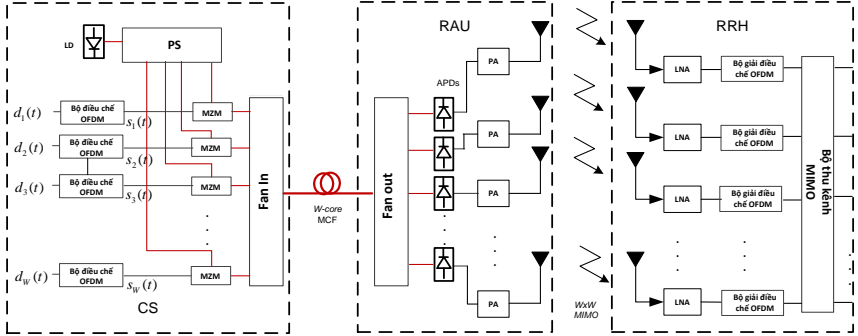
3.3.1 Giới thiệu chung

Mặc dù, kết nối backhaul của mạng truy nhập vô tuyến sử dụng công nghệ RoF và sử dụng MMW đã được nghiên cứu rộng rãi, nhưng thường được xem xét một cách tách biệt. Gần đây, kết nối backhaul kết hợp quang-vô tuyến hai chặng, trong đó RoF được sử dụng trong chặng từ CO tới RAU và MMW được sử dụng từ RAU tới RRH, đã được phân tích trong. Trong các nghiên cứu này, liên kết vô tuyến không được xét đến hoặc được xét đến với khoảng cách ngắn do hạn chế của các điều kiện thử nghiệm. Ngoài ra, việc sử dụng đồng thời RoMCF trong kênh quang và MIMO trong kênh vô tuyến vẫn chưa được xem xét cho các kết nối backhaul.

Trong phần này, kiến trúc kết nối backhaul của mạng truy nhập vô tuyến lai ghép quang-vô tuyến hai chặng dựa trên kết hợp hệ thống MMW/roMCF và kỹ thuật MIMO để tạo lên các kết nối backhaul dung lượng cao cho mạng vô tuyến tế bào thế hệ tiếp theo được đề xuất và hiệu năng về mặt dung lượng của hệ thống này được phân tích dưới ảnh hưởng của nhiều tham số lớp vật lý.

3.3.2 Mô hình hệ thống MMW/RoMCF

Hình 3.7 mô tả kiến trúc hệ thống backhaul đề xuất sử dụng công nghệ MMW/RoF kết hợp với sợi đa lõi MCF và công nghệ MIMO.



Hình 3.7. Kiến trúc hệ thống OFDM MMW/RoF sử dụng MIMO và MCF

3.3.3 Phân tích hiệu năng hệ thống

Trong phần này, hiệu năng (dung lượng) của hệ thống backhaul đường xuống sẽ được đánh giá tại RRH (Hình 3.7). Trước tiên, tỉ số SNR tại RRH được tính toán dưới ảnh hưởng của các nguồn nhiễu, xuyên nhiễu và fading từ cả liên kết quang và liên kết vô tuyến. Cuối cùng, dung lượng kênh của hệ thống đề xuất sẽ được tính toán dựa trên tỉ số SNR từ CS tới RRH.

Tỉ số SNR có thể được tính như sau:

$$\text{SNR} = \frac{(\Re M_A P_r)^2 G_P G_{Tx} G_{Rx} / P_L}{\sigma_N^2 G_P G_{Tx} G_{Rx} / P_L + K_B T B_n N F_{Rx}}. \quad (3.56)$$

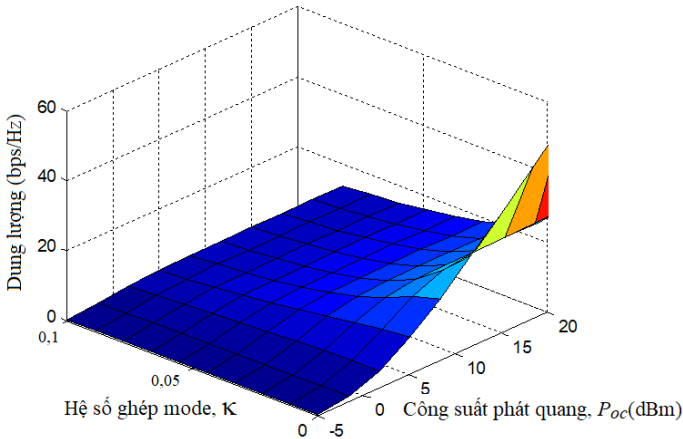
Dung lượng kênh Ergodic của kênh MIMO được tính như sau:

$$C = E \left\{ \log_2 \det \left(\mathbf{I}_{N_r} + \text{SNR} \frac{B_n}{N_t R_s} \mathbf{H} \mathbf{H}^H \right) \right\}, \quad (3.58)$$

trong đó, R_s là tốc độ kí hiệu và B_n là băng tần nhiễu hiệu dụng có giá trị thường được giả thiết bằng với tốc độ kí hiệu R_s .

3.3.4 Kết quả khảo sát hiệu năng hệ thống

Trong Hình 3.12, ảnh hưởng của ba tham số chính, bao gồm hệ số ghép mode, công suất phát và bán kính uốn cong, đến dung lượng kênh được khảo sát. Trong kịch bản này, sợi MCF 4 lõi với khoảng cách giữa các lõi là $45 \mu\text{m}$, kênh MIMO 4×4 , hệ số nhân APD bằng 20 và hệ số Rice bằng 3. Kết quả đầu tiên của kịch bản này là đồ thị 3D mô tả ảnh hưởng của hệ số ghép mode và công suất phát lên dung lượng hệ thống (hình 3.12). Dung lượng kênh giảm mạnh khi hệ số ghép mode tăng lên vì khi hệ số ghép mode tăng lên thì xuyên nhiễu tăng lên. Công suất phát cao giúp cải thiện dung lượng kênh cho trường hợp hệ số ghép mode nhỏ. Tuy nhiên, khi hệ số ghép mode lớn, ví dụ $\kappa = 0.1$, công suất phát cao gây ra xuyên nhiễu lớn và do đó, công suất phát cao cũng không giúp cải thiện dung lượng kênh.



Hình 3.12. Dung lượng kênh phụ thuộc vào hệ số ghép mode và công suất phát với kênh 4×4 MIMO, $M_A = 20$, $\Lambda = 45 \mu\text{m}$, $R_{bd} = 0.3 \text{ m}$ và hệ số Rice $K = 3$

3.4 KẾT LUẬN CHƯƠNG 3

Kiến trúc kết nối backhaul lai ghép quang-vô tuyến hai chặng dựa trên kỹ thuật ghép kênh phân cực và ghép kênh không gian trong sợi quang kết hợp với kỹ thuật phân tập không gian trong đường truyền vô tuyến để tạo lên các kết nối dung lượng cao cho mạng truy nhập vô tuyến băng rộng đã

được đề xuất trong chương này. Hiệu năng của hệ thống MMW/RoF đơn hướng được đánh giá về mặt dung lượng kênh xét đến ảnh hưởng của đầy đủ hơn các tham số lớp vật lý từ sợi quang, kênh vô tuyến cũng như các nguồn nhiễu cũng được xem xét trong các phân tích.

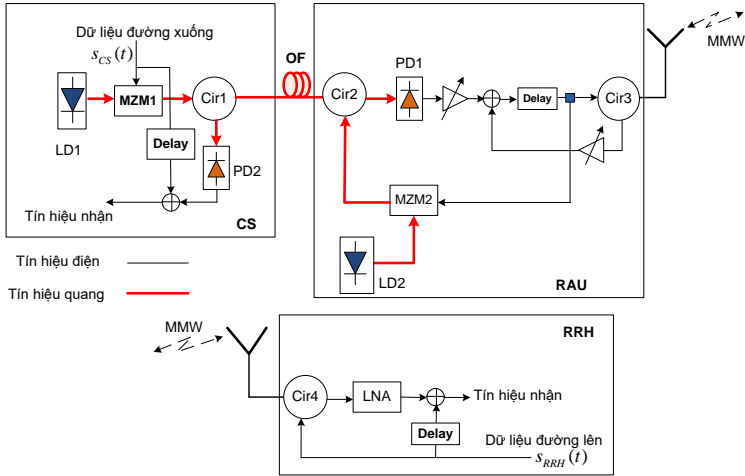
CHƯƠNG 4: ĐỀ XUẤT MÔ HÌNH HỆ THỐNG MMW/RoF CHUYỂN TIẾP SONG HƯỚNG CHO MẠNG TRUY NHẬP VÔ TUYẾN

4.1 GIỚI THIỆU CHUNG

Cho đến nay, đã có nhiều kết quả nghiên cứu về kiến trúc hệ thống RoF đường lên và đường xuống một cách riêng biệt, trong khi kiến trúc hệ thống RoF hai hướng vẫn còn là vấn đề đang được quan tâm nghiên cứu một cách đặc biệt bởi tính ứng dụng của nó trong các mạng thực tế. Sử dụng hai sợi quang hoặc một sợi quang với hai/ba bước sóng khác nhau là các giải pháp đơn giản để cung cấp truyền thông hai hướng. Tuy nhiên, các giải pháp này yêu cầu số lượng sợi quang hoặc bước sóng lớn để hỗ trợ số lượng lớn các BS. Ngoài ra, các nghiên cứu hiện nay chỉ mới đưa ra truyền dẫn song hướng cho liên kết backhaul hoặc fronthaul dựa trên sợi quang. Chi phí và thách thức trong việc lắp đặt sợi quang là các hạn chế đáng kể của các nghiên cứu đó, đặc biệt là trong các khu vực thành thị. Việc sử dụng cáp sợi quang cũng thiếu sự mềm dẻo và không phù hợp trong nhiều ứng dụng và trường hợp như sau các thảm họa lớn. Do vậy, trong chương này, một mô hình hệ thống lai ghép quang – vô tuyến, MMW/RoF, cho kết nối fronthaul của mạng truy nhập vô tuyến để khắc phục được các nhược điểm trên được đề xuất. Trong kiến trúc kết nối fronthaul, CS được kết nối với RAU qua liên kết MMW/RoF trong khi kết nối giữa RAU và RRH dựa trên liên kết vô tuyến sử dụng băng sóng MMW.

Thông thường, tài nguyên vật lý như sợi quang và tần số vô tuyến cần gấp đôi để cung cấp truyền dẫn song công hai hướng. Để giảm các tài nguyên yêu cầu, kỹ thuật chuyển tiếp bán song công hai hướng cho hệ thống lai ghép quang – vô tuyến sử dụng kỹ thuật MMW/RoF, trong đó RAU đóng vai trò làm nút chuyển tiếp giữa CS và RRH, được đề xuất sử dụng. Kiến trúc đề xuất này có hiệu quả về chi phí cũng như yêu cầu chỉ một sợi quang với một bước sóng và một tần số MMW cho truyền dẫn hai hướng cho cả đường lên và đường xuống.

4.2 ĐỀ XUẤT MÔ HÌNH HỆ THỐNG MMW/RoF CHUYỂN TIẾP SONG HƯỚNG CHO MẠNG TRUY NHẬP VÔ TUYẾN



Hình 4.3. Hệ thống fronthaul quang – vô tuyến hai hướng bán song công sử dụng MMW/RoF và ANC

Sơ đồ khối kiến trúc hệ thống fronthaul chuyển tiếp song hướng đề xuất sử dụng công nghệ MMW/RoF được chỉ ra trong hình 4.3.

4.3 KHẢO SÁT HIỆU NĂNG CỦA HỆ THỐNG MMW/RoF CHUYỂN TIẾP SONG HƯỚNG SỬ DỤNG ANC

Trong phần này, hiệu năng của hệ thống MMW/RoF chuyển tiếp song hướng sử dụng ANC đề xuất được phân tích về mặt thông lượng, dưới ảnh hưởng của nhiều tham số lớp vật lý tại bộ thu, sợi quang, và kênh vô tuyến, bao gồm các nguồn nhiễu, tán sắc sợi quang và fading kênh vô tuyến. Hai kỹ thuật chuyển tiếp là giải mã và chuyển tiếp (decode-and-forward -DF) và khuếch đại và chuyển tiếp (amplify-and-forward - AF) được xem xét và so sánh với kỹ thuật chuyển tiếp truyền thống.

Trước tiên tỉ số công suất tín hiệu trên nhiễu cho cả đường lên và đường xuống sẽ được tính toán. Dựa vào các tỉ số SNR đó, hiệu năng hệ thống, về mặt thông lượng, sẽ được phân tích phụ thuộc vào các tham số vật lý nêu trên.

4.3.1 Hệ số kênh

Giả thiết chỉ xét đến suy hao sợi quang và tán sắc sợi quang, hệ số kênh quang được tính như sau:

$$h_1 = \exp(-\alpha L)h_{CD}, \quad (4.1)$$

trong đó, α là hệ số suy hao của sợi quang, L là chiều dài sợi quang giữa CS và RAU. h_{CD} là sự suy giảm công suất tín hiệu do tán sắc sắc thể gây ra, được tính theo công thức 2.34.

Đối với kênh vô tuyến sử dụng băng tần MMW, truyền thông LOS và anten định hướng có hệ số khuếch đại cao được sử dụng, do đó tín hiệu hầu như chỉ chịu ảnh hưởng của suy hao đường truyền. Khi đó, hệ số kênh của liên kết MMW có thể được biểu diễn như sau:

$$h_2 = \frac{G_{Tx}G_{Rx}}{P_L}, \quad (4.2)$$

trong đó, G_{Tx} và G_{Rx} là hệ số khuếch đại của anten phát và thu tương ứng; P_L là suy hao tổng của liên kết vô tuyến, được xác định bởi công thức 2.22.

4.3.2 SNR đường xuống

Tỉ số công suất tín hiệu trên nhiễu của đường xuống được tính như sau:

$$\gamma_d = \frac{h_2 m_1^2 \mathfrak{R}_1^2 P_{CS}^2}{h_2 \sigma_{RAU}^2 + \sigma_{RRH}^2}. \quad (4.8)$$

4.3.3 SNR đường lên

Tỉ số SNR của đường lên được tính như sau:

$$\gamma_u = \frac{(\mathfrak{R}_2 h_1 P_{RAU} m_2)^2 P_{RRH}}{\sigma_{CS}^2}. \quad (4.12)$$

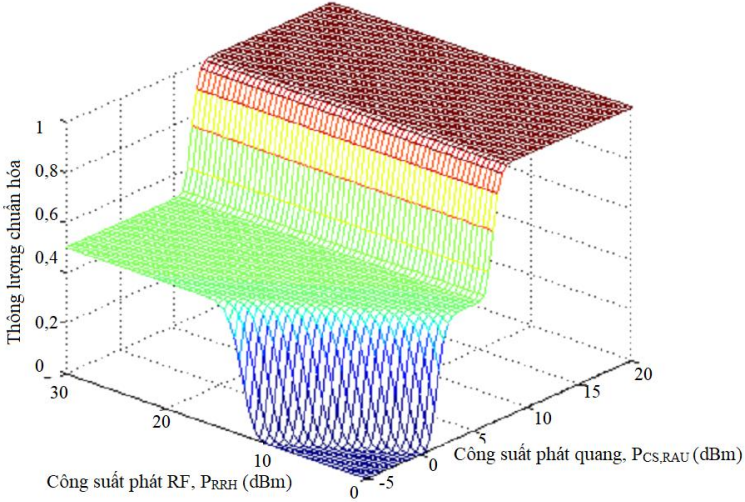
4.3.4 Thông lượng hệ thống

Thông lượng chuẩn hóa của hệ thống ANC sử dụng AF đề xuất được tính bởi:

$$T_n^{ANC} = \frac{1}{2} \left(2 - p_{e-u}^{ANC} - p_{e-d}^{ANC} \right), \quad (4.14)$$

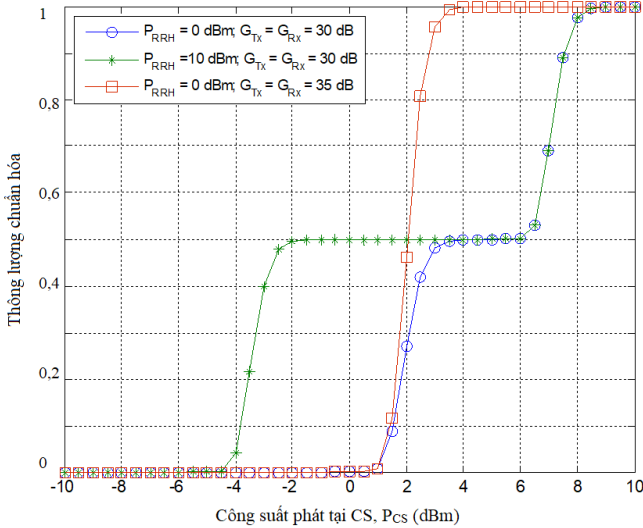
trong đó, T_n^{ANC} là thông lượng chuẩn hóa của hệ thống đề xuất.

4.3.5 Kết quả khảo sát hiệu năng của hệ thống MMW/RoF sử dụng ANC



Hình 4.5. Thông lượng chuẩn hóa phụ thuộc vào công suất phát tại CS và RRH cho hệ thống chuyển tiếp dựa vào ANC với $d = 100$ m, $L = 20$ km và $N_b = 1000$ bit

Kịch bản được đưa ra để khảo sát thông lượng chuẩn hóa của hệ thống đề xuất biến thiên theo cả công suất phát quang và công suất phát vô tuyến. Kết quả của kịch bản này được thể hiện trong hình 4.5. Thông lượng chuẩn hóa được cải thiện khi các công suất phát quang hay vô tuyến tăng. Tuy nhiên, công suất phát vô tuyến tăng chỉ làm ảnh hưởng đến SNR đường lên và do đó thông lượng chuẩn hóa tối đa chỉ là 0.5 khi $P_{CS,RAU}$ nhỏ hơn giá trị ngưỡng (8.5 dBm). Trong khi đó, công suất phát quang ảnh hưởng đến cả SNR đường lên và đường xuống, kết quả là, thông lượng chuẩn hóa tối đa, có giá trị là 1, có thể đạt được khi công suất quang vượt qua mức ngưỡng (từ 8.5 dBm trở lên).



Hình 4.6. Thông lượng chuẩn hóa phụ thuộc vào công suất phát quang cho hệ thống chuyển tiếp dựa trên ANC với $d = 100$ m, $L = 20$ km và $N_b = 1000$ bit

Kịch bản tiếp theo được đưa ra để khảo sát ảnh hưởng của công suất phát quang vào thông lượng chuẩn hóa của hệ thống đề xuất sử dụng chuyển tiếp ANC. Các tham số về độ dài sợi quang, khoảng cách vô tuyến và số bit trong một gói tin giữ nguyên như các kịch bản trước đó. Tham số công suất phát vô tuyến và các hệ số khuếch đại của anten phát và anten thu thay đổi như trên hình 4.6. Kết quả chỉ ra trên đồ thị cho thấy bằng cách tăng công suất phát RF hoặc hệ số anten phát và anten thu, công suất phát quang yêu cầu có thể được giảm đi. Đồ thị cũng chỉ ra rằng với P_{RRH} tăng (hoặc tổng G_{Tx} và G_{Rx}) khoảng 10 dB sẽ được lợi 5 dB về công suất phát quang yêu cầu tại CS và RAU. Tuy nhiên, việc tăng công suất phát vô tuyến và tăng hệ số khuếch đại đóng vai trò khác nhau. Ví dụ, khi $P_{CS,RAU}$ nằm trong dải nào đó (trong kịch bản này là dải $[-4.5, 2]$ dBm), việc tăng các hệ số khuếch đại của các anten không giúp cải thiện thông lượng nhiều như khi tăng công suất phát vô tuyến. Mặt khác, khi $P_{CS,RAU}$ lớn hơn giá trị ngưỡng (2 dBm), tăng các hệ số khuếch đại của các anten sẽ là lựa chọn tốt.

4.4 KẾT LUẬN CHƯƠNG 4

Trong chương này, mô hình và giải pháp cải thiện hiệu năng về mặt thông lượng của kết nối fronthaul của mạng truy nhập vô tuyến sử dụng MMW/RoF kết hợp kỹ thuật chuyển tiếp dựa trên ANC được đề xuất. Trong kiến trúc đề xuất, truyền dẫn hai hướng được triển khai trong cả phân hệ quang và phân hệ vô tuyến với việc sử dụng ANC. Ngoài ra, kiến trúc đề xuất đơn giản vì nó chỉ yêu cầu một sợi quang và một bước sóng cho liên kết quang, cũng như một tần số MMW cho liên kết vô tuyến. Hiệu năng của hệ thống được xem xét dưới ảnh hưởng của nhiều tham số lớp vật lý, bao gồm các nguồn nhiễu, tán sắc sợi quang và fading của kênh vô tuyến. Hai kỹ thuật chuyển tiếp dựa trên ANC và DNC được xem xét và so sánh với kỹ thuật chuyển tiếp truyền thống. Các kết quả khảo sát hiệu năng không chỉ minh chứng cho tính khả thi của hệ thống đề xuất mà còn cho thấy độ lợi về thông lượng khi ANC được sử dụng.

KẾT LUẬN

Nội dung luận án đã đạt được mục tiêu đề ra là phân tích được đồng thời các yếu tố ảnh hưởng chính đến hiệu năng của các hệ thống MMW/RoF với các kịch bản ứng dụng khác nhau và đề xuất giải pháp cải thiện hiệu năng hệ thống khi triển khai trong mạng truy nhập vô tuyến băng rộng. Các kết quả đóng góp mới về khoa học của luận án có thể phân thành ba nhóm như sau:

1. **Xây dựng được mô hình giải tích để đánh giá hiệu năng của hệ thống MMW/RoF dưới tác động đồng thời từ phân hệ truyền dẫn sợi quang RoF và phân hệ truyền dẫn vô tuyến MMW**
2. **Đề xuất giải pháp sử dụng giải pháp ghép kênh không gian trong sợi quang và phân tập không gian trong đường truyền vô tuyến nâng cao hiệu năng của hệ thống MMW/RoF**
3. **Đề xuất sử dụng mã hóa mạng cải thiện hiệu năng của hệ thống MMW/RoF hai hướng bán song công**

Hướng nghiên cứu tiếp theo của luận án sẽ tập trung vào nghiên cứu ứng dụng công nghệ MMW/RoF cho các kịch bản cụ thể có tính cấp thiết cao như mạng truy nhập vô tuyến băng rộng cho đường sắt cao tốc, tàu điện ngầm hay cho các tầng hầm trong tòa nhà.

CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ CỦA TÁC GIẢ

BÀI BÁO KHOA HỌC

- [J1] Phạm Anh Thu, Dang The Ngoc, and Vu Tuan Lam, “Performance Analysis of OFDM Millimeter-wave RoF Systems using APD Receiver”, *VAST Journal of Science and Technology*, vol. 53, no. 2C, pp. 135-147, Dec. 2015. (**Tạp chí Khoa học và Công nghệ - Viện Hàn lâm Khoa học Công nghệ Việt Nam**).
- [J2] Thu A. Pham, Hai Chau Le, Lam T. Vu, and Ngoc T. Dang, “Performance Analysis of Gigabit-Capable Radio Access Networks Exploiting TWDM-PON and RoF Technologies”, *PTIT Journal of Science and Technology on Information and Communications*, vol. 1, no. 2, pp. 78-86, Sept. 2016. (**Tạp chí Khoa học công nghệ Thông tin Truyền thông, Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông**).
- [J3] Phạm Anh Thu (*), Vũ Tuấn Lâm, “Cải thiện hiệu năng hệ thống MMW-RoF sử dụng ghép kênh phân cực và phân tập không gian”, *Journal of Science and Technology on Information and Communications*, pp. 10-16, 2016. (**Tạp chí Khoa học công nghệ Thông tin Truyền thông, Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông**).
- [J4] Thu A. Pham, Hien T. T. Pham, Hai-Chau Le, and Ngoc T. Dang, “Numerical Analysis of the Performance of Millimeter-wave RoF-based Cellular Backhaul Links”, *Journal of Optical Communications*. DOI: 10.1515/joc-2016-0028, June 2016. (**Tạp chí quốc tế ISI và Scopus**).
- [J5] Thu A. Pham, Hien T. T. Pham, Hai-Chau Le, and Ngoc T. Dang, "High-Capacity Mixed Fiber-Wireless Backhaul Networks Using MMW Radio-over-MCF and MIMO" *Optics Communications*, vol. 40, pp. 43-49, Oct. 2017. (**Tạp chí quốc tế ISI với SCI-indexed**).
- [J6] Thu A. Pham, Lam T. Vu, and Ngoc T. Dang, “A Novel Bidirectional Half-Duplex Fronthaul System using MMW-RoF and Analog Network Coding,” *Physical Communication*, vol. 28, pp. 116-122, June 2018. (**Tạp chí quốc tế ISI**).

HỘI NGHỊ KHOA HỌC

- [C1] Thu A. Pham, Hien T. T. Pham, Lam T. Vu, and Ngoc T. Dang, “Effects of Noise and Distortion on Performance of OFDM Millimeter-wave RoF Systems” *In the Proc. of the second IEEE/NAFOSTED Conference on Information and Computer Science (NICS 2015)*, Hochiminh, Vietnam, Sept. 2015, pp. 153-157.
- [C2] Thu A. Pham, Hien T. T. Pham, Hai-Chau Le, and Ngoc T. Dang, “Performance Analysis of MMW-RoF Link in Broadband Optical-Wireless Access Networks” *In the Proc. of the third IEEE/NAFOSTED Conference on Information and Computer Science (NICS 2016)*, Danang, Vietnam, Sept. 2016, pp. 153-158.
- [C3] Thu A. Pham, Nga T. T. Nguyen, Lam T. Vu, and Ngoc T. Dang, “A Novel Hybrid Fiber-Wireless RoF/MMW System using Bidirectional Amplify-and-Forward Relaying,” *In the Proc. of the 2017 IEEE International Conferences on Advanced Technologies for Communications (ATC 2017)*, Quy Nhon, Vietnam, Oct. 2017, pp. 186-191.