

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



NGUYỄN THỊ THU NGÀ

**GIẢI PHÁP TRUYỀN DẪN VÀ CHUYỂN TIẾP TÍN HIỆU
QUANG DỰA TRÊN HẠ TẦNG TRÊN CAO**

Chuyên ngành: Kỹ thuật Viễn thông

Mã số: 9.52.02.08

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

Hà Nội - 2021

Công trình hoàn thành tại:

HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG

Người hướng dẫn khoa học:

PGS.TS. Đặng Thế Ngọc

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 Quốc gia Việt Nam

2. Thư viện Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông

MỞ ĐẦU

Hạ tầng trên cao HAP (High Altitude Platform) được triển khai trên các khinh khí cầu hoặc thiết bị bay không người lái ở độ cao khoảng 17–25 km, đang thu hút được nhiều sự quan tâm nghiên cứu với vai trò như các trạm chuyển tiếp tín hiệu giữa các vệ tinh, giữa vệ tinh và trạm mặt đất hoặc giữa các trạm mặt đất. Cụ thể, HAP được dùng như hạ tầng cho các cảm biến từ xa thu thập dữ liệu về các đối tượng khác nhau mà không cần liên hệ trực tiếp với đối tượng đó. HAP cũng được dùng trong các ứng dụng như bản đồ địa lý, quan sát thiên văn, quân sự, giám sát các sự kiện, giao thông, những vùng nông thôn hẻo lánh, vùng dịch bệnh, thu thập dữ liệu về thời tiết, giám sát điều kiện môi trường như không khí, đất và nước. Sử dụng các HAP có tầm quan trọng lớn với các vùng mật độ dân cư thưa thớt với cơ sở hạ tầng kém hoặc không có. Do vùng phủ lớn, các HAP có thể giữ một vai trò tích cực trong hàng hải và định vị để phát hiện chính xác vị trí của mục tiêu trên mặt đất hoặc trên không.

Ngoài các ứng dụng nêu trên, HAP có thể ứng dụng trong viễn thông để kết nối các trạm mặt đất hoặc chuyển tiếp tín hiệu từ vệ tinh với những ưu điểm có được từ cả truyền thông mặt đất và truyền thông vệ tinh [29]. HAP có vị trí gần như cố định với mặt đất, thuận tiện cho việc duy trì kết nối. HAP có vùng phủ sóng rộng hơn các hệ thống vô tuyến mặt đất và có chi phí phóng, triển khai, nâng cấp và sửa chữa nhỏ hơn hệ thống thông tin vệ tinh, sử dụng năng lượng mặt trời thân thiện với môi trường [53]. Các nghiên cứu gần đây cho thấy HAP đang được coi như một ứng cử viên hứa hẹn được sử dụng để thiết lập các hệ thống truyền thông phục vụ cứu trợ thiên tai, khôi phục thảm họa, cung cấp các ứng dụng và dịch vụ mới trong môi trường đô thị cũng như cung cấp các dịch vụ cơ bản tới các vùng xa xôi hẻo lánh [122]. Các hệ thống truyền thông dựa trên HAP cũng có thể tích hợp vào mạng truy nhập vô tuyến không đồng nhất HetNet trong tương lai để sử dụng làm các kết nối backhaul cho mạng thông tin di động [51]. Các hệ thống truyền thông dựa trên HAP hiện nay chủ yếu dựa trên các kết nối ở tần số vô tuyến RF (Radio Frequency) với tốc độ hạn chế khoảng vài trăm Mb/s. Tốc độ này không thể đáp ứng được nhu cầu của các dịch vụ băng rộng, thời gian thực như video độ phân giải cao hay các kết nối backhaul/truy nhập không dây tốc độ hàng Gigabit/s trong mạng thông tin di động 5G. Để giải quyết vấn đề này giải pháp truyền thông dựa trên HAP với kết nối quang không dây thay thế cho truyền dẫn bằng RF đang dành được nhiều sự quan tâm nghiên cứu.

Với mục đích kết hợp các ưu điểm của HAP trong triển khai nhanh, vận hành và khai thác linh hoạt, chi phí thấp với ưu điểm của công nghệ OWC trong truyền dẫn tốc độ cao, nghiên cứu sinh đã lựa chọn đề tài: **“Giải pháp truyền dẫn và chuyển tiếp tín hiệu quang dựa trên hạ tầng trên cao”** cho luận án nghiên cứu của mình.

Mục tiêu chính của luận án là đề xuất được những giải pháp truyền dẫn và chuyển tiếp tín hiệu quang dựa trên HAP cho các hệ thống OWC nhằm tăng cự ly truyền dẫn và cung cấp khả năng truyền dẫn tốc độ Gigabit trong khi vẫn đảm bảo được yêu cầu về tỉ lệ lỗi bit. Để đạt được mục tiêu đó, luận án cần xây dựng được mô hình giải tích phân tích các ảnh hưởng của môi trường không gian tự do cũng như ảnh hưởng của các loại tạp âm/nhiều lên hiệu năng hệ thống OWC chuyển tiếp dựa trên HAP. Tiếp theo, luận án cần phải đề xuất được các giải pháp cải thiện hiệu năng của hệ thống OWC dựa trên HAP thông qua việc sử dụng các kỹ thuật truyền dẫn và xử lý tín hiệu tiên tiến như điều chế, phân tập, tách sóng và xử lý tín hiệu toàn quang.

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

Chương 1: Tổng quan về truyền thông quang dựa trên HAP

Chương 2: Hệ thống truyền dẫn quang dựa trên HAP với chuyển tiếp O/E/O

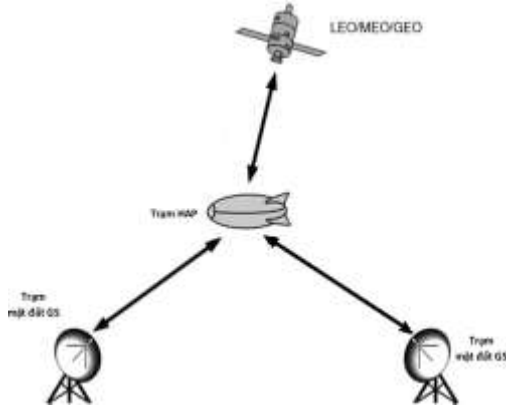
Chương 3: Chuyển tiếp toàn quang đơn hướng dựa trên HAP cho hệ thống OWC

Chương 4: Chuyển tiếp toàn quang song hướng dựa trên HAP cho hệ thống OWC.

CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN VỀ TRUYỀN THÔNG QUANG DỰA TRÊN HAP

1.1 Hệ thống truyền thông quang không dây dựa trên HAP

Sơ đồ khối của hệ thống truyền thông quang không dây dựa trên hạ tầng trên cao (HAP) được thể hiện trên Hình 1.1. Hình vẽ thể hiện 02 kịch bản truyền thông dựa trên HAP bao gồm: (1) hệ thống truyền thông vệ tinh – HAP – trạm mặt đất (GS) và (2) hệ thống truyền thông GS – HAP – GS. Các thành phần chính của hệ thống bao gồm bộ phát quang, trạm chuyển tiếp đặt trên HAP và bộ thu quang.



Hình 1.1 Sơ đồ khối hệ thống truyền thông quang không dây dựa trên HAP.

Bộ phát đặt tại trạm mặt đất và vệ tinh có nhiệm vụ chính là điều chế số liệu bằng gốc vào tín hiệu quang sau đó truyền qua không gian.

Truyền thông quang qua không gian từ mặt đất đến HAP, từ HAP đến vệ tinh và ngược lại thực hiện thông qua kênh truyền dẫn khí quyển. Môi trường khí quyển có tính chất là ngẫu nhiên theo không gian và thời gian. Chính vì vậy, OWC cũng phụ thuộc ngẫu nhiên vào thời tiết và vị trí địa lý. Các yếu tố môi trường khác nhau không thể đoán trước như mây, tuyết, sương mù, mưa v.v..., gây ra sự suy giảm mạnh tín hiệu quang và giới hạn khoảng cách truyền dẫn. Các ảnh hưởng đối với đường lên/đường xuống trong các hệ thống OWC là khác nhau. Các tổn hao gặp phải trong đường lên của OWC là rất lớn so với đường xuống khi chùm tia bắt đầu lan rộng và tích lũy méo tín hiệu quang từ thiết bị đầu cuối mặt đất. Các loại suy hao khi tín hiệu quang truyền qua kênh khí quyển là hấp thụ, tán xạ và nhiễu loạn khí quyển.

Trạm hạ tầng trên cao là các kính khí cầu hoặc máy bay không người lái đặt ở tầng bình lưu. HAP đóng vai trò như một trạm chuyển tiếp tín hiệu giữa hai trạm mặt đất hoặc giữa trạm mặt đất và vệ tinh. Nhiệm vụ của HAP là nhận thông tin từ trạm mặt đất GS-A (hoặc GS-B) chuyển đến, thực hiện chuyển đổi quang điện (O/E), tái tạo xử lý, khuếch đại tín hiệu sau đó thực hiện chuyển đổi điện quang (E/O) và chuyển tiếp đến phía thu GS-B (hoặc GS-A).

Bộ thu được đặt tại các trạm mặt đất GS-A (hoặc GS-B). Bộ thu chuyển đổi tín hiệu quang đầu vào thành tín hiệu điện đầu ra. Trong trường hợp không có khuếch đại đường truyền giữa bộ phát và bộ thu thì bộ thu

cần có độ nhạy thu cao. Có hai kiểu bộ thu quang cơ bản: bộ thu coherent và bộ thu tách sóng trực tiếp (DD).

1.2. Hiệu năng hệ thống OWC dựa trên HAP

Hiệu năng là vấn đề luôn được quan tâm đánh giá trong bất kỳ một hệ thống truyền thông nào. Có rất nhiều các tham số để đánh giá hiệu năng của hệ thống. Trong đó các tham số thường sử dụng như tỉ số tín hiệu trên nhiễu (SNR), tỉ lệ lỗi bit BER, dung lượng kênh C, xác suất/dung lượng dưới ngưỡng... Tuy nhiên, việc lựa chọn tham số nào để đánh giá tùy thuộc vào đặc điểm và ứng dụng của từng hệ thống. Trong luận án, với hệ thống truyền thông quang dựa trên HAP, các tham số nghiên cứu sinh sử dụng là tỉ số tín hiệu trên nhiễu và tỉ lệ lỗi bit.

- *Tỉ số tín hiệu trên nhiễu SNR:*
- *Tỷ lệ lỗi bit (BER)*

1.3. Các công trình nghiên cứu liên quan

Theo tìm hiểu của nghiên cứu sinh, ở Việt Nam hiện tại các nghiên cứu về truyền thông quang không dây chuyển tiếp dựa trên hạ tầng trên cao HAP chưa được quan tâm nhiều.

Trên thế giới, một số các hệ thống truyền thông dựa trên HAP đã được triển khai. Các hướng nghiên cứu chính hiện nay về các hệ thống OWC dựa trên HAP bao gồm:

- 1) *Nghiên cứu các kịch bản triển khai truyền thông quang không dây dựa trên HAP và các vấn đề liên quan.*
- 2) *Nghiên cứu ảnh hưởng của kênh OWC từ đó phân tích, đánh giá và đề xuất các giải pháp cải thiện hiệu năng của hệ thống OWC chuyển tiếp dựa trên HAP.*
- 3) *Nghiên cứu các giải pháp cải thiện hiệu năng hệ thống OWC chuyển tiếp dựa trên HAP.*

1.4. Nhận xét các công trình nghiên cứu liên quan và hướng nghiên cứu của luận án

1.4.1. Nhận xét về công trình nghiên cứu liên quan

Qua khảo sát và phân tích ở trên, nghiên cứu sinh nhận thấy vẫn còn một số vấn đề chưa được đề cập đến trong các nghiên cứu trước đây cụ thể như sau:

a) Hạn chế trong các nghiên cứu về mô hình kênh

Trong các yếu tố chính ảnh hưởng đến hiệu năng của hệ thống truyền thông quang không dây chuyển tiếp dựa trên HAP như đã đề cập ở trên, ảnh hưởng của các tham số đường truyền khí quyển, các điều kiện đường truyền, các loại nhiễu chưa được xem xét một cách đầy đủ và đồng thời trong mỗi công trình nghiên cứu.

b) Hạn chế trong các nghiên cứu về phân tích và đánh giá hiệu năng

Các nghiên cứu trước đây chủ yếu tập trung vào các kỹ thuật điều chế, giải điều chế đơn giản, ít công trình nghiên cứu khảo sát việc sử dụng các kỹ thuật truyền dẫn và xử lý tín hiệu tiên tiến như tách sóng coherent, phân tập không gian, chuyển tiếp đa chặng...

Các nghiên cứu trước đây chủ yếu tập trung vào các hệ thống đơn hướng chuyển tiếp điện hoặc quang. Chưa có công trình công bố liên quan đến việc đề xuất và nghiên cứu khả năng ứng dụng HAP trong mạng song hướng chuyển tiếp toàn quang.

1.4.2. Hướng nghiên cứu của luận án

Trên cơ sở kết quả phân tích các hạn chế của các nghiên cứu liên quan, các hướng nghiên cứu được đề xuất trong luận án này bao gồm

- (1) Xây dựng mô hình giải tích phân tích một cách toàn diện các ảnh hưởng của môi trường không gian tự do cũng như ảnh hưởng của các loại nhiễu lên hiệu năng hệ thống OWC chuyển tiếp dựa trên HAP.
- (2) Đề xuất sử dụng kết hợp đồng thời nhiều giải pháp kỹ thuật như điều chế, phân tập, tách sóng nhằm cải thiện hiệu năng truyền dẫn và chuyển tiếp tín hiệu quang dựa trên HAP. Đặc biệt tập trung vào các kỹ thuật xử lý tín hiệu toàn quang nhằm nâng cao tốc độ xử lý.
- (3) Đề xuất mô hình và nghiên cứu khả năng truyền dẫn và chuyển tiếp toàn quang dựa trên HAP cho các hệ thống OWC đơn hướng và song hướng.

1.5. Kết luận chương 1

Nội dung chương 1 đã trình bày tổng quan về cấu trúc, các phần tử, các tham số hiệu năng và các yếu tố ảnh hưởng lên hiệu năng của hệ thống OWC dựa trên HAP. Ngoài ra, các công trình nghiên cứu trong và ngoài nước liên quan đến hệ thống OWC dựa trên HAP cũng được khảo sát trong chương này. Qua phân tích, đánh giá tình hình nghiên cứu đó, luận án đã đưa ra các hạn chế của các nghiên cứu trước đây. Trên cơ sở các hạn chế

này, hướng nghiên cứu của luận án đã được đề xuất là kết hợp đồng thời nhiều giải pháp kỹ thuật như điều chế, phân tập, tách sóng nhằm cải thiện hiệu năng của hệ thống OWC chuyển tiếp dựa trên HAP, đặc biệt tập trung vào các kỹ thuật xử lý tín hiệu toàn quang nhằm nâng cao tốc độ xử lý. Đồng thời đề xuất mô hình và nghiên cứu khả năng ứng dụng hệ thống OWC chuyển tiếp toàn quang dựa trên HAP cho truyền dẫn đơn hướng và song hướng.

CHƯƠNG 2: HỆ THỐNG TRUYỀN DẪN QUANG DỰA TRÊN HAP VỚI CHUYỂN TIẾP O/E/O

2.1. Mở đầu

Hệ thống truyền thông quang không dây OWC dựa trên HAP có môi trường truyền dẫn hở là môi trường động và rất phức tạp. Các ảnh hưởng của môi trường và nhiễu loạn khí quyển lên búp sóng quang sẽ gây ra tổn hao công suất, biến đổi về biên độ và pha của tín hiệu quang. Do kênh truyền khí quyển có tính chất ngẫu nhiên nên các ảnh hưởng của nó có thể đặc tính hóa bởi các mô hình thống kê. Một trong các mô hình thống kê được đề xuất để mô hình hóa đặc tính của kênh truyền khí quyển là mô hình nhiễu loạn Gamma- Gamma. Các nghiên cứu trong luận án sẽ sử dụng mô hình này để ước tính công suất quang tại phía thu.

2.2. Mô hình kênh OWC

Hai ảnh hưởng chính của kênh khí quyển bao gồm suy hao đường truyền và nhiễu loạn khí quyển [88]. Do đó, trạng thái kênh (h_c) có thể biểu diễn như sau

$$(2.1)$$

$$h_c = h_l h_a$$

trong đó h_l và h_a tương ứng là ảnh hưởng của suy hao đường truyền và nhiễu loạn khí quyển.

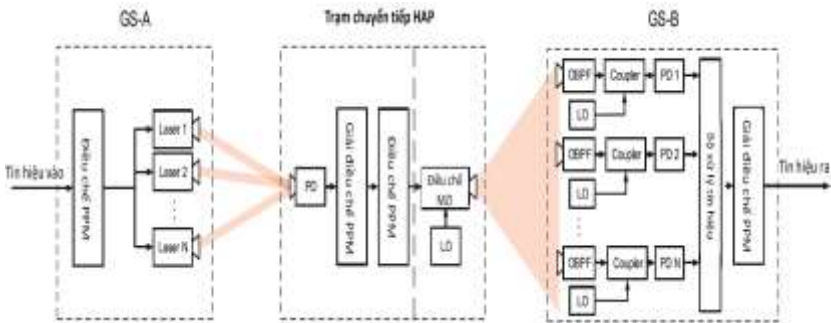
2.3. Hệ thống truyền dẫn OWC dựa trên HAP chuyển tiếp O/E/O

Luận án xem xét hệ thống truyền dẫn OWC dựa trên HAP bao gồm hai GS và một nút chuyển tiếp HAP. Trong đó, một GS nằm gần trạm gốc (BS) của mạng thông tin di động và một GS khác ở phía mạng lõi, đóng vai trò truyền tín hiệu từ BS đến mạng lõi thông qua HAP và ngược lại. Mô hình hệ thống này sẽ là một giải pháp backhaul đầy hứa hẹn để cung cấp

cho mạng truy nhập không dây tốc độ cao cho vùng nông thôn, các khu vực đảo và các khu vực bị cô lập do thiên tai.

Các nghiên cứu trước đây thường phân tích hiệu năng của các hệ thống OWC chuyển tiếp dựa trên HAP với các cấu hình đơn giản sử dụng điều chế OOK, điều chế cường độ/tách sóng trực tiếp IM/DD và một đầu vào một đầu ra SISO. Luận án đề xuất áp dụng một số kỹ thuật để cải thiện hiệu năng cho hệ thống OWC dựa trên HAP với chuyển tiếp O/E/O. Đầu tiên, M -PPM được sử dụng do lợi ích về mặt hiệu quả năng lượng. Thứ hai, các kỹ thuật phân tập không gian với nhiều đầu vào đơn đầu ra MISO cho đường lên (UL) và nhiều đầu ra đơn đầu vào SIMO cho đường xuống DL được sử dụng để đơn giản hóa kiến trúc HAP, trong khi vẫn giữ được khả năng giảm ảnh hưởng của nhiễu loạn. Thứ ba, máy thu tách sóng coherent được trang bị tại các GS để đạt được độ nhạy thu cao. Tại nút chuyển tiếp HAP sử dụng kỹ thuật tách tín hiệu và chuyển tiếp (DF).

2.3.1. Mô hình hệ thống đề xuất



Hình 2.4 Sơ đồ khối hệ thống OWC chuyển tiếp dựa trên HAP chuyển tiếp ODAF và tách sóng coherent.

Tại GS-A, dữ liệu nhị phân đầu vào được điều chế PPM tại bộ điều chế PPM. Tại nút chuyển tiếp dựa trên HAP, tín hiệu quang từ N nguồn laser được kết hợp ở thấu kính thu và chuyển đổi thành dòng quang điện nhờ vào PD. Tại máy thu GS-B, N thấu kính thu được sử dụng để thu tín hiệu quang. Tín hiệu quang kết hợp được chuyển đổi thành tín hiệu điện tại PD.

2.3.2. Phân tích hiệu năng

BER đầu cuối – đầu cuối (P_{e2e}) giữa hai GS của hệ thống OWC chuyển tiếp dựa trên HAP phụ thuộc vào hiệu năng BER của cả UL và DL và được xác định như sau:

$$P_{e2e} = 1 - (1 - P_e^{(UL)})(1 - P_e^{(DL)}) \quad (2.18)$$

$$P_e^{(UL/DL)} = \frac{M}{2(M-1)} P_{e-sym}^{(UL/DL)} \quad (2.19)$$

$P_{e-sym}^{(UL)}$ có thể được tính như sau:

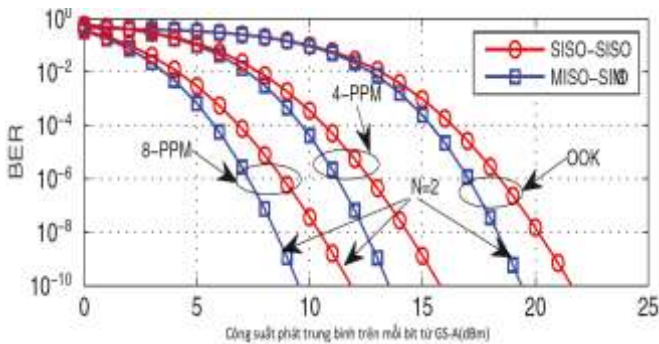
$$P_{e-sym}^{(UL)} \leq (M-1) \int_0^\infty f_{h_a}(h_a^{(u)} | \alpha_T, \beta_T, \Omega_T) \times Q\left(\frac{\Re P_t^{(GS)} h_l^{(u)} h_a^{(u)}}{N\sigma_b}\right) dh_a^{(u)} \quad (2.22)$$

$P_{e-sym}^{(DL)}$ được xác định như sau:

$$\begin{aligned} P_{e-sym}^{(DL)} &\leq (M-1) \int_0^\infty f_{h_{a,k}}(\overline{h_{a,k}^{(u)}} | \alpha, \beta, \Omega) \\ &\quad \times Q\left(\frac{\sum_{k=1}^N 2 \Re \sqrt{P_{s,k} P_{LO}}}{\sigma_n}\right) d\overline{h_{a,k}^{(u)}} \\ &\leq (M-1) \int_0^\infty f_{h_{a,k}}(\overline{h_{a,k}^{(u)}} | \alpha, \beta, \Omega) \\ &\quad \times Q\left(\frac{2 \Re \sqrt{P_t^{(HAP)} h_l^{(d)} P_{LO}} \sum_{k=1}^N \sqrt{h_{a,k}^{(d)}}}{\sigma_n}\right) d\overline{h_{a,k}^{(d)}} \end{aligned} \quad (2.30)$$

2.3.3. Kết quả khảo sát hiệu năng

Hình 2.5 (a) khảo sát hiệu năng BER theo công suất phát trung bình trên mỗi bit từ GS-HAP dựa trên hệ thống chuyển tiếp sử dụng các sơ đồ OOK, 4-PPM và 8-PPM với SISO/SISO và 2-MISO/2-SIMO cho UL/DL. Công suất phát từ HAP và công suất LO được cố định tương ứng là $P_b^{(HAP)} = 9$ dBm và $P_{LO} = 0$ dBm. Ta thấy rằng công suất phát trung bình từ GS để đạt được BER yêu cầu giảm khi sử dụng M -arry PPM thay vì dùng OOK. Xem xét trường hợp của UL/DL dựa trên SISO/SISO với BER là 10^{-6} , công suất phát trung bình cần thiết trên mỗi bit từ GS là 18,4 dBm đối với trường hợp OOK trong khi nó chỉ là 12,7 dBm cho trường hợp 4-PPM. Bằng cách sử dụng mức điều chế cao hơn như 8-PPM, có thể đạt được mức công suất phát yêu cầu từ GS.



Hình 2.5 Hiệu năng BER theo công suất phát trung bình trên mỗi bit từ GS - HAP với các mức điều chế và số thấu kính thu phát khác nhau.

2.4 Kết luận chương 2

Chương 2 đã trình bày chi tiết về mô hình kênh của hệ thống OWC dựa trên HAP với suy hao đường truyền và nhiễu loạn khí quyển. Nội dung chương 2 cũng đề xuất mô hình hệ thống OWC dựa trên HAP với chuyển tiếp O/E/O sử dụng kết hợp điều chế PPM, phân tập không gian và tách sóng coherent. Kết quả phân tích cho thấy nhờ áp dụng kết hợp các phương pháp này đã nâng cao hiệu năng BER, tăng cự ly truyền dẫn đồng thời giảm được công suất tiêu thụ tại HAP. Mô hình đề xuất là giải pháp cho mạng

truy nhập quang không dây tốc độ cao thực hiện kết nối giữa trạm gốc và mạng lõi khi có sự cố không lắp đặt được cáp quang.

CHƯƠNG 3: CHUYỂN TIẾP TOÀN QUANG ĐƠN HƯỚNG DỰA TRÊN HAP CHO HỆ THỐNG OWC

3.1. Đặt vấn đề

Như đã trình bày trong chương 2, hạ tầng trên cao HAP đóng vai trò là nút chuyển tiếp, thực hiện khuếch đại hoặc tái tạo tín hiệu nhận được trước khi chuyển tiếp đến nút tiếp theo. Tuy nhiên, với chuyển tiếp O/E/O, tín hiệu quang được chuyển đổi thành tín hiệu điện sau đó được khuếch đại trước khi chuyển đổi trở lại miền quang và truyền đến nút tiếp theo [26], [22]. Kỹ thuật chuyển tiếp này giới hạn tốc độ xử lý tín hiệu. Nó cũng đòi hỏi các thành phần bổ sung cho chuyển đổi quang/điện/quang, dẫn đến kiến trúc của HAP phức tạp. Trong trường hợp chuyển tiếp toàn quang, tín hiệu được xử lý trong miền quang và sau đó chuyển tiếp đến nút tiếp theo. Kỹ thuật chuyển tiếp này cung cấp tốc độ dữ liệu cao với sự trợ giúp của các bộ lọc và bộ khuếch đại quang, được gọi là kỹ thuật khuếch đại và chuyển tiếp toàn quang (OAF) [74], [88]. Trong chương này, luận án đề xuất 02 kịch bản truyền dẫn và chuyển tiếp toàn quang dựa trên HAP. Trong đó, kỹ thuật tái tạo và chuyển tiếp toàn quang được áp dụng cho cả hai kịch bản.

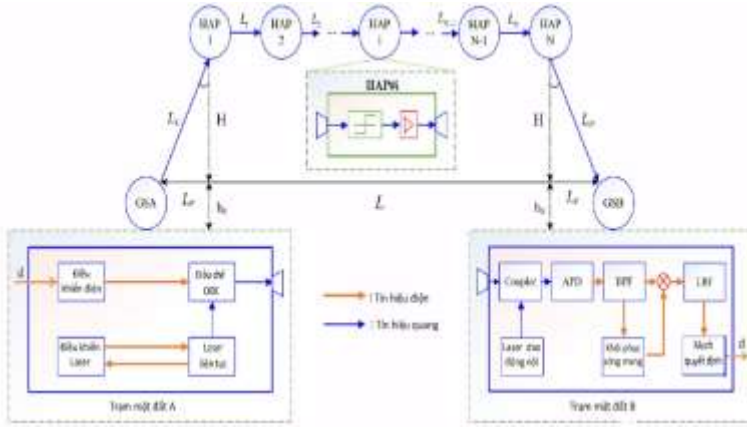
Kịch bản thứ nhất: Đề xuất mô hình hệ thống OWC kết nối 02 trạm mặt đất với sự hỗ trợ chuyển tiếp đa chặng toàn quang nhiều HAP. Đồng thời, bộ thu tách sóng coherent được sử dụng để tăng độ nhạy thu, giảm công suất phát yêu cầu hay tăng cự ly truyền dẫn giữa hai trạm mặt đất.

Kịch bản thứ hai: Đề xuất mô hình hệ thống OWC kết nối một vệ tinh ở quỹ đạo thấp với một trạm mặt đất, trong đó tín hiệu được chuyển tiếp toàn quang thông qua một HAP. Trong kịch bản này, ngoài việc đánh giá hiệu năng BER của hệ thống, mô hình mô phỏng và đánh giá chất lượng truyền dẫn ảnh cũng được thực hiện.

3.2. Hệ thống OWC chuyển tiếp toàn quang dựa trên nhiều HAP và tách sóng coherent

3.2.1. Mô hình thiết kế hệ thống OWC đa chặng dựa trên nhiều HAP

Hình 3.1 mô tả sơ đồ của hệ thống OWC đa chặng dựa trên nhiều HAP được đề xuất bao gồm hai trạm mặt đất, được ký hiệu là trạm GS-A, trạm GS-B và các trạm chuyển tiếp HAP.



Hình 3.1. Sơ đồ hệ thống OWC chuyển tiếp dựa trên nhiều HAP.

3.2.2. Phân tích hiệu năng hệ thống

BER đầu cuối- đầu cuối

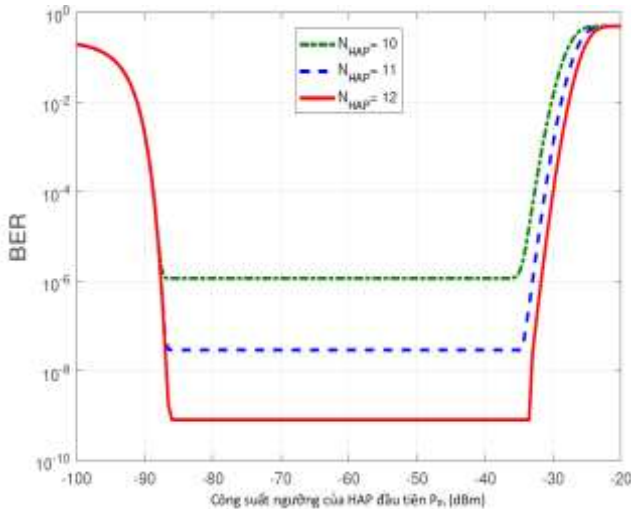
Xác suất truyền chính xác từ đầu cuối tới đầu cuối được xác định như sau:

$$\begin{aligned}
 P_c &= P_0 \left(1 - P_{A-H_1}(1/0)\right) \left(1 - P_{H_i-H_{i+1}}(1/0)\right)^{N_{HAP}-1} \\
 &\quad \times \left(1 - P_{H_N-B}(1/0)\right) \\
 &+ P_1 \left(1 - P_{A-H_1}(0/1)\right) \left(1 - P_{H_i-H_{i+1}}(0/1)\right)^{N_{HAP}-1} \\
 &\quad \times \left(1 - P_{H_N-B}(0/1)\right)
 \end{aligned} \tag{3.21}$$

3.2.3. Kết quả khảo sát hiệu năng hệ thống

Trong hình 3.2 khảo sát sự thay đổi của hiệu suất BER so với công suất ngưỡng P_{th} của HAP đầu tiên với $P_t^\Sigma = 30$ dBm, $P_{LO} = 0$ dBm, $L = 200$ km, $P_{th}^{(i)} = -50$ dBm. Ta thấy rằng đường cong BER được chia thành ba

đoạn. Trong đoạn đầu tiên, BER giảm khi công suất ngưỡng tăng. Đoạn này tương ứng với dải công suất ngưỡng, trong đó xác suất lỗi phát bit 0 và thu bit 1 chiếm ưu thế. Do đó, sự gia tăng của công suất ngưỡng giúp giảm BER. Đoạn thứ hai là phạm vi không đổi của BER, cũng là giá trị thấp nhất, BER sàn. Công suất ngưỡng tương ứng với đoạn này gọi là các giá trị ngưỡng tối ưu. Đoạn cuối cùng, BER tăng theo công suất ngưỡng. Điều này được giải thích rằng BER bị chi phối bởi xác suất lỗi phát bit 1 và thu bit 0 cho phạm vi giá trị công suất ngưỡng cao. Từ hình này, ta tìm thấy phạm vi tối ưu của các giá trị công suất ngưỡng nên đặt cho HAP đầu tiên để BER chạm sàn. Cụ thể hơn, phạm vi tối ưu của các giá trị công suất ngưỡng là từ -86 dBm đến -35 dBm.



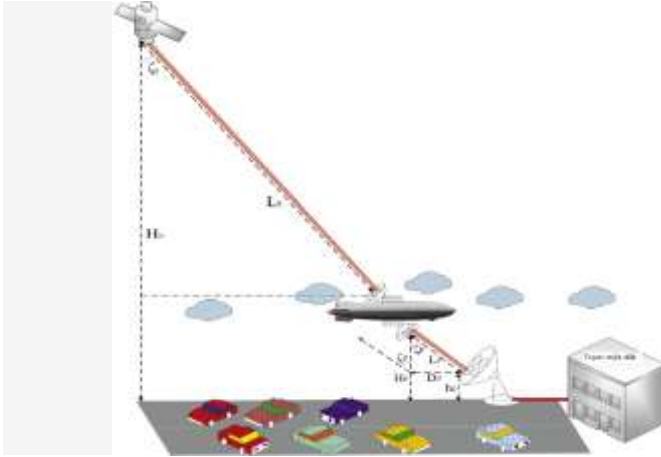
Hình 3.3 BER theo công suất ngưỡng của HAP P_{th} đầu tiên với $P_t^\Sigma = 30$ dBm, $P_{LO} = 0$ dBm, $L = 200$ km, $P_{th}^{(t)} = -50$ dBm.

3.3. Hệ thống OWC vệ tinh-mặt đất chuyển tiếp toàn quang dựa trên HAP

3.3.1. Mô hình thiết kế hệ thống OWC vệ tinh- mặt đất chuyển tiếp dựa trên HAP

Hệ thống OWC vệ tinh-mặt đất chuyển tiếp dựa trên HAP, bao gồm ba phần: vệ tinh LEO tại độ cao 610 km so với bề mặt Trái đất đóng vai trò như một máy phát, HAP hoạt động như một nút chuyển tiếp và trạm

mặt đất GS. Tín hiệu quang từ vệ tinh LEO được chuyển tiếp trong miền quang tại HAP trước khi được chuyển tiếp đến GS. Để đồng chỉnh HAP với các bộ thu phát, HAP sử dụng thiết bị định hướng, bắt và bám PAT.



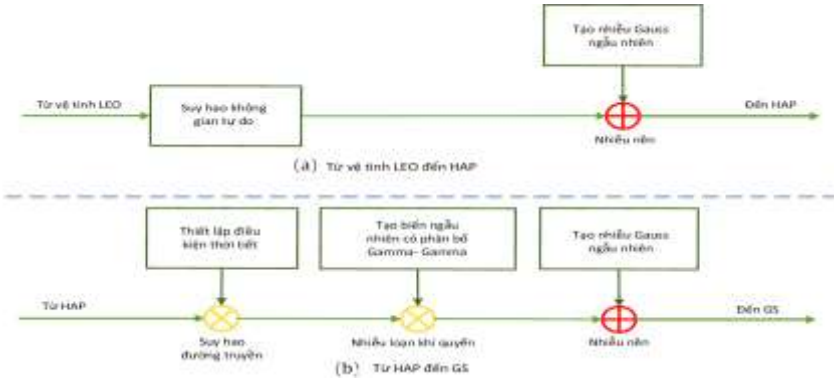
Hình 3.6 Sơ đồ khối của hệ thống OWC LEO- mặt đất chuyển tiếp dựa trên HAP

3.3.2. Phân tích hiệu năng hệ thống

BER đầu cuối- đầu cuối

$$\begin{aligned}
 \text{BER}_{e2e}^{(DAF)} &\leq 1 - \frac{1}{2} \left[1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{P_{th}}{\sqrt{N_0^{(P)}}} \right) \right] [1 - P_{P-G}(\gamma)] \\
 &\quad - \frac{1}{2} \left[1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{P_r^{(P)} - P_{th}}{\sqrt{N_0^{(P)}}} \right) \right] [1 - P_{P-G}(\gamma)] \\
 &\quad - \frac{1}{4} \operatorname{erfc} \left(\frac{P_{th}}{\sqrt{N_0^{(P)}}} \right) P_{P-G}(\gamma) \\
 &\quad - \frac{1}{4} \operatorname{erfc} \left(\frac{P_r^{(P)} - P_{th}}{\sqrt{N_0^{(P)}}} \right) P_{P-G}(\gamma)
 \end{aligned} \tag{3.55}$$

3.3.3. Mô hình mô phỏng hệ thống



Hình 3.8a. Mô hình mô phỏng M-C cho kênh OWC từ vệ tinh LEO đến HAP, b. Mô hình mô phỏng M-C cho kênh OWC từ HAP- GS

Hình 3.8 (a) cho thấy mô hình mô phỏng M-C cho kênh OWC từ vệ tinh LEO đến HAP. Tín hiệu máy phát $d[n]$ từ vệ tinh LEO được đưa vào khối suy hao không gian tự do và sau đó được cộng với nhiễu nền từ khối tạo nhiễu Gauss ngẫu nhiên. Sau khi tín hiệu thu được khuếch đại nhờ thấu kính thu, dữ liệu từ vệ tinh LEO ($d_{[n]}^H$) được so sánh với công suất ngưỡng P_{th} của OHL để xác định $d_{[n]}^{OHL}$. Tại bộ khuếch đại quang, $d_{[n]}^{OHL}$ được khuếch đại trở thành $d^p[n]$ và sau đó được phát đến GS với công suất phát $P_t^{(P)}$ nhân với hệ số khuếch đại của thấu kính TX của HAP thông qua kênh OWC giữa HAP và GS được mô tả trong hình 3.8(b).

Áp dụng cho truyền hình ảnh

Mô phỏng truyền hình ảnh từ vệ tinh LEO đến GS có thể được thực hiện theo các bước sau:

Bước 1: Hình ảnh gốc được chuyển đổi thành chuỗi dữ liệu bit. Sau đó được điều chế bởi bộ điều chế OOK và phát đến HAP.

Bước 2: Tín hiệu thu được tại HAP được tách bởi OHL và khuếch đại bởi bộ khuếch đại quang. Tiếp theo, tín hiệu được phát cho GS.

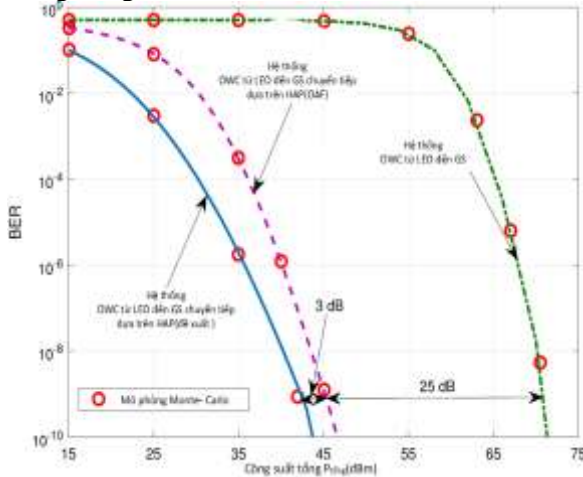
Bước 3: Tại GS, dòng quang được chuyển đổi quang điện nhờ APD. Sau đó, một mạch quyết định sẽ so sánh dòng quang điện với mức ngưỡng để quyết định bit "1" hoặc bit "0".

Bước 4: Hình ảnh phát đi được xây dựng lại từ bit được tách và so sánh với hình ảnh gốc để ước tính BER như sau [46]

$$BER = \frac{\sum_{mnq} [(x_{mn})_q]_2 \oplus [(y_{mn})_q]_2}{M_p \times N_p \times p} \quad (3.56)$$

3.3.4. Kết quả khảo sát hiệu năng hệ thống

Trong hình 3.11, đã đưa ra các ưu điểm của hệ thống chuyển tiếp dựa trên ODAF so với hệ thống chuyển tiếp dựa trên OAF và hệ thống WC LEO – mặt đất không dùng HAP.



Hình 3.11 BER theo công suất phát của hệ thống OWC LEO – mặt đất chuyển tiếp dựa trên HAP so với hệ thống OWC LEO – mặt đất thông thường

Kết quả chất lượng hình ảnh

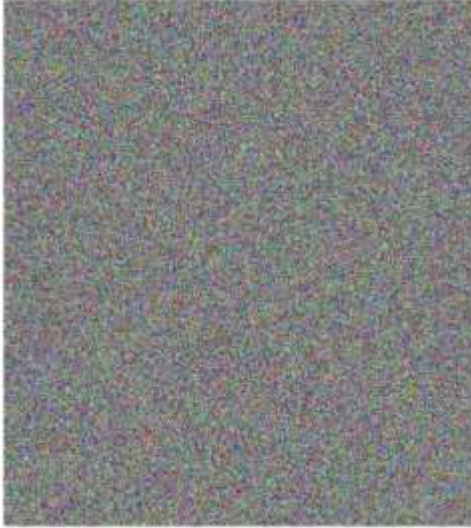
Luận án sử dụng hình ảnh của một vụ cháy rừng được vệ tinh Landsat 8 LEO của NASA chụp lại (hình 3.18 [103]) làm hình ảnh gốc để mô phỏng. Hình ảnh có được bằng mô phỏng M-C. Hình 3.19 cho thấy hình ảnh khôi phục được truyền bởi hệ thống thông thường mà không cần chuyển tiếp trong khi hình 3.20 là hình ảnh được xây dựng lại trong hệ

thống đề xuất. Sự cải thiện hiệu năng của hệ thống đề xuất so với hệ thống OWC LEO - mặt đất thông thường có thể được nhìn thấy rõ ràng trong những hình ảnh này.

Với tổng công suất phát là 35 dBm, hình ảnh nhận được tại GS (xem hình 3.19) trong hệ thống thông thường không thể nhìn thấy do BER cao 0,4970 làm cho hầu hết tất cả các pixel là lỗi. Ngược lại, hình ảnh được khôi phục trong hệ thống đề xuất thể hiện trong hình 3.20 vẫn có thể được nhận ra nhờ sử dụng chuyển tiếp toàn quang ODAF dựa trên HAP.



Hình 3.18 Hình ảnh gốc để mô phỏng.



Hình 3.19 Hình ảnh khôi phục được truyền bởi hệ thống thông thường với công suất phát là 35 dBm



Hình 3.20 Hình ảnh được xây dựng lại trong hệ thống đề xuất với công suất phát là 35 dBm.

3.4. Kết luận chương 3

Nội dung chương 3 đã trình bày các đóng góp của luận án trong việc đề xuất hệ thống truyền thống OWC chuyển tiếp toàn quang đơn hướng dựa trên HAP. Mô hình đầu tiên đề xuất trong chương là mạng truyền dẫn quang đa chặng dựa trên HAP chuyển tiếp toàn quang và tách sóng Coherent. Chuyển tiếp toàn quang giúp đơn giản kiến trúc, giảm công suất tiêu thụ của HAP, máy thu Coherent giúp tăng độ nhạy của máy thu. Ngoài ra, việc sử dụng chuyển tiếp đa chặng dựa trên HAP giúp tăng được khoảng cách truyền dẫn. Mô hình thứ hai là hệ thống OWC LEO đến mặt đất chuyển tiếp dựa trên HAP. Chương 3 cũng đã khảo sát hiệu năng BER theo các thông số hệ thống khác nhau bao gồm: công suất ngưỡng của các OHL, hệ số suy hao, góc thiên đỉnh và khoảng cách truyền dẫn. Tính khả thi của hệ thống đề xuất đã được chứng minh qua các kết quả BER thấp và tốc độ dữ liệu cao (lên đến 10 Gb/s).

CHƯƠNG 4: CHUYỂN TIẾP TOÀN QUANG SONG HƯỚNG DỰA TRÊN HAP CHO HỆ THỐNG OWC

4.1. Đặt vấn đề

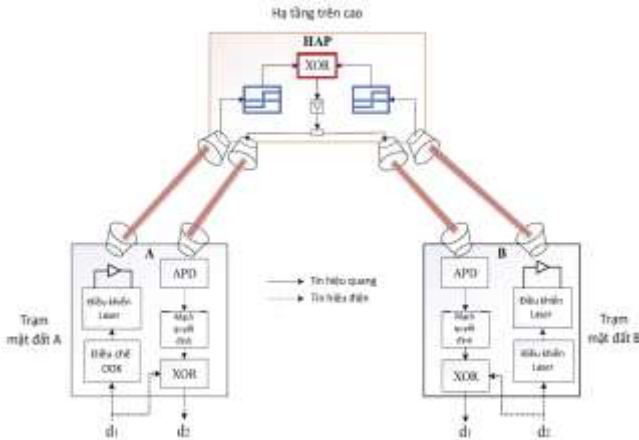
Thông thường, sợi quang được sử dụng cho các mạng backhaul băng thông rộng [39], cung cấp các kết nối tốc độ dữ liệu cao giữa các trạm thu phát BTS và mạng lõi (CN) của các mạng di động thế hệ tiếp theo. Tuy nhiên, nếu xảy ra các thảm họa như động đất, lũ lụt, sợi quang có thể bị đứt và thông tin liên lạc sẽ bị gián đoạn. Việc hàn nối, sửa chữa các sợi bị hỏng khi có nhiều vật cản từ các tòa nhà bị sập, cây cối, v.v ... sẽ rất khó khăn và mất thời gian. Do đó, để đối phó với những tình huống khó khăn này và kế thừa những lợi thế của chuyển tiếp ORF, luận án đề xuất mạng quang không dây OWC chuyển tiếp song hướng toàn quang băng thông rộng dựa trên HAP cho mạng lưới backhaul, nơi hai GS nằm gần trạm gốc BTS và CN đóng vai trò trong việc truyền tín hiệu từ BTS đến CN thông qua HAP và ngược lại.

4.2. Hệ thống truyền dẫn và chuyển tiếp toàn quang song hướng dựa trên HAP

4.2.1. Mô hình hệ thống

Sơ đồ khối của hệ thống đề xuất bao gồm hai GS (trạm A và trạm

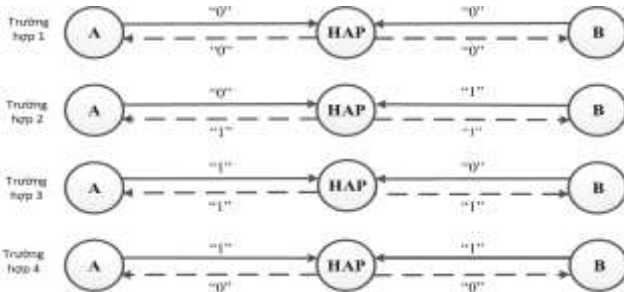
B) và trạm chuyển tiếp được đặt trên HAP như trong hình 4.2.



Hình 4.2 Sơ đồ khối của hệ thống

4.2.2. Phân tích hiệu năng hệ thống

Trong tuyến OWC đường lên, OHL tại HAP có thể quyết định sai giữa bit “1” và bit “0”, do ảnh hưởng của nhiễu nền do đó xảy ra lỗi. Tương tự, tại các GS (nút A và nút B), tác động của nhiễu nỏ APD và nhiễu nhiệt đến tín hiệu thu được có thể gây ra lỗi khi tín hiệu đi qua mạch quyết định để xác định bit “1” hoặc bit “0”. Tất cả các trường hợp có thể xảy ra trong khi trao đổi dữ liệu nhị phân giữa nút A và nút B được hiển thị trong hình 4.3 và giải thích như sau:



Hình 4.3 Bốn trường hợp xảy ra khi phát 2 bit từ 2 GS

Để làm rõ ảnh hưởng của từng đường truyền OWC, luận án sẽ phân tích xác suất lỗi đối với đường lên OWC từ mặt đất đến HAP và sau đó cho đường xuống OWC từ HAP đến mặt đất riêng biệt.

a. Đường lên từ mặt đất đến HAP

Đường truyền OWC được sử dụng để truyền dữ liệu từ nút A và nút B đến HAP. Xác suất lỗi của đường lên OWC chỉ phụ thuộc vào mức ngưỡng P_{th} của OHL. Giả sử rằng hệ thống đề xuất là đối xứng, tức là, cùng một công suất phát trung bình được ký hiệu là $P_t^{(X)} = P_t^{(A)} = P_t^{(B)}$ được truyền từ mỗi GS.

b. Đường xuống từ HAP đến GS

Không giống như cách tính xác suất lỗi đối với đường lên từ trạm mặt đất đến HAP, với đường xuống OWC từ HAP đến GS, chúng ta cần xem xét không chỉ có nhiễu nền mà còn có nhiễu nỏ APD và nhiễu nhiệt được tạo ra từ bộ thu. Hơn nữa, mức ngưỡng của mạch quyết định cũng ảnh hưởng đến việc quyết định bit “1” hoặc bit “0” trong miền điện.

a. BER đầu cuối- đầu cuối

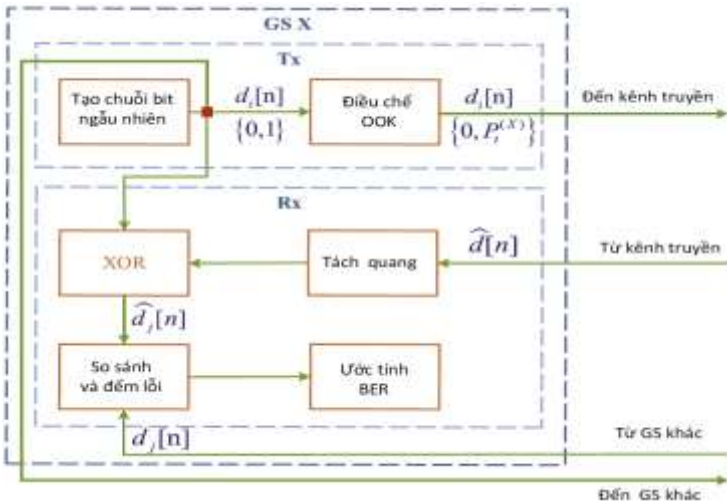
Giả sử rằng hệ thống song hướng, BER_{e2e} tại nút A và nút B được xác định theo cách tương tự và xác suất lỗi của mỗi hướng truyền là như nhau. Để đơn giản, xác suất phát bit “1” và “0” của mỗi trạm mặt đất là bằng nhau. Vì thế, P xác định như sau:

$$P_{00} = P_{01} = P_{10} = P_{11} = \frac{1}{4}$$

Dựa vào công thức (4.15) và công thức (4.25) BER đầu cuối- đầu cuối bằng $(1 - P_c)$ được tính như sau:

$$\begin{aligned}
 \text{BER}_{e2e} \leq 1 - & \left[\frac{1}{4} [1 - P_{X-P}(1/0)]^2 [1 - P_{X-P}(y_1)] \right. \\
 & + \frac{1}{4} [1 - P_{X-P}(1/0)] [1 - P_{X-P}(0/1)] [1 - P_{P-X}(y_1)] \\
 & + \frac{1}{4} [1 - P_{X-P}(0/1)] [1 - P_{X-P}(1/0)] [1 - P_{P-X}(y_1)] \\
 & \left. + \frac{1}{4} [1 - P_{X-P}(0/1)]^2 [1 - P_{P-X}(y_1)] \right]
 \end{aligned} \tag{3.55}$$

4.2.3. Mô hình mô phỏng hệ thống



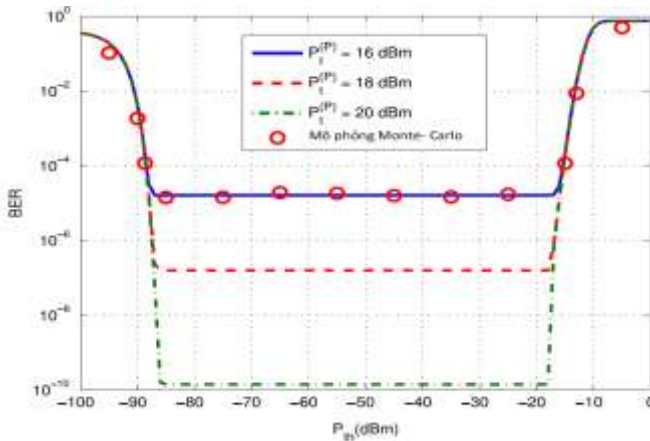
Hình 4.4 Mô hình mô phỏng Monte-Carlo cho GS.

Quá trình mô phỏng M-C cũng được cung cấp chi tiết trong hình 4.4 minh họa mô hình mô phỏng của GS X ($X \in \{A, B\}$). Trong pha đầu tiên, một chuỗi bit ngẫu nhiên $d_i[n]$ ($i = 1$ hoặc 2) được tạo bởi bộ tạo chuỗi bit ngẫu nhiên. Sau đó, nó được điều chế bằng cách sử dụng bộ điều

chế OOK để tạo thành tập hợp các giá trị $P_t^{(X)}$ và 0 tương ứng cho bit “1” cho bit “0”. Tiếp theo, $d_i[n]$ sẽ được phát tới HAP thông qua kênh truyền OWC.

4.2.4. Kết quả khảo sát hiệu năng hệ thống

Trong hình 4.7, hiệu năng BER được khảo sát theo công suất ngưỡng với $P_b = 3,6125 \times 10^{-14}$ W và $P_t^{(X)} = 30$ dBm. Các giá trị của công suất phát từ HAP là 16 dBm, 18 dBm và 20 dBm. Sự tồn tại của các vùng tối ưu của công suất ngưỡng P_{th} khi BER có giá trị tối thiểu, có thể được nhận ra dễ dàng cho các công suất khác nhau. Ví dụ: khi $P_t^{(P)} = 20$ dBm, ngưỡng công suất tối ưu có thể là một trong những giá trị trong khoảng từ -86 dBm đến -18 dBm. Nếu chúng ta giảm $P_t^{(P)}$, hiệu năng BER mức ngưỡng tối ưu sẽ giảm, tuy nhiên, các đường cong xuống và đường cong lên của BER với $P_t^{(P)}$ khác nhau bị chồng lên nhau. Hiện tượng này xảy ra vì sự tăng của $P_t^{(P)}$ chỉ ảnh hưởng đến xác suất lỗi của các đường xuống và không có ảnh hưởng đến xác suất lỗi của đường lên dẫn đến BER sàn và bị chi phối bởi P_{th} tại HAP.



Hình 4.7 BER theo công suất ngưỡng P_{th} với các giá trị khác nhau của công suất phát từ HAP và $P_b = 3,6125 \times 10^{-14}$ W; $P_t^{(X)} = 30$ dBm.

4.3. Kết luận chương 4

Nội dung chương 4 đã trình bày các đóng góp của luận án trong

việc đề xuất hệ thống truyền thông OWC chuyển tiếp song hướng sử dụng mã hóa mạng cho mạng backhaul băng rộng dựa trên HAP. Trong chương cũng xây dựng biểu thức tính BER đầu cuối – đầu cuối cho kết nối từ hai GS đến HAP qua kênh nhiễu loạn Gamma-Gamma. Tính khả thi của hệ thống đề xuất đã được chứng minh qua các kết quả BER thấp và tốc độ dữ liệu cao (lên đến 10 Gb/s). Khảo sát hiệu năng BER theo các thông số hệ thống khác nhau bao gồm: công suất ngưỡng của các OHL, hệ số suy hao, góc thiên đỉnh và khoảng cách truyền dẫn. Các kết quả tính toán số và kết quả mô phỏng này đã cung cấp các thông tin hữu ích cho việc thiết kế hệ thống như việc lựa chọn dải tối ưu của công suất ngưỡng, độ cao của HAP, góc thiên đỉnh và khoảng cách trực tiếp giữa hai nút GS.

KẾT LUẬN

Nội dung luận án đã đạt được mục tiêu đề ra là nghiên cứu giải pháp truyền dẫn và chuyển tiếp tín hiệu quang dựa trên hạ tầng trên cao HAP. Các kết quả đóng góp mới về khoa học của luận án có thể phân thành ba nhóm như sau:

1. **Đề xuất giải pháp cải thiện hiệu năng truyền dẫn quang dựa trên HAP với chuyển tiếp O/E/O**
2. **Đề xuất mô hình thiết kế và xây dựng mô hình giải tích đánh giá hiệu năng hệ thống truyền dẫn và chuyển tiếp toàn quang đơn hướng dựa trên HAP**
3. **Đề xuất mô hình thiết kế và xây dựng mô hình giải tích đánh giá hiệu năng hệ thống truyền dẫn và chuyển tiếp toàn quang song hướng dựa trên HAP**

Hướng nghiên cứu tiếp theo của luận án sẽ tập trung vào giải pháp truyền dẫn tín hiệu quang không dây dựa trên các thiết bị bay tầm thấp LAP, ứng dụng của các thiết bị bay tầm thấp cũng như các giải pháp nâng cao hiệu năng của mạng sử dụng thiết bị bay này.

CÁC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC ĐÃ CÔNG BỐ

BÀI BÁO KHOA HỌC

[J1] **Nga T. T. Nguyen**, Minh Q. Vu, Hien T. T. Pham, Bac H. Dang, and Ngoc T. Dang, "Performance Enhancement of HAP-based Relaying M-PPM FSO System using Spatial Diversity and Heterodyne Detection Receiver" *Journal of Optical Communications*, vol.42, no.1, pp. 111-

120, 2021.

[J2] Minh Q. Vu, **Nga T. T. Nguyen**, Hien T. T. Pham, and Ngoc T. Dang, “Performance Enhancement of LEO-to-Ground FSO Systems using All-optical HAP-based Relaying,” *Physical Communication*, vol. 31, pp. 218-229, Dec. 2018.

[J3] Minh Q. Vu, **Nga T. T. Nguyen**, Hien T. T. Pham, and Ngoc T. Dang, “All-Optical Two-Way Relaying Free-Space Optical Communications for HAP-based Broadband Backhaul Networks,” *Optics Communications*, vol. 410, pp. 277-286, Mar. 2018.

HỘI NGHỊ KHOA HỌC

[C1] Minh Q. Vu, **Nga T. T. Nguyen**, Minh B. Vu, Hang T. T. Phan, Hien T. T. Pham, and Ngoc T. Dang, “HAP-based FSO System using All-Optical Detect-Amplify-and-Forward Relaying and Coherent Detection Receiver” In the Proc. of the fourth IEEE/NAFOSTED Conference on Information and Computer Science (NICS 2017), Hanoi, Vietnam, Nov. 2017, pp. 144-149.

[C2] **Nga T. T. Nguyen**, Minh B. Vu, Hoa T. Le, Vuong V. Mai, and Ngoc T. Dang “HAP-based Multi-hop FSO Systems Using All-Optical Relaying and Coherent Receiver” In the Proc. of the sixth IEEE/NAFOSTED Conference on Information and Computer Science (NICS 2019), Hanoi, Vietnam, Dec. 2019.