

PHÂN TÍCH QUỸ ĐƯỜNG TRUYỀN CHO HỆ THỐNG FSO VỆ TINH CHUYÊN TIẾP DỰA TRÊN HAP TRONG KHU VỰC NHIỆT ĐỚI

Nguyễn Thị Thu Nga
Học viện Công nghệ Bưu Chính Viễn Thông

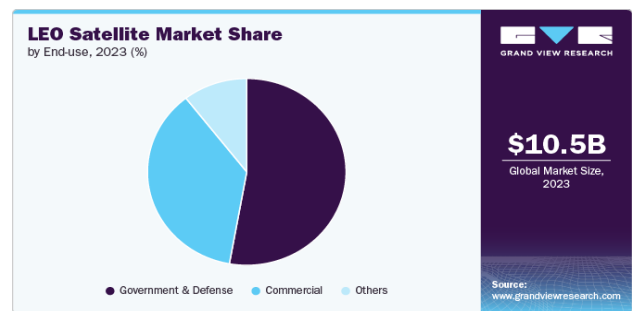
Tóm tắt: Mạng vệ tinh quang không gian tự do (FSOSN) sử dụng các liên kết quang giữa vệ tinh, hạ tầng trên cao (HAP), và thiết bị đầu cuối tại trạm mặt đất (GS). Nghiên cứu này phân tích quỹ đường truyền cho các liên kết quang đường xuống giữa vệ tinh – HAP – GS trong môi trường nhiệt đới, nơi có thách thức lớn về thời tiết. Do vệ tinh có công suất hạn chế, chúng tôi đánh giá ảnh hưởng của khoảng cách liên kết và môi trường đến công suất truyền. Mô hình suy hao quang được xây dựng để phân tích các yếu tố như khoảng cách truyền, suy hao chùm tia và ảnh hưởng của mây, mưa. Kết quả cho thấy, khoảng cách truyền làm tăng mạnh suy hao chùm tia, trong khi mây là yếu tố ảnh hưởng nhiều nhất trong điều kiện nhiệt đới. Dựa trên kết quả này, chúng tôi đề xuất các hướng dẫn thiết kế quỹ công suất, giúp tối ưu hiệu suất và đảm bảo kết nối ổn định cho mạng FSO vệ tinh – HAP – GS trong khu vực nhiệt đới.

Từ khóa: Truyền thông quang vệ tinh (OpticsSatCom), HAP, LEO, quỹ đường truyền.

I. GIỚI THIỆU

Quy mô thị trường vệ tinh LEO toàn cầu ước tính đạt 10,54 tỷ đô la Mỹ vào năm 2023 và dự kiến sẽ tăng trưởng ở tốc độ CAGR là 14,36% từ năm 2024 đến năm 2030 [1]. Sự tăng trưởng nhanh chóng với việc triển khai các chòm sao vệ tinh lớn nhằm mục đích cung cấp phạm vi phủ sóng internet băng thông rộng toàn cầu. Các công ty đang phóng hàng nghìn vệ tinh nhỏ để tạo ra các mạng lưới kết nối, nâng cao tốc độ dữ liệu và khả năng kết nối. Xu hướng này được thúc đẩy bởi nhu cầu ngày càng tăng đối với internet tốc độ cao, đặc biệt là ở các khu vực xa xôi và chưa được phục vụ đầy đủ, và dự kiến sẽ mở rộng đáng kể phạm vi thị trường và khả năng.

Thị trường vệ tinh LEO ở Châu Á - Thái Bình Dương (APAC) chiếm một phần doanh thu đáng kể vào năm 2023 như được chỉ ra trong hình 1 [1]. Chiến lược tăng trưởng của khu vực APAC bao gồm việc mở rộng năng lực vệ tinh để hỗ trợ các thị trường mới nổi và tăng cường kết nối. Các khoản đầu tư được thực hiện vào phát triển công nghệ vệ tinh, cơ sở hạ tầng và hợp tác khu vực. Chính phủ và khu



Hình 1. Xu hướng phát triển của thị trường vệ tinh tính tới năm 2023 [1].

vực tư nhân đang nỗ lực nâng cao năng lực không gian, cải thiện sản xuất vệ tinh và giải quyết nhu cầu ngày càng tăng về dịch vụ truyền thông và quan sát Trái đất [2, 3].

Cùng nhịp với sự phát triển của chòm sao LEO, sự ra đời của các dịch vụ như bản đồ độ nét cao và định vị/xác định mục tiêu (ví dụ: phát trực tuyến video 4K/8K và VR/AR) đã thúc đẩy sự phát triển của Internet [4]. Đặc biệt, các mạng dọc, chẳng hạn như vệ tinh quỹ đạo Trái đất thấp (LEO) và hạ tầng trên cao (HAP), đã được đề xuất rộng rãi như một giải pháp mở rộng thị trường truyền thông từ không gian. Nhiều sáng kiến của các dự án lớn như là Starlink, OneWeb, Globalstar và Telesat đã cho thấy các vệ tinh LEO được tổ chức trong các mạng chòm sao đã trở nên hấp dẫn như thế nào đối với phạm vi phủ sóng Internet toàn cầu. Các HAP, chẳng hạn như máy bay và khinh khí cầu, được đặc trưng bởi tính dễ triển khai và bảo trì, cấu hình có thể thích ứng và hiệu quả về chi phí. Chúng hoạt động như các trạm chuyển tiếp giữa các vệ tinh LEO và mặt đất, tăng cường khả năng mở rộng của hệ thống vệ tinh.

Đối với truyền thông tốc độ cao từ không gian, truyền thông quang không gian tự do (FSO) là một ứng cử viên tiềm năng nhờ băng thông không cần cấp phép rộng lớn của nó [5, 6]. Vì các HAP hoạt động ở độ cao 17–25 km (nơi tác động của thời tiết là không đáng kể), nên việc duy trì các kết nối FSO đáng tin cậy trong điều kiện thời tiết và khí quyển là một thách thức. Các vấn đề quan trọng trên các liên kết FSO HAP-đến-GS cuối là suy hao chùm tia, độ phủ của mây và nhiễu loạn khí quyển [7, 8]. Những điều này ảnh hưởng đến các yêu cầu nghiêm ngặt về chất lượng dịch vụ (QoS). Để duy trì được chất lượng dịch vụ, chúng

Tác giả liên hệ: Nguyễn Thị Thu Nga,

Email: ngant@ptit.edu.vn

Đến tòa soạn: 10/2024, chỉnh sửa: 11/2024, chấp nhận đăng: 12/2024.

ta cần ước tính trước công suất truyền quang ở từng khu vực địa lý, nơi có điều kiện môi trường thời tiết khác nhau để có kế hoạch triển khai. Như được báo cáo gần đây trong [7], khu vực APAC, nơi có khí hậu nhiệt đới gió mùa, chịu ảnh hưởng khác biệt từ thiên nhiên. Điều này gián tiếp dẫn tới sự ảnh hưởng đáng kể tới các hệ thống truyền thông không chỉ ở phân hệ mặt đất mà còn trong các hệ thống truyền thông từ không gian.

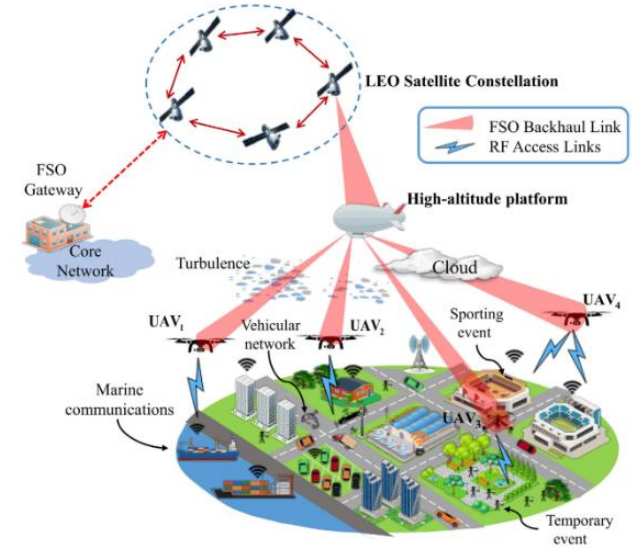
Thiết kế quỹ đường truyền cho hệ thống truyền thông vệ tinh – HAP – GS là điều cấp thiết, đặc biệt trong bối cảnh khí hậu nhiệt đới với điều kiện thời tiết khắc nghiệt. Do vệ tinh và HAP hoạt động trên tầng bình lưu hoặc cao hơn, môi trường truyền giữa chúng chủ yếu là không gian chân không, không chịu ảnh hưởng của mây và hiện tượng nhấp nháy quang. Tuy nhiên, liên kết từ HAP đến trạm mặt đất (GS) phải truyền qua bầu khí quyển, gặp phải suy hao do tán xạ và hấp thụ. Vì vậy, công suất truyền cần được điều chỉnh để bù đắp tổn thất này, đảm bảo chất lượng kết nối.

Trong phần khảo sát tình hình trong và ngoài nước, chúng tôi nhận thấy rằng có nhiều nghiên cứu khác nhau xem xét phân tích quỹ công suất cho truyền thông vệ tinh quang như có thể thấy trong [9]–[13] và các tài liệu tham khảo trong đó. Khác với tài liệu hiện tại, chúng tôi đã khảo sát cả liên kết liên vệ tinh quang giữa các vệ tinh LEO và liên kết lên/xuống quang giữa các vệ tinh LEO và các trạm mặt đất có thể thiết lập FSOSN trong không gian. Trong [9], các tác giả nghiên cứu tỷ lệ lỗi bit so với công suất nhận được cho các liên kết liên vệ tinh quang, trong khi chúng tôi tập trung vào việc kiểm tra các yếu tố ảnh hưởng đến công suất truyền cho liên kết liên vệ tinh quang và liên kết lên/xuống quang trong FSOSN LEO. Trong [10], các tác giả nghiên cứu liên kết liên vệ tinh quang với tốc độ dữ liệu 10 Gbps. Trong [11], các tác giả đề cập đến mô hình quỹ công suất quang cho liên kết quang liên vệ tinh và mô phỏng các liên kết bằng cách sử dụng điều chế QPSK để tìm mối quan hệ giữa khoảng cách liên kết và tốc độ dữ liệu. Trong [12], các tác giả đưa ra mô hình cho quỹ đường truyền quang nhưng phân tích của họ dựa trên mô phỏng các liên kết quang LEO-to-GEO và GEO-to-ground, trong khi chúng tôi tập trung vào các liên kết quang LEO-to-HAP và HAP-tới-GS. Trong [13], tán xạ Mie và tán xạ hình học được xem xét trong suy giảm khí quyển cho liên kết quang lên/xuống, trong khi trong công trình này, chúng tôi cũng nghiên cứu ảnh hưởng của khoảng cách và góc nâng đến các tác nhân bất lợi cho liên kết quang lên/xuống.

Trong phân tích quỹ đường truyền của mạng truyền thông vệ tinh – HAP – GS, chúng tôi trước tiên khảo sát các điều kiện bất lợi của môi trường, như là nhiễu loạn khí quyển, mây, và suy hao chùm tia, ảnh hưởng tới quỹ công suất quang cần thiết kế. Sau đó, chúng tôi phân tích ảnh hưởng của từng yếu tố đến công suất, đưa ra giá trị định lượng để thuận tiện cho việc nghiên cứu cũng như đưa vào thực tiễn để các nhà cung cấp dịch vụ có thể tham khảo cho bài toán hiện tại và tương lai. Từ kết quả của nghiên cứu, chúng tôi đưa ra biện pháp sử dụng bộ khuếch đại và chuyển tiếp tại HAP để bù suy hao chùm tia từ vệ tinh tới HAP. Nghiên cứu này không chỉ cung cấp thông tin hữu ích cho thiết kế quỹ đường truyền trong khu vực nhiệt đới mà còn mở ra tiềm năng ứng dụng cho các hệ thống truyền thông vệ tinh thế hệ mới, góp phần cải thiện hiệu suất kết nối và mở rộng phạm vi dịch vụ ở những khu vực khó tiếp cận.

II. MÔ HÌNH HỆ THỐNG

Mạng backhaul dựa trên FSO với nhiều UAV và GS ở phân hệ mặt đất như được minh họa trong Hình 2.



Hình 2. Một ví dụ về hệ thống FSO vệ tinh chuyển tiếp dựa trên HAP [14].

Đặc biệt, một khu vực từ xa được kết nối với mạng lõi thông qua chòm sao vệ tinh LEO (ví dụ: Starlink của SpaceX). Sau đó, HAP đóng vai trò là một trạm chuyển tiếp giữa vệ tinh LEO và hàng loạt các thiết bị đầu cuối thuộc phân hệ mặt đất, ví dụ: cho các sự kiện thể thao, mạng lưới phương tiện, thông tin liên lạc hàng hải và các sự kiện tạm thời. Chuyển tiếp vệ tinh LEO được hỗ trợ bởi HAP tới nhiều thiết bị đầu cuối. Để ngắn gọn, chúng tôi biểu thị vệ tinh LEO là nút S, HAP chuyển tiếp là nút H và thiết bị đầu cuối tại phân hệ mặt đất là GS. Sơ đồ khuếch đại và chuyển tiếp có thể được sử dụng tại nút H, khuếch đại tín hiệu nhận được từ S trước khi truyền lại đến các thiết bị đầu cuối GS.

Mô hình kênh quang giữa vệ tinh và HAP

Như đã mô tả trong phần trước, tác động của mây và nhiễu loạn khí quyển lên chùm tia quang từ vệ tinh đến HAP có thể không đáng kể, gần như có thể bỏ qua, do vệ tinh và HAP nằm phía trên các đám mây (tức là 17-25 km). Chùm tia quang Gaussian bị phân kỳ một lượng trên đường đi từ vệ tinh đến HAP. Tổn hao công suất được tính là tỷ lệ công suất thu được của khẩu độ HAP so với diện tích chùm tia tại HAP. Đối với một chùm tia đơn, tổn hao có thể được ước tính là [15]

$$L_{leo} \approx A_0 \exp\left(-\frac{2\rho^2}{w_{deg}^2}\right), \quad (1)$$

trong đó $w_{deg}^2 = w_d^2 \frac{\sqrt{\pi} \operatorname{erf}(v)}{2v \exp(-v^2)}$ là chùm tia tương đương,

trong đó, $w_z = w_0 \sqrt{1 + \varepsilon \left(\frac{\lambda d_1}{\pi w_0^2}\right)^2}$ là chùm tia tương đương

ở khoảng cách d_1 , $w_0 = \frac{(2\lambda)}{(\pi\theta)}$ là chùm tia tương đương tại

khoảng cách $d_1 = 0$ với θ là góc phân kỳ, $\varepsilon = \left(1 + 2 \frac{w_0^2}{\rho_0^2(d_1)}\right)$, $\rho_0(d_1) = (0.55 C_n^2 k_w^2 d_1)^{-3/5}$ [8]. Bằng cách giả

định rằng việc theo dõi chủ động giữa vệ tinh và HAP là hoàn hảo, thì máy dò HAP nằm ở tâm của dấu chân chùm tia (tức là $\rho = 0$). Do đó, $A_0 = [\operatorname{erf}(v)]^2$ tương ứng với

phân số công suất thu được tại $\rho = 0$ với $v = \frac{a\sqrt{\pi}}{w_d\sqrt{2}}$ là tỷ lệ giữa bán kính khẩu độ và độ rộng chùm tia.

A. Mô hình kênh quang giữa HAP và mặt đất

Đối với đường xuống từ HAP đến GS, mô hình toán học của hệ số kênh được biểu thị là $h_{FSO} = h_c h_a h_p$ trong đó h_c là suy giảm do mây, h_a là fading do nhiễu loạn gây ra, và h_p là suy hao chùm tia quang trong chặng thứ 2 từ HAP tới trạm mặt đất. Trong đó suy hao chùm tia ở chặng 2 có thể được ước tính tương tự như cách phân tích chặng 1 trước đó. Do đó, để ngắn gọn và tập trung vào mục đích chính của bài, chúng tôi sẽ bỏ qua phần mô tả suy hao chùm tia trong chặng 2.

Suy hao do mây: Trong đường xuống quang, suy hao khí quyển rất nghiêm trọng do tán xạ, do mây gây ra. Mây là kết quả của sự ngưng tụ hơi nước phía trên bề mặt trái đất và đôi khi có thể làm gián đoạn tín hiệu hoặc chặn hoàn toàn tín hiệu quang từ HAP đến UAV. Bên cạnh đó, bước sóng quang hoạt động trong băng tần THz tương ứng với phạm vi bước sóng từ 0,8 đến 2 μm , có kích thước hạt gần bằng hơi nước [16, 17]. Do đó, hiện tượng tán xạ xảy ra trên đường truyền chùm tia, dẫn đến giảm đáng kể tầm nhìn và công suất tín hiệu. Trong mô hình này, tầm nhìn có thể được xác định dựa trên nồng độ số giọt mây N_c và hàm lượng nước lỏng mây M_c như sau [16]

$$V = \frac{1.002}{(N_c \times M_c)^{0.6473}}. \quad (2)$$

Từ thông số về tầm nhìn của hệ thống, chúng ta cần xác định hệ số suy hao của tín hiệu quang khi đi qua vùng mây bao phủ là đáng kể như thế nào. Để lượng hóa được sự suy hao này, chúng tôi sử dụng phương trình Beer-Lambert để xác định sự suy giảm mây và có thể được biểu thị như sau:

$$L_c = \exp\left(-\frac{a_c^r a_c}{\cos(\xi_{HU})}\right), \quad (3)$$

trong đó d_c là khoảng cách liên quan đến hiện tượng tán xạ xảy ra. α_c là hệ số suy giảm và có thể được biểu thị như sau:

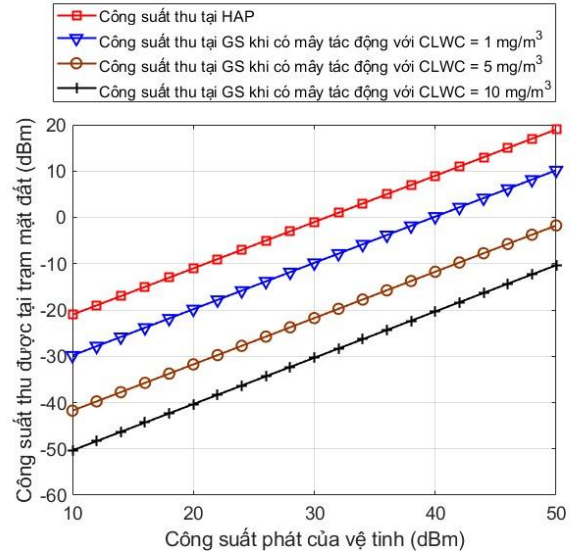
$$\alpha_c = \frac{3.91}{V(km)} \left(\frac{\lambda[nm]}{550}\right)^{-q} \quad (4)$$

trong đó q là hệ số được đưa ra bởi mô hình Kim [17].

Hình 3 khảo sát công suất quang bị suy giảm dưới tác động của các điều kiện mây trong dải công suất hoạt động từ 10 đến 50 dBm. Thông thường với một vệ tinh bay cách trái đất khoảng 600 km và HAP bay ở độ cao 20 km, góc phân kỳ khoảng vài μrad thì suy hao chùm tia được ước lượng khoảng 30 dB như đang biểu diễn cho đường màu đỏ. Giả định không có suy hao đường truyền nào khác, chúng tôi tập trung vào đánh giá sự ảnh hưởng của mây ở khu vực nhiệt đới gió mùa với ba điều kiện mây khác nhau tương ứng với hàm lượng nước trong đám mây lần lượt là 1, 5, và 10 mg/m^3 . Rõ ràng rằng với hàm lượng nước trong đám mây càng lớn thì suy hao càng lớn, đặc biệt khi đám mây đặc với $M_c = 10 \text{ mg/m}^3$ thì tín hiệu quang có khả năng bị suy hao thêm 30 dB nữa trong khi sẽ chỉ là 10 dB với mức $M_c = 1 \text{ mg/m}^3$.

Suy hao do nhiễu loạn: Những ảnh hưởng quan trọng nhất của nhiễu loạn khí quyển đối với chùm tia laser bao gồm biến dạng mặt phẳng pha, sự mở rộng của chùm tia, sự di chuyển của chùm tia và sự phân bố lại cường độ trong chùm tia, được gọi là hiện tượng nhấp nháy. Trong trường

hợp chùm tia phân kỳ mạnh, nhấp nháy là nguồn chính gây ra suy hao công suất.



Hình 3. Công suất thu tại trạm mặt đất trong trường hợp chỉ xem xét ảnh hưởng của mây trong các điều kiện khác nhau.

Việc đánh giá các suy hao công suất do nhiễu loạn là một vấn đề phụ trong việc tính toán độ khả dụng. Do thiếu dữ liệu thực tế, rất khó để ước lượng độ mạnh nhấp nháy trong các điều kiện thời tiết khác nhau và xác định ảnh hưởng của nhấp nháy đối với độ khả dụng FSO trong thời gian dài. Mục đích của phần này chỉ là cung cấp các quan hệ để ước tính sơ bộ mức suy hao công suất do nhiễu loạn khí quyển. Đó là lý do tại sao một số sự đơn giản hóa đã được thực hiện: suy hao công suất được giải quyết cho chế độ dao động yếu, các đặc tính của chùm tia laser được xấp xỉ bằng sóng cầu, và mức suy hao công suất phụ thuộc vào xác suất tối đa có được tỷ lệ lỗi bit (BER) dưới một giá trị nhất định đã được sử dụng. Cường độ I của một sóng quang lan truyền qua khí quyển nhiễu loạn là một biến ngẫu nhiên. Phương sai chuẩn hóa của cường độ sóng quang, được gọi là chỉ số nhấp nháy, được định nghĩa bởi:

$$\sigma_I^2 = \frac{\langle I^2 \rangle}{\langle I \rangle^2} - 1 \quad (5)$$

trong đó dấu ngoặc nhọn biểu thị một giá trị trung bình tập hợp. Chỉ số nhấp nháy chỉ ra cường độ của các dao động cường độ. Đối với các dao động yếu, nó tỉ lệ thuận và đối với các dao động mạnh, nó tỉ lệ nghịch với phương sai Rytov cho một sóng phẳng.

$$\sigma_I^2 = 1.23 C_n^2 k^7 L^{\frac{11}{6}} \quad (6)$$

trong đó C_n^2 là tham số cấu trúc chỉ số khúc xạ. Tham số này không dễ đo vì nó phụ thuộc vào nhiệt độ, sức gió, độ cao, độ ẩm, áp suất khí quyển, v.v. Nó biến thiên khoảng từ 10^{-12} đến $10^{-19} \text{ m}^{-2/3}$. Một số phương pháp dẫn đến việc đánh giá nó được trình bày trong các tài liệu tham khảo [18 – 20]. Đối với một trường nhiễu loạn đồng nhất, có thể được giả định khi lan truyền theo chiều ngang gần mặt đất, tham số cấu trúc chỉ số khúc xạ là không đổi. Các nhấp nháy quang học có thể giảm bằng cách tăng diện tích thu thập của thấu kính thu; diện tích này gây ra sự tích hợp của các

cường độ khác nhau tác động lên các phần cụ thể của thấu kính. Hiện tượng này được gọi là trung bình lỗ mờ. Hệ số trung bình lỗ mờ cho một sóng cầu được cho bởi:

$$A = \frac{\sigma_P^2}{\sigma_I^2} = \left[1 + 0.333 \left(\frac{kD^2}{4L} \right)^{\frac{5}{6}} \right]^{-\frac{7}{5}} \quad (7)$$

trong đó σ_P^2 là chỉ số nhấp nháy công suất và σ_I^2 là phương sai Rytov cho sóng cầu. Có thể thấy rằng ảnh hưởng của cả đường kính thấu kính và tham số cấu trúc chỉ số khúc xạ lên mức nhấp nháy là tương đối lớn. Nhiều công trình lý thuyết và thực nghiệm [21 – 23] cho thấy rằng dưới các dao động yếu, công suất quang hoặc cường độ có thể được mô hình hóa như một biến ngẫu nhiên phân phối lognormal. Hàm mật độ xác suất (PDF) của công suất quang học nhận được là:

$$p(P) = \frac{1}{P\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp \left\{ -\frac{\left[\ln \frac{P}{\langle P \rangle} + \frac{\sigma^2}{2} \right]^2}{2\sigma^2} \right\} \quad (8)$$

trong đó $\sigma^2 = \ln(\sigma_P^2)$ là phương sai của công suất log.

Tỷ lệ lỗi bit (BER) đạt được trong quá trình truyền thông qua bầu khí quyển không bị nhiễu loạn thấp hơn tỷ lệ lỗi bit bị ảnh hưởng bởi hiện tượng nhấp nháy, tức là ($BER_0 < BER_{sc}$). Điều này được gây ra bởi sự dao động công suất, có thể dẫn đến các tín hiệu giảm tạm thời. Rõ ràng rằng việc tăng cường BER_{sc} có thể được giảm thiểu bằng cách tăng cường công suất quang tương ứng. Một trong số ít cách biết đến để xác định suy hao do nhấp nháy L_{sc} dựa trên giả định rằng xác suất:

$$\Pr[BER_0 < BER_{sc}] = \Pr[PLC_{sc} < \langle P \rangle] = P_{ub} \quad (9)$$

trong đó PLC_{sc} là công suất tức thời đã được bù đắp, thường thì nó thấp hơn công suất trung bình (P) trong các khoảng thời gian mà tổng của chúng bằng xác suất giới hạn trên P_{ub} nhân với thời gian truyền [24]. Bằng cách sắp xếp lại phương trình (9) và giả định rằng P phân phối theo kiểu lognormal theo phương trình (8), chúng ta có được:

$$\Pr \left[\frac{P}{\langle P \rangle} < \frac{1}{L_{sc}} \right] = F \left(\frac{1}{L_{sc}} \right) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[-\frac{\ln \left(\frac{1}{L_{sc}} \right) + \frac{\sigma^2}{2}}{\sqrt{2\sigma^2}} \right] \quad (10)$$

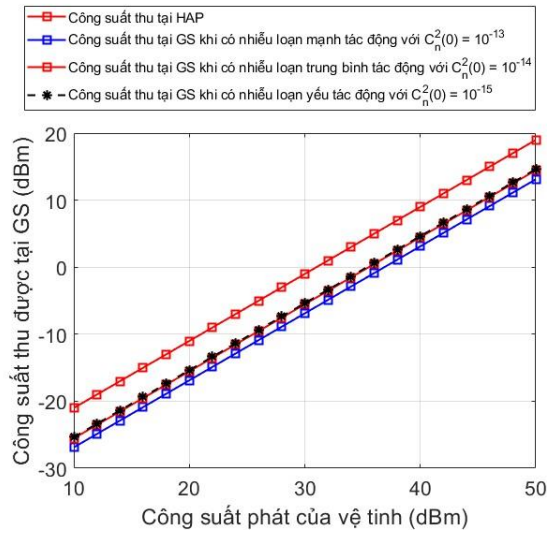
trong đó $\operatorname{erfc}(\cdot)$ là hàm bù lỗi, $F(\cdot)$ là hàm phân phối tích lũy (CDF). Do đó, suy hao do nhấp nháy được biểu diễn dưới dạng:

$$L_{sc} = \exp \left[\operatorname{erfcinv}(2P_{ub}) \sqrt{2\ln(\sigma_P^2 + 1)} \right] \quad (11)$$

Trong đó $\operatorname{erfcinv}(\cdot)$ là hàm nghịch đảo của hàm sai số bổ sung. Vì σ_P là hàm của L , chúng ta có thể viết là:

$$A_{turb}(L) = 10 \log[L_{sc}(L)] \quad \text{[dB]} \quad (12)$$

III. PHÂN TÍCH QUỸ CÔNG SUẤT ĐƯỜNG TRUYỀN



Hình 4. Công suất thu tại trạm mặt đất dưới tác động của nhiễu loạn khí quyển trong ba trường hợp mạnh, trung bình, và yếu với điều kiện trời trong không có mây.

Một ví dụ về sơ đồ mức công suất của hệ thống FSO triển khai ở kịch bản vệ tinh – HAP – GS. Các tác nhân có hại cho liên kết FSO gây ra suy hao đặc biệt có thể quan sát được giữa một diode laser ở một phía phát và một photodiode ở phía thu của tuyến FSO. Rõ ràng rằng công suất quang thu được có thể được viết dưới dạng:

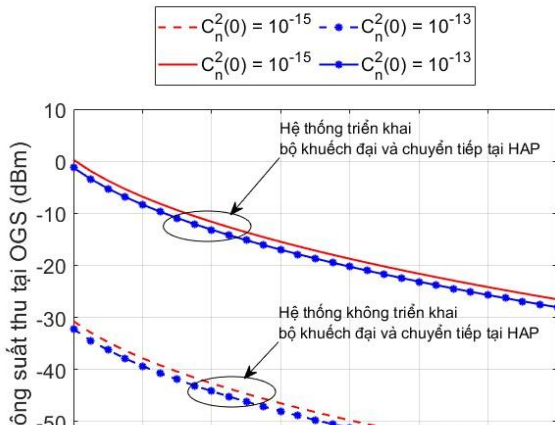
$$P_r = P_t - L_{leo,SH} - L_c - L_{atm} - L_{leo,HG} \quad (13)$$

trong đó P_t là công suất quang trung bình của diode laser, $L_{leo,HAP}$ là suy hao chùm tia ứng với chệch từ vệ tinh tới HAP, L_c là suy hao do mây, L_{atm} là suy hao do nhiễu loạn khí quyển (tán xạ và nhiễu loạn), và $L_{leo,HG}$ là suy hao chùm tia ứng với chệch từ HAP tới trạm mặt đất. Để tách sóng thành công, công suất trên vùng hoạt động của photodiode P_r phải nằm trong khoảng được giới hạn bởi độ nhạy của bộ thu P_{min} và công suất quá tải của bộ thu P_{max} (công suất quang thu tối thiểu và tối đa tương ứng cho BER cho trước).

IV. THẢO LUẬN KẾT QUẢ

Trong phần này, chúng ta đánh giá hiệu năng hệ thống vệ tinh – HAP – trạm mặt đất như được mô tả ở trên. Chúng ta xem xét các thông số như sau: vệ tinh LEO bay quanh quỹ đạo ở độ cao 500 km, trong khi HAPS nằm ở độ cao 20 km. Các góc thiên đỉnh được đặt bằng 30 độ, tốc độ gió trung bình bình phương $\sqrt{w_H} = 21$ m/s. Ngoài ra, các tham số được hiệu chỉnh trong từng ngữ cảnh sẽ được ghi chú trong từng kết quả.

Hình 4 cho thấy mối liên hệ giữa công suất thu tại GS trong các điều kiện nhiễu loạn khác nhau trong các vùng mạnh, trung bình, và yếu với điều kiện trời trong không có mây. Thông qua kết quả này, chúng ta có thể thấy rằng fading do nhiễu loạn gây ra sẽ ảnh hưởng mạnh tới việc gây ra tỉ lệ lỗi bit khi xử lý tại máy thu còn về vấn đề hấp thụ công suất thì không đáng kể. Cho dù trong điều kiện nhiễu loạn mạnh nhất thì suy hao gây ra bởi nhiễu loạn khí

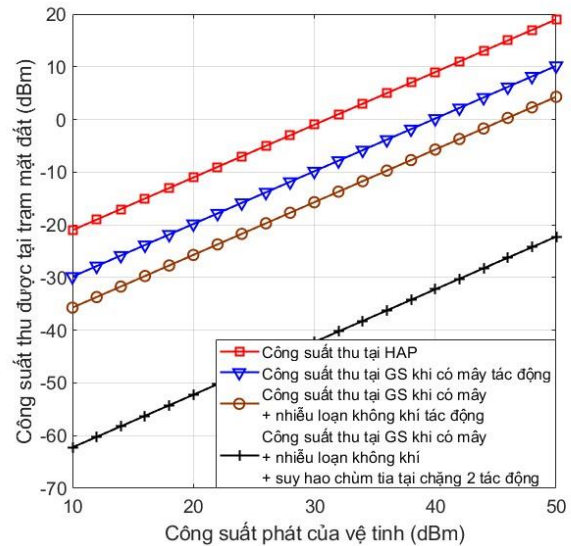


Hình 5. Công suất thu tại trạm mặt đất khi xem xét lần lượt các tác động từ môi trường vật lý bên ngoài hệ thống.

quyền chỉ khoảng 8 dB, một con số khá khiêm tốn so với sự suy hao do mây gây ra.

Hình 5 khảo sát công suất thu tại trạm mặt đất trong các điều kiện bất lợi của môi trường với dải công suất phát từ 10 đến 50 dBm. Đường màu đỏ thể hiện công suất quang thu được tại HAP, và cho ta thấy rằng sau quãng đường dài từ vệ tinh tới HAP, công suất tổn hao mất đi 30 dB do suy hao chùm tia. Tại HAP, nếu không sử dụng kỹ thuật nào khác, tín hiệu được chuyển tiếp tới trạm mặt đất và ứng với các đường màu xanh chấm tam giác, màu nâu chấm tròn, và màu đen dấu cộng sẽ thể hiện cho các tác động có mây, có nhiễu loạn, và có thêm suy hao chùm tia tại chặng 2 của hệ thống từ HAP tới trạm mặt đất. Từ đây, ta có thể thấy rằng khi xem xét điều kiện mây (với $M_c = 1 \text{ mg/m}^3$) ảnh hưởng tới hệ thống thì mất đi khoảng 10 dB công suất như được chỉ ra trong hình 5 ở trên. Trong trường hợp nếu có nhiễu loạn mạnh xảy ra đồng thời thì hệ thống sẽ mất thêm khoảng 5 dB công suất nữa và tại phía thu chịu thêm suy hao chùm tia khoảng 35 dB nữa. Lý do khiến cho suy hao chùm tia tại chặng 2 lớn hơn chặng 1 mặc dù khoảng cách truyền dẫn nhỏ hơn là vì HAP sẽ sử dụng chùm góc phân kỳ lớn nhằm hướng tới cung cấp một vùng rộng ở phân hệ mặt đất sao cho đáp ứng nhiều người dùng đồng thời hoặc hỗ trợ cho các phương tiện di chuyển liên tục mà không cần chuyển giao hay kết nối lại. Còn tại phía vệ tinh chỉ cần phát chùm tia với góc phân kỳ nhỏ để đảm bảo công suất nhận được tại HAP đủ lớn, điều này có thể làm được vì vị trí của HAP được xác định bởi GPS; do đó, chúng ta có thể truyền thẳng chùm tia tới vị trí của HAP.

Để cải thiện hiệu năng của hệ thống truyền tin từ vệ tinh tới trạm mặt đất thông qua nút chuyển tiếp HAP dựa trên công nghệ FSO, bộ khuếch đại và chuyển tiếp là một giải pháp tiềm năng có thể triển khai tại HAP. Trong kết quả của hình 6, chúng tôi kiểm tra tính khả thi của giải pháp



Hình 6. Khảo sát công suất thu tại trạm mặt đất dưới tác động của mây và điều kiện nhiễu loạn được xem xét trong hai vùng mạnh và yếu với công suất phát là 40 dBm.

này trong điều kiện mây tăng dần từ 1 đến 15 mg/m³ cho hai trường hợp nhiễu loạn mạnh ($C_n^2 = 10^{-13}$) và tại vùng nhiễu loạn yếu ($C_n^2 = 10^{-15}$). Công suất được khảo sát ở kết quả này là 40 dBm. Tại HAP, bộ khuếch đại và chuyển tiếp (AF) được thiết kế sao cho có thể bù được công suất tổn hao ở chặng một, nghĩa là khoảng 30 dB, cái mà hoàn toàn khả thi với các bộ khuếch đại quang ngày nay.

V. KẾT LUẬN

Chúng tôi đã phân tích mối quan hệ giữa quỹ đường truyền và khoảng cách truyền, đồng thời xem xét tác động của công suất và tốc độ dữ liệu. Kết quả cho thấy quỹ đường truyền giảm tỷ lệ nghịch với khoảng cách, điều này đặc biệt quan trọng đối với các liên kết quang không gian tự do giữa vệ tinh, HAP và trạm mặt đất (GS) trong liên kết đường xuống. Nghiên cứu đã tính toán suy hao công suất do các yếu tố như nhiễu loạn khí quyển, mây và suy hao chùm tia.

Chúng tôi đã mô hình hóa chi tiết các liên kết quang, đánh giá từng loại suy hao để lượng hóa tác động của môi trường. Khoảng cách truyền được xác định là yếu tố ảnh hưởng mạnh nhất đến suy hao chùm tia, trong khi mây gây suy giảm đáng kể tín hiệu quang, đặc biệt trong môi trường nhiệt đới. Dựa trên kết quả này, chúng tôi cung cấp các hướng dẫn thiết kế quỹ công suất thực tiễn nhằm tối ưu hiệu suất hệ thống, hỗ trợ triển khai hiệu quả các mạng truyền thông vệ tinh – HAP – GS trong điều kiện khắc nghiệt của khu vực nhiệt đới

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Market analysis report, “LEO Satellite Market Size, Share & Trends Analysis Report By Satellite Mass, By Frequency Band, By Propulsion Type, By Application, By End-use, By Region, And Segment Forecasts, 2024 – 2030,” [Online] available at: <https://www.grandviewresearch.com/>

- [2] D. Zhou, M. Sheng, J. Li, and Z. Han, “Aerospace integrated networks innovation for empowering 6G: A survey and future challenges,” IEEE Commun. Surveys Tuts., vol. 25, no. 2, pp. 975–1019, 2nd Quart., 2023.
- [3] Z. Jia, M. Sheng, J. Li, D. Zhou, and Z. Han, “Joint HAP access and LEO satellite backhaul in 6G: Matching game-based approaches,” IEEE J. Sel.

- Areas Commun., vol. 39, no. 4, pp. 1147–1159, Apr. 2021.
- [4] Y. Zhu, W. Bai, M. Sheng, J. Li, D. Zhou, and Z. Han, "Joint UAV access and GEO satellite backhaul in IoRT networks: Performance analysis and optimization," *IEEE Internet Things J.*, vol. 8, no. 9, pp. 7126–7139, May 2021.
- [5] Thang V. Nguyen, Hoang D. Le, and Anh T. Pham, "On the Design of RIS-UAV Relay-Assisted Hybrid FSO/RF Satellite-Aerial-Ground Integrated Network," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 59, Iss. 02, pp. 757–771, Apr. 2023.
- [6] Hoang D. Le, Thang V. Nguyen, and Anh T. Pham, "Aerial IRS-Aided Vertical Backhaul FSO Networks over Fisher-Snedecor F Turbulence Channels," *IEEE International Conference on Communications and Electronics (ICCE)*, Nha Trang, Vietnam, Jul. 2022.
- [7] Thang V. Nguyen, Hoang D. Le, Ngoc T. Dang, and Anh T. Pham, "Average Transmission Rate and Outage Performance of Relay-Assisted Satellite Hybrid FSO/RF Systems," In the *Proc. of the IEEE 2021 International Conferences on Advanced Technologies for Communications (ATC 2021)*, Hochiminh, Vietnam, Oct. 2021.
- [8] Thang V. Nguyen, Hoang D. Le, Ngoc T. Dang, and Anh T. Pham, "On the Design of Rate Adaptation for Relay-Assisted Satellite Hybrid FSO/RF Systems," *IEEE Photonics Journal*, vol. 14, Iss.01, pp. 1–11, Feb. 2022.
- [9] C. Carrizo, M. Knapik, J. Horwath, D. Gonzalez, and P. Cornwell, "Optical Inter-Satellite Link Terminals for Next Generation Satellite Constellations," in *Proc. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE)*, vol. 11272, article id. 1127203, 2020, pp. 1–11.
- [10] A. Maho et al., "Assessment of the Effective Performance of DPSK vs. OOK in Satellite-Based Optical Communications," in *Proc. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE)*, vol. 11180, 2019, pp. 1–6.
- [11] B. Patnaik and P.K. Sahu, "Inter-Satellite Optical Wireless communication System Design and Simulation," *IET Communication*, vol. 6(16), pp. 2561–2567, Nov. 2012.
- [12] H. Lim, J. Park, M. Choi, C. Choi, and J. Kim, "Performance Analysis of DPSK Optical Communication for LEO-to-Ground Relay Link Via a GEO Satellite," *Journal of Astronomy Space Sciences*, vol. 37(1), pp. 11–18, Mar. 2020.
- [13] E. Erdogan, I. Altunbas, G. Kurt, M. Bellemare, G. Lamontagne, and H. Yanikomeroglu, "Site Diversity in Downlink Optical Satellite Networks Through Ground Station Selection," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 31179–31190, Feb. 2021.
- [14] Khanh D. Dang, Hoang D. Le, Chuyen T. Nguyen, and Anh T. Pham, "Cooperative HARQ-Aided Multiple UAVs in Optical Aerospace Backhaul Networks," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 138247–138260, Dec. 2023.
- [15] Thang V. Nguyen, Hoa T. Le, Hien T.T. Pham, Vuong V. Mai, and Ngoc T. Dang, "Enhancing Design and Performance Analysis of Satellite Entanglement-based CV-QKD/FSO Systems," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 112097–112107, Oct. 2023.
- [16] Hoang D. Le, Thang V. Nguyen, and Anh T. Pham, "Cloud Attenuation Statistical Model for Satellite-based FSO Communications". *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 20, no. 05, May. 2021.
- [17] Thang V. Nguyen, Hoang D. Le, Thanh V. Pham, and Anh T. Pham, "Link Availability of Satellite-based FSO Communications in the presence of Clouds and Turbulence," *IEICE Communication Express*, vol. 10, pp. 1–6, Jan. 2021.
- [18] S. Rasouli and M. Tavassoly, "Measurement of the refractive-index structure constant, C_n^2 , and its profile in the ground level atmosphere by moire technique," *Proc. SPIE 6364*, 63640G s2006d.
- [19] G. d'Auria, F. S. Marzano, and U. Merlo, "Statistical estimation of mean refractive-index structure constant in clear air," in *Proc. of 7th Int. Conf. Antennas and Propagation*, 15–18 April 1991, York, UK, vol. 1, pp. 177–180, IEEE, Piscataway, NJ s1991d.
- [20] G. R. Ochs, "Measurement of refractive-index structure parameter by incoherent aperture scintillation techniques," *Proc. SPIE 1115*, 107–115 s1989d.
- [21] L. C. Andrews and R. L. Phillips, *Laser Beam Propagation through Random Media*, SPIE, Bellingham s1998d.
- [22] L. C. Andrews, R. L. Phillips, and C. Y. Hopen, *Laser Beam Scintillation with Applications*, SPIE, Bellingham, WA, s2001d.
- [23] V. I. Tatarski, *The Effect of the Turbulent Atmosphere on Wave Propagation*, Keter Press, Jerusalem s1961d.
- [24] D. Giggenbach and F. Moll, "Scintillation loss in optical low earth orbit data downlinks with avalanche photodiode receivers," *IEEE Int. Conf. Space Opt. Syst.*, pp. 115–122, 2017. DOI:OI:10.1109/ICSOS.2017.8357220

PERFORMANCE EVALUATION OF SECURITY IN COMMUNICATIONS BETWEEN LEO SATELLITES AND HIGH ALTITUDE PLATFORM STATIONS

Abstract: Satellites, high-altitude platforms (HAPs), and ground station (GS) terminals can all communicate with each other optically through free-space optical satellite networks (FSOSN). In this study, the link budget for satellite-HAP-GS downlink optical connections is looked at in tropical climates that have a lot of weather-related issues. Given the restricted capacity of satellites, we evaluate the impact of link distance and environmental factors on transmitted power. An optical loss model examines variables including transmission distance, propagation attenuation, and the effects of clouds and atmospheric turbulence. The findings indicate that transmission distance markedly elevates beam loss, but clouds are the predominant factor in tropical environments. Based on these results, we suggest guidelines for power budget design that improve performance and maintain stable connectivity for satellite-HAP-GS FSO networks in tropical locations.

Keywords: Optical Satellite Communications (OpticsSatCom), HAP, LEO, Link Budget



Nguyễn Thị Thu Nga nhận được bằng kỹ sư Điện tử và Viễn thông tại Đại học Bách Khoa Hà Nội, Việt Nam năm 1999 và bằng Thạc sĩ tại Đại học Công nghệ, Đại học Quốc gia Việt Nam năm 2005, nhận bằng tiến sĩ năm 2021 tại Học viện công nghệ Bưu chính Viễn Thông (PTIT). Cô hiện tại là giảng viên Khoa Viễn thông 1, Học viện công nghệ Bưu chính Viễn

Thông. Mọi quan tâm nghiên cứu hiện tại của cô là trong lĩnh vực truyền thông quang, thiết kế và đánh giá hiệu năng của các hệ thống truyền thông quang không dây.