CẢI THIỆN HIỆU NĂNG CỦA HỆ THỐNG THÔNG TIN VỆ TINH QUANG BẰNG KỸ THUẬT ĐIỀU KHIỂN CHÙM TIA THÍCH ỨNG

OPTICAL SATELLITE SYSTEM PERFORMANCE IMPROVEMENT WITH THE HELP OF ADAPTIVE BEAM CONTROL TECHNIQUE

Lê Tuấn Đạt, Vũ Trung Dũng, Nguyễn Tuyết Anh, Hoàng Duy Thái

Khoa Điện tử và Kỹ thuật máy tính, Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật công nghiệp

Đến Tòa soạn ngày 10/3/2025, chấp nhận đăng ngày 08/4/2025

Tóm tắt: Nghiên cứu này giới thiệu cơ chế điều khiển thích ứng chùm tia để cải thiện hiệu năng của các mạng truyền thông phi mặt đất (NTN) dựa trên truyền tín hiệu quang (FSO), đặt biệt là cho các đường truyền thông tin từ vệ tinh - HAP - mặt đất theo chiều dọc. Dựa trên các thông tin trạng thái kênh, hệ thống tự động điều chỉnh độ phân kỳ chùm tia và tốc độ truyền một cách thích ứng để khắc phục các vấn đề ảnh hưởng từ: nhiễu loạn khí quyển, lệch hướng, mây. Kết quả của nghiên cứu cải thiện được tốc độ đường truyền và phạm vi phủ sóng. Kỹ thuật điều khiển chùm tia thích ứng có thể đạt được tốc độ truyền cao và kết nối đáng tin cậy, đáp ứng được các nhu cầu của mạng truyền thông 6G trong tương lai.

Từ khóa: Truyền thông vệ tinh, điều khiển chùm tia thích ứng, mạng lưới không gian.

Abstract: This paper proposes an adaptive beam management mechanism to improve the performance of non-terrestrial communication networks (NTN) based on optical signal transmission (FSO), particularly vertical satellite-HAP-ground communication links. Based on channel status information, the system automatically adjusts the beam divergence and transmission rate to compensate for atmospheric turbulence, deflection, and clouds. The research findings boost transmission rates and coverage. The adaptive beam control technology can produce high transmission rates and consistent connections, satisfying the requirements of future 6G communication networks.

Keywords: Satellite communication, adaptive beam control, non-terrestrial network.

1. GIỚI THIỆU

Sự phát triển của Internet đóng vai trò quan trọng trong các dịch vụ công nghệ như nhận dạng mục tiêu, định vị và bản đồ. Tuy nhiên, mạng mặt đất truyền thống còn nhiều hạn chế, như phạm vi phủ sóng giới hạn, dung lượng thấp và yêu cầu hạ tầng phức tạp. Mạng phi mặt đất (NTN), bao gồm vệ tinh LEO, nền tảng HAP và UAV, đã được đề xuất như một giải pháp thay thế. Đặc biệt, truyền thông quang trong không gian tự do (FSO) nổi bật với băng thông rộng và khả năng hoạt động không cần cấp phép, phù hợp với ứng dụng Internet từ không gian. Việc tích hợp FSO với NTN hứa hẹn phát triển các hệ thống truyền thông tốc độ cao, đáp ứng yêu cầu mạng 6G.

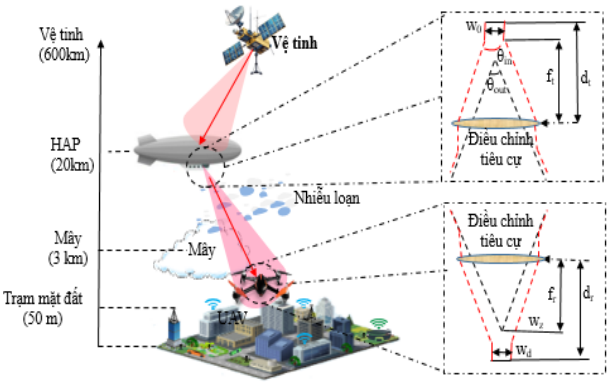
Dù có nhiều tiềm năng, NTN dựa trên FSO vẫn đối mặt với thách thức như nhiễu loạn khí quyển và phân kỳ chùm tia, gây suy giảm hiệu năng liên kết. Các hệ thống căn chỉnh, định hướng và theo dõi chùm tia (PAT) thường được triển khai để khắc phục, nhưng vẫn bị ảnh hưởng bởi rung động cơ học, nhiệt độ và tốc độ gió. Do đó, cần có các giải pháp nâng cao chất lượng liên kết FSO. Nhiều nghiên cứu đã phân tích lỗi lệch hướng trong liên kết

FSO ngang, nhưng chưa xem xét đầy đủ ảnh hưởng của nhiễu loạn khí quyển và giả định phân bố Gauss chưa chính xác [1-2]. Điều này đặt ra nhu cầu về mô hình chính xác hơn và các giải pháp hiệu quả cho hệ thống NTN dựa trên FSO.

Nghiên cứu này đề xuất kỹ thuật điều khiển chùm tia thích ứng nhằm giảm nhiễu loạn và lỗi lệch hướng. Có hai phương pháp chính: (i) điều khiển cơ học dựa trên chuyển động gương hoặc lăng kính, phổ biến nhưng cồng kềnh và phản hồi chậm [3], và (ii) điều khiển phi cơ học bằng thấu kính tiêu cự biến đổi lệch tâm (VFL), đã được nghiên cứu cho liên kết HAP [2]. Xét theo hướng truyền thẳng đứng, các nền tảng HAP đóng vai trò quan trọng trong duy trì kết nối giữa vệ tinh và UAV. Việc sử dụng HAP làm nút chuyển tiếp kết hợp với kỹ thuật khuếch đại và chuyển tiếp giúp giảm thiểu suy hao do phân kỳ chùm tia trong chặng truyền đầu tiên từ vệ tinh đến HAP. Tại HAP, bộ điều khiển chùm tia thích ứng có thể điều chỉnh kích thước chùm tia phù hợp với từng ứng dụng truyền thông UAV. Ngoài ra, để đảm bảo tốc độ truyền dữ liệu tối ưu trong hệ thống NTN dựa trên FSO, nghiên cứu này áp dụng kỹ thuật điều chỉnh tốc độ thích ứng. Phương pháp này cho phép tối ưu hóa tốc độ truyền trung bình, cải thiện hiệu suất hệ thống trong các điều kiện truyền dẫn khác nhau.

2. MÔ TẢ HỆ THỐNG

Mô tả sơ đồ khối kết nối vệ tinh - HAP - mặt đất với hai chặng truyền. Chặng đầu tiên là từ vệ tinh đến HAP, và chặng thứ hai là từ HAP đến mặt đất. Trong chặng đầu tiên, vệ tinh đóng vai trò là bộ phát, thực hiện điều chế dữ liệu bằng QAM và biểu diễn tín hiệu. Tín hiệu đã được điều chế sau đó được chuyển thành tín hiệu quang S(t), được biểu diễn như sau:



Hình 1. Kỹ thuật điều khiển chùm tia thích ứng

$$S(t) = P_s[1 + ms(t)] \quad (1)$$

Với P_s là công suất truyền, m là chỉ số điều chế. Tín hiệu quang được truyền đến bộ điều khiển phân kỳ chùm tia tại HAP sau đó được khuếch đại trước khi được chuyển tiếp đến các UAV. Tín hiệu đầu ra được biểu diễn như sau:

$$r(t) = G\left[h_{SR}s(t) + n_{b1}\right] \quad (2)$$

Trong đó, h_{SR} là tổn hao do phân kỳ chùm tia ở chặng truyền thứ nhất, n_{b1} là nhiễu nền, và G là hệ số khuếch đại quang. Tín hiệu nhận được tại UAV có thể được biểu diễn như sau:

$$y(t) = h_{RD}Gh_{SR}P_s m s_n(t) + h_{RD}Gn_{b1} + n_{b2} + n_{rec} \quad (3)$$

Trong đó, h_{RD} là hệ số kênh truyền từ HAP đến UAV, và n_{rec} là nhiễu tại bộ thu. Bằng cách sử dụng $G^2 = \dfrac{1}{(P_S m h_{SR})^2 + (\sigma_{b1})^2}$, tỷ số tín hiệu trên nhiễu (SNR) tại phía thu, được ký hiệu là γ^{e2e}, có thể được biểu diễn như sau:

$$\gamma^{e2e} = \frac{(h_{RD}\eta G h_{SR} P_s m)^2}{(h_{RD}\eta\sigma_{b1})^2 + (\eta\sigma_{b2})^2 + (\sigma_{rec})^2} = \frac{\gamma_1\gamma_2}{\gamma_1 + \gamma_2 + 1} \quad (4)$$

Với $\gamma_1 = \dfrac{(P_s m h_{SR})^2}{(\sigma_{b1})^2}$ là nhiễu của đường truyền từ vệ tinh xuống HAP. $\gamma_2 = \dfrac{(\eta h_{RD})^2}{(\eta\sigma_{b2})^2 + (\sigma_{rec})^2}$ là nhiễu của đường truyền từ HAP xuống mặt đất.

3. MÔ HÌNH KÊNH

3.1. Liên kết quang từ vệ tinh đến HAP

Như đã được đề cập trước đó, nhiễu loạn khí quyển và mây có ảnh hưởng không đáng kể đến chùm tia từ vệ tinh đến HAP, do HAP được đặt ở độ cao khoảng 20 km phía trên các đám mây. Chùm tia quang Gauss sẽ phân kỳ dọc theo đường truyền từ vệ tinh đến HAP. Công suất nhận được tại HAP được so sánh với độ rộng chùm tia để xác định tổn hao do phân kỳ. Tổn hao này được tính theo công thức như sau:

$$h_{SR} \approx A_0 \exp\left(-\frac{2\rho^2}{w_{Leq}^2}\right) \quad (5)$$

Trong đó, $w_{Leq}^2 = w_L^2 \frac{\sqrt{\pi} erf(v)}{2v\exp(-v^2)}$ được sử dụng để xác định chùm tia tại HAP, $W_L z = W_0\sqrt{1+\varepsilon\left(\frac{\lambda d_1}{\pi w_0^2}\right)^2}$ là bán kính chùm tia ở khoảng cách z, $w_0 = (2\lambda)/(\pi\theta)$ là bán kính tại tâm của chùm tia ở $d_1 = 0$ với θ là góc phân kỳ, $\varepsilon = \left(1+2\frac{w_0^2}{\rho_0^2(d_1)}\right)$ và $\rho_0(d_1) = \left(0.55C_n^2 k_w^2 d_1\right)^{-3/5}$ là độ dài tương quan [4]. Khi giả định rằng hệ thống theo dõi chủ động giữa vệ tinh và HAP là hoàn hảo, thì bộ thu của HAP sẽ nằm chính giữa dấu chân chùm tia(i.e., ρ = 0). Do đó, $A_0 = [erf(\upsilon)]^2$ là công suất thu được tại ρ = 0, với $v = \frac{a\sqrt{\pi}}{w_d\sqrt{2}}$ là tỉ số giữa bán kính khẩu độ và bán kính chùm tia.

3.2. Liên kết quang HAP-to-UAV

Ảnh hưởng bởi mây: Khi liên kết bị che khuất bởi mây, hiệu năng suy giảm do hàm lượng nước lỏng trong mây (CLWC) cao. Sự suy giảm do mây gây ra được định nghĩa theo định luật Beer-Lambert như sau:

$$h_c = \exp(-\alpha_c d_c) \quad (6)$$

Trong đó α_c là hệ số suy hao do mây và có thể được biểu diễn như sau:

$$\alpha_2 = \frac{3.91}{V[km]}\left(\frac{\lambda[nm]}{550}\right)^{-q} \quad (7)$$

Trong đó, q là hệ số được xác định theo mô hình của Kim [5]. Tầm nhìn được xác định dựa trên mật độ các hạt N_c và hàm lượng nước lỏng trong mây M_c như sau:

$$V = \frac{1.002}{(N_c \times M_c)^{0.6473}} \quad (8)$$

Các giá trị điển hình của N_c và M_c đối với nhiều loại mây khác nhau được trình bày trong [6].

Suy hao do nhiễu loạn khí quyển: Gây ra bởi sự không đồng nhất của nhiệt độ và áp suất trong khí quyển dọc theo đường truyền từ HAP đến UAV được mô hình hóa bằng phân bố Gamma-Gamma [7]. Hàm mật độ xác suất của h_a trong trường hợp này có thể viết dưới dạng:

$$f_{h_a} = \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} h_a^{\frac{\alpha+\beta}{2}-1} K_{\alpha-\beta(2\sqrt{\alpha\beta h_a})} \quad (6)$$

Trong đó, $K_{\alpha-\beta}(.)$ là hàm Bessel bậc $(\alpha\beta)$, $\Gamma(.)$ là hàm Gamma. Các tham số α và β để đánh giá nhiễu loạn quy mô lớn và quy mô nhỏ. Trong trường hợp không có quy mô bên trong bằng không, chúng được đưa ra bởi [8].

Mô hình lỗi lệch hướng: Cơ chế điều khiển chùm tia thích ứng giữa HAP và UAV được minh họa trong Hình 1. Với hệ thống điều khiển chùm tia thích ứng, khối điều khiển trung tâm sẽ điều khiển đến bộ điều khiển chùm tia và bộ điều khiển góc phân kỳ. Tín hiệu quang được hội tụ và điều chỉnh bằng bộ điều khiển góc phân kỳ θ_{in}. Mục tiêu của bộ điều khiển chùm tia là điều chỉnh hướng

truyền của chùm tia đến các UAV. Tiêu cự của thấu kính thay đổi khi độ cong của thấu kính thay đổi, điều này cũng làm thay đổi hướng chùm tia (theo các hướng x và y) cũng như góc phân kỳ của chùm tia θ_{out}. Mô hình Gausian hai biến với bốn tham số $\mu_x \neq 0,\ \mu_y \neq 0,\ \sigma_x \neq \sigma_y$ tạo thành phân bố Beckmann. Do mỗi biến có giá trị trung bình và phương sai riêng nên độ lệch chuẩn dựa trên phân bố Beckmann được xác định như sau [9]. Xác định độ kệch hướng của chùm tia bị với bán kính r, μ và σ lần lượt là giá trị trung bình và độ lệch chuẩn.

$$f(r)=\frac{r}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \times \int_0^{2\pi}\exp\left\{-\frac{(r\cos\theta-\mu_x)^2}{2\sigma^2{}_x}-\frac{((r\cos\theta-\mu_y)^2}{2\sigma^2{}_y}\right\}d\theta \quad (10)$$

Một nguồn sáng hoặc đầu sợi quang tạo ra chùm tia quang ở phía bộ phát (HAP), sau đó chùm tia này được truyền qua một thấu kính để xác định kích thước. Mối quan hệ giữa các đặc tính chùm tia của bộ phát và bộ thu được mô tả như sau:

$$W_a=\frac{L\theta_{out}}{2}=\frac{L\theta_{in}}{2}\sqrt{\left(1-\frac{d_t}{f_t}\right)^2-\left(\frac{\pi W_0^2}{\lambda f_t}\right)^2} \quad (11)$$

Trong đó, W_0 là bán kính ban đầu của chùm tia (tại nguồn sáng), d_t là khoảng cách từ nguồn sáng đến thấu kính, f_t là tiêu cự của thấu kính phát, L là khoảng cách truyền, được xác định bởi: $L = h_{HAP}/\cos(\zeta)$ với θ_{in} và θ_{out} lần lượt là góc phân kỳ của chùm tia trước và sau khi đi qua thấu kính. Tùy thuộc vào nguồn sáng, góc phân kỳ ban đầu của chùm tia được xác định bởi: $\theta_{in} = 2\lambda/(\pi W_0)$. Khoảng cách giữa thấu kính và nguồn sáng là cố định. Các tham số W_0, λ, d_t, W_a thay đổi theo sự biến đổi của tiêu cự thấu kính phát. Tại bên thu, chùm tia chiếu vào thấu kính mỏng có khẩu độ tròn, các mẫu điểm sáng được thu tại mặt phẳng máy dò (cách khẩu độ máy thu khoảng cách dr). Vị trí của mặt phẳng tiêu cự sẽ thay đổi khi thay đổi kích thước chùm tia. Mối quan hệ giữa kích thước chùm tia trên mặt phẳng máy dò và mặt phẳng tiêu cự được mô tả như sau:

$$W_d = W_z\sqrt{1+\left(\frac{d_r-f_r}{z_r}\right)^2} \quad (12)$$

Trong đó, $W_z = 0.42\lambda f_r/(2A)$ là bán kính chùm tia Gauss tại mặt phẳng tiêu cự, và $Z_r = \pi W_f^2/\lambda$ là khoảng Rayleigh. Việc thay đổi độ dài tiêu cự f_r ảnh hưởng đến các tham số A, λ, d_r và W_d [10]. Chúng tôi xem xét một khẩu độ tròn với bán kính a_r, trong đó r là khoảng cách giữa tâm chùm tia và điểm thu. Tại bộ thu, lỗi căn chỉnh có thể được biểu diễn như sau:

$$h_m(r) \cong A_0\exp\left(-\frac{2r^2}{W_d^2}\right). \quad (13)$$

Bằng cách sử dụng phân bố Rayleigh với tham số tỷ lệ σ_{mod} là độ lệch chuẩn của nhiễu dao động tại bộ thu. Kết hợp phương trình (10) và phương trình (13), hàm mật độ xác suất của h_m có thể được biểu diễn như sau:

$$f_{h_m}(h_m)=\frac{\xi^2 h_m^{\xi^2-1}}{A_0^{\xi^2}} \quad (14)$$

Từ phương trình (6), phương trình (9), và phương trình (14), hàm phân phối tích lũy (CDF) của hệ số kênh kết hợp h_{RD} có thể được xác định như sau:

$$F_{\gamma_2,FSO}(\gamma_2,FSO)=\frac{\xi^2}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \times G_{2,4}^{3,1}\left[\frac{\alpha\beta\xi^2}{(\xi^2+1)}\sqrt{\frac{\gamma_2,FSO}{\bar{\gamma}_2,FSO}}\,\middle|\,\begin{matrix}1,\xi^2+1\\ \xi^2,\alpha,\beta,0\end{matrix}\right] \quad (15)$$

Trong đó $\xi=\frac{W_a}{2\sigma_{\text{mod}}}$ và $\Gamma(.)$ là hàm Gamma [10].

4. ĐIỀU KHIỂN THÍCH ỨNG KẾT HỢP VỚI TỐC ĐỘ TRUYỀN

4.1. Hoạt động của cơ chế điều khiển chùm tia thích ứng

Hình 1 mô tả chi tiết hai khối điều khiển, cụ thể là bộ điều khiển góc phân kỳ chùm tia và bộ điều khiển công suất bộ phát, là cần thiết để thực hiện các kỹ thuật điều khiển chùm tia thích ứng. Công suất phát tại HAP được biết, trong khi các đặc tính khác có thể được xác định như sau: Ngay sau khi thiết lập kết nối, HAP yêu cầu và thu nhận thông tin của UAV (ví dụ: vị trí, kích thước khẩu độ, độ nhạy) thông qua kênh điều khiển. Khoảng cách truyền có thể được tính toán nếu vị trí hiện tại của UAVs được xác định. Hơn nữa, thông tin phụ thuộc vào trạng thái kênh, chẳng hạn như h_c, có thể được tính toán từ khoảng cách truyền, vì độ suy giảm của đám mây vẫn gần như không đổi trong tầng bình lưu. Chúng tôi đánh giá các phạm vi hoạt động cần thiết của bộ điều khiển phân kỳ chùm tia. Do đó, góc phân kỳ được chọn để đáp ứng yêu cầu của hệ thống được xem xét như sau:

$$\theta_{in} = \max\left\{\theta_{\mathrm{lim}it}, \frac{1.72a_r}{L}\sqrt{\frac{P_s h_c}{P_{rs}}}\right\} \quad (16)$$

Trong đó, a_r là bán kính khẩu độ, P_{rs} là độ nhạy máy thu, $\theta_{\mathrm{lim}it} = 2\pi/\lambda$ là góc phân kỳ của chùm tia nhỏ nhất.

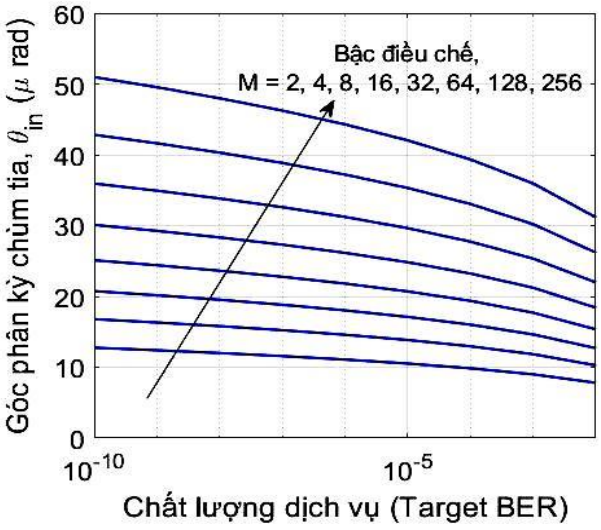
4.2. Điều khiển thích ứng tốc độ

Như minh họa trong Hình 1, bộ điều khiển thích ứng tốc độ được triển khai tại vệ tinh để điều chỉnh thứ tự điều chế, dẫn đến thay đổi tốc độ dữ liệu. Có hai giai đoạn: Hoạt động liên kết FSO và mất điện, trong đó pha FSO có một số chế độ truyền phụ tương ứng với các điều chế khác nhau quyết định tốc độ truyền. Để đáp ứng nhu cầu truyền gigabit của mạng 6G, chế độ cao nhất của pha FSO hoạt động ở đầu. Sau đó, tốc độ truyền được thay đổi linh hoạt dựa trên thông tin trạng thái kênh (CSI). Nếu chất lượng kênh không thay đổi hoặc suy giảm, hệ thống sẽ duy trì ở chế độ tốc độ thấp hơn. Trong trường hợp chế độ tốc độ thấp hơn, quá trình chuyển đổi trở lại chế độ tốc độ cao hơn nếu điều kiện kênh trở nên tốt hơn. Tương ứng với nhiều chế độ liên kết FSO, một số vùng SNR được thiết kế để tương thích với tốc độ truyền của liên kết FSO theo quy tắc chung như sau:

$$R_k = \begin{cases} R_f \log_2 M (if\ \gamma_{f(j)} \le \gamma_f^{e2e} \le \gamma_{f(j+1)}) \\ 0 (if\ 0 \le \gamma_r \le \gamma_{r(1)}) \end{cases} \quad (17)$$

Trong đó, R_f là tốc độ ký hiệu của liên kết FSO. Điều chỉnh tốc độ sử dụng M-QAM, với nhiều chế độ cho liên kết FSO và một chế độ mất kết nối, ngưỡng chuyển đổi γ^* có thể được xác định như sau [8]:

$$\gamma^* = \frac{-2(M-1)}{3}\ln[5BER(M,\gamma)] \quad (18)$$



Hình 2. Góc phân kỳ của chùm tia tương ứng với chất lượng dịch vụ

4.3. Tốc độ truyền trung bình

Để xác nhận hiệu quả của hệ thống đề xuất, chúng tôi sử dụng hiệu năng tốc độ truyền

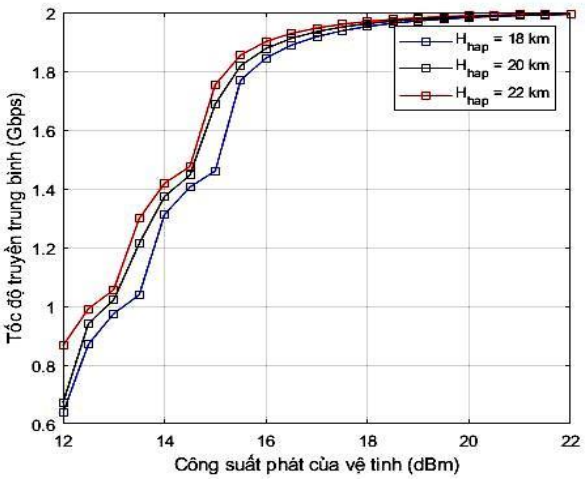
trung bình trong phân tích của mình. Để thực hiện điều này, tốc độ truyền trung bình trong hệ thống đang xét, được xác định thông qua nhiều chế độ truyền FSO, được tính toán như sau:

$$\overline{R} = \sum_{k=1}^{N} p_k R_k \qquad (10)$$

Trong đó, N là tổng số chế độ truyền, và R_k là tốc độ dữ liệu tương ứng tại chế độ thứ k; p_k là xác suất lựa chọn chế độ thứ k [5].

5. KẾT QUẢ

Trong phần này, chúng tôi trình bày các kết quả đánh giá hiệu năng của NTN dựa trên FSO được đề xuất của chúng tôi bằng cách sử dụng chùm tia thích ứng và điều khiển tốc độ kết hợp. Đối với thiết kế thích ứng tốc độ, năm chế độ truyền được sử dụng cho liên kết FSO, bao gồm 2, 4, 8, 16, 32-QAM. Độ cao vệ tinh LEO là 530 km, góc phân kỳ là 15 μ rad, bước sóng quang là 1550 nm, độ cao HAP là 20 km, bán kính khẩu độ HAP là 10 cm, góc thiên đỉnh 60°, góc phân kỳ là 1,5 mrad, công suất ánh sáng nền là 10 μW, độ cao UAV là 100 m, bán kính khẩu độ UAV là 10 cm, độ nhạy quang 0,9, công suất ánh sáng nền là 10 μW.



Hình 3. Tốc độ truyền trung bình theo công suất phát với từng độ cao của HAP

Đầu tiên, các kết quả trong Hình 2 cho thấy rằng hệ thống điều khiển chùm tia thích ứng đề xuất có thể điều chỉnh động góc phân kỳ chùm tia để duy trì tỷ lệ lỗi bit mong muốn trên các bậc điều chế khác nhau. Bậc điều chế cao (ví dụ: M = 256) yêu cầu góc phân kỳ nhỏ hơn để duy trì tính toàn vẹn của tín hiệu, trong khi các bậc điều chế thấp hơn cho phép góc phân kỳ lớn hơn để tăng phạm vi phủ sóng. Khả năng thích ứng này minh họa cho hiệu quả của hệ thống trong việc giảm lỗi lệch hướng và nhiễu loạn khí quyển, đảm bảo hiệu suất đáng tin cậy cho các ứng dụng 6G thông lượng cao.

Tiếp theo, chúng tôi nhấn mạnh hiệu quả của việc sử dụng phương pháp kết hợp điều chỉnh chùm tia thích ứng và điều chỉnh tốc độ truyền để cải thiện hiệu năng của hệ thống. Hình 3 mô tả giữa tốc độ truyền trung bình và công suất phát của vệ tinh đối với các độ cao khác nhau của HAP. Kết quả cho thấy khi công suất phát tăng, tốc độ truyền trung bình cũng tăng theo và đạt đến trạng thái bão hòa khi công suất phát vượt quá một ngưỡng nhất định (khoảng 18 dBm). Ngoài ra, khi độ cao của HAP tăng từ 18 lên 22 km, tốc độ truyền trung bình cũng có xu hướng tăng. Do đó, hệ thống thích ứng vượt trội đáng kể so với các hệ thống không thích ứng về tốc độ truyền trung bình trên tất cả các mức công suất truyền vệ tinh. Kỹ thuật cải thiện hiệu năng bằng cách tự động điều chỉnh các bậc điều chế và đặc điểm chùm tia dựa trên thông tin về trạng thái kênh, đặc biệt là ở các mức công suất cao. Tuy nhiên, nếu việc thu thập và xử lý thông tin phản hồi từ trạng thái kênh bị chậm thì mô hình cần phải đưa ra các giải pháp phù hợp hơn.

6. KẾT LUẬN

Bài báo này trình bày một cơ chế điều khiển chùm tia thích ứng được thiết kế để đáp ứng

hiệu năng NTN dựa trên FSO trong các điều kiện môi trường khác nhau. Hệ thống được đề xuất có hiệu quả làm giảm nhiễu loạn khí quyển và lỗi lệch hướng bằng cách điều chỉnh động góc phân kỳ chùm tia và tốc độ truyền, đảm bảo liên kết truyền thông ổn định và chất lượng cao. Kết quả mô phỏng chứng minh những cải tiến đáng kể về tốc độ truyền của hệ thống so với các phương pháp không thích ứng, đặc biệt là trong các trường hợp có yêu cầu về công suất truyền và chất lượng dịch vụ khác nhau. Nghiên cứu này nhấn mạnh tiềm năng của điều khiển chùm tia thích ứng như một yếu tố hỗ trợ quan trọng cho truyền thông tốc độ cao trong mạng 6G, cung cấp giải pháp có khả năng mở rộng cho internet thế hệ tiếp theo từ không gian. Trong thời gian tới chúng tôi sử dụng các thuật toán AI để dự đoán trước trạng thái kênh truyền, nhiễu loạn khí quyển để cải thiện giới hạn trên.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] N. Vaiopoulos, H.G. Sandalidis, and D. Varoutas, "*Using a hap network to transfer wimax ofdm signals: Outage probability analysis*," Journal of Optical Communications and Networking, vol. 5, no. 7, pp. 711–721, (2013).

[2] V.V. Mai and H. Kim, "*Adaptive beam control techniques for airborne free-space optical communication systems*," Appl. Opt., vol. 57, pp. 7462–7471, (Sep 2018.)

[3] M.K. Al-Akkoumi, H. Refai, and J.J.S.Jr., "*A tracking system for mobile FSO," in Free-Space Laser Communication Technologies XX* " (S. Mecherle, ed.), vol. 6877, p. 68770O, International Society for Optics and Photonics, SPIE, (2008).

[4] F. Yang, J. Cheng, and T. A. Tsiftsis, "*Free-space optical communication with nonzero boresight pointing errors*," IEEE Transactions on Communications, vol. 62, no. 2, pp. 713–725, (2014).

[5] T.V. Nguyen, H.D. Le, and A.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, no. 2, pp. 757–771, (2023).

[6] E. Erdogan, I. Altunbas, G.K. 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, (2021).

[7] M.A. Al-Habash, L.C. Andrews, and R.L. Phillips, "*Mathematical model for the irradiance probability density function of a laser beam propagating through turbulent media*," Optical Engineering, vol. 40, pp. 1554–1562, (2001).

[8] T.V. Nguyen, H.D. Le, T. V. Pham, and A.T. Pham, "*Link availability of satellite-based fso communications in the presence of clouds and turbulence*," IEICE Communications Express, vol. 10, (2021).

[9] B. Zhu, Z. Zeng, J. Cheng, and N.C. Beaulieu, "*On the distribution function of the generalized beckmann random variable and its applications in communications*," IEEE Transactions on Communications, vol. 66, no. 5, pp. 2235–2250, (2018).

[10] B. Zhang, J. Zerubia, and J.-C. Olivo-Marin "*Gaussian approximations of fluorescence microscope point-spread function models*," Appl. Opt., vol. 46, pp. 1819 – 1829, (Apr 2007).

[11] H. Kaushal and G. Kaddoum, "*Optical communication in space: Challenges and mitigation techniques*," IEEE Communications Surveys Tutorials, vol. 19, no. 1, pp. 57–96, (2017).

Thông tin liên hệ: **Lê Tuấn Đạt**

Điện thoại: 0989 735 138 - Email: ltdat@uneti.edu.vn

Khoa Điện tử và Kỹ thuật máy tính, Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp.