ĐÁNH GIÁ HIỆU NĂNG BẢO MẬT LỚP VẬT LÝ CHO MẠNG TRUYỀN THÔNG PHI MẶT ĐẤT DÙNG KỸ THUẬT TẠO NHIỄU NHÂN TẠO DƯỚI ẢNH HƯỞNG CỦA THỜI TIẾT

PERFORMANCE ANALYSIS OF PHYSICAL LAYER SECURITY FOR COMMUNICATION IN NON-TERRESTRIAL NETWORKS WITH ARTIFICIAL NOISE GENERATION TECHNIQUES UNDER WEATHER CONDITIONS

Nguyễn Mai Anh, Trần Thu Hương, Bùi Thị Ninh.

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

Đến Tòa soạn ngày 13/10/2025, chấp nhận đăng ngày 01/12/2025

Tóm tắt: Nghiên cứu đánh giá hiệu năng bảo mật lớp vật lý của hệ thống truyền thông phi mặt đất (Non Terrestrial Network - NTN) trong điều kiện thời tiết mưa đặc trưng tại ba miền Bắc - Trung - Nam của Việt Nam. Mô hình xem xét liên kết RF từ hạ tầng trên cao (High Altitude Platform - HAP) đến UAV và thiết bị nghe lén (Eve), trong đó suy hao mưa được mô tả bằng các tham số k và α theo khuyến nghị ITU-R, sử dụng dữ liệu lượng mưa trung bình của các năm. Nghiên cứu áp dụng kỹ thuật tạo nhiễu nhân tạo (Artificial Noise- AN) nhằm giảm thiểu nguy cơ nghe lén, đồng thời đánh giá dung lượng bảo mật của hệ thống. Kết quả mô phỏng cho thấy mưa làm suy giảm mạnh hiệu năng bảo mật, đặc biệt ở miền Trung trong mùa bão và miền Nam trong mùa mưa kéo dài. Việc sử dụng AN giúp duy trì dung lượng bảo mật dương ngay cả trong điều kiện thời tiết bất lợi. Nghiên cứu này khẳng định tính cần thiết của việc tích hợp mô hình suy hao mưa thực tế vào thiết kế và cải thiện bảo mật của hệ thống NTN, góp phần nâng cao độ tin cậy và an toàn trong các ứng dụng truyền thông không dây hiện đại.

Từ khóa: Bảo mật lớp vật lý (PLS), mạng truyền thông phi mặt đất (NTN), tạo nhiễu nhân tạo (AN).

Abstract: The research assesses the physical layer security performance of a non-terrestrial communication system (NTN) under typical wet weather conditions in three regions of Vietnam: north, central, and south. The model considers the RF link from high altitude platform (HAP) to the UAV and the eavesdropping device (Eve), in which the rain attenuation is characterized by the parameters k and α in accordance with the ITU-R guideline, using the years' average rainfall data. The research uses artificial noise (AN) techniques to reduce the risk of eavesdropping and assess the system's security capabilities. According to simulation data, rain greatly decreases security performance, particularly in the Central region during the storm season and in the South during the lengthy rainy season. The application of AN contributes to a positive security capacity even in poor weather circumstances. This work supports the importance of incorporating a realistic rain attenuation model into the design and security optimization of the NTN system, which will help to improve the dependability and safety of current wireless communication systems.

Keywords: Physical Layer Security (PLS), Non Terrestrial Network (NTN), Artificial Noise (AN).

1. GIỚI THIỆU

Sự phát triển mạnh mẽ của mạng truyền thông phi mặt đất (NTN) là một trong những hướng nghiên cứu quan trọng nhằm hiện thực hóa mục tiêu kết nối mọi nơi của mạng 6G. NTN bao gồm: các vệ tinh (LEO - quỹ đạo trái đất

thấp); HAP một công nghệ được coi là hệ thống "giả" vệ tinh có độ bền cao, hoạt động ở tầng bình lưu với độ cao từ 17-20 km trong khoảng 32 giờ, phạm vi phủ sóng với bán kính hơn 100 km, chất lượng tín hiệu tốt, độ tin cậy, thông lượng cao, chi phí thấp và độ trễ nhỏ [1] hoặc UAV để cung cấp vùng phủ sóng rộng, hỗ trợ triển khai nhanh ở những khu vực vùng sâu vùng xa hoặc bị ảnh hưởng bởi thiên tai. Tuy nhiên, mạng NTN đối mặt với nhiều thách thức, đặc biệt là nguy cơ bị nghe lén do đặc tính truyền sóng trong không gian mở và cự ly liên kết dài. Ngoài ra, điều kiện thời tiết bất lợi, chẳng hạn như mưa lớn, gây suy hao đáng kể ở các băng tần cao (liên kết RF - Radio Frequency - tần số vô tuyến), nhiễu loạn khí quyển (liên kết FSO - Free Space Optical - truyền thông quang qua không gian tự do), ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng tín hiệu và hiệu năng bảo mật. Các phương pháp mã hóa truyền thống ở tầng cao (Network hoặc Application) không còn đủ mạnh trước các hình thức nghe lén thụ động tinh vi, đòi hỏi phải có những giải pháp bổ sung ở tầng vật lý.

Một giải pháp nổi bật là bảo mật lớp vật lý (PLS), khai thác tính ngẫu nhiên của kênh truyền để đảm bảo an toàn thông tin. Trong số các kỹ thuật PLS, nhiễu nhân tạo (AN) đã chứng minh khả năng nâng cao bảo mật hiệu quả, tín hiệu nhiễu được phát trong không gian rỗng của kênh hợp pháp, không ảnh hưởng đến người nhận hợp pháp nhưng làm suy giảm đáng kể SNR của kẻ nghe lén (Eve). Bằng cách tối ưu phân bổ công suất giữa tín hiệu thông tin và AN, hệ thống có thể nâng cao dung lượng bảo mật (Cs) và giảm xác suất dừng bảo mật (SOP) mà không cần phụ thuộc hoàn toàn vào mã hóa tầng cao.

Các nghiên cứu [2]-[4] đều xem xét hệ thống FSO/RF hai chặng vệ tinh-HAP-UAV có thiết bị nghe lén trên không và sử dụng nhiễu nhân tạo để tăng bảo mật. Các tác giả triển khai AN tại HAP, xây dựng biểu thức gần đúng cho xác suất dừng bảo mật và kiểm chứng bằng mô phỏng Monte Carlo. Kết quả cho thấy AN làm giảm đáng kể nguy cơ nghe lén, hiệu năng bảo mật phụ thuộc vào phân bổ công suất giữa tín hiệu và AN, cũng như sai lệch định hướng và vị trí của thiết bị nghe lén.

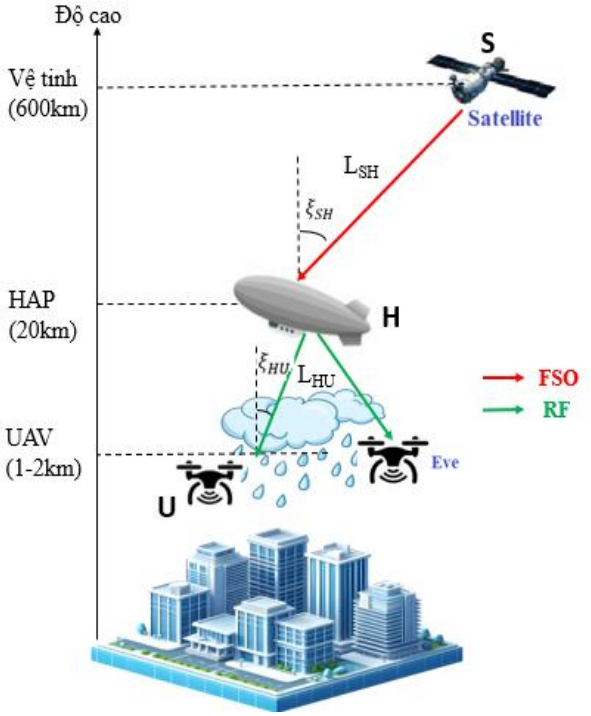
Mặc dù các nghiên cứu đạt được nhiều kết quả khả quan, tuy nhiên phần lớn các nghiên cứu này chủ yếu xem xét các điều kiện kênh lý tưởng mà chưa xét đến ảnh hưởng của các yếu tố thời tiết như mưa, mây, độ ẩm, sương mù… những yếu tố rất quan trọng khi triển khai thực tế trong không gian ngoài trời, ảnh hưởng đáng kể đến suy hao đường truyền, làm thay đổi cân bằng giữa kênh hợp pháp và kênh nghe lén. Được thúc đẩy bởi những lý do trên, nghiên cứu đề xuất mô hình và đánh giá dung lượng bảo mật trong truyền thông phi mặt đất với các đóng góp như sau:

- Đề xuất một kịch bản nghe lén mới cho mạng phi mặt đất trong vấn đề tấn công bảo mật thụ động, cụ thể là kẻ nghe lén đang nghe lén truyền thông giữa HAP và UAV.
- Nghiên cứu tác động của thời tiết đến bảo mật của hệ thống, cụ thể xem xét ảnh hưởng của mưa tới sự suy giảm tín hiệu RF.
- Kết hợp mô hình hóa suy hao mưa với kỹ thuật AN để đánh giá hiệu năng bảo mật của hệ thống trong điều kiện môi trường thực tế có xét đến các yếu tố mưa ở 3 miền Bắc, Trung, Nam tại Việt Nam.

2. MÔ HÌNH HỆ THỐNG

Xem xét một hệ thống truyền thông phi mặt đất hỗn hợp FSO/RF được trình bày trong Hình 1, trong mô hình hệ thống gồm ba nút chính:

- Nguồn phát (S): Là vệ tinh quỹ đạo thấp (LEO) phát tín hiệu qua liên kết FSO, ở độ cao khoảng 500-700 km so với mặt đất.
- Nút chuyển tiếp (H): Là hạ tầng trên cao (HAP) bay ở tầng bình lưu (17-22 km), thu tín hiệu FSO và phát lại tín hiệu bằng RF đến UAV. HAP được trang bị nhiều anten phát, đồng thời tạo nhiễu nhân tạo để nâng cao bảo mật.
- Nút đích (U): Là UAV bay ở độ cao thấp (~1-2 km), được trang bị 1 anten thu và là thiết bị nhận hợp pháp trong hệ thống.



Hình 1. Hệ thống truyền thông phi mặt đất hỗn hợp FSO/RF

Hệ thống được xem xét trong điều kiện có sự hiện diện của kẻ nghe lén (Eve), được trang bị một anten thu và đặt tại vị trí bất kỳ trong vùng phủ sóng. Giả định rằng Eve nằm giữa H và U tại liên kết RF, thực hiện kiểu tấn công nghe lén thụ động, tức là Eve không phát sóng tín hiệu can thiệp mà chỉ bí mật thu thập tín hiệu truyền từ H đến U để khai thác thông tin.

2.1. Truyền thông từ vệ tinh - HAP

Vệ tinh truyền dữ liệu đến HAP thông qua liên kết FSO, về cơ bản ở tầng này không có mây và các điều kiện bất thường nên chỉ xét sự suy giảm tầng bình lưu (h_a) và lỗi lệch hướng (h_p).

Suy hao tầng bình lưu: mô tả bởi định luật Beer:

$$h_a = e^{-\psi D_{SH}}, \quad (1)$$

Trong đó: ψ - hệ số suy giảm do sol khí tầng bình lưu; D_{SH} - khoảng cách truyền từ vệ tinh đến HAP.

Lỗi lệch hướng: Tổn hao hình học do sự trải rộng chùm tia tại phía thu kết hợp với ảnh hưởng của lệch hướng được xác định:

$$h_p(r; D_{SH}) \approx A_0 \exp\left(\frac{-2r^2}{w_{D,eq}^2}\right), \quad (2)$$

Với: $w_{D,eq}^2 = w_D^2 \frac{\sqrt{\pi}.erf(v)}{2v.\exp(-v^2)}$ là chiều rộng chùm tia tương đương tại HAP; $A_0 = [erf(v)]^2$ là phần công suất thu được tại $r = 0$; $v = \frac{\sqrt{\pi}\alpha_d}{\sqrt{\pi} w_D}$; α_d là bán kính của khẩu độ tại HAP; $w_D = w_{0,S}\left[1 + \left(\frac{D_{SH}.\lambda}{\pi w_{0,S}^2}\right)^2\right]^{1/2}$ là độ rộng búp sóng quang tại khoảng cách D_{SH}; $w_{0,S} = \lambda / 2\theta_c$ là eo chùm tia từ vệ tinh; θ_c là góc phân kỳ chùm tia.

Theo [7] tín hiệu nhận được tại HAP là:

$$y_{SH} = \varsigma\sqrt{P_S} h_{SH} x_S + n_H, \quad (3)$$

Trong đó: $h_{SH} = h_a h_p$ là suy giảm ở liên kết FSO; $0 \le \varsigma \le 1$ là hệ số chuyển đổi quang - điện; P_S là công suất phát của S, x_S là tín hiệu

được truyền đi, n_H là nhiễu Gaussian trắng cộng (AWGN) với mật độ phổ công suất nhiễu N_0. Do đó, tỷ số tín hiệu trên nhiễu tức thời (SNR) tức thời tại HAP được xác định:

$$\gamma_H = \frac{\varsigma P_S I_{SH}^2}{N_0} = \bar{\gamma}_H I_{SH}^2, \quad (4)$$

Trong đó: $\bar{\gamma}_H = \frac{\varsigma P_S}{N_0}$ là SNR trung bình tại H với $E\left[I_{SH}^2\right] = 1$.

2.2. Truyền thông từ HAP - UAV

Đối với liên kết RF, xét suy hao đường truyền bị ảnh hưởng bởi:

Ảnh hưởng của mây: Vẫn cần được xem xét trong thiết kế liên kết vệ tinh, đặc biệt với các tần số trên 15 GHz, nơi độ suy hao có thể đạt đến khoảng 4 dB và tiếp tục tăng khi tần số tăng. Theo ITU-P840 [9], mô hình suy giảm đám mây dựa trên tán xạ Rayleigh phù hợp với tần số lên đến 200 GHz và được biểu thị như sau:

$$L_C = d_c \alpha_1, \quad (5)$$

Trong đó: L_C - suy hao do mây với độ dày của mây là d_c; $\alpha_1 = K_C M_C$ - suy hao riêng trong mây (dB/km); $K_C((\text{dB/km})/(\text{g/m}^3))$ - hệ số suy hao riêng; $M_C(\text{g/m}^3)$ - hàm lượng nước lỏng trong mây [6].

Ảnh hưởng của mưa: Mưa là một trong những yếu tố gây suy hao lớn nhất đối với tín hiệu vô tuyến, đặc biệt đối với các hệ thống thông tin vệ tinh hoạt động ở tần số cao (trên 10 GHz). Hiện tượng này không chỉ làm suy giảm cường độ tín hiệu mà còn gây biến dạng phân cực, dao động nhanh biên độ, giảm độ rộng băng thông kết hợp và suy giảm hệ số khuếch đại anten. Do đó, việc đánh giá suy hao do mưa là yêu cầu quan trọng trong thiết kế liên kết vệ tinh - mặt đất, đặc biệt ở các vùng nhiệt đới và cận nhiệt đới nơi mưa có cường độ cao và tần suất lớn. Suy hao do mưa xuất hiện khi sóng điện từ truyền qua vùng mưa bị hấp thụ và tán xạ bởi các giọt nước. Độ suy hao γ_R (dB/km) từ lượng mưa R (mm/h) được thể hiện qua như sau:

$$\gamma_R = kR^\alpha, \quad (6)$$

Giá trị của các hệ số k, α được xác định theo hàm của tần số f (GHz) trong phạm vi từ 1 đến 1000 Ghz từ các phương trình sau:

$$\log_{10}^k = \sum_{j=1}^{4}\left(a_j \exp\left[\frac{\log_{10} f - b_j}{c_j}\right]^2\right) + m_k \log_{10} f + c_k, \quad (7)$$

$$\alpha = \sum_{j=1}^{5}\left(a_j \exp\left[-\left(\frac{\log_{10} f - b_j}{c_j}\right)^2\right]\right) + m_\alpha \log_{10} f + c_\alpha, \quad (8)$$

Trong đó: f: tần số (GHz); $k: k_H$ hoặc k_V (hệ số suy hao đối với phân cực ngang hoặc dọc); $\alpha: \alpha_H$ hoặc α_V (góc pha ứng với phân cực ngang hoặc dọc) [5].

$$k = \left[k_H + k_V + (k_H - k_V)\cos^2\theta\cos 2\tau\right]/2 \quad (9)$$

$$\alpha = (k_H\alpha_H + k_V\alpha_V + \left(k_H\alpha_H - k_V\alpha_V\right)\times \times\cos^2\theta\cos 2\tau)/2k, \quad (10)$$

Trong đó: θ: Góc nâng của đường truyền; τ: Góc nghiêng của phân cực so với phương ngang (đối với phân cực tròn $\tau = 45^o$).

Trong nghiên cứu này, xét tần số tại 26 GHz, theo bảng 5 của [5], thì:

$k_H = 0.1724; \alpha_H = 0.9884$

$k_V = 0.1669; \alpha_V = 0.9421$

Hệ số kênh của liên kết RF có thể được biểu diễn dưới dạng $h_{RF} = g_r h_r$, h_r là hệ số fading

kênh, g_r là suy hao đường truyền, được xác định như sau [6]:

$$g_r[dB] = G_t + G_r - 20\log\left(\frac{4\pi L_{HU}}{\lambda_{RF}}\right) - \\ -(\alpha_{oxy} + \alpha_{rain}).L_{HU} - L_C, \quad (11)$$

$$L_{HU} = \frac{H_{HAP} - H_{UAV}}{\cos(\xi_{HU})},\ d_c = d_Z / \cos\xi_{HU},$$

Trong đó: G_t, G_r lần lượt là hệ số tăng ích anten phát, thu; ξ_{HU} là góc zenith giữa HAP và UAV; L_{HU} là khoảng cách giữa HAP và UAV; λ_{RF} là bước sóng của kênh RF; α_{oxy}, α_{rain} là hệ số suy giảm do tán xạ của oxi và mưa.

2.3. Kỹ thuật tạo nhiễu nhân tạo

Xét một hệ thống nghe lén MISO, tại HAP (Alice) có N_A anten, UAV (Bob) và kẻ nghe lén (Eve) có 1 anten; Kênh chính và kênh nghe lén có vector với giá trị phức lần lượt **h** $(1\times N_A)$, **g** $(1\times N_A)$; Alice thiết kế ma trận chùm tia $V = [V_I\ V_N]$, V_I để truyền S_I (tín hiệu thông tin), V_N để truyền S_N (tín hiệu AN). Công suất được phân bổ cho S_I là $\sigma_I^2 = \phi.P_t$, $0 \le \phi \le 1$, công suất phát của AN cho các phần tử S_N là:

$$\sigma_N^2 = \frac{(1-\phi).P_H}{N_A - 1} \quad (12)$$

Alice thực hiện phân tích giá trị riêng của $F \triangleq h^H h$; h^H là ma trận chuyển vị Hermitian của **h**. Alice chọn V_I làm vector riêng chính tương ứng với giá trị riêng lớn nhất của **F** (V_I được chuẩn hóa $\|V_I\|^2 = 1$) và chọn V_N là $(N_A - 1)$ vector riêng còn lại của **F** sao cho V_N nằm trong không gian rỗng của h^H, tức là $hV_N = 0$. Do đó, $(N_A - 1)$ vector tín hiệu truyền tại Alice là:

$$x = [V_I\ V_N]\begin{bmatrix} S_I \\ S_N \end{bmatrix} = V_I S_I + V_N S_N, \quad (13)$$

Tín hiệu nhận tại UAV là:

$$y = hx + n_B = hV_I S_I + n_B, \quad (14)$$

n_B: Nhiễu Gaussian trắng cộng tại UAV thỏa mãn: $E\left[n_B n_B^H\right] = \sigma_B^2$

SNR tại UAV là [8]: $\gamma_B = \phi\bar{\gamma}_B \|h\|^2$; (15)

SNR trung bình tại UAV là: $\bar{\gamma}_B = \frac{P_t g_r}{\sigma_B^2}$ (16)

$$\sigma_B^2[dBm] = B + N_0 + N_F, \quad (17)$$

B là băng thông RF (dBMHz); N_0 là mật độ phổ công suất nhiễu (thường có giá trị -174 dBm/MHz); N_F là hệ số nhiễu máy thu.

Tín hiệu nhận tại Eve là:

$$z = gx + n_E = gV_I S_I + gV_N S_N + n_E, \quad (18)$$

n_E: Nhiễu Gaussian trắng cộng tại Eve thỏa mãn: $E\left[n_E n_E^H\right] = \sigma_E^2$.

SNR tại Eve: $\gamma_E = \frac{\phi P_H \|gV_I\|^2}{\frac{(1-\phi)P_H \|gV_N\|^2}{(N_A - 1)} + \sigma_E^2}$, (19)

3. PHÂN TÍCH BẢO MẬT HỆ THỐNG

Trong bảo mật lớp vật lý, dung lượng bảo mật (C_s) là một chỉ số quan trọng dùng để đo lường khả năng bảo vệ thông tin khỏi kẻ nghe lén. Một hệ thống được bảo mật nếu $C_s > 0$, tuy nhiên trong thực tế do ảnh hưởng của fading ngẫu nhiên, điều kiện $C_s > 0$ không phải lúc nào cũng được đảm bảo. Dung lượng bảo mật được định nghĩa là mức dung lượng thông tin tối đa mà nguồn phát (Alice) có thể truyền đến người nhận hợp pháp (Bob) mà không bị rò rỉ đến kẻ nghe lén (Eve). Từ góc

nhìn lý thuyết thông tin, C_S được xác định dựa trên sự khác biệt giữa dung lượng của kênh chính (C_B) và kênh nghe lén (C_E) là:

$$C_S = [C_B - C_E]^+ \quad (20)$$

Trong đó:

$$C_B = \log_2(1+\gamma_B) \quad (21)$$

$$C_E = \log_2(1+\gamma_E) \quad (22)$$

Do đó:

$$C_S = \begin{cases} \log_2(1+\gamma_B) - \log_2(1+\gamma_E), & \gamma_B > \gamma_E \\ 0 & nguoc\,lai \end{cases} \quad (23)$$

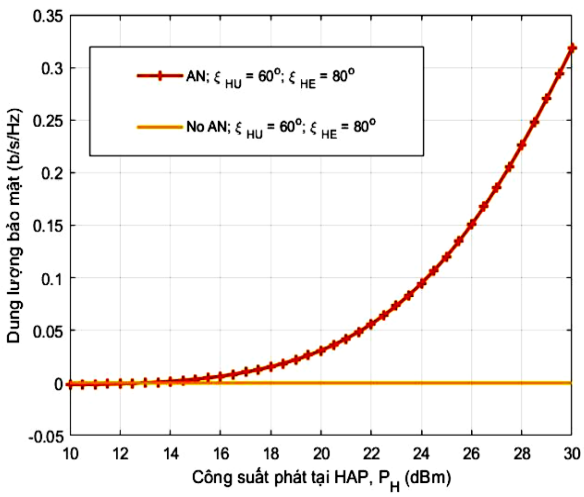
Bảng 1: Danh mục các tham số trong hệ thống

Tham số	Ký hiệu	Giá trị
Bước sóng của liên kết FSO	λ_{FSO}	1,55 µm
Tần số của liên kết RF	f_{RF}	26.10^9 m
Đô cao vệ tinh so với mặt đất	H_S	610 km
Độ cao của HAP so với mặt đất	H_{HAP}	20 km
Độ cao của UAV so với mặt đất	H_{UAV}	1 km
Góc phân kỳ chùm tia	θ_C	3.10^{-6} rad
Bán kính của khẩu độ tại HAP	α_d	10^{-2} m
Hệ số tăng ích anten phát, thu	G_t	30 dB
Hệ số tăng ích anten thu	G_r	30 dB
Công suất tại vệ tinh	P_s	20 dBm
Góc zenith giữa HAP - UAV	ξ_{HU}	60^o
Góc zenith giữa HAP - Eve	ξ_{HE}	80^o

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Trong phần này, phân tích các kết quả mô phỏng thu được nhằm đánh giá hiệu quả của AN dưới ảnh hưởng của thời tiết trong việc cải thiện dung lượng bảo mật của hệ thống truyền thông phi mặt đất.

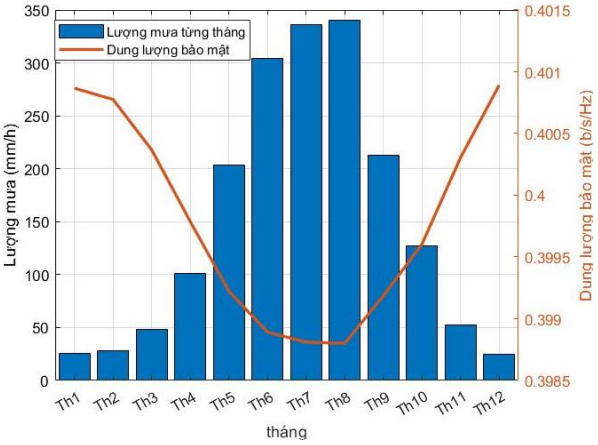
Hình 2 so sánh dung lượng bảo mật theo công suất phát $(P_H = 10 \div 30\,\text{dBm})$ tại HAP giữa hai trường hợp không và có sử dụng AN với $\xi_{HU} = 60^0$, $\xi_{HE} = 80^0$, $\phi = 0.7$, $N_A = 4$. Khi không có AN, Eve thu tín hiệu RF gần tương tự Bob nên dung lượng bảo mật gần bằng 0. Khi dùng AN, HAP phát nhiễu vào không gian rỗng của kênh hợp pháp, khiến Bob không bị ảnh hưởng nhưng SNR của Eve giảm mạnh. Kết quả cho thấy khi tăng công suất phát, dung lượng bảo mật nhanh chóng dương và AN chiếm ưu thế rõ rệt, giúp chuyển hệ thống từ trạng thái không an toàn sang an toàn.



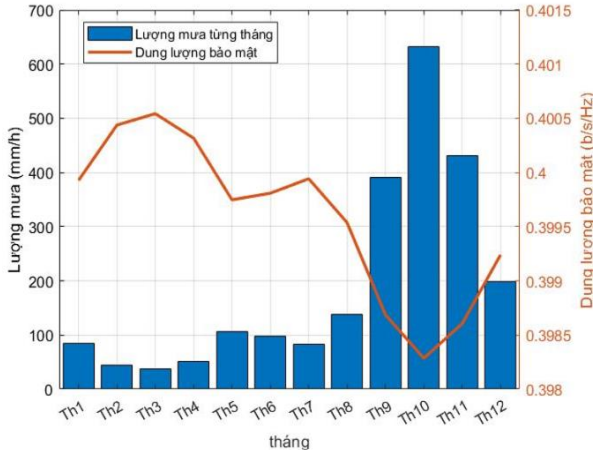
Hình 2. Dung lượng bảo mật của hệ thống khi có và không có nhiễu nhân tạo

Nhìn tổng thể từ hình 3 đến hình 5 với tham số: $P_H = 30\,\text{dBm}$, $N_A = 6$, $\xi_{HU} = 60^0$, $\xi_{HE} = 80^0$, $\phi = 0.7$ cho thấy xu hướng chung là C_S biến thiên mạnh theo tháng và theo đặc thù khí hậu từng miền. Ở cả ba miền, C_S đạt giá

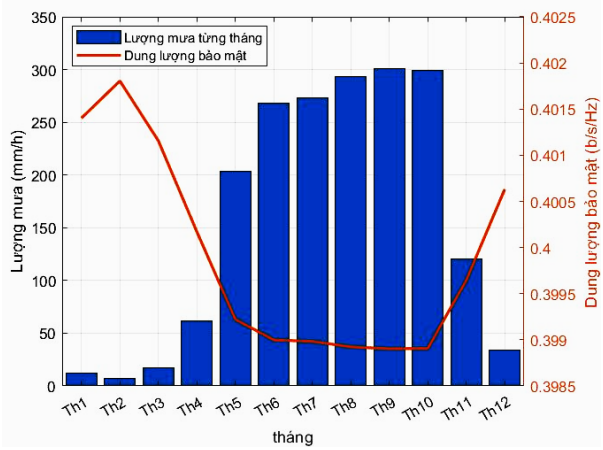
trị cao vào các tháng khô, giảm rõ rệt trong các tháng mưa lớn khi lượng mưa cao làm hệ số suy hao mưa tăng nhanh, kéo SNR giảm và đẩy C_S về gần 0. Tuy nhiên, việc sử dụng AN giúp giảm đáng kể khả năng nghe lén, duy trì $C_S > 0$ trong nhiều tháng ngay cả khi mưa lớn. So sánh giữa các miền, miền Trung chịu tác động cực đoan nhất với biên độ biến thiên lớn và đáy C_S sâu vào mùa bão; miền Nam có mùa mưa kéo dài khiến C_S giảm liên tục nhiều tháng; miền Bắc giảm mạnh vào mùa hè nhưng phục hồi nhanh vào mùa khô.



Hình 3. Dung lượng bảo mật của hệ thống ứng với lượng mưa của từng tháng ở miền Bắc



Hình 4. Dung lượng bảo mật của hệ thống ứng với lượng mưa của từng tháng ở miền Trung



Hình 5. Dung lượng bảo mật của hệ thống ứng với lượng mưa của từng tháng ở miền Nam

Kết quả này khẳng định AN đóng vai trò quan trọng trong việc bảo mật lịch truyền tải phù hợp theo mùa mưa, tối ưu phân bổ công suất.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã nghiên cứu hiệu năng bảo mật lớp vật lý của hệ thống truyền thông phi mặt đất dưới tác động của mưa, trong đó liên kết RF từ HAP đến UAV được phân tích chi tiết theo đặc thù khí hậu ba miền Bắc - Trung - Nam của Việt Nam. Mô hình suy hao mưa được kết hợp AN cho phép đánh giá dung lượng bảo mật theo từng tháng, phản ánh chính xác biến động theo mùa. Phân tích cũng chỉ ra rằng ảnh hưởng của mưa khác nhau theo vùng miền, từ đó là căn cứ đề xuất các giải pháp như tối ưu phân bổ công suất AN theo tháng, lập lịch truyền ưu tiên mùa khô, hoặc điều chỉnh cấu hình liên kết RF để giảm chiều dài đường mưa trong các tháng xấu. Nghiên cứu khẳng định tầm quan trọng của việc tích hợp AN và mô hình hóa mưa thực tế vào thiết kế hệ thống NTN hỗn hợp FSO/RF, góp phần xây dựng các giải pháp truyền thông không dây an toàn và thích ứng với điều kiện khí hậu Việt Nam.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] F. A. d'Oliveira, F. C. L. d. Melo, and T. C. Devezas, "High altitude platforms–present situation and

technology trends," *J. Aerosp. Technol. Manage., vol. 8*, no. 3, pp. 249–262, 2016.

[2] S. Sharma, A. S. Madhukumar and R. Swaminathan, "Effect of Pointing Errors on the Performance of Hybrid FSO/RF Networks," in *IEEE* Access, vol. 7, pp. 131418-131434, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2940630.

[3] E. Erdogan, O. B. Yahia, G. K. Kurt and H. Yanikomeroglu, "Optical HAPS Eavesdropping in Vertical Heterogeneous Networks," in *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*, vol. 4, pp. 208-216, 2023

[4] Odeyemi, K.O.; Owolawi, P.A. A Mixed FSO/RF Integrated Satellite-High Altitude Platform Relaying Networks for Multiple Terrestrial Users with Presence of Eavesdropper: A Secrecy Performance. *Photonics* 2022.

[5] ITU-R, "*Recommendation ITU-R P.838-3: specific attenuation model for rain use in prediction methods,"* 2005. [Online]. Available: https://www.itu. int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.838-3-200503

[6] T. V. Nguyen, H. D. Le, N. T. Dang and A. T. Pham, "On the Design of Rate Adaptation for Relay-Assisted Satellite Hybrid FSO/RF Systems," in *IEEE Photonics Journal*, vol. 14, no. 1, pp. 1-11, Feb. 2022, Art no. 7304211.

[7] O. B. Yahia, E.Erdogan, G.K.Kurt, I.Altunbas and H. Yanikomeroglu, "HAPS Selection for Hybrid RF/FSO Satellite Networks," in *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol.58, no. 4, pp.2855-2867, Aug. 2022.

[8] S. Yan, N. Yang, I. Land, R. Malaney, and J. Yuan, "Three artificial-noise-aided secure transmission schemes in wiretap channels," *IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 67*, no. 4, pp. 3669–3673,2018.

[9] *"Attenuation due to clouds and fog,"* International Telecommunication Union (ITU*)*, Document Rec. ITU-R P-840-6, Sep. 2013.

Thông tin liên hệ: **Nguyễn Mai Anh**

Điện thoại: 0989997649 - Email: nmanh@uneti.edu.vn

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