

ĐÁNH GIÁ PHẨM CHẤT TRUYỀN TIN GÓI NGẮN CỦA HỆ THỐNG UAV-NOMA ĐƯỜNG XUỐNG

Nguyễn Thị Thái Hòa¹, Nguyễn Văn Quyết², Đoàn Vũ Giang³, Trần Mạnh Hoàng^{1*}

¹Trường Đại học Thông tin Liên lạc

²Trường Đại học Công nghệ Đồng Nai

³Trường Cao Đẳng nghề Công nghiệp Hà Nội

*Tác giả liên hệ: Trần Mạnh Hoàng, email: tranmanhhoang@tcu.edu.vn

THÔNG TIN CHUNG

Ngày nhận bài: 11/07/2023

Ngày nhận bài sửa: 04/09/2023

Ngày duyệt đăng: 20/09/2023

TỪ KHOA

UAV;

NOMA;

BLER;

EE;

LoS

TÓM TẮT

Trong bài báo này, chúng tôi đề xuất và khảo sát phẩm chất của hệ thống đa truy nhập không trực giao (NOMA: non-orthogonal multiple access) đường xuống từ thiết bị không người lái (UAV: unmanned aerial vehicle) đến các người dùng mặt đất. Số lần sử dụng kênh của hệ thống đề xuất được thiết kế có giới hạn. Phẩm chất hệ thống được đánh giá thông qua tham số tỉ lệ lỗi khối block error rate (BLER) và hiệu quả năng lượng. Sử dụng phương pháp phân tích toán học để xác định các biểu thức dạng đóng nhằm chỉ ra ảnh hưởng của các tham số đến BLER, sau đó sử dụng mô phỏng Monte-Carlo trên phần mềm Matlab để kiểm chứng các kết quả phân tích và thảo luận phẩm chất hệ thống UAV-NOMA đề xuất. Các kết quả phân tích và mô phỏng trong bài báo chỉ ra rằng, hệ thống đề xuất đáp ứng được yêu cầu độ tin cậy siêu cao, và độ trễ rất nhỏ (URLLC: Ultra-reliable low latency communications) và các phân tích hoàn toàn chính xác.

1. GIỚI THIỆU

Ngày nay, sử dụng thiết bị không người lái (UAV: unmanned aerial vehicle) hỗ trợ truyền thông đã được triển khai. Đặc biệt, UAV hỗ trợ chia sẻ dữ liệu hệ thống giao thông, thay thế các trạm gốc cố định do quá tải hoặc hư hỏng từ các thảm họa thiên nhiên, chiến tranh (L. Wang, Che, Long, Duan, & Wu, 2019). Bên cạnh đó, yêu cầu nghiêm ngặt về độ tin cậy rất cao, độ trễ cực nhỏ (URLLC: ultra-reliable and low latency) trong hệ thống truyền thông tương lai (6G: sixth generation) các gói tin với kích thước lớn không đáp ứng được (Durisi, Koch, & Popovski, 2016). Từ đó, phương pháp truyền tin gói có kích thước

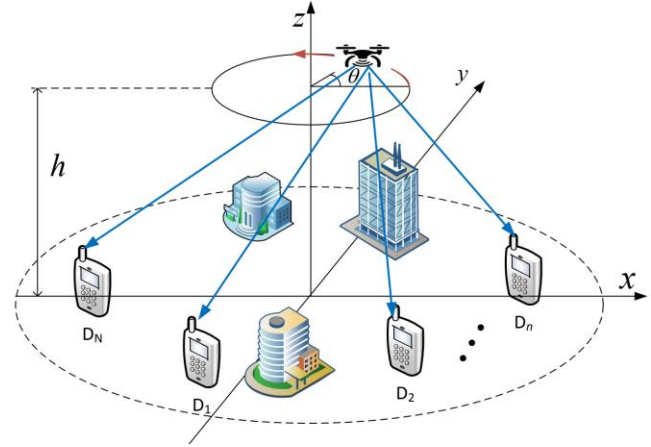
ngắn (SPC: short packet communication) được đề xuất bởi các nhà khoa học trong và ngoài nước (Agarwal, Jagannatham, & Hanzo, 2020). Mặt khác phương thức đa truy nhập không trực giao (NOMA: non-orthogonal multiple access) được xác định là kỹ thuật nhằm tăng hiệu quả sử dụng phổ biến và hứa hẹn thay thế cho phương thức đa truy nhập trực giao (OMA: orthogonal multiple access) hiện có (Dai et al., 2018). Khi sử dụng UAV hỗ trợ truyền thông gói tin ngắn trong các hệ thống NOMA sẽ đáp ứng được yêu cầu hiệu quả sử dụng phổ tần, mở rộng vùng phủ sóng, độ tin cậy cao và độ trễ cực thấp. Tuy vậy, các đề xuất hiện nay đang nghiên cứu các kỹ thuật nêu trên còn rời rạc, chưa tích hợp thành một hệ thống

UAV-NOMA-SPC. Khác với các công trình nghiên cứu trước đây. Cụ thể trong (Yin, Liu, Gui, Gacanin, & Sari, 2022), các tác giả nghiên cứu kết hợp UAV-NOMA với kích thước gói tin dài. Các tác giả trong (Raut, Singh, Li, Alouini, & Huang, 2021) khảo sát BLER và goodput của hệ thống UAV-OMA hoạt động ở kỹ thuật SPC. Trong (Agarwal et al., 2020) và (Xiang et al., 2020) các tác giả xem xét BLER, thông lượng của hệ thống NOMA truyền thông có sử dụng với phương thức truyền SPC. Do đó, trong bài báo này nhóm tác giả đề xuất sử dụng thiết bị UAV hỗ trợ truyền thông gói tin ngắn cho hệ thống NOMA đường xuống. Để đánh giá độ tin cậy bài báo trình bày kết quả khảo sát, tính toán tham số tỷ lệ lỗi khối (BLER: block error rate), thông lượng của hệ thống, mô hình hóa và giải quyết bài toán tối ưu hiệu quả năng lượng (energy-efficiency) truyền thông. Các đóng góp của bài báo được tóm tắt như sau:

- Cung cấp biểu thức tính BLER, thông lượng của hệ thống UAV-NOMA-SPC đã đề xuất.
- Mô hình hóa và giải quyết bài toán tối ưu EE bằng phương pháp tìm kiếm điểm tối ưu, so sánh với kết quả lý thuyết. Tối ưu số bit truyền và độ cao UAV nhằm đạt phẩm chất tốt nhất của hệ thống.
- Sử dụng mô phỏng Matlab để kiểm chứng các kết quả tính toán giải tích và khảo sát phẩm chất hệ thống bằng minh họa đồ thị.

Cấu trúc bài báo được trình bày như sau: Phần 1 giới thiệu những ưu nhược điểm của các nghiên cứu trước đây, Phần 2 mô tả hệ thống đề xuất, Phần 3 trình bày chi tiết các tham số phẩm chất hệ thống, Phần 4 so sánh kết quả phân tích lý thuyết và kết quả mô phỏng, Phần 5 của bài báo là những kết luận và hướng nghiên cứu tiếp theo.

2. MÔ HÌNH HỆ THỐNG



Hình 1. Mô Hình Hệ Thống UAV-NOMA đường xuống

Mô hình hệ thống đề xuất được mô tả như trong Hình 1, trong đó một UAV mang máy phát vô tuyến, phát các gói tin ngắn đến N người dùng mặt đất kí hiệu bởi D_n , $n \in \{1, \dots, N\}$, tọa độ của D_n được đặt tại $(x_{D_n}, y_{D_n}, 0)$. UAV bay ở độ cao h , theo quỹ đạo tròn, $(r \cos \theta, r \sin \theta, h)$ với bán kính r , và θ là góc hợp bởi trục x với đoạn cung di chuyển của UAV. Từ đó, khoảng cách truyền thông của UAV đến D_n có thể được tính như sau:

$$d_n = \sqrt{(r \cos \theta - x_{D_n})^2 + (r \sin \theta - y_{D_n})^2 + h^2}. \quad (1)$$

Đặt hệ số kênh truyền suy hao theo khoảng cách giữa UAV và D_n là $L_n = \sqrt{\beta_0 / d_n^\alpha}$, trong đó β_0 là công suất tham chiếu của độ lợi kênh truyền với khoảng cách 1 m, α là hệ số suy hao phụ thuộc vào môi trường hoạt động của UAV. Hệ số suy hao có thể tính toán thông qua xác suất có tia nhìn thẳng (LoS: Light-of-sight) (Hoang, Tran, & Hiep, 2022) $\alpha = [\alpha(\pi/2) - \alpha(0)]P_{LoS} + \alpha(0)$, trong đó $\alpha(\pi/2)$ và $\alpha(0)$ là giá trị suy hao khi UAV ở điểm thẳng đứng trên người dùng, và $\alpha(0)$ khi UAV nằm sát mặt đất, do đó $\alpha(\pi/2) = 2$, và $\alpha(0) = 3.5$. Ngoài ra, định nghĩa ϕ_n là góc hợp

bởi mặt phẳng ngang với đường thẳng từ UAV đến D_n , do đó góc ϕ_n được tính bởi công thức $\phi_n = 180^\circ / \pi \arcsin(h/d_n)$. Căn cứ vào góc ϕ_n và môi trường hoạt động của UAV, xác suất LoS được tính bởi công thức như trong (Hoang et al., 2022),

$$P_L(\phi_n) = e_1 - \frac{e_1 - e_2}{1 + \left(\frac{\phi_n - e_3}{e_4}\right)^{e_5}}, P_N(\phi_n) = 1 - P_L(\phi_n), \quad (2)$$

trong đó, $e_i, i \in \{1, \dots, 5\}$ là các hằng số phụ thuộc môi trường. Trong nghiên cứu này, giả sử rằng UAV được triển khai trong môi trường Uban (B. Wang, Ouyang, Zhu, & Lin). Khi đó, độ lợi kênh trung bình bị chi phối bởi xác suất LoS có thể được biểu diễn là $\Omega_n = L_n P_L(\phi_n)$. Mặt khác, kênh vô tuyến được thiết lập từ UAV đến D_n còn bị ảnh hưởng bởi hiện tượng pha đỉnh ngẫu nhiên, thông thường thành phần này được mô hình hóa theo các dạng phân bố Rician hoặc Nakagami-m. Trong bài báo này, sử dụng kênh pha đỉnh ngẫu nhiên tuân theo phân bố Rician để phân tích các tham số phẩm chất hệ thống. Do đó, kênh truyền tổng quát của hệ thống UAV được biểu diễn bởi $g_n = f_n \sqrt{\Omega_n}$, trong đó thành phần pha đỉnh ngẫu nhiên được tính bởi:

$$f_n = \sqrt{\frac{K_n}{K_n + 1}} e^{j\psi} + \sqrt{\frac{1}{K_n + 1}} CN(0, \sigma_n^2), \quad (3)$$

với $K_n = P_L(\phi_n) / (1 - P_L(\phi_n))$ là hệ số Rician. Các thiết bị trong hệ thống giả sử được trang bị một ăng-ten và thông tin trạng thái kênh nhận được tại máy phát là hoàn hảo. Ngoài ra, phần cứng của việc thiết kế hệ thống là hoàn hảo, thông tin điều khiển UAV không lỗi, không trễ.

Đặt $X = |f_n|^2$, chúng ta nhận được hàm phân bố tích lũy (CDF: cumulative distribution function) và hàm phân bố xác suất (PDF: probability density function) của biến ngẫu nhiên X được đưa ra như sau (Chen & Tellambura, 2004)

$$F_X(x) = 1 - Q_1(\sqrt{2K}, \sqrt{2\beta_n x}), \quad (4)$$

$$f_X(x) = \beta_n e^{-K_n} \exp(-\beta_n x) I_0\left(2\sqrt{K_n \beta_n x}\right), \quad (5)$$

trong đó, $Q_1(\cdot, \cdot)$ là hàm Q-Marcum, $\beta_n = (K_n + 1) / \lambda_n$ với $\lambda_n = E\{X\}$ là giá trị trung bình của X . Giả sử điều kiện kênh truyền được biết tại UAV thông qua ước lượng kênh và được sắp xếp theo thứ tự tăng dần theo chỉ số $|g_1|^2 < \dots < |g_n|^2 < |g_k|^2 < \dots < |g_N|^2$. Khi UAV phát gói với kích thước l bao gồm b bit theo phương thức NOMA, tín hiệu nhận được tại các người dùng mặt đất có thể được biểu diễn như

$$y_{D_n} = g_n \sqrt{a_n P_V} x_n + g_n \sum_{k=n+1}^N \sqrt{a_k P_V} x_k + w_n, \quad (6)$$

Trong đó, $n < k$, x_n và x_k là tín hiệu của D_n và D_k theo các hệ số phân bố công suất a_n và a_k tương ứng; w_n là tạp âm trắng cộng tính phân bố chuẩn (AWGN: additive white Gaussian noise) tại D_n . Để cho đơn giản, trong bài báo này giả sử phương thức tách tín hiệu khử nhiễu liên tiếp tại các D_n là hoàn hảo, do đó tỷ số tín hiệu-nhiều được thiết lập bởi các biểu thức

$$\gamma_n = \frac{a_n P_V |g_n|^2}{\sum_{k=n+1}^N a_k P_V |g_k|^2 + \sigma_n^2}, \quad n < k \quad (7)$$

$$\gamma_N = a_N P_V |g_N|^2 / \sigma_N^2, \quad n = N.$$

Biểu thức SINRs trong (7) được sử dụng để tính toán các tham số đánh giá phẩm chất hệ thống đề xuất.

3. PHÂN TÍCH THAM SỐ PHẨM CHẤT

3.1. Tỷ lệ lỗi hệ thống

Khác với công thức dung lượng Shannon, tốc độ phát dữ liệu của SPC được tính trong điều kiện có xác suất lỗi ϕ_n khi số lần sử dụng kênh (số symbol) là hữu hạn và mức độ phân tán kênh truyền $V(\gamma_n)$ đã sử dụng khi phát số bit dữ liệu b .

$$R_n(l, \dot{\alpha}_n) = \frac{b}{l} \approx C(\gamma_n) - \sqrt{\frac{V(\gamma_n)}{l}} Q^{-1}(\dot{\alpha}_n), \quad (8)$$

Chú ý rằng biểu thức (8) đúng khi số lần sử dụng kênh l , ($l \geq 100$) đủ lớn và l đến vô cùng thì chính là công thức Shannon (Polyanskiy, Poor, & Verdú, 2010). Từ biểu thức (8) có thể tính xác suất lỗi tức thời (BLER: block error rate) thông qua hàm Q Gaussian như sau:

$$\dot{\alpha}_n \approx Q\left((C(\gamma_n) - R_n) / \sqrt{V(\gamma_n)/l}\right). \quad (9)$$

Từ (9) nhận được BLER trung bình tại mỗi D_n là

$$\bar{\alpha}_n \approx \int_0^\infty Q\left(\sqrt{l/V(\gamma_n)}[C(\gamma_n) - R_n]\right) f_{\gamma_n}(x) dx, \quad (10)$$

trong đó, $f_{\gamma_n}(x)$ là PDF của γ_n . Tuy nhiên từ (10) để tính được công thức BLER trung bình gặp rất nhiều khó khăn. Do đó, theo xấp xỉ đã được tính trong (Yu, Chen, Li, Ding, & Vucetic, 2018) thông qua phép xấp xỉ hàm Q, nhận được

$$Q\left(\frac{C(\gamma_n) - R_n}{\sqrt{V(\gamma_n)/l}}\right) = \begin{cases} 1, & \gamma_n \leq \rho_L \\ \frac{1}{2} - \chi_n(\gamma_i - \tau_n), & \rho_L < \gamma_i < \rho_H \\ 0, & \gamma_n \geq \rho_H \end{cases} \quad (11)$$

trong đó, $\chi_n = [2\pi(2^{2R_n} - 1)/l]^{-1/2}$, $\tau_n = 2^{R_n} - 1$, $\rho_L = \tau_n - 1/(2\chi_n)$ và $\rho_H = \tau_n + 1/(2\chi_n)$. Trên cơ sở (10) và (11), biểu thức BLER trung bình được viết lại

$$\bar{\alpha}_n(\omega) \approx \chi_n \int_{\rho_L}^{\rho_H} F_{\gamma_n|\omega}(x|\omega) dx, \quad (12)$$

với $F_{\gamma_n|\omega}(x|\omega)$ là CDF của γ_n . Để nhận được biểu thức tường minh trong (12), trước hết cần có biểu thức CDF $F_{\gamma_n|\omega}(x|\omega)$. Từ biểu thức SNR đã đưa ra trong (7) và sau ít phép biến đổi chúng ta nhận được $F_{\gamma_n}(x)$ như sau:

$$F_{\gamma_n}(x) = P_{\text{LoS}} I_1 + P_{\text{NLoS}} I_2. \quad (13)$$

trong đó,

$$I_1 = 1 - \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{n=0}^l \beta_{l,n} \left(\frac{(K+1)x\sigma^2}{\Omega_n P_V(a_n - b_n x)} \right)^n e^{-\frac{(K+1)x\sigma^2}{\Omega_n P_V(a_n - b_n x)}} \quad (14)$$

$$I_2 = 1 - \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{n=0}^l \beta_{l,n} \left(\frac{(K+1)x\sigma^2}{\omega \Omega_n P_V(a_n - b_n x)} \right)^n e^{-\frac{(K+1)x\sigma^2}{\omega \Omega_n P_V(a_n - b_n x)}}. \quad (15)$$

Thay thế (13) vào (12) và áp dụng phương pháp xấp xỉ tích phân Chebyshev-Gauss (Vu, Nguyen, Pham, da Costa, & Kim, 2022) với tổng hữu hạn phần tử, nhận được biểu thức BLER trung bình sau

$$\bar{\alpha}_n(\omega) \approx P_{\text{LoS}} \bar{\alpha}_{n,\text{LoS}} + P_{\text{NLoS}} \bar{\alpha}_{n,\text{NLoS}}, \quad (16)$$

và BLER trung bình trong điều kiện LoS và NLoS được tính toán là

$$\bar{\alpha}_{n,\text{LoS}} = 1 - \chi_n \sum_{j=0}^{L_{\max}} \sum_{n=0}^j \sum_{\mu=0}^M \frac{\pi \beta_{j,n}}{M} \left(\frac{(K+1)u\sigma^2}{\Omega_n P_V(a_n - b_n u)} \right)^n \times \exp\left(-\frac{(K+1)u\sigma^2}{\Omega_n P_V(a_n - b_n u)}\right) \sqrt{1-\psi^2} \quad (17)$$

$$\bar{\alpha}_{n,\text{NLoS}} = 1 - \chi_n \sum_{j=0}^{L_{\max}} \sum_{n=0}^j \sum_{\mu=0}^M \frac{\pi \beta_{j,n}}{M} \left(\frac{(K+1)u\sigma^2}{\omega \Omega_n P_V(a_n - b_n u)} \right)^n \times \exp\left(-\frac{(K+1)u\sigma^2}{\omega \Omega_n P_V(a_n - b_n u)}\right) \sqrt{1-\psi^2}, \quad (18)$$

$$\text{Trong đó, } \beta_{j,n} = \frac{K^j}{j!n!e^K}, \quad u = \frac{\rho_H - \rho_L}{2}\psi + \frac{\rho_H + \rho_L}{2}$$

$\psi = \cos\left(\frac{(2\mu-1)\pi}{2M}\right)$, $b_n = \sum_{k=n+1}^N a_k$ và M là số phần tử hữu hạn trong phép xấp xỉ tích phân Chebyshev-Gauss. Ngoài ra, để dễ thấy ảnh hưởng của các tham số đến phẩm chất hệ thống, chúng ta có thể rút gọn biểu thức BLER trung bình bằng cách sử dụng xấp xỉ tích phân Riemann bậc 1. Khi đó BLER có thể được xác định bởi biểu thức sau

$$\bar{\alpha}_n(\omega) \approx \chi_n(\rho_H - \rho_L) F_{\gamma_n|\omega}\left(\frac{\rho_H + \rho_L}{2} | \omega\right) \approx F_{\gamma_n|\omega}(\tau_n | \omega). \quad (19)$$

Tức là BLER trung bình trong điều kiện LoS và NLoS được viết lại

$$\bar{\alpha}_{n,\text{LoS}} \approx 1 - \sum_{j=0}^{L_{\max}} \sum_{n=0}^j \sum_{\mu=0}^{N_{\max}} \frac{(-1)^\mu \beta_{j,n}}{\mu!} \left(\frac{(K+1)\tau_i\sigma^2}{\Omega_n P_s(a_n - b_n \tau_i)} \right)^v \quad (20)$$

$$\tilde{\alpha}_{n,\text{NLoS}} \approx 1 - \sum_{j=0}^{L_{\max}} \sum_{n=0}^j \sum_{\mu=0}^{N_{\max}} \frac{(-1)^\mu \beta_{j,n}}{\mu!} \left(\frac{(K+1)\tau_i \sigma^2}{\omega \Omega_n P_s (a_n - b_n \tau_i)} \right)^\nu. \quad (21)$$

Từ các biểu thức trên thấy rằng, BLER của hệ thống xem xét phụ thuộc vào số lần sử dụng kênh l , độ lợi kênh truyền Ω_n và hệ số phân bổ công suất a_n .

3.2. Tối ưu bit phát và độ cao UAV

Khi số lần sử dụng kênh là cố định, trong đó kênh truyền sử dụng cho bit thông tin và bit huấn luyện kênh là riêng biệt, giả sử là l_i là kênh truyền thông tin và l_e là kênh huấn luyện, ($l = l_i + l_e$) số bit truyền tương ứng là b_i và b_e , ($b = b_i + b_e$). Thông lượng của hệ thống UAV-NOMA-SPC được xác định thông qua biểu thức BLER đã được xác định.

$$\tau(b, h) = \sum_{n=1}^N \frac{b}{l} (1 - \tilde{\alpha}_n(\omega)). \quad (22)$$

Từ (22) thấy rằng, khi cố định l , tăng b_e dẫn đến giảm tỷ số $(b - b_e)/l$, kết quả là giảm BLER nhưng thông lượng của hệ thống cũng giảm theo vì số bit thông tin b_i bị giảm. Điều này có nghĩa là tồn tại một giá trị bit thông tin và bit huấn luyện hợp lý mà ở đó tối ưu đồng thời BLER và thông lượng. Ngoài ra độ cao bay của UAV cũng ảnh hưởng đến phẩm chất hệ thống, do khi UAV bay cao xác suất có tia LoS lớn nhưng mức suy hao tín hiệu cũng lớn theo khoảng cách. Ngược lại khi UAV bay thấp, suy hao theo khoảng cách nhỏ nhưng xác suất LoS cũng nhỏ theo. Có nghĩa là tồn tại một độ cao tối ưu mà tại đó thông lượng của hệ thống đạt lớn nhất. Do đó, chúng ta có bài toán tối ưu thông lượng theo độ cao h và số bit truyền b

$$\begin{aligned} (P) : & \max_{b, h} \tau(b, h), \\ & \text{s.t. } \alpha_n(\omega) \leq \alpha_{th} \\ & b_{\min} \leq b \leq b_{\max} \\ & 0 \leq h \leq h_{\max}, \end{aligned} \quad (23)$$

trong đó, α_{th} là BLER mục tiêu của hệ thống, $b_{\min}$ và $b_{\max}$ tương ứng là số bit truyền tối thiểu và tối đa. Để dễ dàng sử dụng thuật toán tìm kiếm giá trị tối ưu của hàm một biến, chúng ta có thể chia bài toán ở (23) thành 2 bài toán nhỏ như sau: Trước hết cố định h , tìm cực đại thông lượng theo ràng buộc số bit truyền và ràng buộc BLER mục tiêu của hệ thống.

$$\begin{aligned} (P) : & \max_b \tau(b, h), \\ & \text{s.t. } \alpha_n(\omega) \leq \alpha_{th} \\ & b_{\min} \leq b \leq b_{\max}, \end{aligned} \quad (24)$$

Tiếp theo, cố định số bit truyền, tìm thông lượng cực đại theo ràng buộc độ cao và BLER mục tiêu

$$\begin{aligned} (P) : & \max_h \tau(b, h), \\ & \text{s.t. } \alpha_n(\omega) \leq \alpha_{th} \\ & 0 \leq h \leq h_{\max}, \end{aligned} \quad (25)$$

Để cho chặt chẽ, cần thiết phải chứng minh các hàm mục tiêu trong (24) và (25) tồn tại một nghiệm và đảm bảo điều kiện là hàm lõm (concave function) với các biến h và b .

Bổ đề 1: Biểu thức thông lượng của người dùng D_n là hàm lõm đơn trị với các biến h và b .

Chứng minh bổ đề 1, sẽ được cung cấp chi tiết trong phần Phụ lục I.

3.3. Hiệu quả năng lượng

Trong phần này của bài báo trình bày tối ưu công suất phát để đạt hiệu quả năng lượng (EE: Energy efficiency) cực đại với BLER mục tiêu cho trước. Từ định nghĩa về hiệu quả năng lượng

và thông lượng hệ thống tốc độ dữ liệu, chúng ta có thể mô hình hóa bài toán cực đại EE là

$$\begin{aligned} \max_{P_V} \quad & \frac{R_n(1 - \tilde{\alpha}_n(\omega))}{a_n P_V + P_c}, \\ \text{s.t: } \quad & 0 < a_n P_V < P_{\max}, \\ & \dot{\alpha}_n(\omega) \leq \dot{\alpha}_{th}. \end{aligned} \quad (26)$$

trong đó, $P_{\max}$ là công suất phát cực đại của UAV, P_c là công suất chi phí tiêu tốn bên trong của các mạch điện (gây ra bởi phần cứng hệ thống). Từ (8) và ràng buộc của (26) dẫn đến P_V là

$$P_V \geq \frac{2^\Delta - 1}{a_n |g_n|^2}, \quad \Delta = \frac{Q^{-1}(\dot{\alpha}_{th})}{\ln 2\sqrt{I}} + R_n. \quad (27)$$

Để giải bài toán (26) trước hết dùng phương pháp tìm kiếm 2 chiều để đạt được cực tiểu công suất phát của UAV bởi thuật toán sau:

Algorithm 1 Optimization of P_V .

- 1: **Data:** $(x_{D_n}, y_{D_n}, 0)$, (x_U, y_U, H) , r , $b_{\min}$, $b_{\max}$, $h_{\max}$, $\bar{\epsilon}_{th}$, error tolerance $\delta = 10^{-2}$
 - 2: **Result:** Minimum transmit power of UAV
 - 3: Initialization: $\alpha_1 \leftarrow 0$, $\alpha_2 \leftarrow P_{\max}$, $P_V^* \leftarrow \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}$,
 - 4: Compute BLER $\bar{\epsilon}_n(\omega)$ in (16)
 - 5: **while** $|\bar{\epsilon}_n(\omega) - \bar{\epsilon}_{th}| > \delta$ **do**
 - 6: **if** $\bar{\epsilon}_n(\omega) > \bar{\epsilon}_{th}$ **then**
 - 7: Set $\alpha_1 \leftarrow P_V^*$
 - 8: **else**
 - 9: Set $\alpha_2 \leftarrow P_V^*$
 - 10: **end**
 - 11: Set $\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} \leftarrow P_V^*$ and update $\bar{\epsilon}_n(\omega)$ again
 - 12: **end**
 - 13: Return P_V^* .
-

Sau khi đạt được P_V^* chúng ta sử dụng lại thuật toán để xác định cực đại EE. Ngoài ra sau khi nhận được P_V^* từ Thuật toán 1, tối ưu thông lượng theo độ cao và số bit truyền được thực hiện bởi hai thuật toán sau đây:

Algorithm 2 Calculation of h based on (25) with fixed b

- 1: Initialization: $q_L = 0$, $q_U = h_{\max}$, $\mu = q_U - q_L$, $\phi = \frac{\sqrt{5}-1}{2}$ (Golden ratio), error tolerance $\delta = 10^{-2}$,
 - 2: $i = 1$, $\xi_1 = q_L + \frac{q_U - q_L}{\phi}$, $\xi_2 = q_U - \frac{q_U - q_L}{\phi}$,
 - 3: **repeat**
 - 4: **if** $\tau(\xi_1) < \tau(\xi_2)$ **then**
 - 5: $q_U = \xi_2$; $\xi_2 = \xi_1$; $\tau_2 = \tau_1$; $\xi_1 = q_U + \frac{q_U - q_L}{\phi}$; $\tau_1 = \tau(\xi_1)$
 - 6: **else**
 - 7: $q_L = \xi_1$; $\xi_1 = \xi_2$; $\tau_1 = \tau_2$; $\xi_2 = q_L + \frac{q_U - q_L}{\phi}$; $\tau_2 = \tau(\xi_2)$
 - 8: **end if**
 - 9: $i = i + 1$
 - 10: **until** $|q_U - q_L| < \delta$ (the solution converge)
 - 11: Return $h^* = (q_U + q_L)/2$.
-

Algorithm 3 Joint optimization of b and h

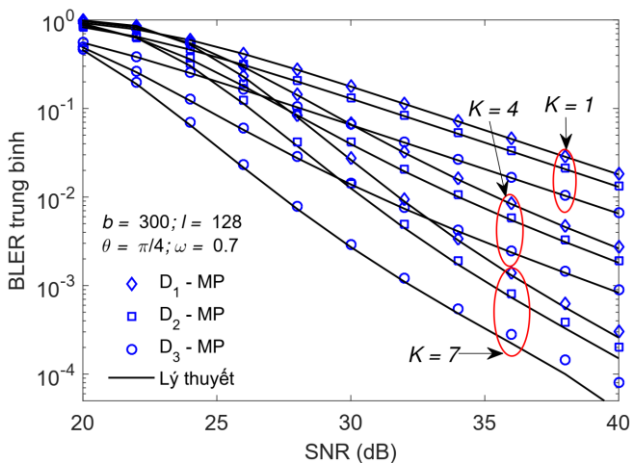
- 1: Initialization: $b_{\min}$, $b_{\max}$, $h_{\max}$, $i = 1$, b_i , h_i and δ
 - 2: **repeat**
 - 3: Using Algorithm 1 to find h_{i+1} for given b_i
 - 4: Using bisection search to find b_{i+1} for given h_{i+1}
 - 5: $i = i + 1$
 - 6: **until** $|b_{\max} - b_{\min}| < \delta$
 - 7: Return $h^* = h_{i+1}$ and $b^* = b_{i+1}$.
-

Các thuật toán sử dụng ở trên sử dụng phương pháp tìm kiếm giá trị tối ưu của hàm mục tiêu, do đó chúng có độ phức tạp rất nhỏ, đơn giản trong viết chương trình, và chỉ sử dụng khi hàm mục tiêu đảm bảo có một nghiệm tối ưu. Thuật toán 1 và 3 chỉ phụ thuộc vào số phép lặp tìm kiếm đến giá trị hội tụ, do đó độ phức tạp tương ứng của chúng là $\lceil \log(\delta / P_{\max}) / \log(\tilde{\alpha}_{th}) \rceil$ và $\lceil \log(\delta / h_{\max}) / \log(\phi) \rceil$. Đối với Thuật toán 2, b^* nằm trong khoảng $[b_{\min} \leq b^* \leq b_{\max}]$, và được chia thành I khoảng nhỏ, tại mỗi bước lặp có khoảng cách $2^{-i}(b_{\max} - b_{\min})$, có nghĩa là số lần lặp để đến giá trị hội tụ là $\lceil \log_2((b_{\max} - b_{\min}) / \delta) \rceil$, trong đó kí hiệu $\lceil \cdot \rceil$ là phép toán làm tròn xuống.

4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ THẢO LUẬN

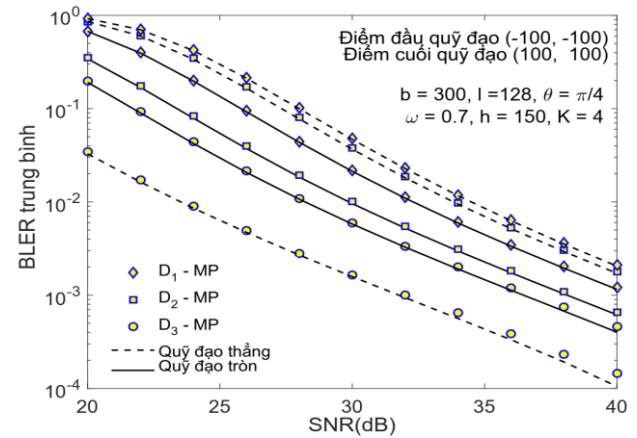
Trong phần này, bài báo trình bày kết quả mô phỏng nhằm mục đích đánh giá tường minh phẩm

chất hệ thống đã đề xuất từ ảnh hưởng của các tham số và kiểm chứng lại các kết quả đã phân tích. Tham số mô phỏng hệ thống UAV hỗ trợ người dùng NOMA theo phương thức SPC được thiết lập như sau: Số lần mẫu ngẫu nhiên được tạo là 2^{14} , kênh truyền của mỗi khe thời gian là pha đỉnh phẳng, có nghĩa là biên độ không thay đổi ở mỗi khe thời gian nhưng sẽ thay đổi ở những khe thời gian kế tiếp. Số bit truyền từ UAV đến từng người dùng $b = 300$, số kênh truyền sử dụng $l = 128$, công suất tham chiếu của UAV $\beta_0 = 20\text{ dB}$, phương sai công suất nhiễu tại D_n được chuẩn hóa $\sigma_n^2 = 1$, điều kiện hội tụ của các thuật toán $\delta = 10^{-2}$, BLER mục tiêu $\tilde{\alpha}_{th} = 10^{-3}$, hệ số phân bổ công suất cho các tín hiệu của người dùng lần lượt $a_1 = 0.5$, $a_2 = 0.3$ và $a_3 = 0.2$. UAV bay theo quỹ đạo tròn có bán kính $r = 100\text{ m}$, được thiết lập từ đầu và điều khiển bởi phi công mặt đất, vị trí các nút mặt đất đặt cố định theo các tọa độ như sau: $D_1(-250, -250, 0)$, $D_2(250, -100, 0)$ và $D_3(0, 500, 0)$. Môi trường triển khai UAV trong khu vực nông thôn do đó ảnh hưởng của các tham số truyền vô tuyến như xác định trong bảng II, (Hoang et al., 2022).



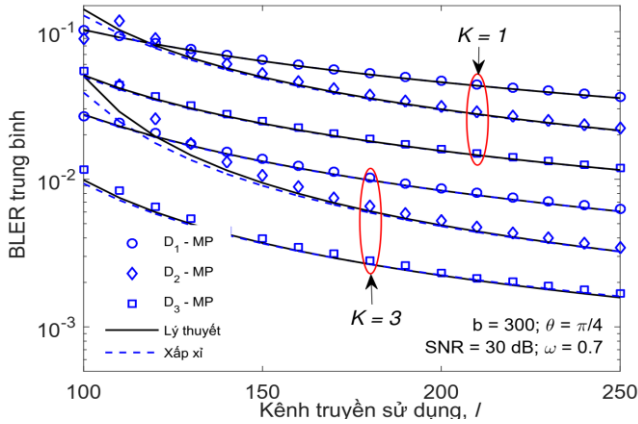
Hình 2. BLER trung bình của các người dùng theo SNR, độ cao UAV $h = 150\text{ m}$, hệ số Rician khác nhau.

Hình 2 trình bày kết quả mô phỏng BLER của các người dùng tương ứng của hệ thống UAV-NOMA SPC đường xuống. Từ kết quả thể hiện trên **Hình 2** chúng ta thấy rằng, hệ số K ảnh hưởng đáng kể đến BLER của hệ thống, cụ thể khi tăng giá trị K , BLER giảm. Điều này có thể lý giải rằng, K đại diện cho giá trị LoS của kênh truyền từ UAV đến D_n , K lớn tương đương như giá trị LoS lớn, BLER được cải thiện. Ngoài ra kết quả lý thuyết trùng với kết quả mô phỏng, xác minh rằng công thức BLER đã đưa ra trong (16) hoàn toàn chính xác. Từ kết quả chúng ta thấy hệ thống đạt được BLER mục tiêu là 10^{-4} tại $\text{SNR} = 35\text{ dB}$ và hệ số $K = 7$, tức là độ tin cậy của hệ thống đạt 99, 99%. Điều đó có nghĩa rằng, hệ thống đề xuất có thể triển khai được trong thực tế.



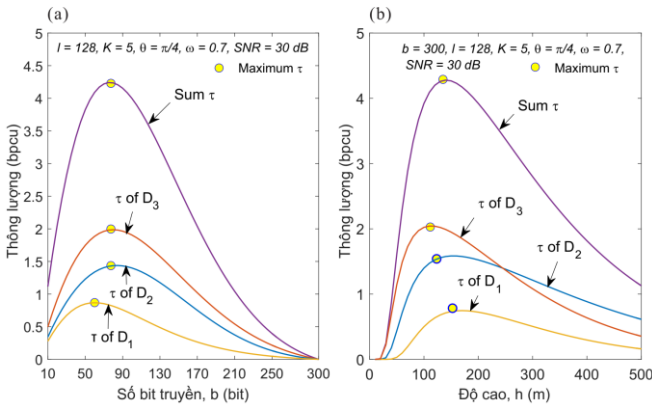
Hình 3. BLERs trung bình của các người dùng theo SNR, độ cao UAV $h = 150\text{ m}$, quỹ đạo khác nhau.

Hình 3 cung cấp kết quả mô phỏng BLER theo 2 dạng quỹ đạo của UAV, nhằm mục đích khẳng định tính ưu việt của thiết lập quỹ đạo tròn so với quỹ đạo bay thẳng của UAV. Từ kết quả trên đồ thị thấy rằng, BLER của D_1 và D_2 khi UAV bay thẳng kém hơn BLER của tất cả các người dùng khi UAV bay vòng. Tuy nhiên khi UAV bay thẳng đến điểm cuối thì BLER của D_3 vượt trội hơn so với BLER của các người dùng khi UAV bay tròn. Nguyên nhân của kết quả này là do khoảng cách khác nhau từ UAV đến D_n của từng dạng quỹ đạo.



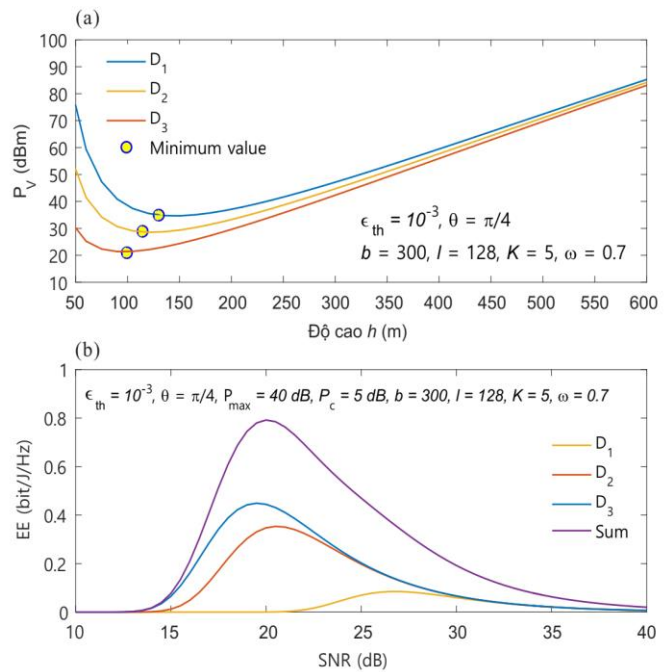
Hình 4. BLER trung bình của các người dùng theo l , $h=150$ m, K khác nhau.

Hình 4 trình bày kết quả mô phỏng BLER trung bình theo số kênh truyền sử dụng. Kết quả từ đồ thị thấy rằng sử dụng 2 phương pháp xấp xỉ công thức tường minh BLER cho kết quả gần như nhau. Ngoài ra khi l lớn thì 2 công thức đã xấp xỉ bằng nhau về giá trị. Mặt khác, khi số kênh truyền sử dụng tăng lên, BLER có xu hướng giảm nhỏ, tuy nhiên mức giảm của BLER theo l ít hơn so với BLER giảm theo SNR, tức là khi tăng l hệ thống chỉ tăng độ lợi mã hóa, trong khi đó độ lợi phân tập bị giữ nguyên do SNR cố định. Do khoảng cách từ UAV đến các người dùng khác nhau dẫn đến BLER của D_3 nhỏ nhất trong các D_n , trong khi đó D_1 cho kết quả BLER kém nhất.



Hình 5. Thông lượng của D_1 , D_2 , D_3 và của hệ thống (a) theo số bit truyền, (b) theo độ cao bay của UAV

Hình 5 biểu diễn thông lượng của D_1 , D_2 , D_3 và của hệ thống thông qua số bit truyền và độ cao bay UAV, các chấm tròn là thông lượng cực đại tương ứng với các giá trị tối ưu b^* và h^* nhận được từ các thuật toán sử dụng ở phần trên. Từ **Hình 5** thấy rằng, các giá trị tối ưu b^* và h^* mà thông lượng D_1 , D_2 , D_3 và của hệ thống đạt cực đại là khác nhau. Ngoài ra thông lượng là hàm lồi một điểm đối với h và b như được phát biểu từ Bổ đề 1. Cụ thể đối với **Hình 5(a)**, thông lượng của D_3 và D_2 đạt giá trị cực đại tương ứng là 2 (bpcu) và 1.5 (bpcu) tại số bit truyền là 80, trong khi đó thông lượng của D_1 đạt được 1 (bpcu) tại số bit truyền là 60. Thông lượng cực đại của hệ thống lớn hơn 4 bpcu. **Hình 5(b)** cũng chỉ ra rằng thông lượng của D_3 và D_2 đạt giá trị cực đại tương ứng tại $h=110$ m và $h=120$ m, trong khi đó thông lượng của D_1 đạt cực đại tại $h=150$ m.



Hình 6. (a) Công suất phát theo độ cao của UAV và ràng buộc BLER mục tiêu; (b) EE của D_1 , D_2 , D_3 và của hệ thống theo SNR

Hình 6. (a) tác động của độ cao bay đến công suất phát của UAV theo ràng buộc BLER mục tiêu là $\bar{\alpha}_{th} = 10^{-3}$. Từ đồ thị trên hình thấy rằng, các độ cao tối ưu của UAV mà tại đó công suất phát của UAV đạt cực tiểu là khác nhau. Nhìn chung khi $h < 100m$ và $h > 150m$ thì yêu cầu công suất phát lớn để BLER đạt $\bar{\alpha}_{th} = 10^{-3}$. Cụ thể D_1 yêu cầu UAV phát 40 dB và bay ở độ cao 130m để đạt được BLER $\bar{\alpha}_{th} = 10^{-3}$, trong khi đó D_2 và D_3 yêu cầu công suất phát là 30 và 20 dB tương ứng tại độ cao 120 và 100 m. Nguyên nhân do độ cao UAV quyết định đến xác suất LoS và suy hao tín hiệu phụ thuộc vào khoảng cách.

Hiệu quả năng lượng của hệ thống được trình bày trong **Hình 6. (b)**. Từ kết quả trên hình thấy rằng, EE tăng khi tăng SNR và đạt đến giá trị cực đại, sau đó giảm dần khi tiếp tục tăng SNR. Như vậy hệ thống tồn tại một giá trị công suất phát mà tại đó EE đạt lớn nhất, tức là cân bằng mức công suất tiêu tốn và phẩm chất lỗi sẽ cho EE lớn nhất. Ngoài ra, quan sát trên đồ thị thấy rằng với hệ thống đề xuất cho hiệu quả năng lượng gần 80% khi công suất hệ thống ở 20 dB (chưa tính công suất tiêu thụ phần cứng).

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã đề xuất một hệ thống UAV-NOMA đường xuống với kích thước gói tin ngắn. Trình bày các tham số chất lượng hệ thống bao gồm BLER và thông lượng, bên cạnh đó bài báo đã mô hình hóa bài toán tối ưu độ cao, số bit truyền và EE. Giải bài toán tối ưu bằng phương pháp tìm kiếm nghiệm của hàm mục tiêu, kiểm chứng kết quả thông qua mô phỏng Monte-Calor. Sử dụng phương pháp phân tích toán học và mô phỏng để khảo sát ảnh hưởng các tham số đến phẩm chất hệ thống. Kết quả cho thấy rằng, hệ thống đề xuất đạt được BLER mục tiêu (độ tin cậy 99, 99%), sử dụng số liệu để thiết kế độ cao

tối ưu của UAV tại 100-150 m; số bit truyền tối ưu của hệ thống UAV-NOMA đường xuống với kích thước gói dữ liệu ngắn nằm trong khoảng 70-90 bit. Ưu điểm của phương pháp sử dụng trong bài báo cung cấp trực tiếp cho người đọc những ảnh hưởng của tham số đến phẩm chất hệ thống, tiết kiệm được thời gian thực hiện chương trình mô phỏng. Ngoài ra phương pháp phân tích toán học kết hợp với mô phỏng ngẫu nhiên có độ tin cậy tuyệt đối. Mô hình này sẽ được mở rộng cho trường hợp nhiều cặp người dùng NOMA.

Phụ lục I

Phần này cung cấp các bước chứng minh bổ đề 1 đã được trình bày ở phần trên.

Đặt $R_n = b/l$ là tốc độ dữ liệu đạt được của D_n , từ (9) thông lượng của D_n có thể được viết lại bởi công thức sau.

$$\tau(R_n) = R_n(1 - Q(f(\gamma_n, R_n))), \quad (28)$$

trong đó, $f(\gamma_n, R_n) = \sqrt{l}[\log_2(1 + \gamma_n) - R_n] / \sqrt{V(\gamma_n)}$. Thực hiện đạo hàm cấp một $\tau(R_n)$ theo biến R_n chúng ta nhận được

$$\frac{\partial \tau(R_n)}{\partial R_n} = 1 - Q(f(\gamma_n, R_n)) - \frac{R_n A_1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{f^2(\gamma_n, R_n)}{2}}, \quad (29)$$

trong đó, $A_1 = \sqrt{l} \ln 2 / \sqrt{1 - (1 + \gamma_n)^{-2}}$. Biểu thức (29) có thể nhận giá trị âm hoặc giá trị dương, điều đó có nghĩa rằng $\tau(R_n)$ là hàm không tăng hoặc giảm tuyến tính theo R_n . Đạo hàm cấp 2 của $\tau(R_n)$ theo biến R_n chúng ta nhận được

$$\frac{\partial^2 \tau(R_n)}{\partial R_n^2} = -\frac{2A_1 e^{-\frac{f^2(\gamma_n, R_n)}{2}}}{\sqrt{2\pi}} - \frac{R_n A_1^2}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{f^2(\gamma_n, R_n)}{2}}. \quad (30)$$

Chú ý rằng, $A_1 \geq 0$ và $f(\gamma_n, R_n) \geq 0$, có nghĩa là $\partial^2 \tau(R_n) / \partial R_n^2 \leq 0$, chúng ta kết luận rằng thông lượng của D_n là hàm lõm đơn trị (concave function) theo R_n hoặc b khi l là cố định. Kết quả đã được trình bày bằng đồ thị trong phần mô phỏng ở trên. Tiếp theo, chúng ta chứng minh $\phi_n(h)$ là một hàm lồi theo biến h , khi $\phi_n(h)$ là lồi, thông lượng sẽ là hàm lõm. Thực hiện đạo hàm cấp 2 của $\phi_n(h)$ với biến h chúng ta nhận được

$$\frac{\partial^2 \phi_n(h)}{\partial h^2} = \frac{\partial^2 \phi_n(h)}{\partial \phi_n^2} \frac{\partial \phi_n}{\partial h} + \frac{\partial^2 \phi_n}{\partial h^2} \frac{\partial \phi_n(h)}{\partial \phi_n}, \quad (31)$$

$$\frac{\partial \phi_n}{\partial h} = \frac{2B+h}{(B+h)\sqrt{B-h^2+h}}, \quad \frac{\partial^2 \phi_n(h)}{\partial \phi_n^2} = \frac{A_1^2}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{f^2(\phi_n, h)}{2}}$$

Với $B = (r \cos \theta - x_{D_n})^2 + (r \sin \theta - y_{D_n})^2 \geq 0$ và

$$\frac{\partial^2 \phi_n}{\partial h^2} = \frac{4B^2(h-1) + Bh(8h-5) + h^2(2h-1)}{2(B+h)^2(B+h-h^2)^3} \geq 0$$

$$\frac{\partial \phi_n(h)}{\partial \phi_n} = -\frac{A_1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{f^2(\phi_n, h)}{2}} \leq 0. \text{ Chúng ta giả sử rằng}$$

tồn tại một h^* thỏa mãn, $\frac{\partial^2 \phi_n(h)}{\partial h^2} = 0$, tức là

$$\frac{\partial^2 \phi_n(h)}{\partial \phi_n^2} \frac{\partial \phi_n}{\partial h} = \frac{\partial^2 \phi_n}{\partial h^2} \frac{\partial \phi_n(h)}{\partial \phi_n}. \quad (32)$$

Từ biểu thức (32) và các điều kiện trên cho thấy vế trái là hàm giảm trên h , còn vế phải là hàm tăng theo h . tức là $\phi_n(h)$ lồi.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Agarwal, A., Jagannatham, A. K., & Hanzo, L. (2020). Finite blocklength non-orthogonal cooperative communication relying on swipt-enabled energy harvesting relays. *IEEE Transactions on Communications*.

Chen, Y., & Tellambura, C. (2004). Distribution functions of selection combiner output in equally correlated rayleigh, rician, and

nakagami-m fading channels. *IEEE Transactions on Communications*, 52(11), 1948-1956.

Dai, L., Wang, B., Ding, Z., Wang, Z., Chen, S., & Hanzo, L. (2018). A survey of non-orthogonal multiple access for 5g. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*.

Durisi, G., Koch, T., & Popovski, P. (2016). Toward massive, ultrareliable, and low-latency wireless communication with short packets. *Proceedings of the IEEE*, 104(9), 1711-1726.

Hoang, T. M., Tran, X. N., & Hiep, P. T. (2022). Outage probability of aerial base station noma mimo wireless communication with rf energy harvesting. *IEEE Internet of Things Journal*, 9(22), 22874-22886.

Polyanskiy, Y., Poor, H. V., & Verdú, S. (2010). Channel coding rate in the finite blocklength regime. *IEEE Transactions on Information Theory*, 56(5), 2307.

Raut, P., Singh, K., Li, C.-P., Alouini, M.-S., & Huang, W.-J. (2021). Non-linear eh-based uav-assisted fd iot networks: Infinite and finite blocklength analysis. *IEEE Internet of Things Journal*.

Vu, T.-H., Nguyen, T.-V., Pham, Q.-V., da Costa, D. B., & Kim, S. (2022). Short-packet communications for uav-based noma systems under imperfect csi and sic. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*.

Wang, B., Ouyang, J., Zhu, W.-P., & Lin, M. (2019). Optimal altitude of uav-bs for minimum boundary outage probability with imperfect channel state information.

Wang, L., Che, Y. L., Long, J., Duan, L., & Wu, K. (2019). Multiple access mmwave design for uav-aided 5g communications. *IEEE Wireless Communications*, 26(1), 64-71.

Xiang, Z., Yang, W., Cai, Y., Ding, Z., Song, Y., & Zou, Y. (2020). Noma-assisted secure short-packet communications in iot. *IEEE Wireless Communications*, 27(4), 8-15.

Yin, Y., Liu, M., Gui, G., Gacanin, H., & Sari, H. (2022). Minimizing delay for mimo-noma

resource allocation in uav-assisted caching networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*.

Yu, Y., Chen, H., Li, Y., Ding, Z., & Vucetic, B. (2018). On the performance of non-orthogonal multiple access in short-packet communications. *IEEE Communications Letters*, 22(3), 590-593.

Vu, T. H., Nguyen, T. V., Pham, Q. V., da Costa, D. B., & Kim, S. (2022). Short-packet communications for UAV-based NOMA systems under imperfect CSI and SIC. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 9(2), 46

EVALUATING THE QUALITY OF SHORT PACKET TRANSMISSION OF DOWNLOAD UAV-NOMA SYSTEM

Nguyen Thi Thai Hoa¹, Nguyen Van Quyet², Doan Vu Giang³, Tran Manh Hoang^{1*}

¹Telecommunications University

²Dong Nai Technology University

³Hanoi Industrial Vocational College

* Corresponding author: Tran Manh Hoang, email: tranmanhhoang@tcu.edu.vn

GENERAL INFORMATION

Received date: 11/07/2023
Revised date: 04/09/2023
Published date: 20/09/2023

KEYWORD

UAV;
NOMA;
BLER;
EE;
LoS

ABSTRACT

In this paper, we propose and analyze the performance of a non-orthogonal multiple access (NOMA) system, where the downlink signals are transmitted from unmanned aerial vehicles (UAVs) to ground users with finite block length. The block error rate (BLER), throughput, and energy efficiency (EE) are used as metrics to evaluate the proposed system performance. Mathematical analysis is employed to derive closed-form expressions that indicate the impact of influential parameters on the BLER, throughput and EE. The accuracy of the derived expressions is verified by presenting that numerical results are perfectly matched with analysis results. The analysis and simulations in the paper demonstrated that the proposed system can meet the requirements of ultra-reliable low-latency communications (URLLC).