

Mạng cảm biến không dây tích hợp công nghệ UAV/điện toán biên di động và truyền thông tán xạ ngược

The integration of MEC/UAV and backscatter communication in wireless sensor networks

Nguyễn Ngọc Rạng^a, Nguyễn Anh Quốc Huy^{a*}, Hà Đắc Bình^a
Nguyen Ngoc Rang^a, Nguyen Anh Quoc Huy^{a*}, Ha Dac Binh^a

^aKhoa Điện - Điện tử, Trường Công nghệ và Kỹ thuật, Đại học Duy Tân, Đà Nẵng, Việt Nam

^aFaculty of Electrical-Electronic Engineering (FEEE), School of Engineering and Technology, Duy Tan University, Da Nang, 550000, Viet Nam

(Ngày nhận bài: 22/11/2024, ngày phản biện xong: 15/01/2025, ngày chấp nhận đăng: 11/03/2025)

Tóm tắt

Mạng cảm biến không dây ngày càng đóng vai trò quan trọng trong nhiều lĩnh vực quân sự, y tế, môi trường, an ninh xã hội. Trong bài báo này, chúng tôi đề xuất một mô hình mạng cảm biến không dây mới sử dụng thiết bị bay không người lái (unmanned aerial vehicle - UAV) có gắn máy chủ điện toán biên hỗ trợ cho nhiều nút cảm biến dựa trên cơ chế truyền thông tán xạ ngược (backscatter communication - BC). Để hỗ trợ cho các nút cảm biến xử lý dữ liệu, chúng tôi đề xuất kết hợp chiến lược giảm tải một phần, kỹ thuật đa truy cập phi trực giao (NOMA) và cơ chế thu năng lượng vô tuyến (RF EH) trong hệ thống này. Ngoài ra, chúng tôi áp dụng phương thức lựa chọn nút cảm biến để đáp ứng tốt nhất yêu cầu về độ trễ. Theo đó, chúng tôi xây dựng các biểu thức dạng xấp xỉ của xác suất tính toán thành công và xác suất dùng năng lượng bằng cách sử dụng các đặc tính thống kê của kênh vô tuyến. Tiếp đến, chúng tôi khảo sát tác động của các thông số quan trọng như công suất phát, số lượng nút cảm biến, tỉ lệ phân chia tác vụ, độ cao của UAV và ngưỡng độ trễ đến hiệu năng của hệ thống. Cuối cùng, chúng tôi kiểm chứng các kết quả phân tích bằng phương pháp mô phỏng máy tính Monte-Carlo. Nghiên cứu cho thấy rằng việc tích hợp các công nghệ này có thể cải thiện đáng kể cả dung lượng và độ trễ hệ thống.

Từ khóa: truyền thông tán xạ ngược; mạng cảm biến không dây; UAV; thu năng lượng vô tuyến; đa truy cập phi trực giao.

Abstract

Wireless sensor networks are increasingly playing a crucial role in various fields such as the military, healthcare, environmental monitoring, and social security. In this paper, we propose a novel wireless sensor network model that utilizes an unmanned aerial vehicle (UAV) equipped with an edge computing server to support multiple sensor nodes based on backscatter communication (BC). We introduce an integration approach that includes a partial offloading strategy, non-orthogonal multiple access (NOMA) technique, and a radio frequency energy harvesting (RF EH) scheme. Additionally, a sensor node selection scheme is applied to the system to meet latency requirements. Closed-form expressions for success probability and energy outage probability are derived by leveraging the statistical properties of the wireless channel. Furthermore, we investigate the impact of critical parameters, such as transmit power, the number of sensor nodes, task splitting ratio, UAV altitude, and latency thresholds, on system performance. Our mathematical analysis is validated through Monte Carlo simulations. The study demonstrates that integrating these technologies can significantly enhance both system capacity and latency performance.

Keywords: backscatter communication; wireless sensor network; unmanned aerial vehicles; radio frequency energy harvesting; non-orthogonal multiple access.

*Tác giả liên hệ: Nguyễn Anh Quốc Huy
Email: nguyenganhquochuy99@gmail.com

1. Giới thiệu

Mạng cảm biến không dây (Wireless Sensor Network - WSN) là một hệ thống bao gồm nhiều cảm biến không dây kết nối với nhau để thu thập và truyền tải dữ liệu môi trường. Các cảm biến này có thể đo lường nhiều loại thông số khác nhau như nhiệt độ, độ ẩm, khói lửa, ánh sáng, chuyển động, áp suất hay các thông số sức khỏe. Điểm nổi bật của mạng cảm biến không dây gồm khả năng di động, tự động hóa, khả năng mở rộng, ứng dụng đa dạng và tiết kiệm năng lượng [1-2]. Về khả năng di động, cảm biến có thể được đặt ở nhiều vị trí khác nhau mà không cần dây nối, giúp dễ dàng triển khai trong các môi trường khác nhau. Về đặc điểm tự động hóa, các cảm biến thường tự động thu thập dữ liệu và truyền về trung tâm, giảm thiểu sự can thiệp của con người. Về khả năng mở rộng, hệ thống có thể dễ dàng mở rộng bằng cách thêm cảm biến mới vào mạng mà không cần thay đổi hạ tầng. Về ứng dụng đa dạng, WSN có thể được ứng dụng trong nhiều lĩnh vực như nông nghiệp, môi trường, thành phố thông minh, chăm sóc sức khỏe, và nhiều lĩnh vực khác. Về ưu điểm tiết kiệm năng lượng, các cảm biến thường được thiết kế để tiết kiệm năng lượng, giúp kéo dài tuổi thọ pin và giảm nhu cầu bảo trì.

Điện toán biên di động (Mobile Edge Computing - MEC) là một mô hình tính toán trong đó các dịch vụ và tài nguyên tính toán được cung cấp đến gần hơn với các thiết bị di động và cảm biến, thường là tại biên của mạng, thay vì tại các trung tâm dữ liệu tập trung xa xôi như điện toán đám mây truyền thống [3-4]. Mô hình này nhằm giảm độ trễ, tăng cường hiệu suất và giảm băng thông cần thiết cho các ứng dụng di động và kết nối vạn vật (IoT). Ứng dụng của MEC trong mạng cảm biến không dây bao gồm: Giảm độ trễ, tăng cường tính toàn vẹn và bảo mật, tiết kiệm băng thông, xử lý thông minh, cải thiện hiệu suất.

Thiết bị bay không người lái (Unmanned Aerial Vehicle - UAV) là các máy bay hoặc thiết bị bay được điều khiển từ xa hoặc tự động mà không cần sự can thiệp của con người trực tiếp trong khoang lái. UAV có thể bao gồm nhiều loại như máy bay không người lái (drone), máy bay trực thăng không người lái, hay các thiết bị bay khác. Việc triển khai UAV trong mạng cảm biến không dây có những ưu điểm như: Mở rộng vùng phủ sóng, tăng cường khả năng linh hoạt, giảm chi phí triển khai, hỗ trợ tình huống khẩn cấp, thu thập dữ liệu và giám sát, cải thiện khả năng phân phối và mạng lưới tạm thời [5-6].

Truyền thông tán xạ ngược (Backscatter Communication - BC) là một công nghệ truyền thông không dây mà trong đó thiết bị không phát ra tín hiệu trực tiếp mà phản xạ hoặc tán xạ tín hiệu từ một nguồn phát khác để truyền dữ liệu [7]. Đây là một phương pháp tiết kiệm năng lượng và chi phí, đặc biệt hữu ích cho các thiết bị có nguồn năng lượng hạn chế. Truyền thông tán xạ ngược là một công nghệ đang phát triển và có tiềm năng ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực khác nhau của mạng không dây, đặc biệt là trong các ứng dụng cần tiết kiệm năng lượng và giảm chi phí như mạng cảm biến không dây [8].

Khác với các cơ chế đa truy cập trực giao truyền thống (FDMA, TDMA, CDMA), trong đó những người dùng khác nhau được phân bổ các băng tần, khe thời gian hoặc mã riêng biệt để tránh nhiễu, cơ chế đa truy cập phi trực giao (NOMA) cho phép nhiều người dùng chia sẻ cùng một tài nguyên thời gian, tần số và mã bằng cách tận dụng sự khác biệt về mức công suất [9-11].

Công trình [12] nghiên cứu sự kết hợp của cơ chế đa truy cập phi trực giao đường lên với thu năng lượng RF cho hệ thống điện toán biên di động. Sự tích hợp của NOMA và giao tiếp tán xạ ngược đã được nghiên cứu trong các công trình [13-14]. Các tác giả trong công trình [13] đã trình bày chi tiết các trường hợp sử dụng mới cho truyền thông tán xạ ngược hỗ trợ NOMA và một

nghiên cứu điển hình về nông nghiệp thông minh xem xét đến tốc độ dữ liệu tổng thể của các thiết bị cảm biến tán xạ ngược sử dụng NOMA. Công trình [14] đề xuất một bài toán tối ưu hóa luân phiên tiết kiệm năng lượng hỗ trợ cơ chế đa truy cập phi trực giao cho giao tiếp cảm biến không dây hỗ trợ tán xạ ngược trong mạng xe cộ. Tuy nhiên, theo hiểu biết của chúng tôi, việc triển khai thu năng lượng RF, giao tiếp tán xạ ngược và kỹ thuật NOMA trong mạng cảm biến không dây sử dụng UAV vẫn chưa được xem xét. Do đó, trong công trình này, chúng tôi tập trung vào việc khảo sát hiệu năng của sự kết hợp của thu năng lượng RF, giao tiếp tán xạ ngược và kỹ thuật NOMA trong mạng cảm biến không dây sử dụng UAV-MEC với cơ chế giảm tải một phần. Những đóng góp chính của bài báo này như sau:

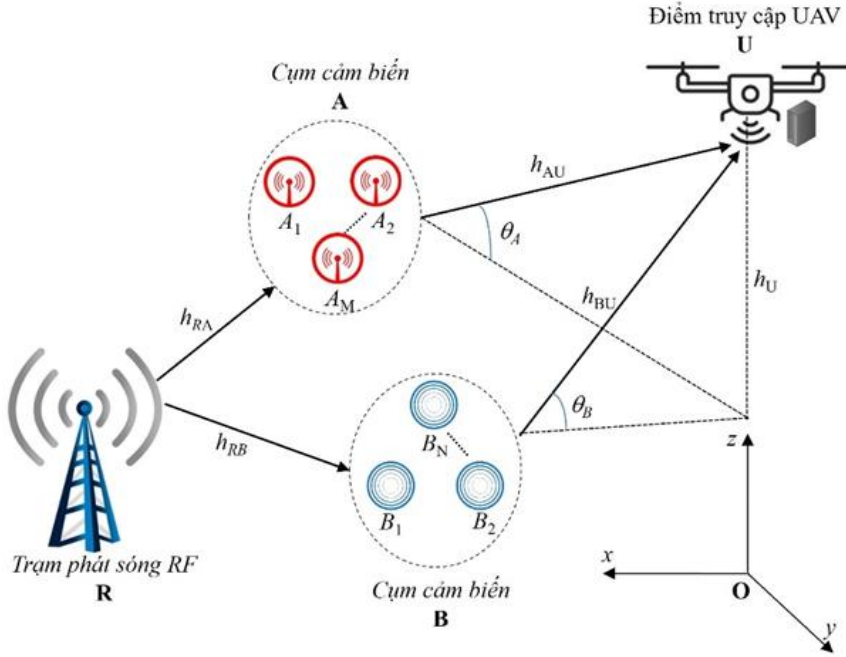
- Chúng tôi đề xuất một mô hình hệ thống NOMA MEC cho mạng cảm biến không dây sử dụng UAV dựa trên giao tiếp tán xạ ngược thu năng lượng RF với cơ chế giảm tải một phần.
- Chúng tôi đưa ra biểu thức dạng tường minh xấp xỉ của xác suất tính toán thành công (SCP) và xác suất dừng năng lượng (EOP).
- Chúng tôi nghiên cứu tác động của các thông số quan trọng như độ cao của UAV, hệ số phân chia nhiệm vụ, hệ số phản xạ tán xạ ngược, độ lớn của tác vụ, số lượng nút cảm biến và công suất truyền tải lên hiệu suất của hệ thống.

Phần còn lại của bài báo này được tổ chức như sau: Mục 2 mô tả mô hình hệ thống và kênh. Phân tích hiệu suất được trình bày trong mục 3. Kết quả số được cung cấp trong mục 4. Mục 5 là phần kết luận và hướng phát triển.

2. Mô hình hệ thống

2.1. Mô hình hệ thống và kênh truyền

Trong công trình này, chúng tôi đề xuất một mô hình hệ thống mạng cảm biến không dây như Hình 1, trong đó hệ thống sử dụng truyền thông tán xạ ngược để thu thập dữ liệu cảm biến và điện toán biên di động tại máy bay không người lái để xử lý. Các nút cảm biến được chia thành hai cụm riêng biệt, cụm **A** (có M nút, kí hiệu là A_m , $m \in \{1, 2, \dots, M\}$) và cụm **B** (có N nút, kí hiệu là A_n , $n \in \{1, 2, \dots, N\}$), mỗi cụm này có cùng một loại cảm biến và hai cụm có mức độ ưu tiên khác nhau. Không mất tính tổng quát, chúng tôi giả sử cụm **A** ưu tiên hơn cụm **B**. Điểm truy cập UAV, kí hiệu là **U**, được triển khai gần người dùng để cung cấp dịch vụ tính toán cho các nút cảm biến bằng cách tích hợp với máy chủ biên và bay lơ lửng trên bầu trời ở độ cao h_U . Các nút cảm biến sử dụng phương thức truyền thông tán xạ ngược với tín hiệu RF từ trạm **R** để giảm tải dữ liệu. Giả sử tất cả các thiết bị không dây đều được trang bị đơn ăng-ten và hoạt động ở chế độ bán song công.



Hình 1. Mô hình hệ thống

Trong nghiên cứu này, tọa độ Descartes tĩnh được sử dụng để biểu diễn vị trí của UAV và mỗi nút như Hình 1. Trong đó, chúng tôi biểu thị vị trí của U là (x_U, y_U, h_U) , vị trí của nút cảm biến $S_k \in \{A_m, B_n\}$ thứ k là $(x_k, y_k, 0)$ với $k \in \{m, n\}$, vị trí của R là $(x_R, y_R, 0)$. Giả sử các kênh không dây mặt đất-không trung và không trung-mặt đất được mô hình hóa bằng hai loại fading: mô hình quy mô lớn và quy mô nhỏ. Trong đó, mô hình quy mô lớn được điều chỉnh bởi mô hình xác suất có đường truyền thẳng (Line-of-Sight - LoS) và không có đường truyền thẳng (Non-Line-of-Sight - NLoS) [15]. Suy hao đường truyền trung bình khi xem xét xác suất của cả liên kết LoS và NLoS giữa U và nút cảm biến thứ k được tính bằng công thức sau:

$$L_{Uk} = \left[J_{LoS} + \frac{J_{LoS} - J_{NLoS}}{1 + \beta e^{\left(\frac{-100}{\pi} \mu \theta_{Uk} + \mu \beta\right)}} \right] d_{Uk}^\alpha, \quad (1)$$

trong đó, $\theta_{Uk} \triangleq \arcsin(h_U / d_{Uk})$, $d_{Uk} = \sqrt{(x_U - x_k)^2 + (y_U - y_k)^2 + h_U^2}$, α là số mũ suy hao đường truyền, μ và β biểu diễn các tham số có giá trị thay đổi dựa trên môi trường xung quanh, $J_\Omega \triangleq \Psi_\Omega(4\pi f_c / c)$, $\Omega \in \{LoS, NLoS\}$ biểu thị tham số phụ thuộc vào môi trường và tần số sóng mang f_c , c biểu thị tốc độ ánh sáng và Ψ_Ω biểu

diễn suy hao đường truyền quá mức của quá trình truyền LoS và NLoS [15].

Hệ số kênh của các liên kết $R-S_k$, S_k-U được ký hiệu lần lượt là h_{RS_k} và h_{S_kU} . Giả sử các kênh truyền này độc lập, đồng nhất và tuân theo fading Rayleigh. Khi đó, hàm phân phối tích lũy (cumulative distribution function - CDF) và hàm mật độ xác suất (probability density function - PDF) của độ lợi công suất kênh tương ứng $|h_{RS_k}|^2$ và $|h_{S_kU}|^2$, $S_k \in \{A_m, B_n\}$, lần lượt là

$$F_V(x) = 1 - e^{-\frac{x}{\lambda_V}}, \quad (2)$$

$$f_V(x) = \frac{1}{\lambda_V} e^{-\frac{x}{\lambda_V}}, \quad (3)$$

trong đó, $V \in \{|h_{RS_k}|^2, |h_{S_kU}|^2\}$, $\lambda_V \triangleq E(V)$.

2.2. Mô hình tín hiệu

Trong mô hình hệ thống đề xuất này, để áp dụng kỹ thuật đa truy cập phi trực giao NOMA nhằm nâng cao hiệu năng hệ thống, chúng tôi lựa chọn một cặp nút cảm biến đóng vai trò là các cụm trưởng bằng cách:

$$A = \arg \max_{1 \leq m \leq M} \{|h_{Rm}|\}, B = \arg \max_{1 \leq n \leq N} \{|h_{Rn}|\}. \quad (4)$$

Tín hiệu nhận được tại U như sau:

$$y = \left(\sqrt{\frac{\varepsilon_A P_0}{d_{RA}^\alpha L_{UA}}} b_A h_{RA} h_{AU} + \sqrt{\frac{\varepsilon_B P_0}{d_{RB}^\alpha L_{UB}}} b_B h_{RB} h_{BU} \right) x + w, \quad (5)$$

trong đó, x là tín hiệu truyền từ $\mathbf{R}$, thỏa mãn kỳ vọng $\mathbf{E}(|x|^2) = 1$; b_A và $b_B \in \{0, 1\}$ tương ứng đại diện cho các bit dữ liệu của $\{A, B\}$; $w \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2)$ là nhiễu trắng cộng Gaussian (AWGN) với trung bình là 0 và phương sai là σ^2 . ε_A và ε_B lần lượt là hệ số tán xạ tại nút cảm biến A và B. Do cụm $\mathbf{A}$ ưu tiên hơn cụm $\mathbf{B}$, nên ε_A và ε_B được thiết kế

để thỏa mãn điều kiện $\varepsilon_A > \varepsilon_B$. Các hệ số kênh truyền h_{RA} và h_{RB} tương ứng được biểu diễn như sau:

$$\begin{aligned} h_{RA} &= \max_{1 \leq m \leq M} \{|h_{Rm}|\}, \\ h_{RB} &= \max_{1 \leq n \leq N} \{|h_{Rn}|\}. \end{aligned} \quad (6)$$

Ngoài ra, h_{AU} và h_{BU} lần lượt là hệ số kênh truyền từ các nút cảm biến A và B đến U. Hàm phân phối tích lũy (CDF) của độ lợi kênh truyền $|h_{RA}|^2$ và $|h_{RB}|^2$ có được như sau:

$$F_{|h_{RA}|^2}(x) = \left(1 - e^{-\frac{x}{\lambda_{RA}}} \right)^M = 1 + \sum_{m=0}^{M-1} \binom{M}{m} (-1)^{M-m} e^{-\frac{(M-m)x}{\lambda_{RA}}}, \quad (7)$$

$$F_{|h_{RB}|^2}(x) = \left(1 - e^{-\frac{x}{\lambda_{RB}}} \right)^N = 1 + \sum_{n=0}^{N-1} \binom{N}{n} (-1)^{N-n} e^{-\frac{(N-n)x}{\lambda_{RB}}}. \quad (8)$$

Áp dụng kỹ thuật triệt nhiễu liên tiếp (Successive Interference Cancellation - SIC) tại U, b_A được giải mã trước tiên bằng cách xử lý thành phần b_B như nhiễu và sau đó trừ đi thành phần b_B đã giải mã để thu được b_A . Tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu cộng với nhiễu (SINR) để giải mã b_A và tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu (SNR) để giải mã b_B tại U lần lượt được biểu diễn như sau:

$$\gamma_A = \frac{a_A |h_{RA}|^2 |h_{AU}|^2}{a_B |h_{RB}|^2 |h_{BU}|^2 + 1} = \frac{a_A H_A}{a_B H_B + 1}, \quad (9)$$

$$\gamma_B = a_B |h_{RB}|^2 |h_{BU}|^2 = a_B H_B, \quad (10)$$

trong đó, $H_A \triangleq |h_{RA}|^2 |h_{AU}|^2$, $H_B \triangleq |h_{RB}|^2 |h_{BU}|^2$, $a_A \triangleq \frac{\varepsilon_A \gamma_0}{d_{RA}^\alpha L_{UA}}$, $a_B \triangleq \frac{\varepsilon_B \gamma_0}{d_{RB}^\alpha L_{UB}}$, $\gamma_0 \triangleq \frac{P_0}{\sigma^2}$.

Để hỗ trợ cho việc phân tích hiệu năng hệ thống, đầu tiên chúng tôi xây dựng Bổ đề 1 để tính toán CDF của H_X , $X \in \{A, B\}$.

Bổ đề 1.

Hàm phân phối tích lũy (CDF) của H_X , $X \in \{A, B\}$ được biểu diễn như sau:

$$F_{H_A}(x) = 1 + 2 \sum_{m=0}^{M-1} \binom{M}{m} (-1)^{M-m} \sqrt{\frac{(M-m)x}{\lambda_{RA} \lambda_{AU}}} K_1 \left(2 \sqrt{\frac{(M-m)x}{\lambda_{RA} \lambda_{AU}}} \right), \quad (11)$$

$$F_{H_B}(x) = 1 + 2 \sum_{n=0}^{N-1} \binom{N}{n} (-1)^{N-n} \sqrt{\frac{(N-n)x}{\lambda_{RB} \lambda_{BU}}} K_1 \left(2 \sqrt{\frac{(N-n)x}{\lambda_{RB} \lambda_{BU}}} \right), \quad (12)$$

trong đó, $K_v(\cdot)$ là hàm Bessel đã sửa đổi loại 2 bậc v [14].

Chứng minh.

$F_{H_A}(x) = \Pr(H_A < x) = \Pr(|h_{RA}|^2 |h_{AU}|^2 < x) = \Pr\left(|h_{RA}|^2 < \frac{x}{|h_{AU}|^2}\right)$. Thay (3) và (7) vào và dùng công thức (3.471-9) trong tài liệu [16], ta được kết quả như (11).

Tương tự đối với (12). Bổ đề 1 đã được chứng minh.

Hệ quả 1.

Hàm mật độ xác suất (PDF) của H_X , $X \in \{A, B\}$ được biểu diễn như sau:

$$f_{H_A}(x) = 2 \sum_{m=0}^{M-1} \binom{M}{m} \frac{(M-m)(-1)^{M-m+1}}{\lambda_{RA}\lambda_{AU}} K_0 \left(2 \sqrt{\frac{(M-m)x}{\lambda_{RA}\lambda_{AU}}} \right), \quad (13)$$

$$f_{H_B}(x) = 2 \sum_{n=0}^{N-1} \binom{N}{n} \frac{(N-n)(-1)^{N-n+1}}{\lambda_{RB}\lambda_{BU}} K_0 \left(2 \sqrt{\frac{(N-n)x}{\lambda_{RB}\lambda_{BU}}} \right), \quad (14)$$

2.3. Mô hình năng lượng

Các nút cảm biến nhận được tín hiệu RF từ $\mathbf{R}$, một phần tín hiệu thu được này được tán xạ ngược sau khi đã điều chế thông tin đến $\mathbf{U}$, phần còn lại được chuyển hóa thành năng lượng dùng để xử lý dữ liệu tại chỗ. Năng lượng thu được tại nút cảm biến được tính như sau:

$$E_X^h = \eta(1 - \varepsilon_X) P_0 |h_{RX}|^2 T, \quad (15)$$

trong đó, $X \in \{A, B\}$, η là hệ số chuyển hóa năng lượng ($0 < \eta \leq 1$).

Giả sử, dữ liệu của các nút cảm biến được chia thành hai phần: phần dữ liệu xử lý tại chỗ có độ lớn $L_X^{(1)}$ – bit, còn phần gửi cho $\mathbf{U}$ có độ lớn $L_X^{(2)}$ – bit. Năng lượng tiêu hao cho việc xử lý tại chỗ được tính như sau:

$$E_X^{local} = \rho c_X (f_X)^2 L_X^{(1)}, \quad (16)$$

trong đó, ρ biểu thị cho hệ số điện dung hiệu dụng của CPU phụ thuộc vào kiến trúc của nó trong các thiết bị nút cảm biến, c_X và f_X biểu thị chu kỳ CPU để tính toán một bit và tần số chu kỳ CPU của X tương ứng. Đối với việc xử lý cục bộ, điều kiện sau đây phải được thỏa mãn:

$$E_X^h \geq E_X^{local}. \quad (17)$$

2.4. Mô hình giảm tải và xử lý biên

Như đã trình bày ở phần trên, cơ chế giảm tải một phần được áp dụng cho hệ thống này. Phần xử lý tại chỗ cần thời gian xử lý được tính như sau:

$$T_X^{local} = \frac{c_X L_X^{(1)}}{f_X}, \quad (18)$$

với $X \in \{A, B\}$. Trong khi đó, phần còn lại được giảm tải về cho $\mathbf{U}$ với thời gian truyền và xử lý tại $\mathbf{U}$ lần lượt được tính như sau:

$$T_X^{off} = \frac{L_X^{(2)}}{C_X}, \quad (19)$$

$$T_U^{exe} = \frac{c_U (L_A^{(2)} + L_B^{(2)})}{f_U}, \quad (20)$$

trong đó, $C_X = W \log(1 + \gamma_X)$ với W là băng thông kênh truyền; c_U và f_U tương ứng là chu kỳ CPU để tính toán một bit và tần số chu kỳ CPU của $\mathbf{U}$.

3. Phân tích hiệu năng

3.1. Xác suất tính toán thành công

Trong hệ thống này, chúng tôi khảo sát hiệu năng thông qua độ trễ của hệ thống. Độ trễ của hệ thống được định nghĩa như sau:

$$T_{\max} = \max \left\{ \max(T_A^{local}, T_B^{local}), \max(T_A^{off}, T_B^{off}) + T_U^{exe} \right\}. \quad (21)$$

Xác suất tính toán thành công (Successful Computation Probability - SCP), ký hiệu là Λ_{SCP} , được sử dụng như một tiêu chí quan trọng để đánh giá hiệu năng của hệ thống này. Nó được định nghĩa là xác suất các tác vụ của cặp người dùng được hoàn thành trong độ trễ hệ thống tối đa cho phép T_{th} như sau:

$$\Lambda_{SCP} = \Pr(T_{\max} \leq T_{th}). \quad (22)$$

Định lý 1.

Xác suất tính toán thành công Λ_{SCP} của hệ thống đề xuất được tính theo biểu thức:

$$\Lambda_{SCP} = \begin{cases} 0, & \delta > T_{th} \\ \frac{4\pi}{Q} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{q=1}^Q \binom{M}{m} \binom{N}{n} \frac{(N-n)(-1)^{M+N-m-n}}{\lambda_{RB} \lambda_{BU}} \sqrt{\frac{(M-m)(2^{\frac{\Delta_A}{W}} - 1)(a_B(-\ln u_q) + 1)}{\lambda_{RA} \lambda_{AU} a_A}} & \delta \leq T_{th} \\ \times K_1 \left(2 \sqrt{\frac{(M-m)(2^{\frac{\Delta_A}{W}} - 1)(a_B(-\ln u_q) + 1)}{\lambda_{RA} \lambda_{AU} a_A}} \right) K_0 \left(2 \sqrt{\frac{(N-n)(-\ln u_q)}{\lambda_{RB} \lambda_{BU}}} \right) \sqrt{\frac{1-x_q}{1+x_q}}, & \end{cases} \quad (23)$$

trong đó, $\delta = \max(T_A^{local}, T_B^{local})$,

$$\Delta_A = \frac{L_A^{(2)}}{T_{th} - \frac{c_U (L_A^{(2)} + L_B^{(2)})}{f_U}}, \quad \varpi = e^{\frac{\frac{\Delta_B}{1-2^{\frac{W}{W}}}}{a_B}}, \quad u_q = \frac{(\omega_q + 1)\varpi}{2},$$

$$\omega_q = \cos\left(\frac{2q-1}{2Q}\pi\right), \quad \Delta_B = \frac{L_B^{(2)}}{T_{th} - \frac{c_U (L_A^{(2)} + L_B^{(2)})}{f_U}}, \quad \text{với } Q \text{ là}$$

hệ số đánh đổi giữa độ phức tạp và độ chính xác của phương pháp tích phân Gaussian-Chebyshev.

$$\Lambda_{EOP} = \Pr(E_A^{local} > E_A^h \text{ or } E_B^{local} > E_B^h) = 1 - \Pr(E_A^{local} < E_A^h, E_B^{local} < E_B^h), \quad (24)$$

trong đó, E_X^h và E_X^{local} , $X \in \{A, B\}$, lần lượt được định nghĩa ở các biểu thức (15) và (16). Tương tự như phần 3.1, chúng tôi cũng xây dựng được Định lý 2 cho xác suất dừng năng lượng.

Định lý 2.

Xác suất dừng năng lượng Λ_{EOP} của hệ thống đề xuất được tính theo biểu thức:

$$\Lambda_{EOP} = 1 - \left[1 - \left(1 - e^{-\frac{\Omega_A}{\lambda_{RA}}} \right)^N \right] \left[1 - \left(1 - e^{-\frac{\Omega_B}{\lambda_{RB}}} \right)^N \right], \quad (25)$$

trong đó, $\Omega_X = \frac{\rho c_X (f_X)^2 L_X^{(1)}}{\eta(1-\varepsilon_X)P_0 T}$, $X \in \{A, B\}$.

Chứng minh.

Xem phần chứng minh ở Phụ lục A.

3.2. Xác suất dừng năng lượng

Trong hệ thống này, xác suất dừng năng lượng (Energy Outage Probability - EOP), ký hiệu là Λ_{EOP} , cũng là một tiêu chí quan trọng để đánh giá hiệu năng của hệ thống. Nó được định nghĩa là xác suất năng lượng tiêu hao cho tính toán cục bộ lớn hơn năng lượng RF thu được:

Chứng minh.

Xem phần chứng minh ở Phụ lục B.

4. Kết quả số và thảo luận

Trong phần này, chúng tôi cung cấp các kết quả số về SCP và EOP bằng cách sử dụng phương pháp mô phỏng Monte-Carlo. Để thuận tiện, chúng tôi giả sử các thiết bị cảm biến trong từng cụm là giống nhau, khoảng cách giữa các cảm biến trong từng cụm là rất nhỏ so với khoảng cách từ **R** và **U** đến cụm **A** và **B**, khi đó, khoảng cách **R** và **U** đến cụm **A** và **B** là như nhau với mọi nút cảm biến trong cùng một cụm. Các tham số mô phỏng được đưa ra như Bảng 1.

Bảng 1. Các thông số mô phỏng

Thông số	Ký hiệu	Giá trị sử dụng
Môi trường truyền		Rayleigh
Tham số phân bố Rayleigh	$\lambda_{RX}, \lambda_{XU}$	1
Hệ số suy hao đường truyền	α	2
Tham số môi trường	μ, β	9.6177, 0.1581
Hệ số tán xạ	$\varepsilon_A, \varepsilon_B$	0.5, 0.5
Tần số sóng mang	f_c	10^5 Hz
Tọa độ của trạm RF	(x_R, y_R, h_R)	(2, 2, 0)
Tọa độ của A_k, B_k	(x_k, y_k, h_k)	(1, 2, 0), (2, 1, 0)

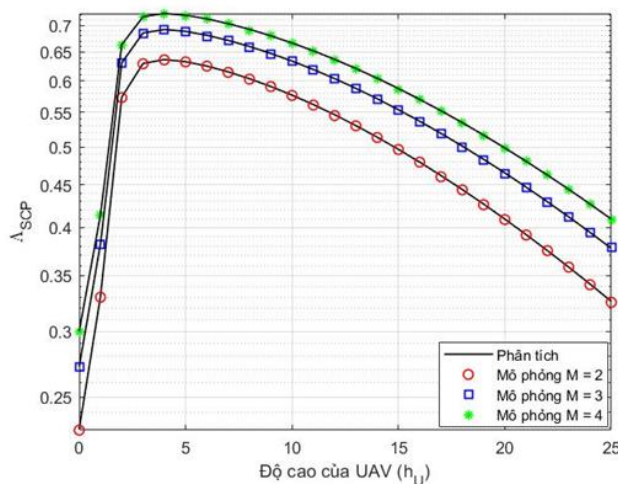
Tọa độ của UAV	(x_U, y_U, h_U)	$(0, 0, 5)$
Công suất phát của R	P_0	0-40 dB
Tần số CPU của các nút cảm biến và máy chủ U	f_A, f_B, f_U	$10^8, 10^8, 10^9$ Hz
Số chu kỳ CPU tính toán 1 bit	C_A, C_B, C_U	2, 2, 2
Độ rộng băng thông kênh	W	10^8 Hz
Hệ số chuyển đổi năng lượng RF	η	0.75
Độ dài các tác vụ	L_A, L_B	1Mbs, 5Mbs, 10Mbs
Hệ số phân chia tác vụ	ξ_A, ξ_B	0.4, 0.3
Ngưỡng độ trễ	T_{th}	1s
Ngưỡng năng lượng	E_{th}	1J

4.1. Xác suất tính toán thành công

Trong phần này, chúng tôi trình bày kết quả mô phỏng và phân tích theo tiêu chí đánh giá xác suất tính toán thành công (Λ_{SCP}).

Hình 2 mô tả sự thay đổi Λ_{SCP} theo độ cao của UAV với các giá trị khác nhau của số lượng nút cảm biến cụm A. Quan sát hình này, ta thấy đường cong có chiều hướng tăng nhanh khi độ cao của UAV thay đổi từ 0 đến nhỏ hơn 5, tức Λ_{SCP} tăng. Khi độ cao của UAV tiếp tục tăng thì đường cong đi xuống, tức Λ_{SCP} giảm. Hiện tượng này được giải thích như sau: khi độ cao của UAV giảm về 0, mặc dù suy hao đường truyền giảm nhưng do sự che

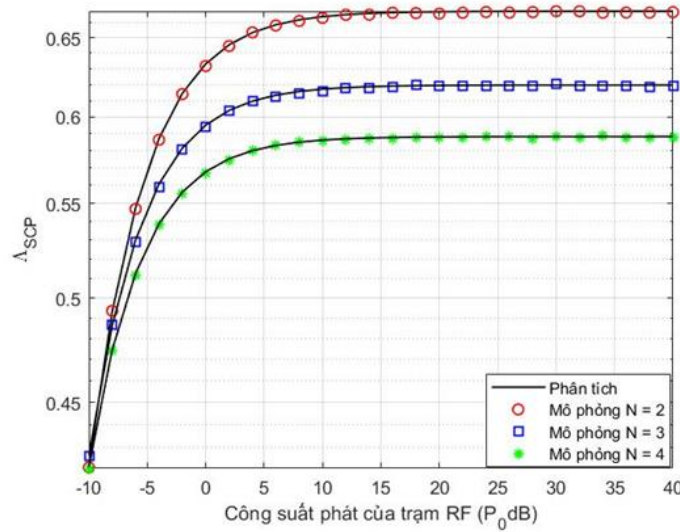
chắn của chương ngại vật trên đường truyền, NLoS chiếm ưu thế nên Λ_{SCP} giảm. Khi độ cao của UAV tăng cao, tuy LoS chiếm ưu thế, tuy nhiên suy hao đường truyền ảnh hưởng lớn nên Λ_{SCP} giảm. Như vậy, tồn tại một giá trị độ cao của UAV cân bằng giữa LoS, NLoS và suy hao đường truyền làm cho đạt giá trị lớn nhất. Ngoài ra, Hình 4 cho thấy rằng Λ_{SCP} tăng khi số lượng nút cảm biến cụm A tăng. Điều này nói lên khi số lượng nút cảm biến cụm A tăng, nó cho phép chúng ta lựa chọn được nút cảm biến tốt nhất để gửi dữ liệu cho trạm UAV xử lý, từ đó cải thiện được hiệu năng của hệ thống.



Hình 2. Λ_{SCP} thay đổi theo độ cao của UAV và số lượng nút cảm biến cụm A

Hình 3 vẽ đường cong Λ_{SCP} thay đổi theo công suất phát của trạm RF và số lượng nút cảm biến cụm B. Từ hình 3 ta thấy, khi tăng công suất phát thì Λ_{SCP} tăng, điều này nói lên hiệu năng của hệ thống được cải thiện. Tuy nhiên, khi công suất tăng từ 15dB trở đi, hiệu năng hệ thống bão hòa.

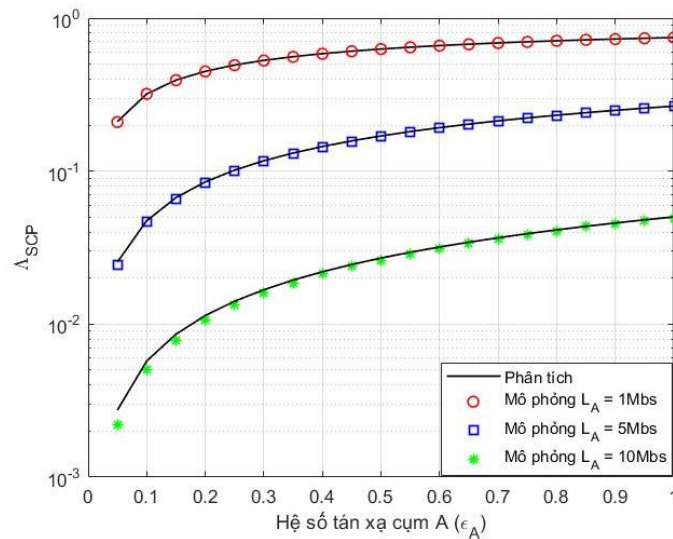
Ngoài ra, Λ_{SCP} tăng khi số lượng nút cảm biến cụm B tăng. Như vậy, khi số lượng nút cảm biến cụm B tăng, nó cho phép chúng ta lựa chọn được nút cảm biến tốt nhất giúp cải thiện được hiệu năng của hệ thống.



Hình 3. Λ_{SCP} thay đổi theo công suất phát của **R** và số lượng nút cảm biến cụm **B**

Hình 4 là các đường cong minh họa Λ_{SCP} thay đổi theo hệ số tán xạ và độ lớn dữ liệu của cụm **A**. Từ Hình 4 ta thấy, hệ số tán xạ của cụm **A** càng lớn tức việc phân bố công suất phát cho nút cảm biến cụm **A** càng nhiều cho giảm tải dữ liệu

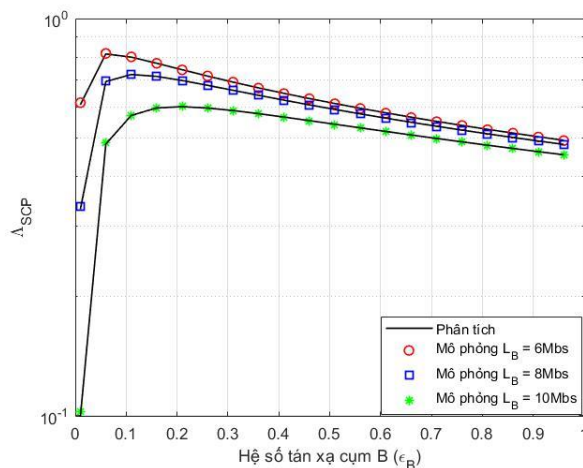
tới máy chủ ở UAV giúp nâng cao hiệu năng mạng. Đồng thời, ta cũng thấy lượng dữ liệu của cụm **A** càng tăng thì càng làm giảm hiệu năng mạng.



Hình 4. Λ_{SCP} thay đổi theo hệ số tán xạ và độ lớn dữ liệu của cụm **A**

Hình 5 mô tả sự thay đổi Λ_{SCP} theo hệ số tán xạ và độ lớn dữ liệu của cụm **B**. Từ hình này ta thấy hệ số tán xạ của cụm **B** tăng từ 0 thì xác suất tính toán thành công tăng. Tuy nhiên, khi hệ số tán xạ của cụm **B** tiếp tục tăng thì xác suất tính toán thành công giảm. Điều này được giải thích như sau: ban đầu hệ số tán xạ của cụm **B** tăng thì

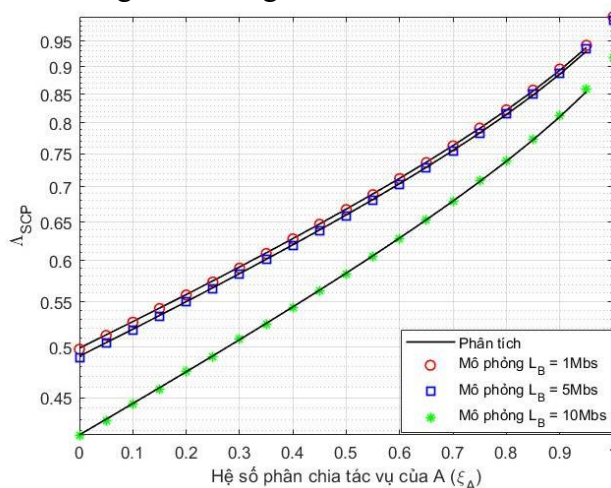
giúp cho cụm **B** tăng công suất giảm tải giúp cải thiện hiệu năng hệ thống, khi hệ số tán xạ của cụm **B** tiếp tục tăng thì nó tăng thành phần nhiễu của SINR theo biểu thức (9). Cũng từ hình này ta thấy, lượng dữ liệu của cụm **B** càng tăng thì càng làm giảm hiệu năng mạng.



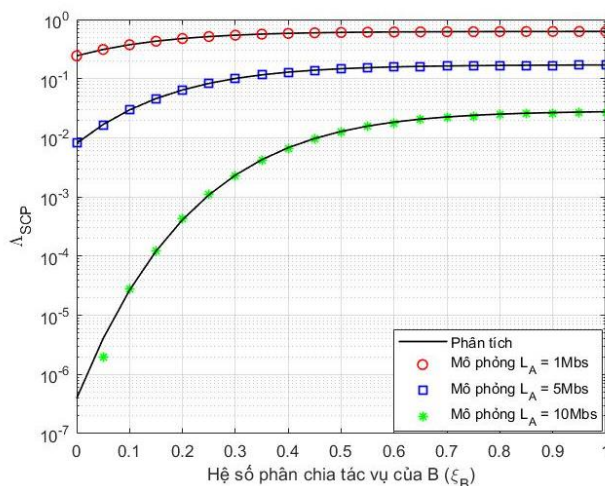
Hình 5. Λ_{SCP} thay đổi theo hệ số tán xạ và độ lớn dữ liệu của cụm **B**

Hình 6 và Hình 7 vẽ các đường cong Λ_{SCP} thay đổi theo hệ số phân chia tác vụ và độ lớn dữ liệu của các cụm. Chúng cho thấy dữ liệu giảm tải ở máy chủ biên càng tăng thì hiệu năng độ trễ càng

giảm. Điều này cho thấy để cải thiện hiệu năng hệ thống thì ta cần nâng cao khả năng xử lý tại các nút cảm biến.



Hình 6. Λ_{SCP} thay đổi theo hệ số phân chia tác vụ và độ lớn dữ liệu của cụm **B**

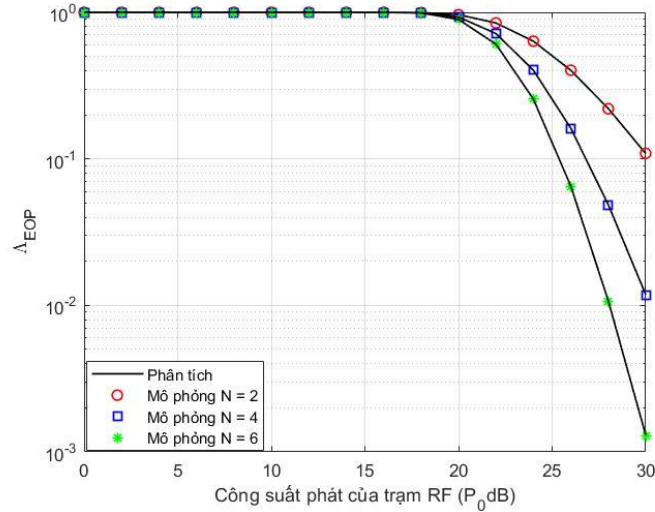


Hình 7. Λ_{SCP} thay đổi theo hệ số phân chia tác vụ và độ lớn dữ liệu của cụm **A**

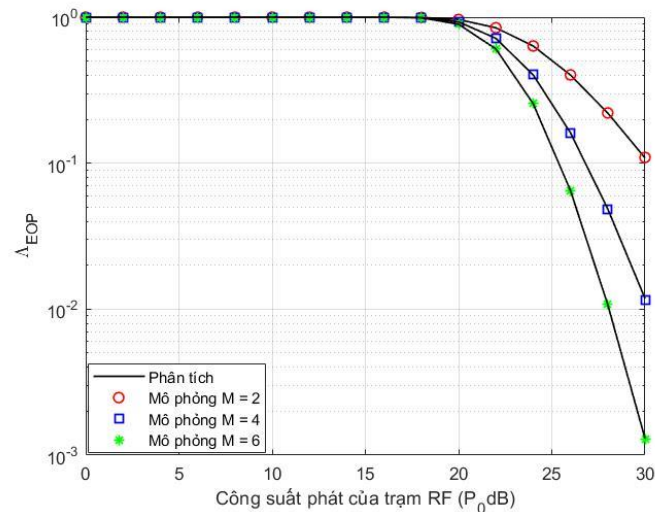
4.2. Xác suất dừng năng lượng

Trong phần này, chúng tôi khảo sát xác suất dừng năng lượng Λ_{EOP} theo công suất phát của trạm R và với các giá trị số lượng nút cảm biến

khác nhau. Từ Hình 8 và Hình 9 ta thấy công suất phát tăng hoặc số lượng nút cảm biến tăng đều có thể làm giảm xác suất dừng năng lượng, từ đó nâng cao được hiệu năng hệ thống.



Hình 8. Λ_{EOP} thay đổi công suất phát trạm R và số lượng nút cảm biến của cụm B



Hình 9. Λ_{EOP} thay đổi công suất phát trạm R và số lượng nút cảm biến của cụm A

Quan sát kết quả từ các hình 2-9, ta thấy kết quả phân tích khớp với kết quả mô phỏng. Điều này khẳng định tính đúng đắn của kết quả phân tích.

5. Kết luận và hướng phát triển

Bài báo này đã trình bày kết quả phân tích hiệu năng của mạng cảm biến không dây sử dụng thiết bị bay không người lái có gắn máy chủ điện toán biên hỗ trợ cho nhiều nút cảm biến dựa trên kỹ thuật truyền thông tán xạ ngược. Chúng tôi đã tiến

hành xây dựng các mô hình: mô hình hệ thống, mô hình tín hiệu, mô hình năng lượng và mô hình giảm tải. Đồng thời, để khảo sát hiệu năng của hệ thống, chúng tôi đã xây dựng các biểu thức xác suất tính toán thành công và xác suất dừng năng lượng. Hành vi của hệ thống cũng được khảo sát theo các tham số chính như công suất phát của trạm RF, độ cao của UAV, các hệ số tán xạ, hệ số phân chia tác vụ, số lượng nút cảm biến, độ lớn dữ liệu. Kết quả khảo sát cho thấy để cải thiện hiệu năng của hệ

thống mạng cảm biến không dây này, chúng ta có thể tăng công suất phát của trạm RF, tăng số lượng nút cảm biến, giảm độ lớn dữ liệu và lựa chọn các giá trị hệ số tán xạ, hệ số phân chia tác vụ và độ

cao của UAV phù hợp. Trong tương lai, chúng tôi phát triển theo hướng xem xét hiệu năng tính toán và năng lượng cùng lúc và đồng thời hình thành bài toán tối ưu hiệu năng hệ thống.

PHỤ LỤC A: Chứng minh Định lý 1.

$$\begin{aligned}
 \Lambda_{SCP} &= \Pr\left(\max(T_A^{local}, T_B^{local}) \leq T_{th}, \max(T_A^{off}, T_B^{off}) + T_U^{exe} \leq T_{th}\right) \\
 &= \begin{cases} 0, & \max(T_A^{local}, T_B^{local}) > T_{th} \\ \Pr\left(\frac{I_A^{(2)}}{C_A} \leq T_{th} - \frac{C_U(I_A^{(2)} + L_B^{(2)})}{f_U}, \frac{I_B^{(2)}}{C_B} \leq T_{th} - \frac{C_U(I_A^{(2)} + L_B^{(2)})}{f_U}\right), & \max(T_A^{local}, T_B^{local}) \leq T_{th} \end{cases} \\
 &= \begin{cases} 0, & \max(T_m^c, T_n^c) > T_{th} \\ \Pr(C_A \geq \Delta_A, C_B \geq \Delta_B), & \max(T_m^c, T_n^c) \leq T_{th} \end{cases} \\
 &\quad \Pi \\
 \Pi &= \Pr\left(\frac{a_A H_A}{a_B H_B + 1} \geq 2^{\frac{\Delta_A}{W}} - 1, a_B H_B \geq 2^{\frac{\Delta_B}{W}} - 1\right) \\
 &= \Pr\left(H_A \geq \frac{(2^{\frac{\Delta_A}{W}} - 1)(a_B H_B + 1)}{a_A}, H_B \geq \frac{2^{\frac{\Delta_B}{W}} - 1}{a_B}\right) \\
 &= \int_{\frac{2^{\frac{\Delta_B}{W}} - 1}{a_B}}^{\infty} \left[1 - F_{H_A}\left(\frac{(2^{\frac{\Delta_A}{W}} - 1)(a_B t + 1)}{a_A}\right)\right] f_{H_B}(t) dt \\
 &\stackrel{(a)}{=} 4 \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \binom{M}{m} \binom{N}{n} (-1)^{M+N-m-n} \frac{(N-n)}{\lambda_{RB} \lambda_{BU}} \int_0^{\varpi} \sqrt{\frac{(M-m)(2^{\frac{\Delta_A}{W}} - 1)(a_B(-\ln u) + 1)}{\lambda_{RA} \lambda_{AU} a_A}} \\
 &\quad K_1\left(2\sqrt{\frac{(M-m)(2^{\frac{\Delta_A}{W}} - 1)(a_B(-\ln u) + 1)}{\lambda_{RA} \lambda_{AU} a_A}}\right) K_0\left(2\sqrt{\frac{(N-n)(-\ln u)}{\lambda_{RB} \lambda_{BU}}}\right) \frac{du}{u} \\
 &\stackrel{(b)}{=} \frac{4\pi}{Q} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{q=1}^Q \binom{M}{m} \binom{N}{n} \frac{(N-n)(-1)^{M+N-m-n}}{\lambda_{RB} \lambda_{BU}} \sqrt{\frac{(M-m)(2^{\frac{\Delta_A}{W}} - 1)(a_B(-\ln u_q) + 1)}{\lambda_{RA} \lambda_{AU} a_A}} \\
 &\quad K_1\left(2\sqrt{\frac{(M-m)(2^{\frac{\Delta_A}{W}} - 1)(a_B(-\ln u_q) + 1)}{\lambda_{RA} \lambda_{AU} a_A}}\right) K_0\left(2\sqrt{\frac{(N-n)(-\ln u_q)}{\lambda_{RB} \lambda_{BU}}}\right) \sqrt{\frac{1-x_q}{1+x_q}}.
 \end{aligned}$$

Bước (a) có được là do sử dụng kết quả (11) và (14) và thay biến bằng cách đặt $u = e^{-t}$ và $\varpi = e^{-\omega}$ với $\omega = \frac{2^{\frac{\Delta_B}{W}} - 1}{a_B}$. Bước (b) có được nhờ áp dụng phương pháp tích phân Gaussian-Chebyshev. Định lý 1 đã được chứng minh.

PHỤ LỤC B: Chứng minh Định lý 2.

$$\begin{aligned}
\Lambda_{EOP} &= 1 - \Pr(E_A^{local} < E_A^h, E_B^{local} < E_B^h) \\
&= 1 - \Pr(|h_{RA}|^2 > \Omega_A) \Pr(|h_{RB}|^2 > \Omega_B) \\
&= 1 - [1 - F_{|h_{RA}|^2}(\Omega_A)] [1 - F_{|h_{RB}|^2}(\Omega_B)].
\end{aligned}$$

Áp dụng các biểu thức (7) và (8), ta đã chứng minh được Định lý 2.

Tài liệu tham khảo

- [1] Amutha, J., Sharma, S., & Nagar, J. (2020). WSN strategies based on sensors, deployment, sensing models, coverage and energy efficiency: Review, approaches and open issues. *Wireless Personal Communications*, 111(2), 1089-1115.
- [2] Saha, H. N., Roy, R., Chakraborty, M., & Sarkar, C. (2021). IoT-enabled agricultural system application, challenges and security issues. *Agricultural informatics: automation using the iot and machine learning*, 223-247.
- [3] Abbas, N., Zhang, Y., Taherkordi, A., & Skeie, T. (2017). Mobile edge computing: A survey. *IEEE Internet of Things Journal*, 5(1), 450-465.
- [4] Liu, H., Eldarrat, F., Alqahtani, H., Reznik, A., De Foy, X., & Zhang, Y. (2017). Mobile edge cloud system: Architectures, challenges, and approaches. *IEEE Systems Journal*, 12(3), 2495-2508.
- [5] Masaracchia, A., Li, Y., Nguyen, K. K., Yin, C., Khosravirad, S. R., Da Costa, D. B., & Duong, T. Q. (2021). UAV-enabled ultra-reliable low-latency communications for 6G: A comprehensive survey. *IEEE access*, 9, 137338-137352.
- [6] Zhang, Y., & Zhang, Y. (2022). Mobile edge computing for UAVs. *Mobile Edge Computing*, 65-80.
- [7] Wu, W., Wang, X., Hawbani, A., Yuan, L., & Gong, W. (2022). A survey on ambient backscatter communications: Principles, systems, applications, and challenges. *Computer Networks*, 216, 109235.
- [8] Nguyen, M. T., Nguyen, C. V., Tran, H. T., & Viola, F. (2023). Energy harvesting for mobile agents supporting wireless sensor networks. *Energy Harvesting and Systems*, 10(2), 267-275.
- [9] Du, J., Liu, W., Lu, G., Jiang, J., Zhai, D., Yu, F. R., & Ding, Z. (2020). When mobile-edge computing (MEC) meets nonorthogonal multiple access (NOMA) for the Internet of Things (IoT): System design and optimization. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(10), 7849-7862.
- [10] Truong, V. T., Vo, M. T., & Ha, D. B. (2021). Performance analysis of Mobile Edge Computing network applied uplink NOMA with RF energy harvesting. In *International Conference on Industrial Networks and Intelligent Systems* (pp. 57-72). Cham: Springer International Publishing.
- [11] Guo, J., Zhou, X., Durrani, S., & Yanikomeroglu, H. (2018). Design of non-orthogonal multiple access enhanced backscatter communication. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 17(10), 6837-6852.
- [12] Truong, V. T., Ha, D. B., & Vo, M. T. (2023, October). RF Energy Harvesting and Security Offloading Protocol for MEC-enabled NOMA Networks with Passive Eavesdropper. In *2023 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC)* (pp. 51-56). IEEE.
- [13] Jameel, F., Zeb, S., Khan, W. U., Hassan, S. A., Chang, Z., & Liu, J. (2020). NOMA-enabled backscatter communications: Toward battery-free IoT networks. *IEEE Internet of Things Magazine*, 3(4), 95-101.
- [14] Ihsan, A., Chen, W., Khan, W. U., Wu, Q., & Wang, K. (2023). Energy-efficient backscatter aided uplink NOMA roadside sensor communications under channel estimation errors. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 24(5), 4962-4974.
- [15] Nguyen, A. N., Ha, D. B., Van Truong, T., Sanguanpong, S., & So-In, C. (2023). Secrecy performance analysis and optimization for UAV-relay-enabled WPT and cooperative NOMA MEC in IoT networks. *IEEE Access*, 11, 127800-127816.
- [16] Gradshteyn, I. S., & Ryzhik, I. M. (2014). Table of integrals, series, and products. Academic press.