

Kết nối vạn vật tích hợp cảm biến, truyền thông, điện toán biên di động và truyền năng lượng vô tuyến sử dụng UAV

Integrated Sensing, Communication, Edge Computing, and Energy Harvesting for UAV-Assisted IoT Networks

Lê Trung Nhân^a, Nguyễn Văn Long^{b*}, Hà Đắc Bình^c
Le Trung Nhan^a, Nguyen Van Long^{b*}, Ha Dac Binh^c

^aTrường Tiểu học và Trung học cơ sở Pháo Đài, Hà Tiên, tỉnh An Giang, Việt Nam

^aPhao Dai Primary and Secondary School, Ha Tien, An Giang, Viet Nam

^bTrung tâm Nghiên cứu và Ứng dụng AI Quy Nhơn, FPT Software, Gia Lai, Việt Nam

^bQuy Nhon AI Research and Application Center, FPT Software, Gia Lai, Viet Nam

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

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

(Ngày nhận bài: 11/08/2025, ngày phản biện xong: 13/11/2025, ngày chấp nhận đăng: 24/11/2025)

Tóm tắt

Kết nối vạn vật (IoT) đang phát triển nhanh chóng trong nhiều lĩnh vực công nghiệp, an ninh quốc phòng, giao thông thông minh, y tế, môi trường. Trong bài báo này, chúng tôi đề xuất một mô hình hệ thống IoT sử dụng thiết bị bay không người lái (UAV) có gắn máy chủ điện toán biên hỗ trợ cho nhiều thiết bị IoT với cơ chế tích hợp cảm biến, truyền thông và tính toán (integrated sensing, communication, and computing - ISCC). Để hỗ trợ cho các thiết bị IoT xử lý dữ liệu, chúng tôi đề xuất kết hợp cơ chế thu năng lượng vô tuyến phân chia theo thời gian và chiến lược giảm tải một phần trong hệ thống này, đồng thời áp dụng phương thức thu năng lượng vô tuyến và cảm biến đồng thời. Sau đó, chúng tôi xây dựng các biểu thức dạng tường minh chính xác của xác suất cảm biến và tính toán thành công bằng cách sử dụng các đặc tính thống kê của kênh không dây. Ngoài ra, chúng tôi khảo sát ảnh hưởng của các thông số quan trọng như công suất phát, số lượng thiết bị IoT, tỉ lệ phân chia dữ liệu, độ lớn dữ liệu, độ cao của UAV, băng thông, chu kỳ hoạt động và độ rộng xung của tín hiệu radar đến hiệu năng của hệ thống. Cuối cùng, các kết quả phân tích của chúng tôi được kiểm chứng bằng phương pháp mô phỏng máy tính Monte-Carlo.

Từ khóa: kết nối vạn vật, tích hợp cảm biến, truyền thông và tính toán, UAV, thu năng lượng vô tuyến, xác suất cảm biến và tính toán thành công

Abstract

The Internet of Things (IoT) is rapidly expanding across various sectors, including industry, national security, smart transportation, healthcare, and environmental management. In this paper, we propose an IoT system model that leverages unmanned aerial vehicles (UAVs) equipped with edge computing servers. This model supports multiple IoT devices through an integrated sensing, communication, and computing (ISCC) mechanism. To facilitate data processing for these IoT devices, we introduce a combined time-splitting radio energy harvesting mechanism and a partial offloading strategy. Specifically, we utilize both radio energy harvesting and simultaneous sensing. Subsequently, we derive exact closed-form expression for the probability of successful sensing and computing, drawing upon the statistical characteristics of

*Tác giả liên hệ: Nguyễn Văn Long

Email: nguyenvanlong17@dtu.edu.vn

the wireless channel. Furthermore, we investigate the impact of several key parameters on system performance, such as transmission power, the number of IoT devices, data dividing ratio, data length, UAV altitude, bandwidth, duty cycle and pulse duration of radar signal. Finally, our analytical results are rigorously verified through Monte-Carlo computer simulations.

Keywords: Internet of things, integration of sensing, communication and computing, UAV, radio frequency energy harvesting, probability of successful sensing and computing

1. Giới thiệu

Kết nối vạn vật (Internet of Things - IoT) là chỉ việc kết nối các thiết bị vật lý, cảm biến, máy móc, phương tiện, và các vật dụng khác qua mạng Internet để chúng có thể giao tiếp và trao đổi dữ liệu với nhau. Các thiết bị này có thể là mọi thứ từ điện thoại thông minh, đồng hồ thông minh, tủ lạnh, xe hơi, đến các thiết bị công nghiệp hay cảm biến môi trường [1]. Nhờ vào kết nối này, IoT giúp tăng cường sự tự động hóa, tối ưu hóa quy trình làm việc và mang lại sự tiện ích cho người sử dụng. Cụ thể, một chiếc xe hơi có thể tự động cập nhật phần mềm qua mạng, các thiết bị gia đình có thể điều chỉnh nhiệt độ, ánh sáng hoặc thậm chí báo động khi có sự cố. Hệ thống tích hợp cảm biến, truyền thông và điện toán (ISCC) là một trong những đại diện cho sự phát triển gần đây trong mạng di động thế hệ thứ sáu (6G) [2]. Mô hình mới nổi ISCC này được đề xuất có thể tiếp tục nâng cao khả năng của các hệ thống IoT bằng cách cho phép các thiết bị không chỉ cảm biến và truyền thông mà còn xử lý dữ liệu cục bộ, dẫn đến cải thiện hiệu quả và đáp ứng được yêu cầu thời gian thực. Trong đó, kỹ thuật điện toán biên di động (Mobile Edge Computing - MEC) cho phép cung cấp các dịch vụ và tài nguyên tính toán đến gần với các thiết bị IoT hơn [3-4]. Do đó, kỹ thuật này giúp giảm độ trễ, nâng cao hiệu năng cho các ứng dụng di động và IoT. Việc triển khai thiết bị UAV trong IoT đã được đề xuất với nhiều 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]. Tuy nhiên, sự phức tạp và mức độ kết nối ngày

càng tăng này gây ra các vấn đề làm suy giảm hiệu năng mạng. Việc nâng cao hiệu năng các hệ thống IoT không dây tích hợp cảm biến, truyền thông và điện toán đặt ra một thách thức đa chiều. Sự hội tụ của dữ liệu cảm biến, kênh truyền thông và tài nguyên tính toán tạo ra các vấn đề về kiến trúc, xử lý thông minh tại biên, hiệu quả năng lượng, bảo mật và quyền riêng tư, và quản lý tài nguyên động. Các thiết bị IoT bị hạn chế về tài nguyên cộng với bản chất động và phân tán của các mạng này cũng như độ nhạy cảm của dữ liệu được thu thập và xử lý đòi hỏi các giải pháp mới và hiệu quả.

Một số kiến trúc mạng mới sử dụng UAV tích hợp các thành phần ISCC, bao gồm cả kiến trúc tập trung (đám mây) và phân tán (biên) được đề xuất trong các công trình [7-11]. Trong công trình [7], các tác giả đã sử dụng cấu trúc tính toán đơn tầng (single-tier computing) và UAV để cải thiện độ chính xác của định vị và phạm vi cảm biến của mạng xe cộ (V2X). Ngoài ra, nhóm tác giả còn đề xuất một chiến lược giảm tải tính toán tiết kiệm năng lượng cho quá trình hợp nhất dữ liệu đa cảm biến trong mạng V2X được hỗ trợ bởi UAV. Một hệ thống tích hợp ISCC cho các hệ thống cảm biến đám đông di động (MCS) trong điều kiện hạn chế tài nguyên đa chiều được đề xuất trong [8] có xem xét về các vấn đề phát sinh trong quá trình cảm biến, xử lý và truyền dữ liệu bằng MCS. Công trình [9] nhằm mục đích giảm thiểu tổng năng lượng tiêu thụ cho việc cảm biến, giao tiếp với trạm gốc và chuyến bay của UAV. Ngoài ra, đối với mỗi mục tiêu, công trình này cũng xem xét số lượng mẫu cần thiết để đạt được một lỗi huấn luyện nhất định tại trạm gốc, số lượng mẫu tỷ lệ thuận với tốc độ thông tin radar của mục tiêu. Trong nghiên cứu của

[10], UAV tối ưu hóa vector định hình chùm tia của nó để phục vụ cả điểm truy cập (có máy chủ) và mục tiêu. Một điều kiện quan trọng là công suất tín hiệu đến mục tiêu phải vượt quá ngưỡng được xác định trước. Để đạt được điều này, mục tiêu của họ là tối ưu hóa cả định hình chùm tia và quỹ đạo của UAV để tối đa hóa tổng có trọng số. Tổng này xem xét dữ liệu trung bình được chuyển tải đến các điểm truy cập, bị hạn chế bởi khả năng tính toán của chúng và công suất tín hiệu trung bình tại mục tiêu. Dựa trên điều này, các tác giả trong [11] khám phá một vấn đề tương tự. Tuy nhiên, UAV của họ có thể thực hiện các tính toán cục bộ ngoài việc chuyển tải các tác vụ đến điểm truy cập mặt đất. Mục tiêu của họ là tối đa hóa hiệu quả năng lượng, được định nghĩa là tổng số bit được cả UAV và điểm truy cập cảm nhận và tính toán, chia cho mức tiêu thụ năng lượng của UAV.

Tuy nhiên, theo hiểu biết của chúng tôi, việc triển khai thu năng lượng RF, cảm biến và cơ chế chuyển tải một phần trong mạng IoT sử dụng UAV vẫn chưa được xem xét. Do đó, trong công trình này, chúng tôi tập trung vào việc phân tích hiệu năng của mạng IoT không dây tích hợp thu năng lượng vô tuyến, cảm biến, chuyển tải và tính toán. Những đóng góp chính của bài báo này được tóm tắt như sau:

(1) Đề xuất một mô hình và một giao thức tích hợp thu năng lượng vô tuyến, cảm biến, chuyển tải và tính toán cho hệ thống IoT không dây sử dụng UAV với cơ chế chuyển tải một phần.

(2) Xây dựng biểu thức dạng tường minh chính xác của xác suất cảm biến và tính toán thành công (SSCP).

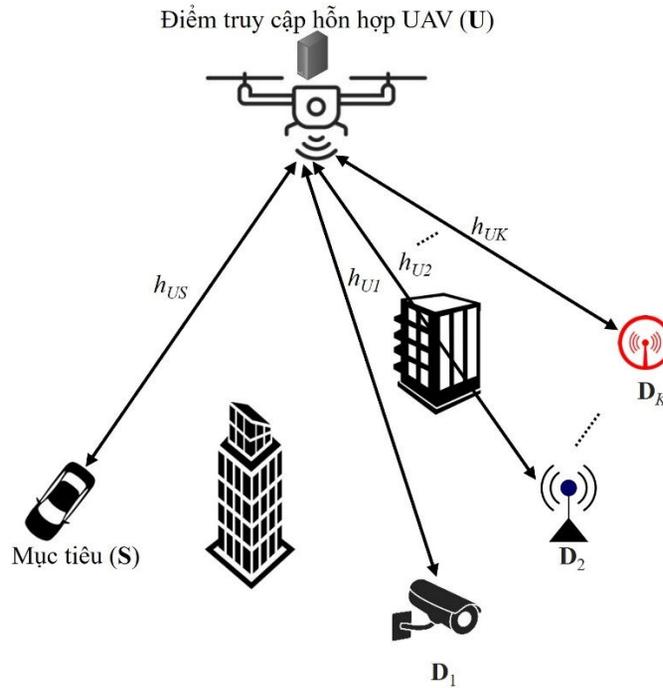
(3) Khảo sát ảnh hưởng của các thông số quan trọng như công suất phát, số lượng thiết bị IoT, tỉ lệ phân chia dữ liệu, độ lớn dữ liệu, độ cao của UAV, băng thông, chu kỳ hoạt động và độ rộng xung của tín hiệu radar lên hiệu năng của hệ thống.

Phần còn lại của bài báo này bố cục như sau: Mục 2 trình bày mô hình hệ thống và kênh truyền. Hiệu năng được phân tích trong Mục 3. Kết quả số và thảo luận được trình bày trong Mục 4. Cuối cùng, Mục 5 là phần kết luận và hướng phát triển.

2. Mô hình hệ thống

2.1. Mô hình hệ thống và kênh truyền

Hình 1 minh họa một mô hình hệ thống IoT mà chúng tôi đề xuất, trong đó điểm truy cập hỗn hợp UAV, kí hiệu là U , được triển khai gần các thiết bị IoT để cảm biến mục tiêu S và cung cấp dịch vụ tính toán cho các thiết bị IoT. U được tích hợp máy chủ biên và được điều khiển lơ lửng trên không ở độ cao h_U phục vụ cho K thiết bị IoT. U được trang bị cảm biến để thu thập thông tin vị trí và trạng thái của các thiết bị IoT, đồng thời đóng vai trò trạm phát năng lượng vô tuyến cho các thiết bị này. Các thiết bị IoT được kí hiệu là D_k , $k \in \{1, 2, \dots, K\}$ sau khi nhận năng lượng từ U thì chuyển tải một phần cho máy chủ tại UAV để xử lý. 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.



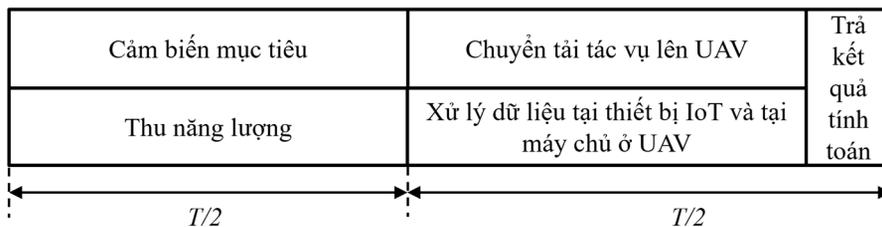
Hình 1. Mô hình hệ thống ISCC IoT

Giả sử UAV bay đến vị trí phục vụ các thiết bị IoT và thời gian phục vụ được chia thành các khối thời gian T . Trong mỗi thời gian khối này, cách thức hoạt động của hệ thống đề xuất này được mô tả như Hình 2. Quá trình hoạt động chia thành ba pha như sau:

- Pha 1: UAV phát tín hiệu RF để truyền năng lượng cho các thiết bị IoT và định vị mục tiêu trong khoảng thời gian $T/2$.
- Pha 2: Từng thiết bị IoT sử dụng năng lượng thu được để tính toán cục bộ và điều chế tín hiệu

nhằm phân xạ và chuyển tải một phần tác vụ của mình cho UAV để thực hiện giảm tải thông qua phương thức đa truy cập phân chia theo tần số (FDMA) trong khoảng thời gian còn lại. Đồng thời, dữ liệu của các thiết bị IoT được máy chủ UAV xử lý song song tại máy chủ gắn trên UAV.

- Pha 3: UAV gửi trả kết quả cho các thiết bị IoT. Do độ lớn của kết quả nhỏ hơn rất nhiều so với dữ liệu chuyển tải lên từ thiết bị IoT nên chúng tôi bỏ qua khoảng thời gian này.



Hình 2. Giảm tải hoạt động trong mỗi thời gian khối

Giả sử các kênh truyền không dây mặt đất-không trung và không trung-mặt đất được mô hình hóa bằng hai loại fading: mô hình fading cỡ lớn và fading cỡ nhỏ. Trong đó, suy hao tổng thể của mô hình fading cỡ lớn - có xem xét xác suất

của cả liên kết LoS và NLoS giữa U và thiết bị IoT thứ k được tính bằng công thức:

$$L_{Uk} = \left[J_{LoS} + \frac{J_{LoS} - J_{NLoS}}{1 + \beta e^{\left(\frac{-180}{\pi} \mu \theta_{Uk} + \mu \beta\right)}} \right] d_{Uk}^\alpha, \quad (1)$$

trong đó, $\theta_{Uk} \triangleq \arcsin(h_U / d_{Uk})$, d_{Uk} là khoảng cách giữa **U** và **D_k**, 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, $J_\Omega \triangleq \Psi_\Omega(4\pi f_c / c)$, $\Omega \in \{LoS, NLoS\}$ là tham số phụ thuộc vào môi trường và tần số sóng mang f_c , c là vận tốc ánh sáng và Ψ_Ω biểu diễn suy hao đường truyền quá mức của quá trình truyền LoS và NLoS [12].

Hệ số kênh truyền của các liên kết **U-S** và **U-D_k** được ký hiệu lần lượt là h_{US} và h_{Uk} . Giả sử các kênh truyền này độc lập, đồng nhất và tuân theo fading Rayleigh, khi đó, hàm phân phối tích lũy và hàm mật độ xác suất của độ lợi công suất kênh tương ứng $|h_{US}|^2$ và $|h_{Uk}|^2$, lần lượt là

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

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

trong đó, $Z \in \{|h_{US}|^2, |h_{Uk}|^2\}$, $\lambda_Z \triangleq \mathbf{E}(Z)$.

2.2. Mô hình tín hiệu

Trong mô hình hệ thống đề xuất này, tín hiệu cảm biến nhận được tại **U** trong pha 1 được biểu diễn như sau:

$$y_s = \frac{1}{L_{US}} \sqrt{\varepsilon P_0} h_{US} h_{SU} x + w, \quad (4)$$

trong đó, x là tín hiệu truyền từ **U**, thỏa mãn kỳ vọng $\mathbf{E}(|x|^2) = 1$, ε là hệ số phản xạ của mục tiêu **S**, L_{US} là suy hao được tính tương tự như (1), P_0 là công suất phát của **U**, $w \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2)$ là nhiễu trắng cộng Gaussian (AWGN) với trung bình là 0 và phương sai là σ^2 . Tỉ số công suất tín hiệu trên công suất nhiễu (SNR) để định vị mục tiêu là

$$\gamma_s = \frac{\varepsilon P_0 |h_{US}|^4}{L_{US}^2 \sigma^2} = \frac{\varepsilon \gamma_0 X^2}{L_{US}^2}, \quad (5)$$

trong đó, $\gamma_0 = \frac{P_0}{\sigma^2}$, $X = |h_{US}|^2$.

Tín hiệu chuyển tải từ các thiết bị IoT nhận được tại **U** trong pha 2 như sau:

$$y_k = \sqrt{\frac{P_k}{L_{Uk}}} h_{Uk} s_k + w_k, \quad (6)$$

trong đó, s_k và P_k lần lượt là tín hiệu và công suất phát từ thiết bị IoT thứ k , $w_k \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2)$ là AWGN cũng có trung bình là 0 và phương sai là σ^2 . Tỉ số công suất tín hiệu trên công suất nhiễu khi nhận tín hiệu giảm tải tại UAV là

$$\gamma_k = \frac{P_k |h_{Uk}|^2}{L_{Uk} \sigma^2} = \frac{P_k Y_k}{L_{Uk} \sigma^2}, \quad (7)$$

trong đó, $Y_k = |h_{Uk}|^2$.

2.3. Mô hình năng lượng

Các thiết bị IoT nhận được năng lượng RF từ **U**, năng lượng thu được tại thiết bị IoT được tính như sau:

$$E_k^h = \frac{\eta_k P_0 |h_{Uk}|^2 T}{2L_{Uk}} = \frac{\eta_k P_0 T}{2L_{Uk}} Y_k, \quad (8)$$

trong đó, η_k là hệ số chuyển hóa năng lượng ($0 < \eta_k \leq 1$). Một phần năng lượng dùng để xử lý dữ liệu cục bộ, phần còn lại dùng để chuyển tải dữ liệu lên cho **U**.

Giả sử độ lớn dữ liệu của thiết bị IoT thứ k là L_k với các bit độc lập có thể phân chia tùy ý. Năng lượng tiêu hao cho việc xử lý cục bộ được tính như sau:

$$E_k^l = \rho_k c_k (f_k)^2 L_k^{(1)}, \quad (9)$$

trong đó, ρ_k biểu thị cho hệ số điện dung hiệu dụng phụ thuộc vào kiến trúc của CPU trong các thiết bị IoT, c_k và f_k biểu thị chu kỳ CPU để tính toán một bit và tần số chu kỳ CPU của thiết bị IoT tương ứng, $L_k^{(1)}$ là độ lớn dữ liệu xử lý tại chỗ, $L_k^{(1)} = \delta L_k$ với δ là hệ số phân chia dữ liệu, $0 \leq \delta \leq 1$. Công suất phát dùng cho việc chuyển tải được tính như sau:

$$P_k = \frac{2(E_k^h - E_k^l)}{T} = \frac{\eta_k P_0}{L_{Uk}} Y_k - \frac{2E_k^l}{T}. \quad (10)$$

2.4. Mô hình giảm tải và xử lý biên

Cơ chế giảm tải một phần được áp dụng cho hệ thống này. Do đó, phần xử lý cục bộ tại thiết bị IoT cần thời gian xử lý là

$$T_k^l = \frac{c_k L_k^{(1)}}{f_k} \quad (11)$$

Trong khi đó, phần còn lại được chuyển tải về cho UAV với thời gian truyền và xử lý tại U lần lượt được tính là

$$T_k^o = \frac{L_k^{(2)}}{C_k} \quad (12)$$

$$T_U^e = \frac{c_U \sum_{k=1}^K L_k^{(2)}}{f_U} \quad (13)$$

trong đó, $L_k^{(2)} = (1-\delta)L_k$, $C_k = \frac{W}{K} \log(1+\gamma_k)$ với W là băng thông hệ thống; c_U và f_U tương ứng là chu kỳ CPU để tính toán 1 bit và tần số chu kỳ CPU của U.

3. Phân tích hiệu năng

Khả năng nhận biết chính xác và hiệu quả mục tiêu tiềm năng của toàn bộ hệ thống phụ thuộc trực tiếp vào chất lượng tín hiệu radar nhận biết của nó. Để định lượng điều này, tốc độ thông tin của tín hiệu radar thu được tính như sau [12-13]:

$$R_{rad} = \frac{B_{rad}}{2} \log_2(1+2B\omega\gamma_s) \quad (14)$$

$$\Psi_{SSCP} = \Pr\left(\gamma_s > \gamma_{th}, \max\{T_k^l, T_k^o, T_U^e\} < \frac{T}{2}\right), \quad \forall k \in \{1, 2, \dots, K\} \quad (17)$$

Trong công trình này, chúng tôi xây dựng biểu thức dạng tường minh cho xác suất cảm biến và tính toán thành công như Định lý 1.

$$\Psi_{SSCP} = \begin{cases} e^{-\frac{1}{\lambda_s} \sqrt{\frac{L_{US}^2 \gamma_{th}}{\epsilon \gamma_0}} \prod_{k=1}^K e^{-\frac{\Lambda_k}{\lambda_k}}}, & T_k^l < \frac{T}{2} \text{ and } T_U^e < \frac{T}{2}, \forall k \in \{1, 2, \dots, K\} \\ 0 & T_k^l \geq \frac{T}{2} \text{ or } T_U^e \geq \frac{T}{2}, k \in \{1, 2, \dots, K\} \end{cases} \quad (18)$$

trong đó, $\gamma_{th} = \frac{2^{R_{th}} - 1}{2B\omega}$, $\Lambda_k = \frac{b_k + \sqrt{b_k^2 + 4a_k c_k}}{2a_k}$, $a_k = \frac{\eta \gamma_0}{L_{Uk}^2}$, $b_k = \frac{2E_k^l}{TL_{Uk}^2 \sigma^2}$, $c_k = 2 \frac{2KL_k^{(2)}}{WT} - 1$.

Chứng minh.

Xem phần chứng minh ở Phụ lục A.

trong đó, B_{rad} biểu thị tỷ lệ giữa hệ số chu kỳ hoạt động của tín hiệu radar ν với độ rộng xung radar ω , được biểu thị bằng $B_{rad} = \nu/\omega$. Trong khi đó, $B=W/K$ biểu thị băng thông kênh. Tốc độ này có thể được hiểu là thông tin tương hỗ giữa radar và mục tiêu, đo lường mức độ hiệu quả của thiết bị trong việc trích xuất thông tin mục tiêu từ tín hiệu phản hồi thu được. Việc tính toán tốc độ này cung cấp một mô tả trực quan về khả năng định vị. Cụ thể, để xác định được mục tiêu thì tốc độ thông tin của tín hiệu radar thu được phải thỏa mãn:

$$R_{rad} = \frac{B_{rad}}{2} \log_2(1+2B\omega\gamma_s) > R_{th} \quad (15)$$

$$\Leftrightarrow \gamma_s > \gamma_{th} = \frac{2^{\frac{2R_{th}}{B_{rad}}} - 1}{2B\omega} \quad (16)$$

Xác suất cảm biến và tính toán thành công (Successful Sensing Computation Probability - SSCP), ký hiệu là Ψ_{SSCP} , được xây dựng như một tiêu chí quan trọng để đánh giá hiệu năng của hệ thống này. Nó được định nghĩa là xác suất định vị thành công đồng thời hoàn thành việc xử lý toàn bộ dữ liệu từ các thiết bị IoT trong độ trễ hệ thống tối đa cho phép $T/2$ như sau:

Định lý 1.

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

4. Kết quả số và thảo luận

Trong phần này, chúng tôi cung cấp các kết quả số về tiêu chí đánh giá xác suất cảm biến và tính toán thành công (Ψ_{SSCP}) thông qua mô phỏng Monte Carlo bằng công cụ Matlab. Các tham số

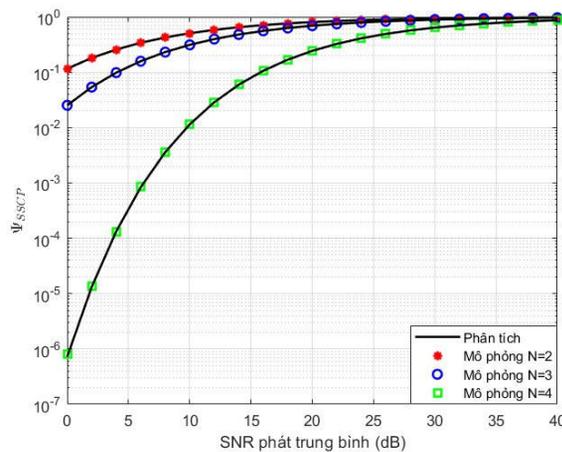
mô phỏng được liệt kê trong Bảng 1. Để đơn giản chúng tôi giả thiết các thiết bị IoT có cùng hệ số chuyển đổi năng lượng, cùng độ dài dữ liệu cần xử lý và hệ số phân chia tác vụ.

Bảng 1. Các thông số mô phỏng

Thông số	Ký hiệu	Giá trị sử dụng
Môi trường truyền		Rayleigh
Tham số phân bố Rayleigh	λ_s, λ_k	1
Hệ số suy hao đường truyền	α	2
Tham số môi trường	μ, β	9.6177, 0.1581
Hệ số phản xạ	ε	0.8
Tần số sóng mang	f_c	10^5 Hz
Độ rộng xung tín hiệu radar	ω	$20\mu s$
Chu kỳ hoạt động của tín hiệu radar	ν	0.01-0.02s
Tọa độ của UAV	(x_U, y_U, h_U)	(0, 0, 5)
Tọa độ của mục tiêu S	(x_s, y_s, h_s)	(15, 15, 0)
Tọa độ của D_k	(x_k, y_k, h_k)	([10 20 15 25], [10 10 10 10], 0)
Số lượt mô phỏng		10^6
Công suất phát của UAV	P_0	0-40 dB
Tần số CPU của các thiết bị IoT và máy chủ U	f_k, f_U	$10^8, 10^9$ Hz
Số chu kỳ CPU xử lý 1bit dữ liệu	c_k, c_U	2, 2
Độ rộng băng thông kênh	W	100MHz
Hệ số chuyển đổi năng lượng RF	η	0.8
Độ dài các dữ liệu	L_k	1Mbs
Hệ số phân chia dữ liệu	δ	0.3
Thời gian khối	T	1s
Ngưỡng tốc độ cảm biến	R_{th}	1kbps

Hình 3 mô tả sự ảnh hưởng của SNR phát trung bình γ_0 và số thiết bị IoT lên hiệu năng của hệ thống theo tiêu chí Ψ_{SSCP} . Quan sát từ hình này

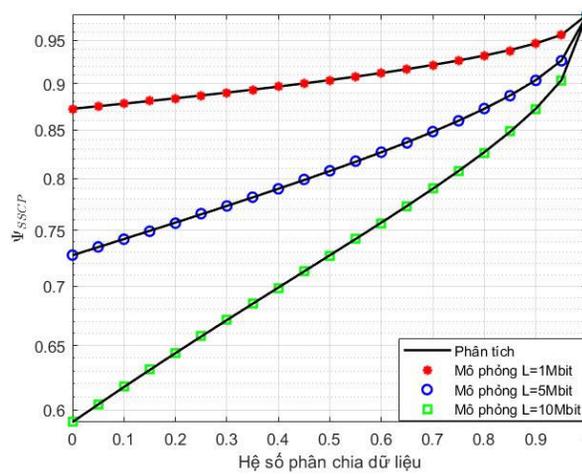
ta thấy, Ψ_{SSCP} tăng khi tăng công suất phát. Đồng thời, khi tăng số lượng thiết bị IoT thì hiệu năng của hệ thống giảm.



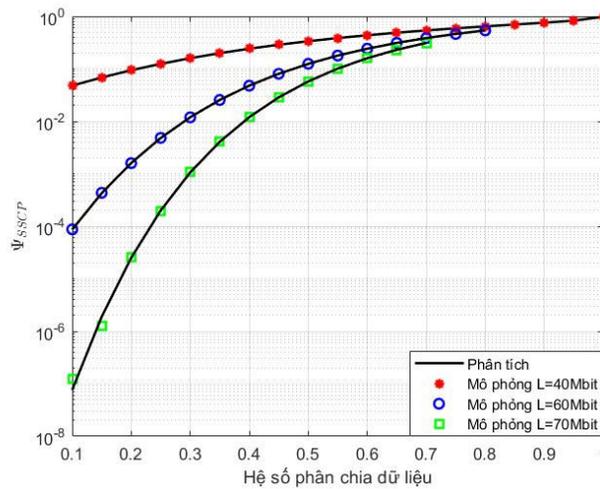
Hình 3. Ψ_{SSCP} thay đổi theo SNR phát trung bình γ_0 và số thiết bị IoT

Hình 4 và 5 mô tả sự thay đổi của Ψ_{SSCP} theo hệ số phân chia dữ liệu và độ lớn dữ liệu. Từ hình 4 và 5 ta thấy, Ψ_{SSCP} tăng khi hệ số phân chia dữ liệu tăng và độ lớn dữ liệu giảm. Điều này được giải thích như sau: dữ liệu được phân chia thành 2 phần, một phần xử lý tại chỗ và phần còn lại xử lý tại máy chủ của UAV. Máy chủ UAV thường có khả năng xử lý lớn hơn nhiều so với các thiết bị IoT nên khi phân chia dữ liệu càng nhiều cho máy chủ UAV thì dễ đáp ứng được yêu cầu thời gian thực. Trong khi đó, độ lớn dữ liệu lớn thì làm tăng thời gian xử lý và làm giảm hiệu năng hệ thống. Tuy nhiên, theo

Hình 5, nếu tăng độ lớn dữ liệu lên rất lớn (ví dụ, 60Mbits hoặc 70Mbits) ta thấy khi tăng hệ số phân chia dữ liệu đến một giá trị ngưỡng thì sẽ dẫn đến máy chủ UAV không xử lý kịp, dẫn đến không đáp ứng được yêu cầu thời gian thực và làm giảm hiệu năng hệ thống. Cụ thể, trong Hình 5 với độ lớn dữ liệu là 40Mbits thì ngưỡng giá trị hệ số phân chia dữ liệu là 0.8; với độ lớn dữ liệu là 60Mbits thì ngưỡng giá trị hệ số phân chia dữ liệu là 0.7. Điều này cho thấy việc phân chia dữ liệu hợp lý giúp cải thiện hiệu năng cảm biến và độ trễ của hệ thống.



Hình 4. Ψ_{SSCP} thay đổi theo hệ số phân chia dữ liệu và độ lớn dữ liệu



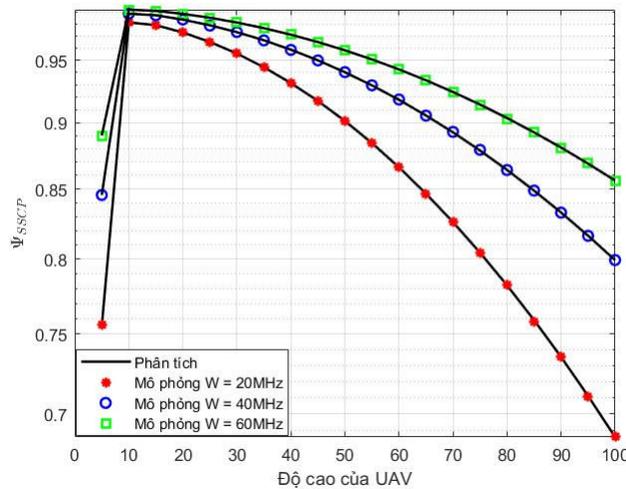
Hình 5. Ψ_{SSCP} thay đổi theo hệ số phân chia dữ liệu và độ lớn dữ liệu

Hình 6 mô tả sự thay đổi của Ψ_{SSCP} theo độ cao của UAV và độ rộng băng thông. Quan sát hình này, ta thấy Ψ_{SSCP} có chiều hướng tăng nhanh khi độ cao của UAV thay đổi từ 0 đến 10. Khi độ cao của UAV tiếp tục tăng thì đường cong đi xuống, tức Ψ_{SSCP} giảm. Kết quả 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 chướng ngại vật đối với tín hiệu truyền với NLoS chiếm ưu thế nên Ψ_{SSCP} giảm. Khi độ cao của UAV tăng cao, tuy LoS chiếm ưu thế, nhưng khoảng cách truyền xa làm suy hao đường truyền tăng, dẫn đến Ψ_{SSCP} 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, chẳng hạn $h_U = 10m$.

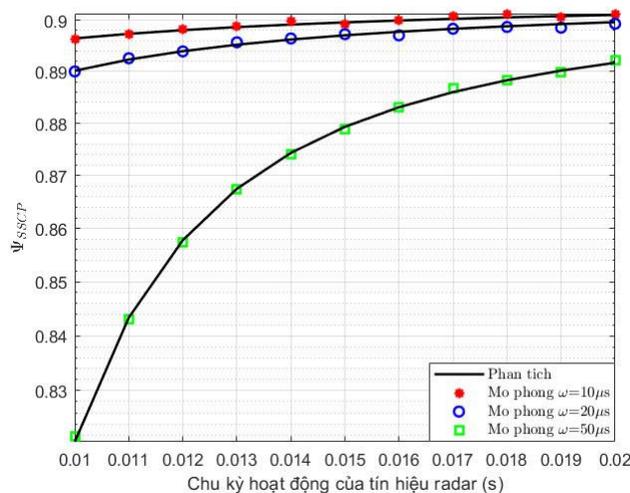
Ngoài ra, từ Hình 6 ta cũng thấy rằng băng thông càng cao thì hiệu năng của hệ thống càng được cải thiện.

Hình 7 mô tả Ψ_{SSCP} thay đổi theo chu kỳ hoạt động và độ rộng xung của tín hiệu radar. Ta có thể thấy, Ψ_{SSCP} tăng theo chu kỳ hoạt động radar cao hơn. Ngược lại, hình cũng cho thấy SSCP giảm khi thời lượng xung radar dài hơn. Điều này cho thấy băng tần radar rộng hơn cho tín hiệu radar dẫn đến hiệu suất cảm biến tốt hơn.

Cuối cùng, quan sát kết quả từ các Hình 3-7, ta thấy kết quả phân tích khớp với kết quả mô phỏng. Điều này khẳng định tính đúng đắn của kết quả phân tích.



Hình 6. Ψ_{SSCP} thay đổi theo độ cao của UAV và độ rộng băng thông



Hình 7. Ψ_{SSCP} thay đổi theo chu kỳ hoạt động của tín hiệu radar và độ rộng xung

5. Kết luận và hướng phát triển

Bài báo này đã trình bày kết quả phân tích hiệu năng của hệ thống tích hợp cảm biến, ISCC cho mạng IoT không dây với cơ chế chuyển tải một phần sử dụng UAV và thu năng lượng vô tuyến. Để đánh giá hiệu năng hệ thống, chúng tôi đã xây dựng các biểu thức dạng tường minh chính xác của xác suất cảm biến và tính toán thành công bằng cách sử dụng các đặc tính thống kê của kênh không dây. Ngoài ra, chúng tôi đã khảo sát ảnh hưởng của các thông số quan trọng

như công suất phát, số lượng thiết bị IoT, tỉ lệ phân chia dữ liệu, độ lớn dữ liệu, độ cao của UAV, băng thông, chu kỳ hoạt động và độ rộng xung của tín hiệu radar đến hiệu năng của hệ thống. Kết quả cho thấy, để cải thiện hiệu năng hệ thống, chúng ta có thể tăng công suất phát, băng thông kênh truyền, và băng tần radar, đồng thời chọn giá trị phù hợp của tỉ lệ phân chia dữ liệu và độ cao UAV. Hướng nghiên cứu tiếp theo, chúng tôi xem xét cảm biến đa mục tiêu và áp dụng cơ chế đa truy cập phi trực giao cho hệ thống ISCC này.

PHỤ LỤC A: Chứng minh Định lý 1.

$$\begin{aligned}
 \Psi_{SSCP} &= \Pr\left(\gamma_s > \gamma_{th}, \max\{T_k^l, T_k^o, T_U^e\} < \frac{T}{2}\right), \quad \forall k \in \{1, 2, \dots, K\} \\
 &= \prod_{k=1}^K \Pr\left(\gamma_s > \gamma_{th}, T_k^l < \frac{T}{2}, \frac{L_k^{(2)}}{C_k} < \frac{T}{2}, T_U^e < \frac{T}{2}\right) \\
 &= \begin{cases} \prod_{k=1}^K \Pr\left(\gamma_s > \gamma_{th}, \frac{KL_k^{(2)}}{W \log(1 + \gamma_k)} < \frac{T}{2}\right), & T_k^l < \frac{T}{2}, T_U^e < \frac{T}{2}, \forall k \in \{1, 2, \dots, K\} \\ 0 & T_k^l \geq \frac{T}{2}, T_U^e \geq \frac{T}{2}, k \in \{1, 2, \dots, K\} \end{cases} \\
 &= \begin{cases} \Pr(\gamma_s > \gamma_{th}) \prod_{k=1}^K \Pr(\gamma_k > c_k), & T_k^l < \frac{T}{2} \text{ and } T_U^e < \frac{T}{2}, \forall k \in \{1, 2, \dots, K\} \\ 0 & T_k^l \geq \frac{T}{2} \text{ or } T_U^e \geq \frac{T}{2}, k \in \{1, 2, \dots, K\} \end{cases} \\
 &= \begin{cases} \Pr\left(\frac{\varepsilon\gamma_0 X^2}{L_{US}^2} > \gamma_{th}\right) \prod_{k=1}^K \Pr\left(\frac{\eta\gamma_0}{L_{Uk}^2} Y_k^2 - \frac{2E_k^l}{TL_{Uk}^2 \sigma^2} Y_k - c_k > 0\right), & T_k^l < \frac{T}{2} \text{ and } T_U^e < \frac{T}{2}, \forall k \in \{1, 2, \dots, K\} \\ 0 & T_k^l \geq \frac{T}{2} \text{ or } T_U^e \geq \frac{T}{2}, k \in \{1, 2, \dots, K\} \end{cases} \\
 &= \begin{cases} \Pr\left(X > \sqrt{\frac{L_{US}^2 \gamma_{th}}{\varepsilon\gamma_0}}\right) \prod_{k=1}^K \Pr(Y_k > \Lambda_k), & T_k^l < \frac{T}{2} \text{ and } T_U^e < \frac{T}{2}, \forall k \in \{1, 2, \dots, K\} \\ 0 & T_k^l \geq \frac{T}{2} \text{ or } T_U^e \geq \frac{T}{2}, k \in \{1, 2, \dots, K\} \end{cases} \\
 &= \begin{cases} \left[1 - F_X\left(\sqrt{\frac{L_{US}^2 \gamma_{th}}{\varepsilon\gamma_0}}\right)\right] \prod_{k=1}^K [1 - F_{Y_k}(\Lambda_k)], & T_k^l < \frac{T}{2} \text{ and } T_U^e < \frac{T}{2}, \forall k \in \{1, 2, \dots, K\} \\ 0 & T_k^l \geq \frac{T}{2} \text{ or } T_U^e \geq \frac{T}{2}, k \in \{1, 2, \dots, K\} \end{cases}
 \end{aligned}$$

trong đó, $\Lambda_k = \frac{b_k + \sqrt{b_k^2 + 4a_k c_k}}{2a_k}$, $a_k = \frac{\eta\gamma_0}{L_{Uk}^2}$, $b_k = \frac{2E_k^l}{TL_{Uk}^2 \sigma^2}$, $c_k = 2 \frac{2KL_k^{(2)}}{WT} - 1$. Thay các hàm CDF tương ứng theo biểu thức (2) ta được kết quả cuối cùng. Định lý 1 đã được chứng minh.

Tài liệu tham khảo

- [1] Saha, H.N., Roy, R., Chakraborty, M., Sarkar, C. (2021). "IoT-enabled agricultural system application, challenges and security issues." In *Agricultural Informatics: Automation Using the IoT and Machine Learning* (pp. 223–247). DOI: 10.1002/9781119769231.ch11.
- [2] Wen, D., Zhou, Y., Li, X., Shi, Y., Huang, K., Letaief, K.B. (2024). "A Survey on Integrated Sensing, Communication, and Computation." *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. DOI: 10.1109/COMST.2024.3521498 (early access).
- [3] Ramesh, S., Radhika, S., Suchetana, C. (2023). "A survey of mobility-aware multi-access edge computing: Challenges, use cases and future directions." *Ad Hoc Networks*, vol. 140, 103044. DOI: 10.1016/j.adhoc.2022.103044.
- [4] Abrar, M., Ajmal, U., Almohaimed, Z.M., Gui, X., Akram, R., Masroor, R. (2021). "Energy efficient UAV-enabled mobile edge computing for IoT devices: a review." *IEEE Access*, 9, pp. 127779–127798. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3112104.
- [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*, vol. 9, pp. 137338–137352.
- [6] Muwafaq, L., Noordin, N.K., Othman, M., Ismail, A., Hashim, F. (2023). "A survey on cloudlet computation optimization in the mobile edge computing environment." *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 14(1), pp. 520–532.
- [7] Liu, Q., Liang, H., Luo, R., Liu, Q. (2022). "Energy-efficiency computation offloading strategy in UAV aided V2X network with integrated sensing and communication." *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 3, pp. 1337–1346. DOI: 10.1109/OJCOMS.2022.3195703.
- [8] Li, X., Feng, G., Liu, Y., Qin, S., Zhang, Z. (2023). "Joint sensing, communication, and computation in mobile crowdsensing enabled edge networks." *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 22, no. 4, pp. 2818–2832. DOI: 10.1109/TWC.2022.3214535.
- [9] Huang, N., Dou, C., Wu, Y., Qian, L., Lin, B., Zhou, H. (2023). "Unmanned aerial vehicle-aided integrated sensing and computation with mobile edge computing." *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 10, no. 19, pp. 16830–16844.
- [10] Xu, Y., Zhang, T., Liu, Y., Yang, D. (2023). "UAV-enabled integrated sensing, computing, and communication: A fundamental trade-off." *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 12, no. 5, pp. 843–847.
- [11] Chen, J., Xu, Y., Yang, D., Zhang, T. (2024). "UAV-assisted ISCC networks: Joint resource and trajectory optimization." *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 13, no. 9, pp. 2372–2376. DOI: 10.1109/LWC.2024.3415084.
- [12] Qi, Q., Chen, X., Khalili, A., Zhong, C., Zhang, Z., Ng, D.W.K. (2022). "Integrating sensing, computing, and communication in 6G wireless networks: Design and optimization." *IEEE Transactions on Communications*, vol. 70, no. 9, pp. 6212–6227. DOI: 10.1109/TCOMM.2022.3190363.
- [13] Li, B., Shen, L., Zhao, C., Fei, Z. (2025). "Robust resource optimization in integrated sensing, communication, and computing networks based on soft actor-critic." *Journal of Electronics & Information Technology*, vol. 47, no. 4, pp. 948–957. DOI: 10.11999/JEIT240716.