

## TÍCH HỢP CẢM BIẾN, TRUYỀN THÔNG, ĐIỆN TOÁN BIÊN VÀ TRUYỀN NĂNG LƯỢNG VÔ TUYẾN CHO MẠNG PHƯƠNG TIỆN GIAO THÔNG

Nguyễn Thành Nam\*, Lê Phương Quyên,  
Trương Văn Trương, Hà Đắc Bình

Khoa Điện-Điện tử, Trường Công nghệ và Kỹ thuật, Đại học Duy Tân

\*Email: nguyenthannam9@dtu.edu.vn

Ngày nhận bài: 3/9/2025; ngày hoàn thành phản biện: 19/9/2025; ngày duyệt đăng: 01/10/2025

### TÓM TẮT

Bài báo này phân tích hiệu năng của một mạng phương tiện tích hợp cảm biến, truyền thông và tính toán (ISCC) tích hợp khả năng thu thập năng lượng RF. Mô hình hệ thống bao gồm nhiều người dùng trên xe bị hạn chế về tài nguyên được ghép nối sử dụng cơ chế NOMA để chuyển tải các tác vụ cho trạm gốc gắn trên phương tiện thông qua giao tiếp tán xạ ngược. Người dùng áp dụng chiến lược phân chia tác vụ: một phần được xử lý cục bộ bằng năng lượng RF thu thập được, phần còn lại được chuyển đến máy chủ biên của trạm gốc. Chúng tôi xây dựng biểu thức dạng đóng gần đúng cho xác suất cảm biến và tính toán thành công nhận biết năng lượng (E-SSCP) bằng cách kết hợp mô hình hóa cảm biến, thu thập năng lượng và độ trễ. Tiếp đó, chúng tôi nghiên cứu ảnh hưởng của các tham số chính đến hiệu suất hệ thống. Kết quả mô phỏng xác thực các phân tích lý thuyết đã đề xuất.

**Từ khóa:** cảm biến, truyền thông và tính toán, mạng phương tiện, E-SSCP, thu năng lượng RF.

### 1. MỞ ĐẦU

Những tiến bộ trong công nghệ mạng, đặc biệt hướng đến 6G [1], đã thúc đẩy mạng lưới xe cộ phát triển nhanh chóng. Bằng cách tích hợp cảm biến, điện toán và thu thập năng lượng RF, các hệ thống này hỗ trợ các ứng dụng như xe tự lái và quản lý giao thông thông minh [2-3]. Tuy nhiên, các trạm gốc cố định truyền thống gặp nhiều rào cản về chi phí và vùng phủ sóng, thúc đẩy sự nổi lên của các đám mây con [4]. Đồng thời, việc đảm bảo cung cấp năng lượng liên tục là rất quan trọng. Truyền năng lượng không dây (WPT) [5] là một giải pháp, nhưng việc thu năng lượng thường cạnh tranh với truyền dữ liệu. Để giải quyết vấn đề này, truyền thông tin và năng lượng không dây

đồng thời (SWIPT) giúp tăng cường hiệu suất [6]. Bên cạnh đó, truyền thông tán xạ ngược là một kỹ thuật hứa hẹn để tiết kiệm năng lượng. Để nâng cao hơn nữa dung lượng hệ thống, phương thức đa truy cập phi trực giao (NOMA) có thể được tích hợp. NOMA cho phép nhiều người dùng chia sẻ cùng một tài nguyên truyền dẫn, và sử dụng kỹ thuật khử nhiễu liên tiếp (SIC) tại máy thu để giải điều chế và khôi phục thông tin, qua đó cải thiện đáng kể khả năng truy cập hàng loạt.

Các nghiên cứu gần đây đã khám phá các lĩnh vực liên quan. Công trình [7] đã đề xuất một bài toán tối ưu hóa kết hợp cho hệ thống ISCC, nhằm giảm thiểu tổng độ trễ phát sinh từ việc truyền dữ liệu giữa các thiết bị, hàng đợi tính toán dữ liệu và xác thực blockchain. Họ đã giải quyết vấn đề này bằng thuật toán mạng Q sâu (DQN) đối kháng, tối ưu hóa đồng thời việc lập lịch thời gian, phân bổ kênh và điều khiển công suất. Nghiên cứu cũng kết hợp một phương pháp phân bổ tài nguyên cân bằng giữa độ trễ tính toán và bảo mật. Công trình [8] tập trung vào một lược đồ phân bổ tài nguyên và tối ưu hóa quyết định mạnh mẽ cho một mạng thống nhất cảm biến-tính toán. Trong [9], các tác giả đã chứng minh cách bề mặt thông minh có thể cấu hình lại (RIS) có thể cải thiện khả năng cảm biến, giao tiếp và tính toán thông qua thiết kế đa lớp. Nghiên cứu này xem xét hai kịch bản: máy bay không người lái (UAV) và mạng phương tiện (Internet of Vehicles - IoV). Mặc dù công nghệ tích hợp cảm biến, truyền thông và tính toán rất hứa hẹn, việc ứng dụng nó trong bối cảnh mạng truyền thông tán xạ ngược kết hợp NOMA vẫn chưa được khám phá nhiều. Nghiên cứu của chúng tôi tập trung vào việc tích hợp các kỹ thuật thu năng lượng RF, cảm biến, truyền thông tán xạ ngược và NOMA trong mạng Điện toán biên di động trên xe (VMEC) sử dụng sơ đồ giảm tải một phần.

Những đóng góp chính của bài báo này là:

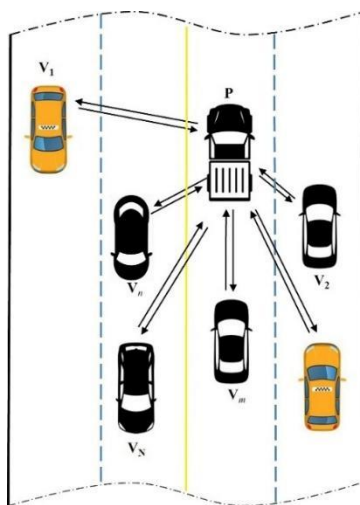
- Chúng tôi đề xuất một mô hình hệ thống VMEC NOMA dựa trên năng lượng RF, cảm biến và truyền thông tán xạ ngược, kết hợp sơ đồ giảm tải một phần.
- Chúng tôi phát triển và phân tích một thước đo mới, xác suất cảm biến và tính toán thành công nhận biết năng lượng (E-SSCP), và rút ra biểu thức dạng tường minh gần đúng của nó.
- Để hiểu rõ hơn về hiệu suất hệ thống, chúng tôi nghiên cứu tác động của các thông số quan trọng, bao gồm hệ số phân chia tác vụ, hệ số phản xạ tán xạ ngược, vận tốc xe và công suất phát, đến hiệu năng hệ thống.

Phần còn lại của bài báo này được tổ chức như sau: Phần 2 mô tả mô hình hệ thống. Phần 3 trình bày phân tích hiệu suất. Phần 4 cung cấp các kết quả số, và Phần 5 kết luận công trình của chúng tôi.

## 2. MÔ HÌNH HỆ THỐNG

### 2.1. Mô hình hệ thống và kênh truyền

Chúng tôi xem xét một hệ thống VMEC như hình 1 bao gồm  $N$  phương tiện ( $V_n$ ) và một xe hỗn hợp ( $P$ ) cung cấp năng lượng và dịch vụ tính toán sử dụng cơ chế truyền thông tán xạ ngược. Tất cả các thiết bị được giả định có một ăng-ten duy nhất và hoạt động ở chế độ bán song công.  $P$  là một phương tiện di động, được tích hợp máy chủ biên để cung cấp các dịch vụ điện toán. Các phương tiện có năng lực tính toán hạn chế hoặc các thiết bị IoT trên phương tiện được ghép thành  $M = N/2$  cặp (ký hiệu  $V_m$  và  $V_n$  với  $m, n \in \{1, \dots, M\}$ ) để triển khai NOMA. Các cặp này có thể chuyển tải một phần tác vụ bằng cách sử dụng giao tiếp tán xạ ngược, tận dụng tín hiệu RF từ  $P$ . Hệ số kênh truyền của liên kết hướng tới ( $P-V_k$ ) và hướng phản hồi ( $V_k-P$ ) lần lượt là  $h_{fk}$  và  $h_{bk}$ ,  $k \in \{1, 2, \dots, N\}$ . Không mất tính tổng quát, giả sử hệ thống có đầy đủ thông tin kênh truyền và các mức tăng độ lợi công suất kênh được sắp xếp như sau  $|h_{f1}|^2 \leq \dots \leq |h_{fm}|^2 \leq \dots \leq |h_{f(M+1)}|^2 \leq \dots \leq |h_{fn}|^2 \leq \dots \leq |h_{fN}|^2$ ,  $l \in \{f, b\}$ . Hệ thống được giả thiết triển khai trong môi trường đô thị với vận tốc di chuyển thấp nên hiệu ứng Doppler được bỏ qua. Các cặp người dùng sử dụng cơ chế đa truy cập phân chia theo thời gian (TDMA). Giả sử, tổng thời gian phục vụ cho  $N$  người dùng là  $T$  và khe thời gian cho mỗi cặp giống nhau được ký hiệu là  $\tau$ .



Hình 1. Mô hình hệ thống mạng phương tiện tích hợp ISCC đề xuất

Giả sử tất cả các kênh đều độc lập và tuân theo phân bố fading Rayleigh đồng nhất. Trong nghiên cứu này, việc áp dụng phân bố fading Rayleigh nhằm mô hình hóa đặc tính kênh truyền trong môi trường đô thị mật độ cao, nơi xảy ra hiện tượng tán xạ, khúc xạ và không có đường truyền thẳng (Non-Line of Sight - NLoS). Mặc dù các mô hình như Nakagami- $m$  hay Rician có thể bao phủ rộng hơn cho các kịch bản LoS, giả thiết Rayleigh cung cấp cơ sở toán học thuận lợi để thiết lập các biểu thức giải tích dạng

đồng, đồng thời cho phép đánh giá hiệu năng hệ thống trong điều kiện lan truyền khắc nghiệt nhất. Do đó, hàm mật độ tích lũy (CDF) và hàm mật độ xác suất (PDF) của độ lợi công suất kênh truyền,  $X_k = |h_{fk}|^2 = |h_{bk}|^2$ , lần lượt được biểu diễn như sau:

$$F_{X_k}(x) = 1 - e^{-\frac{x}{\lambda_k}}, \quad (1)$$

$$f_{X_k}(x) = \frac{1}{\lambda_k} e^{-\frac{x}{\lambda_k}}, \quad (2)$$

trong đó,  $\lambda_k \triangleq \mathbb{E}(X_k)$ .

## 2.2. Mô hình thu năng lượng RF

Trong nghiên cứu này, để đơn giản chúng tôi sử dụng mô hình thu năng lượng RF tuyến tính [9]. Mặc dù việc sử dụng mô hình này giúp giảm độ phức tạp tính toán các biểu thức toán học, nhưng những hạn chế của nó chưa phản ánh được hiện tượng bão hòa năng lượng ở mức công suất đầu vào cao, một đặc tính của mạch thu năng lượng RF thực tế. Do đó, kết quả phân tích ở đây được xem là đánh giá hiệu năng trong vùng hoạt động tuyến tính của mạch thu [10]. Năng lượng thu được tại  $V_k$  ( $k \in \{m, n\}$ ) được tính như sau:

$$E_k = \eta(1 - \varepsilon_k)P_0 |h_{fk}|^2 \tau = \eta(1 - \varepsilon_k)P_0 X_k \tau, \quad (3)$$

trong đó,  $P_0$  là công suất phát của xe P,  $\eta$  là hệ số chuyển đổi năng lượng ( $0 < \eta \leq 1$ ),  $\varepsilon_k$  biểu thị hệ số tán xạ ngược,  $0 < \varepsilon_k < 1$ . Để đơn giản, chúng tôi giả thiết các thiết bị người dùng có hệ số tán xạ ngược giống nhau và được biểu thị là  $\varepsilon$ .

## 2.3. Mô hình tín hiệu và cảm biến

Trong mỗi khe thời gian  $/$ , trạm P phát tín hiệu RF đến cặp người dùng tương ứng. Cặp người dùng này nhận, giải điều chế thông tin, và đồng thời phản xạ tín hiệu về cho P. Tín hiệu nhận được tại P như sau:

$$y = \left( \sqrt{\frac{\varepsilon_m P_0}{d_m^{2\alpha}}} b_m h_{fm} h_{bm} + \sqrt{\frac{\varepsilon_n P_0}{d_n^{2\alpha}}} b_n h_{fn} h_{bn} \right) x + w, \quad (4)$$

Trong đó,  $x$  là tín hiệu RF gốc truyền từ P thỏa mãn  $\mathbf{E}(|x|^2) = 1$ ,  $\mathbf{E}(\cdot)$  là viết tắt của toán tử kỳ vọng;  $b_m$  và  $b_n \in \{0, 1\}$  lần lượt đại diện cho các bit dữ liệu của  $V_m$  và  $V_n$ ;  $w \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2)$  biểu thị độ nhiễu Gauss trắng cộng (additive white Gaussian noise - AWGN) trung bình bằng không với phương sai là  $\sigma^2$ . Áp dụng triệt nhiễu liên tiếp (SIC) tại P,  $b_n$  được giải mã trước bằng cách xử lý tín hiệu của  $b_m$  như can nhiễu, sau đó trừ đi thành phần của  $b_n$

đã giải mã để thu được  $b_m$ . Tỷ số tín hiệu trên nhiễu cộng nhiễu (SINR) và tỷ số tín hiệu trên nhiễu (SNR) tại P lần lượt được viết như sau:

$$\gamma_n = \frac{a_n X_n^2}{a_m X_m^2 + 1}, \quad (5)$$

$$\gamma_m = a_m X_m^2, \quad (6)$$

trong đó,  $a_k \triangleq \frac{\varepsilon_k \gamma_0}{d_k^{2\alpha}}, \gamma_0 \triangleq \frac{P_0}{\sigma^2}, k \in \{m, n\}$ .

Trong hệ thống ISCC này, hiệu suất cảm biến được đánh giá. Nhận thấy rằng độ chính xác cảm biến của mục tiêu tăng khi tốc độ dữ liệu cảm biến đạt được tăng, chúng tôi sử dụng tốc độ cảm biến đạt được làm chỉ số hiệu suất chính. Tốc độ này có thể được tính như sau:

$$C_k = W \log(1 + \gamma_k), \quad (7)$$

trong đó,  $W$  là băng thông tín hiệu. Để đảm bảo đạt được hiệu suất cảm biến cần thiết, tốc độ này phải đáp ứng một yêu cầu thông lượng tối thiểu ( $R_{\min}$ ) [11], tức là:

$$C_k \geq R_{\min}. \quad (8)$$

#### 2.4. Mô hình tính toán cục bộ

Áp dụng sơ đồ chuyển tải một phần, tác vụ  $L_k$ -bit của mỗi người dùng được chia thành hai phần: Một tác  $L_{k1} = \lambda L_k$  được tính toán cục bộ tại  $V_k$  và phần còn lại  $L_{k2} = (1 - \lambda)L_k$  được chuyển tải đến P, với  $\lambda$  là hệ số phân chia tác vụ,  $0 \leq \lambda \leq 1$ . Giả thiết, năng lượng thu được tại  $V_k$  được sử dụng để thực thi tác vụ  $L_{k1}$ -bit và việc thực thi này được tiến hành song song việc thực thi tại P.

Các mô hình độ trễ và mức tiêu thụ năng lượng cho tính toán cục bộ được tính toán như sau [12]:

$$T_k^c = \frac{c_k L_{k1}}{f_k}, \quad (9)$$

$$E_k^c = \mu c_k (f_k)^2 L_{k1}, \quad (10)$$

trong đó,  $f_k$  biểu thị hệ số điện dung hiệu dụng của CPU,  $c_k$  và  $f_k$  lần lượt là chu kỳ CPU để tính toán một bit và tần số chu kỳ CPU tại  $V_k, k \in \{m, n\}$ .

#### 2.5. Mô hình chuyển tải và tính toán

Cặp người dùng  $V_m$  và  $V_n$  áp dụng NOMA và điều chế thông tin trên tín hiệu RF và chuyển tải tác vụ  $L_{k2}$ -bit cho P. Thời gian chuyển tải đến P và độ trễ tính toán tại P được tính toán như sau:

$$T_k^o = \frac{L_{k2}}{C_k}, \quad (11)$$

$$T_{mn}^e = \frac{c_P (L_{m2} + L_{n2})}{f_P}. \quad (12)$$

Trong đó,  $c_P$  và  $f_P$  lần lượt là chu kỳ CPU để tính toán một bit và tần số chu kỳ CPU tại  $P$ ,  $k \in \{m, n\}$ .

### 3. PHÂN TÍCH HIỆU NĂNG HỆ THỐNG

Trong phần này, chúng tôi trình bày việc phát triển một thước đo phân tích mới, là xác suất cảm biến và tính toán thành công nhận biết năng lượng (E-SSCP), ký hiệu là  $\Psi$ . Việc đánh giá hiệu năng cảm biến trong ISCC có thể được thực hiện bằng cách sử dụng điều kiện ràng buộc như biểu thức (8). Để đánh giá hiệu năng, chúng tôi xem xét hai điều kiện ràng buộc. Thứ nhất, năng lượng RF thu được phải đủ cho việc tính toán cục bộ, tức là  $E_k \geq E_k^c$ . Thứ hai, do việc xử lý và chuyển tải được thực hiện song song nên tổng độ trễ của cặp người dùng  $V_m$  và  $V_n$  là  $T_{\max} = \max \left\{ \max(T_m^c, T_n^c), \max(T_m^o, T_n^o) + T_{mn}^e \right\}$ .

Kết hợp các điều kiện này, E-SSCP được định nghĩa cụ thể là xác suất năng lượng thu được từ mỗi người dùng đủ để thực thi cục bộ, cảm biến thành công và các tác vụ của họ được hoàn thành trong độ trễ hệ thống tối đa cho phép  $T_{th}$  như sau:

$$\Psi_{\{m,n\}} = \Pr \left( E_m \geq E_m^c, E_n \geq E_n^c, C_m \geq R_{\min}, T_{\max} \leq T_{th} \right). \quad (13)$$

trong đó, với công trình này chúng tôi thiết lập  $T_{th} = \tau = T/M$ , tức là các tác vụ phải hoàn thành trong khe thời gian được phân bổ.

**Mệnh đề 1.** Biểu thức dạng tường minh gần đúng của E-SSCP cho một cặp người dùng ( $V_m$  và  $V_n$ ) trong hệ thống mạng xe ISCC được xem xét ( $\Psi_{\{m,n\}}$ ) được biểu thị như sau:

$$\Psi_{\{m,n\}} = \begin{cases} 0, & \max(T_m^c, T_n^c) > \tau \\ \frac{\pi}{Q\lambda_m} \sum_{q=1}^Q e^{-\frac{\sqrt{b_1(\ln t_q)^2 + b_2} + \ln t_q}{\lambda_n} + \frac{\ln t_q}{\lambda_m}} \sqrt{\frac{1-x_q}{1+x_q}}, & \max(T_m^c, T_n^c) \leq \tau, \Phi \geq \Omega \\ \frac{\pi}{Q\lambda_m} \sum_{q=1}^Q e^{-\frac{\sqrt{b_1(\ln t_q)^2 + b_2} + \ln t_q}{\lambda_n} + \frac{\ln t_q}{\lambda_m}} \sqrt{\frac{1-x_q}{1+x_q}} + \left( e^{-\frac{\Phi}{\lambda_m}} - e^{-\frac{\Omega}{\lambda_m}} \right) e^{-\frac{A_1}{\lambda_n}}, & \max(T_m^c, T_n^c) \leq \tau, \Phi < \Omega \end{cases} \quad (14)$$

trong đó  $A_k = \frac{\mu c_k (f_k)^2 L_{k1}}{\eta(1-\varepsilon_k)P_0\tau}$ ,  $\gamma_{th1} = 2^{\frac{R_{min}}{W}} - 1$ ,  $\gamma_{th2} = 2^{\frac{\Lambda_m}{W}} - 1$ ,  $\gamma_{th3} = 2^{\frac{\Lambda_n}{W}} - 1$ ,  $B_1 = \sqrt{\frac{\gamma_{th1}}{a_m}}$ ,  $B_2 = \sqrt{\frac{\gamma_{th2}}{a_m}}$ ,  
 $\Lambda_k = \frac{L_{k2}}{T_{th} - T_{mn}^e}$ ,  $b_1 = \frac{\gamma_{th1} a_m}{a_n}$ ,  $b_2 = \frac{\gamma_{th3}}{a_n}$ ,  $\Phi = \max(A_m, B_1, B_2)$ ,  $\Omega = \sqrt{\frac{A_n^2 - b_2}{b_1}}$ ,  $\Xi = \max(\Phi, \Omega)$ ,  
 $t_q = \frac{(x_q + 1)e^{-\Xi}}{2}$ ,  $x_q = \cos\left(\frac{2q-1}{2Q}\pi\right)$  với  $Q$  là hệ số đánh đổi giữa độ phức tạp và độ chính xác của phương pháp tích phân Gaussian-Chebyshev.

**Chứng minh:** Xem phụ lục A.

**Hệ quả:** Biểu thức dạng đóng gần đúng của E-SSCP cho toàn bộ hệ thống mạng phương tiện có ISCC được xem xét ( $\Psi_{sys}$ ) được thể hiện như sau:

$$\Psi_{sys} = \prod_{m=1, n=M+1}^{M, N} \Psi_{\{m, n\}}. \quad (15)$$

#### 4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

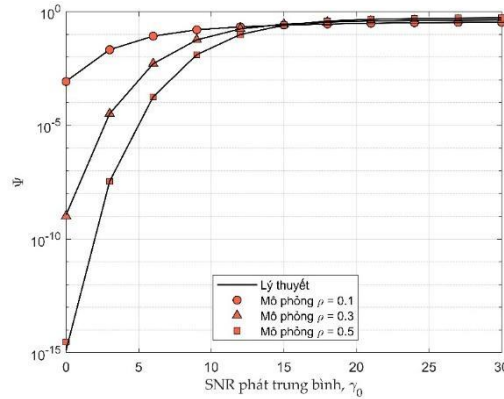
Trong phần này, chúng tôi cung cấp các kết quả số về E-SSCP bằng cách sử dụng phương pháp mô phỏng Monte-Carlo. Các thông số mô phỏng được sử dụng như trong Bảng 1.

**Bảng 1.** Tham số mô phỏng

Ký hiệu	Giá trị	Ký hiệu	Giá trị
	Rayleigh	$L_m, L_n$	10 MBits
$\eta$	0.75	$\tau$	0.1s
$\varepsilon$	0.3	$M$	3
$\rho$	0.3	$\sigma^2$	- 20 dBm
$c_m, c_n, c_p$	2	$P_0$	0-30 dB
$f_m, f_n, f_p$	100 MHz, 100 MHz, 1GHz	$R_{min}$	30 Mbps
$\mu$	$10^{-23}$	$W$	10 MHz
$Q$	100	$\alpha$	2

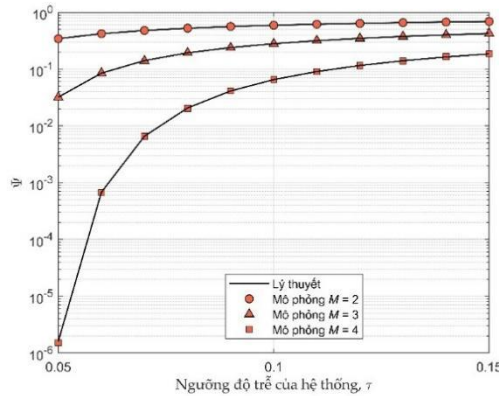
Hình 2 minh họa sự ảnh hưởng của SNR phát trung bình ( $\gamma_0$ ) và hệ số phân chia tác vụ ( $\rho$ ) lên hiệu năng hệ thống ( $\Psi$ ). Kết quả cho thấy  $\Psi$  tăng đáng kể khi  $\gamma_0$  tăng, do hệ thống có đủ năng lượng cho tính toán cục bộ và thời gian giảm tải cũng được rút

ngắn. Ở ba mức  $\rho$  khác nhau thì  $\Psi$  cao nhất ở trường hợp  $\rho = 0.1$  và thấp nhất tại  $\rho = 0.5$ . Điều này là do khả năng tính toán cục bộ của phương tiện còn hạn chế, nên việc ưu tiên giảm tải tác vụ về máy chủ MEC sẽ hiệu quả hơn so với xử lý cục bộ.



Hình 2. E-SSCP so với SNR phát trung bình với hệ số phân chia tác vụ

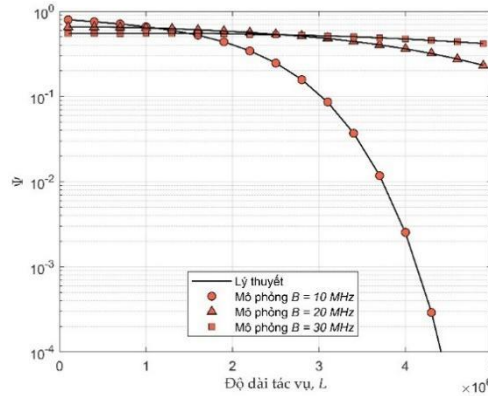
Hình 3 minh họa sự ảnh hưởng của ngưỡng độ trễ của hệ thống ( $\tau$ ) lên hiệu năng hệ thống ( $\Psi$ ) với ba mức số lượng cặp phương tiện ( $M$ ) khác nhau. Kết quả chỉ ra rằng  $\Psi$  được cải thiện đáng kể khi  $\tau$  tăng, do ràng buộc về độ trễ được nới lỏng, cho phép các tác vụ có nhiều thời gian hơn để hoàn thành thành công. Ngược lại, hiệu năng hệ thống suy giảm rõ rệt khi  $M$  tăng, vì khi  $M$  lớn, các khe thời gian bị chia nhỏ, làm thu hẹp thời gian xử lý cho mỗi tác vụ, dẫn đến xác suất vi phạm ngưỡng trễ  $\tau$  cao hơn.



Hình 3. E-SSCP so với ngưỡng độ trễ của hệ thống với số lượng cặp phương tiện

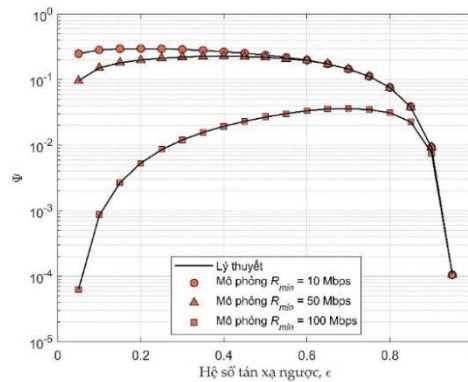
Hình 4 minh họa sự ảnh hưởng của độ dài tác vụ ( $L$ ) lên  $\Psi$  với ba mức băng thông ( $B$ ) khác nhau. Khi  $L$  tăng thì  $\Psi$  giảm mạnh vì lúc này trong cùng một ngưỡng  $T$  nhưng  $L$  tăng. Điều này là hoàn toàn hợp lý, bởi khi  $L$  tăng, hệ thống đòi hỏi nhiều thời gian hơn cho cả quá trình giảm tải và xử lý tính toán. Và ở ba mức  $B$  khác nhau trường hợp  $B = 10\text{MHz}$  có hiệu năng thấp nhất ở cùng các giá trị  $L$  và ngược lại. Nguyên nhân là do băng thông hẹp làm tăng đáng kể thời gian truyền tải dữ liệu (do tốc độ dữ liệu

thấp hơn), gây ra độ trễ lớn và làm giảm  $\Psi$ . Điều này khẳng định rằng băng thông rộng là một yếu tố then chốt để giảm độ trễ truyền tải và cải thiện hiệu năng hệ thống.



Hình 4. E-SSCP so với độ dài tác vụ với băng thông

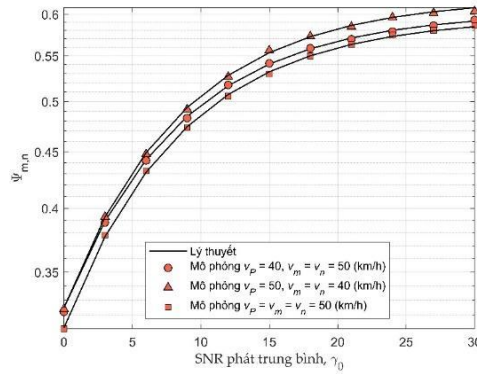
Hình 5 minh họa sự ảnh hưởng của hệ số tán xạ ngược ( $\epsilon$ ) lên  $\Psi$  với ba mức ngưỡng tốc độ cảm biến ( $R_{min}$ ) khác nhau. Kết quả cho ta thấy  $\Psi$  đạt giá trị tối ưu tại một điểm  $\epsilon$  cụ thể, thể hiện sự đánh đổi rõ rệt giữa năng lượng thu được (để tính toán cục bộ) và cường độ tín hiệu tán xạ. Khi  $\epsilon$  quá nhỏ hoặc quá lớn, hiệu năng đều suy giảm. Ngoài ra,  $\Psi$  suy giảm đáng kể khi  $R_{min}$  tăng, vì  $R_{min}$  đại diện cho yêu cầu về chất lượng dịch vụ (QoS) của tác vụ cảm biến. Khi yêu cầu này trở nên khắt khe hơn (ngưỡng  $R_{min}$  cao hơn), khiến hệ thống sẽ khó đáp ứng được đồng thời các ràng buộc.



Hình 5. E-SSCP so với hệ số tán xạ ngược với ngưỡng tốc độ cảm biến

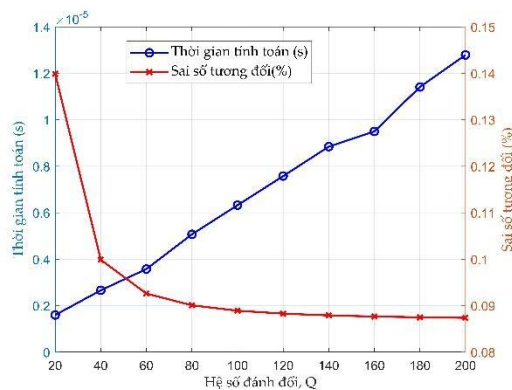
Để đánh giá ảnh hưởng của vận tốc di chuyển, hình 6 minh họa hiệu năng  $\Psi$  theo SNR phát trung bình ( $\gamma_0$ ) với ba kịch bản, giả sử  $V_m$  và  $V_P$  di chuyển cùng chiều, trong khi  $V_n$  và  $V_P$  đi ngược chiều. Ba kịch bản vận tốc ( $v_p, v_m, v_n$ ) được khảo sát là (i)  $v_p = 50 km/h, v_m = v_n = 40 km/h$ , (ii)  $v_p = 40 km/h, v_m = v_n = 50 km/h$  (iii) là cả ba phương tiện  $v = 50 km/h$ . Tương tự hình 2,  $\Psi$  luôn tăng khi  $\gamma_0$  tăng ở mọi kịch bản. Tuy nhiên,

ở một mức  $\gamma_0$  cố định, kịch bản (i) cho  $\Psi$  cao nhất, tiếp theo là (ii) và (iii) thấp nhất. Điều này phản ánh tác động của vận tốc tương đối. Ở trường hợp (iii),  $V_n$  đi ngược chiều với  $V_P$  với vận tốc cao làm suy hao đường truyền tăng mạnh, gây suy giảm chất lượng tín hiệu. Ngược lại trường hợp (i) và (ii) thể hiện sự kết hợp vận tốc tối ưu hơn, làm giảm tốc độ gia tăng khoảng cách giữa các phương tiện, giúp chất lượng tín hiệu tốt hơn.



Hình 6. E-SSCP so với SNR phát trung bình với vận tốc phương tiện

Hình 7 minh họa mối quan hệ đánh đổi giữa độ phức tạp tính toán và độ chính xác xấp xỉ khi thay đổi hệ số  $Q$  tại mức  $P_0 = 15$  dB. Kết quả cho thấy thời gian tính toán tăng tuyến tính theo  $Q$ , phù hợp với cấu trúc biểu thức xấp xỉ dưới dạng tổng hữu hạn theo  $q = 1, \dots, Q$  do đó chi phí tính toán tăng xấp xỉ tỉ lệ với số điểm lấy mẫu. Ngược lại, sai số tương đối giảm khi  $Q$  tăng và có xu hướng bão hòa: sai số giảm mạnh ở miền  $Q$  nhỏ (tại  $Q = 20$  với mức sai số khoảng 0,14% giảm xuống 0,1% tại  $Q = 40$ ). Sau đó giảm chậm và tiến dần đến mức ổn định khoảng 0.09% khi  $Q > 100$ . Điều này cho thấy việc tăng  $Q$  vượt quá ngưỡng 80 – 100 sẽ khiến cho thời gian tính toán tăng nhưng độ chính xác không đổi quá nhiều. Theo đó nghiên cứu của chúng tôi lựa chọn  $Q = 100$  để đảm bảo tính chính xác xấp xỉ với thời gian tính toán hợp lý.



Hình 7. Mối quan hệ đánh đổi giữa độ phức tạp tính toán và độ chính xác xấp xỉ.

Mặc dù nghiên cứu này tập trung vào phân tích tham số của mô hình đề xuất, nhưng phân tích định tính cho thấy hệ thống tích hợp NOMA và tán xạ ngược vượt trội

so với các phương pháp tiếp cận truyền thống như OMA hay truyền thông chủ động. Thứ nhất, so với các kỹ thuật OMA (như TDMA/FDMA) vốn gặp hạn chế về độ trễ và số lượng kết nối trong môi trường mật độ cao, cơ chế NOMA cho phép phục vụ nhiều phương tiện đồng thời trên cùng tài nguyên, giúp giảm đáng kể độ trễ truy cập và tăng hiệu quả phổ. Các nghiên cứu gần đây [13], [14] cũng chỉ ra rằng NOMA cung cấp tổng tốc độ dữ liệu và sự cân bằng hiệu năng-năng lượng tốt hơn so với OMA trong các mạng 5G/6G. Thứ hai, tích hợp Backscatter là yếu tố then chốt để giải quyết bài toán năng lượng. Hơn nữa, việc tích hợp tán xạ ngược giúp hệ thống đạt được các tiêu chuẩn "Green IoT" bền vững cho mạng 6G, như được chỉ ra trong [15].

## 5. KẾT LUẬN

Bài báo này trình bày hiệu năng hệ thống VMEC NOMA, tích hợp việc thu năng lượng RF, cảm biến và truyền thông tán xạ ngược với cơ chế giảm tải một phần. Chúng tôi đã phát triển một thước đo hiệu năng mới là E-SSCP và rút ra thành công biểu thức giải tích dạng tường minh của nó. Các kết quả phân tích và mô phỏng đã làm rõ tác động của các tham số quan trọng như SNR phát trung bình, hệ số phân chia tác vụ, vận tốc xe, độ dài tác vụ, băng thông đã cung cấp những hiểu biết sâu sắc để thiết kế hệ thống. Bên cạnh các kết quả lý thuyết, tính khả thi triển khai thực tế của hệ thống đề xuất cũng được xem xét. Việc tích hợp NOMA và Backscatter trong môi trường phương tiện di động cao đối mặt với các thách thức về đồng bộ hóa thời gian và ước lượng kênh truyền (CSI). Tuy nhiên, với sự phát triển của công nghệ hiện hành, các vấn đề này hoàn toàn có thể được giải quyết. Cụ thể, vấn đề đồng bộ hóa khung truyền dẫn cho NOMA có thể được đảm bảo thông qua các chuẩn giao tiếp V2X hiện đại kết hợp với định vị GNSS độ chính xác cao [16]. Đối với thách thức về độ phức tạp tính toán của SIC và sự biến đổi nhanh của kênh truyền, nghiên cứu [17] đã đề xuất áp dụng các thuật toán học sâu, để ước lượng kênh và phân bổ tài nguyên hiệu quả trong thời gian thực, phù hợp với năng lực tính toán ngày càng mạnh mẽ của các máy chủ biên trên xe. Trong tương lai chúng tôi sẽ tối ưu hóa tài nguyên bằng cách sử dụng các thuật toán, mở rộng kịch bản khảo sát về mật độ bảo mật hoặc tăng mô hình đa người dùng và đa máy chủ MEC. Đặc biệt, để khắc phục hạn chế của giả thiết đơn giản hóa hiện tại, mô hình thu năng lượng phi tuyến tính sẽ được áp dụng nhằm phản ánh chính xác hơn hiệu suất thực tế của hệ thống.

## PHỤ LỤC

Phụ lục A: Trong phần này, chúng tôi trình bày chứng minh Mệnh đề 1. Từ công thức (13), chúng ta có:

$$\begin{aligned}
 \Psi_{\{m,n\}} &= \Pr\left(E_m \geq E_m^c, E_n \geq E_n^c, C_m \geq R_{\min}, \max\left\{\max(T_m^c, T_n^c), \max(T_m^o, T_n^o) + T_{mn}^e\right\} \leq T_{th}\right) \\
 &= \begin{cases} 0, & \max(T_m^c, T_n^c) > \tau \\ \Pr\left(X_m \geq A_m, X_n \geq A_n, X_m \geq B_1, \max\left(\frac{L_{m2}}{C_m}, \frac{L_{n2}}{C_n}\right) + \frac{c_p(L_{m2} + L_{n2})}{f_p} \leq \tau\right), & \max(T_m^c, T_n^c) \leq \tau \end{cases} \\
 &= \begin{cases} 0, & \max(T_m^c, T_n^c) > \tau \\ \Pr\left(X_m \geq A_m, X_n \geq A_n, X_m \geq B_1, C_m \geq \Lambda_m, C_n \geq \Lambda_n\right), & \max(T_m^c, T_n^c) \leq \tau \end{cases} \\
 &= \begin{cases} 0, & \max(T_m^c, T_n^c) > \tau \\ \Pr\left(X_m \geq A_m, X_n \geq A_n, X_m \geq B_1, X_m \geq B_2, X_n \geq \sqrt{\frac{\gamma_{th3} a_m X_m^2 + \gamma_{th3}}{a_n}}\right), & \max(T_m^c, T_n^c) \leq \tau \end{cases} \\
 &= \begin{cases} 0, & \max(T_m^c, T_n^c) > \tau \\ \Pr\left(X_m \geq \underbrace{\max(A_m, B_1, B_2)}_{\Phi}, X_n \geq \max\left(A_n, \sqrt{b_1 X_m^2 + b_2}\right)\right), & \max(T_m^c, T_n^c) \leq \tau \end{cases} \tag{A-1}
 \end{aligned}$$

$$A_m = \frac{\mu c_m (f_m)^2 L_{m1}}{\eta(1-\varepsilon_m) P_0 \tau}, A_n = \frac{\mu c_n (f_n)^2 L_{n1}}{\eta(1-\varepsilon_n) P_0 \tau}, B_1 = \sqrt{\frac{\gamma_{th1}}{a_m}}, \gamma_{th1} = 2^{\frac{R_{\min}}{W}} - 1, \Lambda_m = \frac{L_{m2}}{\tau - \frac{c_p(L_{m2} + L_{n2})}{f_p}}$$

trong đó,

$$\Lambda_n = \frac{L_{n2}}{\tau - \frac{c_p(L_{m2} + L_{n2})}{f_p}}, B_2 = \sqrt{\frac{\gamma_{th2}}{a_m}}, \gamma_{th2} = 2^{\frac{\Lambda_m}{W}} - 1, b_1 = \frac{\gamma_{th3} a_m}{a_n}, b_2 = \frac{\gamma_{th3}}{a_n}$$

Ta tính tích phân  $I$  như sau:

$$\begin{aligned}
 I &= \Pr\left(X_m \geq \underbrace{\max(A_m, B_1, B_2)}_{\Phi}, X_n \geq \max\left(A_n, \sqrt{b_1 X_m^2 + b_2}\right)\right) \\
 &= \begin{cases} \Pr\left(X_m \geq \Xi, X_n \geq \sqrt{b_1 X_m^2 + b_2}\right) & \Phi \geq \Omega \\ \Pr\left(X_m \geq \Xi, X_n \geq \sqrt{b_1 X_m^2 + b_2}\right) + \Pr\left(\Phi \leq X_m \leq \Omega, X_n \geq A_n\right) & \Phi < \Omega \end{cases} \tag{A-2}
 \end{aligned}$$

$$\Phi = \max(A_m, B_1, B_2), \Omega = \sqrt{\frac{A_n^2 - b_2}{b_1}}, \Xi = \max(\Phi, \Omega)$$

trong đó

Tiếp theo ta biến đổi  $I_1$  trước:

$$I_1 = \int_{\Xi}^{\infty} \left[1 - F_{X_n}\left(\sqrt{b_1 x^2 + b_2}\right)\right] f_{X_m}(x) dx = \frac{1}{\lambda_m \Xi} \int_{\Xi}^{\infty} e^{-\frac{\sqrt{b_1 x^2 + b_2} x}{\lambda_n} - \frac{x}{\lambda_m}} dx \tag{A-3}$$

Đặt biến  $t = e^{-x} \Rightarrow x = -\ln t$ ,  $dx = -\frac{dt}{t}$ . Khi  $x = \Xi \Rightarrow t = e^{-\Xi}$  và  $x \rightarrow \infty \Rightarrow t = 0$ . Do đó:

$$I_1 = \frac{1}{\lambda_m} \int_0^{\Xi} e^{-\frac{\sqrt{b_1(-\ln t)^2 + b_2} + \ln t}{\lambda_n + \lambda_m}} dt. \quad (\text{A-4})$$

Áp dụng phương pháp tích phân Gaussian-Chebyshev ta thu được tích phân  $I_1$  như sau:

$$I_1 = \frac{\pi}{Q\lambda_m} \sum_{q=1}^Q e^{-\frac{\sqrt{b_1(\ln t_q)^2 + b_2} + \ln t_q}{\lambda_n + \lambda_m}} \sqrt{\frac{1-x_q}{1+x_q}}, \quad (\text{A-5})$$

trong đó  $t_q = \frac{(x_q + 1)e^{-\Xi}}{2}, x_q = \cos\left(\frac{2q-1}{2Q}\pi\right)$ .

Tiếp theo ta biến đổi  $I_2$ :

$$\begin{aligned} I_2 &= \Pr(\Phi < X_m < \Omega) \cdot \Pr(X_n \geq A_n) \\ &= [F_{X_m}(\Omega) - F_{X_m}(\Phi)] \cdot [1 - F_{X_n}(A_n)] = \left( e^{-\frac{\Phi}{\lambda_m}} - e^{-\frac{\Omega}{\lambda_m}} \right) e^{-\frac{A_n}{\lambda_n}}. \end{aligned} \quad (\text{A-6})$$

Mệnh đề đã được chứng minh.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] R. Liu, M. Hua, K. Guan, X. Wang, L. Zhang, T. Mao, D. Zhang, Q. Wu, A. Jamalipour (2024). 6G enabled advanced transportation systems, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 25, no. 9, pp. 10 564–10 580.
- [2] Li, X., Feng, G., Liu, Y., Qin, S., Zhang, Z. (2023). Joint Sensing, Communication, Computation in Mobile Crowdsensing Enabled Edge Networks. In *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 22, no. 4, pp. 2818-2832.
- [3] J. Zhao, R. Ren, D. Zou, Q. Zhang, W. Xu (2024). IoV-oriented integrated sensing, computation, and communication: System design and resource allocation, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 73, no. 11, pp. 16 283–16 294.
- [4] L. Muwafaq, N. K. Noordin, M. Othman, A. Ismail, F. Hashim (2023). A survey on cloudlet computation optimization in the mobile edge computing environment, *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 14, no. 1, pp. 520–532.
- [5] Nguyen, Minh T., Nguyen, Cuong V., Tran, Hoang T., Viola, Fabio (2023). Energy harvesting for mobile agents supporting wireless sensor networks, *Energy Harvesting and Systems*, vol. 10, no. 2, pp. 267-275.
- [6] Nguyen, VL., Truong, VT., Tran, T.T., Ha, DB., (2026). Secure Offloading in UAV-Aided IoT Networks with Backscatter Communication and Non-linear Energy Harvesting. In: Vo, NS., Ha, DB., Jung, H. (eds) *Industrial Networks and Intelligent Systems. INISCOM 2025. Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*, vol 656. Springer, Cham, pp. 142-155.

- [7] Huang, B., Feng, J. and Jin, X. (2025). Sensing, communication, computing integrated resource allocation for AI-empowered trustworthy IoT. *IEEE Transactions on Consumer Electronics* 71(1): 2003–2016.
- [8] Li, B., Shen, L., Zhao, C. and Fei, Z. (2025). Robust resource optimization in integrated sensing, communication, and computing networks based on soft actorcritic. *Journal of Electronics and Information Technology*, 47(240716): 948–957.
- [9] Anh-Nhat Nguyen, Dac-Binh Ha, V. N. Vo, Van-Truong Truong, Dinh-Thuan Do, C. So-In, (2022). Performance Analysis and Optimization for IoT Mobile Edge Computing Networks with RF Energy Harvesting and UAV Relaying. In *IEEE Access*, vol. 10, pp. 21526-21540.
- [10] Luo, Y., Xu, C., Li, B., Dong, J., Wang, L., Li, X., ... & Lin, Y. (2025). Performance Analysis of Non-Linear Energy Harvesting Cognitive Two-Way Relay Network Based on NOMA. *Digital Signal Processing*, 105427.
- [11] X. Li, Z. Wu, Y. Cai, W. Yuan, (2024). Joint Beamforming and Resource Allocation Design for STARS-Assisted OFDMA ISCC Network. In *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 13, no. 7, pp. 1968-1972.
- [12] Liu, S., Huang, Y., Hu, H., Si, J., Cheng, G., Huang, T., Hu X. (2023). Resource and trajectory optimization for secure communication in RIS assisted UAV-MEC system. *IET Communications*, vol. 17, no. 18, pp. 2041-2139.
- [13] Balaraman, A., Shioda, S., Kim, Y., Kim, Y., & Kim, T. (2024). Efficient User Pairing and Resource Optimization for NOMA-OMA Switching Enabled Dynamic Urban Vehicular Networks. *Electronics*, 13(23), 4834.
- [14] Nandal, V. (2023, October). A comparative study of oma and noma in 5g networks, analyzing performance and optimizing wireless network capacity using noma. In *2023 First International Conference on Advances in Electrical, Electronics and Computational Intelligence (ICAEECI)* (pp. 1-6). IEEE.
- [15] Zeng, J., Zhang, T., Mishra, D., Yuan, J., & Seneviratne, A. (2025). A Survey on Green Designs for Energy Harvesting Backscatter Communications to Enable Sustainable IoT. *Energies* (19961073), 18(4).
- [16] Rodr, J., Wei, Z., Wang, J., Gutierrez, C. A., & Correia, L. M. (2025). 6G-enabled vehicle-to-everything communications: Current research trends and open challenges. *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*.
- [17] Cho, S. (2024). Deep-learning-based resource allocation for 6G NOMA-assisted backscatter communications. *IEEE Internet of Things Journal*, 11(19), 32234-32243.

## INTEGRATING SENSING, COMMUNICATIONS, EDGE COMPUTING AND RF POWER TRANSFER FOR VEHICULAR NETWORKS

Nguyen Thanh Nam\*, Le Phuong Quyen,  
Truong Van Truong, Ha Duc Binh

Faculty of Electrical and Electronic Engineering,  
School of Engineering and Technology, Duy Tan University

\*Email: nguyenthannam9@dtu.edu.vn

### ABSTRACT

This paper analyzes the performance of an integrated sensing, communication, and computation (ISCC) vehicular network incorporating RF energy harvesting. Our system model consists of multiple resource-constrained in-vehicle users connected using non-orthogonal multiple access (NOMA) to offload tasks to a vehicle-mounted base station via backscatter communication. The users employ a partial handover strategy: the users harvest RF energy from the base station to execute a part of the task locally, transferring the remaining portion to the base station server. Next, we derive an approximate closed-form expression for the energy-constrained successful sensing and computation probability (E-SSCP) by integrating sensing, energy harvesting, and delay modeling. Subsequently, we investigate how key parameters affect the system performance to understand the behavior of the proposed framework. Finally, simulation results validate our theoretical analysis.

**Keywords:** sensing, communications and computing, vehicular networks, E-SSCP, RF energy harvesting.