

Hiệu năng mạng điện toán biên di động sử dụng bề mặt phản xạ thông minh và cơ chế đa truy cập phi trực giao

On performance of mobile edge computing network using intelligent reflecting surface and non-orthogonal multiple access scheme

Nguyễn Lê Hoàng Tuấn^{a,b}, Phạm Quyền Anh^{a,b}, Hà Đắc Bình^{a,b*}
Nguyễn Le Hoang Tuan^{a,b}, Pham Quyen Anh^{a,b}, Ha Dac Binh^{a,b*}

^aKhoa Điện - Điện tử, Trường Đại học Duy Tân, Đà Nẵng, Việt Nam

^aFaculty of Electrical & Electronics Engineering, Duy Tan University, 550000, Danang, Vietnam

^bViện Nghiên cứu và Phát triển Công nghệ Cao, Đại học Duy Tân, Đà Nẵng, Việt Nam

^bInstitute of Research and Development, Duy Tan University, Da Nang, 550000, Vietnam

(Ngày nhận bài: 11/10/2022, ngày phản biện xong: 9/6/2022, ngày chấp nhận đăng: 10/7/2022)

Tóm tắt

Bài báo này khảo sát một mô hình mạng điện toán biên di động sử dụng cơ chế đa truy cập phi trực giao (NOMA) được sự hỗ trợ của bề mặt phản xạ thông minh. Dựa vào các đặc tính thống kê của kênh truyền vô tuyến, chúng tôi xây dựng các biểu thức dạng tường minh của xác suất tính toán thành công và xác suất năng lượng tiêu thụ để khảo sát và đánh giá hiệu năng của hệ thống. Dựa trên các biểu thức này, chúng tôi thu được các kết quả số học về xác suất tính toán thành công và xác suất năng lượng tiêu thụ theo các tham số chính của hệ thống là công suất phát, tỉ lệ phân bổ công suất phát, độ dài của tác vụ và số lượng phần tử phản xạ được cung cấp để đánh giá sự hoạt động của hệ thống. Cuối cùng, chúng tôi kiểm chứng tính đúng đắn của các biểu thức phân tích bằng mô phỏng Monte-Carlo.

Từ khóa: Mạng điện toán biên di động, NOMA, bề mặt phản xạ thông minh, xác suất tính toán thành công và xác suất năng lượng tiêu thụ.

Abstract

In this paper, we investigate a mobile edge computing (MEC) network using non-orthogonal multiple access (NOMA) scheme with the support of intelligent reflecting surface (IRS). The closed-form expressions for the successful computation and power consumption probabilities are derived based on the statistical characteristics of the transmission channels. Numerical results in terms of successful computation and power consumption probabilities according to transmit power, transmit power allocation ratio, task length, and number of reflecting elements are provided to evaluate this proposed system performance. Finally, we verify the correctness of the analytical expressions by Monte-Carlo simulation.

Keywords: Mobile edge computing network, NOMA, intelligent reflecting surface, successful computation probability, energy consumption probability.

* *Corresponding Author:* Ha Dac Binh; Institute of Research and Development, Duy Tan University, Da Nang, 550000, Vietnam; Faculty of Electrical & Electronics Engineering, Duy Tan University, 550000, Danang, Vietnam
Email: hadacbinh@duytan.edu.vn

1. Giới thiệu

Mặc dù mạng thông tin di động thế hệ thứ năm (5G) vẫn đang trong quá trình bước đầu triển khai thương mại trên toàn thế giới, nhưng hiện nay giới học thuật và công nghiệp đã bắt đầu cuộc đua nhắm đến một thế hệ mạng thông tin di động của tương lai như mạng sau 5G (B5G), mạng thế hệ thứ sáu (6G) nhằm đáp ứng tốt hơn nhu cầu người dùng với các yêu cầu đặt ra nghiêm ngặt hơn so với mạng 5G hiện nay như tốc độ truyền dữ liệu và hiệu quả sử dụng năng lượng cao, vùng phủ sóng rộng, độ tin cậy cực cao và độ trễ thấp [1-4].

Cùng với mạng thông tin di động, những năm gần đây, mạng kết nối vạn vật (Internet of things – IoT) đã trở thành khái niệm rất thịnh hành. IoT đã và đang được triển khai ứng dụng ở nhiều lĩnh vực khác nhau trong thực tế như công nghiệp, nông nghiệp, an ninh quốc phòng, giao thông vận tải, giáo dục... [1],[4].

Điểm chung của mạng thông tin di động thế hệ tương lai và IoT đó là cả hai có nhiều ứng dụng yêu cầu xử lý dữ liệu lớn và phải đáp ứng yêu cầu thời gian thực với độ trễ thấp. Để đáp ứng những yêu cầu này, giải pháp sử dụng hệ thống điện toán biên di động (MEC) đã được đề xuất như một phương án khả thi và có tiềm năng [1-4]. Trong mạng MEC, các máy chủ được bố trí đến vùng biên của mạng để hỗ trợ người dùng thực thi các tác vụ thông qua các kênh truyền không dây (ví dụ như các hệ thống tự trị hoặc các hệ thống thời gian thực...).

Song song với giải pháp sử dụng mạng MEC, phương thức đa truy cập phi trực giao (non-orthogonal multiple access - NOMA) đã được giới thiệu với giải pháp cho phép nhiều người dùng thực hiện đa truy cập sử dụng chung nguồn tài nguyên tần số, thời gian và phân biệt với nhau bằng những mức công suất khác nhau qua đó giúp tăng số lượng kết nối, nâng cao hiệu suất phổ và hiệu quả năng lượng [5-9]. Các tác giả trong [8] đã đề xuất một mô

hình hệ thống với hai điểm truy cập và một người dùng nhiều ăng-ten, trong đó thu năng lượng RF và NOMA được sử dụng để cải thiện hiệu suất mất điện của hệ thống. Công trình [9] đã đề xuất một mô hình hệ thống với hai nhóm người dùng NOMA và điểm truy cập đa ăng-ten, trong đó cơ chế lựa chọn ăng-ten tốt nhất và người dùng tốt nhất được sử dụng để nâng cao hiệu suất của hệ thống MEC.

Ngoài hai giải pháp nói trên, trong thời gian gần đây giải pháp sử dụng bề mặt phản xạ thông minh (intelligent reflecting surface - IRS) cũng đã nổi lên như một mô hình tiềm năng để tạo ra các kênh truyền không dây thông minh, có thể cấu hình lại để áp dụng cho hệ thống truyền thông không dây B5G/6G [10-13]. Một cách tổng quát, IRS là bề mặt phẳng được tạo ra từ một số lượng lớn các phần tử phản xạ thụ động, mỗi phần tử trong số đó có thể để thực hiện sự thay đổi biên độ và/hoặc pha một cách chủ động trên tín hiệu đến một cách độc lập. Bằng cách triển khai các IRS trong mạng không dây với mật độ phù hợp và điều phối hợp lý các phần tử phản xạ của chúng, việc truyền tín hiệu không dây giữa máy phát và máy thu có thể được cấu hình lại một cách linh hoạt nhằm đạt được các mục tiêu mong muốn khác nhau tùy theo nhu cầu người sử dụng. Nói cách khác, IRS cung cấp một cách thức cơ bản giải quyết để vấn đề suy giảm và nhiễu sóng của kênh không dây và từ đó có khả năng tạo ra đột phá trong việc cải thiện dung lượng và độ tin cậy của truyền thông không dây.

Việc tích hợp IRS vào các hệ thống NOMA-MEC mở ra một hướng nghiên cứu tiềm năng, góp phần hiện thực hóa mạng thế hệ tiếp theo [14-16]. Công trình [14] đề xuất mô hình IRS-NOMA-MEC hai người dùng với cơ chế chia sẻ thời gian NOMA cho phép hệ thống chuyển đổi giữa NOMA hoặc TDMA. Các tác giả nghiên cứu hệ thống với hai kịch bản trong đó khả năng tính toán của máy chủ MEC là hữu

hạn và vô hạn. Mô hình IoT NOMA-MEC đa người dùng với sự trợ giúp của nhiều IRS được nghiên cứu trong công trình [15]. Các tác giả nêu vấn đề tối đa hóa hiệu quả năng lượng và đề xuất một thuật toán thư giãn lập trình bán xác định (semidefinite programming relaxation algorithm) để giải quyết bài toán không lồi này. Trong công trình [16], một mô hình mạng NOMA MEC IoT thu năng lượng không dây IRS được đề xuất. Cụ thể, các thiết bị IoT (ID) có thể thu năng lượng từ một trạm phát trực tiếp và thông qua một kênh phản xạ IRS. Sau đó, ID sử dụng năng lượng thu được này để giảm tải các tác vụ đến điểm truy cập bằng giao thức NOMA đường lên. Kết quả mô phỏng đã làm rõ ảnh hưởng của số phần tử phản xạ IRS đối với hiệu năng hệ thống so sánh với trường hợp không sử dụng nó.

Khác với các công bố nêu trên, trong bài báo này chúng tôi phân tích hiệu năng của hệ thống dựa trên đặc tính thống kê của kênh truyền bằng cách tìm ra các biểu thức dạng tường minh của xác suất tính toán thành công và xác suất năng lượng tiêu thụ. Đóng góp khoa học của bài báo này như sau:

- Đưa ra một mô hình hệ thống MEC sử dụng đa truy cập NOMA được hỗ trợ bởi một IRS. Đề xuất giao thức hoạt động của hệ thống.
- Xây dựng biểu thức dạng đóng của xác suất tính toán thành công và xác suất tiêu thụ năng lượng để đánh giá hiệu năng của hệ thống trên.
- Thực hiện khảo sát, đưa ra kết quả số và đánh giá sự ảnh hưởng của một số thông số như công suất phát, số lượng phần tử phản xạ của IRS, hệ số phân bổ công suất... đến hiệu năng của hệ thống. Qua đó khẳng định hiệu quả của giải pháp sử dụng IRS trong một hệ thống không dây.

Phần còn lại của bài viết này được tổ chức như sau: Phần 2 trình bày mô hình hệ thống;

phần 3 trình bày phân tích hiệu năng của hệ thống theo xác suất tính toán thành công và xác suất tiêu thụ năng lượng của người dùng; phần 4 cung cấp kết quả số và thảo luận; cuối cùng, chúng tôi kết luận nội dung nghiên cứu trong phần 5.

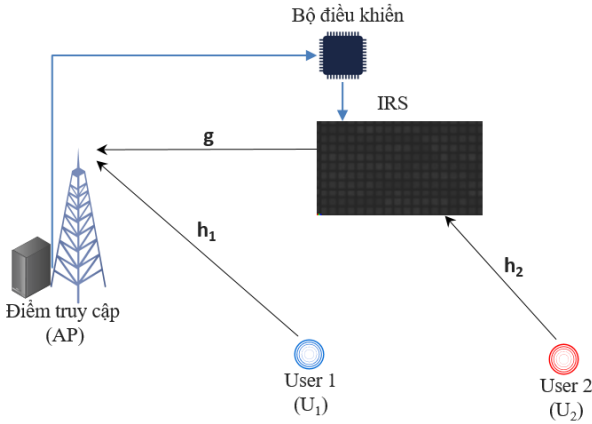
2. Mô hình hệ thống

Chúng tôi khảo sát một mô hình hệ thống mạng điện toán biên di động có sự hỗ trợ của bề mặt phản xạ thông minh như Hình 1. Hệ thống này bao gồm một điểm truy cập **AP**, một cặp người dùng \mathbf{U}_i với $i \in \{1, 2\}$ và một bề mặt phản xạ thông minh (**IRS**) với N phần tử phản xạ thụ động. Do kênh truyền từ người dùng \mathbf{U}_2 đến điểm truy cập có chất lượng kém và không ổn định nên cần sự hỗ trợ từ **IRS** để cải thiện hiệu năng mạng. Bộ điều khiển (controller) trong Hình 1 chịu trách nhiệm kiểm soát các phần tử phản xạ cũng như điều chỉnh biên độ/pha phản xạ của chúng theo thời gian thực. Để đơn giản, ta giả định rằng không có sự ảnh hưởng tín hiệu tương hỗ trong phản xạ của các phần tử **IRS** lân cận, tức là tất cả các phần tử **IRS** phản xạ các tín hiệu đến một cách độc lập. Do ảnh hưởng của suy hao, ta chỉ xem xét các tín hiệu được **IRS** phản xạ lần đầu tiên và bỏ qua những tín hiệu đó được phản xạ bởi nó hai hoặc nhiều lần. Như vậy, tín hiệu nhận được từ tất cả các phần tử **IRS** có thể được mô hình hóa như một sự kết hợp của các tín hiệu phản xạ tương ứng của chúng; do đó, mô hình tín hiệu bằng tần cơ sở tính toán cho tất cả N phần tử **IRS** như sau:

$$y(t) = \left(\sum_{n=1}^N \beta_n e^{j\theta_n} h_{2,n} g_n \right) x(t) = \mathbf{h}_2^H \Theta \mathbf{g} x(t), \quad (1)$$

Trong đó, $x(t)$ biểu thị tín hiệu truyền bằng gốc có giá trị phức, $\mathbf{g} \triangleq [g_1, g_2, \dots, g_N]^T$, $\mathbf{h}_2^H \triangleq [h_{2,1}, h_{2,2}, \dots, h_{2,N}]$ với g_n và $h_{2,n}$ lần lượt là hệ số kênh truyền từ **AP** đến **IRS** và **IRS** đến người dùng \mathbf{U}_2 , đồng thời chúng tuân theo phân bố Nakagami- m với tham số tương ứng là m_g và m_2 . $\Theta \triangleq \text{diag}[\beta_1 e^{j\theta_1}, \beta_2 e^{j\theta_2}, \dots, \beta_N e^{j\theta_N}]$, với

$j = \sqrt{-1}$, β_n là hệ số phản xạ biên độ và θ_n là biến dịch pha của phần tử phản xạ thứ n có thể được hiệu chỉnh thông qua bộ điều khiển IRS.



Hình 1. Mô hình hệ thống mạng điện toán biên di động sử dụng IRS

Giả thiết, tất cả các máy đều là thiết bị đơn ăng-ten và hoạt động ở chế độ bán song công. Tại AP, bộ thu sử dụng mạch triệt tiêu nhiễu nối tiếp (successive interference cancellation SIC) để giải mã tín hiệu thu được. Ngoài ra, chúng tôi còn giả thiết U_1 và U_2 có tác vụ L_1 -bit và tác vụ L_2 -bit tương ứng.

Chúng tôi đề xuất giao thức cho mô hình Hình 1 này như sau:

Bước 1: Người dùng giảm tải các tác vụ đến cho máy chủ tại AP bằng cách gửi tác vụ/dữ liệu đến điểm truy cập. Trong đó, IRS hỗ trợ cho U_2 bằng cách phản xạ tín hiệu đến chuyển tiếp đến AP.

Bước 2: Điểm truy cập AP nhận các tác vụ/dữ liệu này và tiến hành xử lý tại máy chủ.

Bước 3: Kết quả xử lý được gửi trả về cho các người dùng bằng cách áp dụng cơ chế NOMA cho đường xuống.

Nội dung tiếp theo, chúng tôi trình bày các bước của giao thức trên bằng các mô hình toán học cụ thể như sau:

Bước 1: Hai người dùng U_1 và U_2 áp dụng cơ chế NOMA đường lên để truyền tín hiệu dữ liệu tương ứng s_1 và s_2 cho AP trong khoảng thời gian τ_1 . Tín hiệu thu được tại AP như sau:

$$y = h_1 \sqrt{\frac{\rho P_0}{d_1^{\alpha_1}}} s_1 + \mathbf{h}_2^H \mathbf{\Theta} \mathbf{g} \sqrt{\frac{(1-\rho)P_0}{d_{21}^{\alpha_2} d_{22}^{\alpha_3}}} s_2 + w, \quad (2)$$

trong đó, h_1 lần lượt là hệ số kênh truyền từ AP đến người dùng U_1 và tuân theo phân bố Nakagami- m với tham số tương ứng là m_1 ; P_0 là tổng công suất phát của người dùng; ρ là hệ số phân chia công suất; α là hệ số suy hao công suất theo khoảng cách; d_1 , và d_{21} lần lượt là khoảng cách Euclidean từ U_1 và U_2 đến AP và IRS; d_{22} là khoảng cách Euclidean từ AP đến IRS; w là nhiễu trắng cộng Gaussian (AWGN) có trung bình bằng 0 và phương sai là σ^2 .

Bước 2: Tại AP sử dụng bộ khử nhiễu SIC, trong đó AP giải mã tín hiệu của U_1 trước trong khi xem tín hiệu của U_2 là nhiễu. Sau khi có được s_1 , ta lấy tín hiệu tổng thu được trừ cho s_1 thì thu được s_2 . Tỷ số tín hiệu trên nhiễu tại AP được tính như sau:

$$\gamma_{s_1} = \frac{\rho \gamma_0 \mu_1 |h_1|^2}{(1-\rho) \gamma_0 \mu_2 |\mathbf{h}_2^H \mathbf{\Theta} \mathbf{g}|^2 + 1} = \frac{\rho \gamma_0 \mu_1 U}{(1-\rho) \gamma_0 \mu_2 V + 1}, \quad (3)$$

$$\gamma_{s_2} = (1-\rho) \gamma_0 \mu_2 |\mathbf{h}_2^H \mathbf{\Theta} \mathbf{g}|^2 = (1-\rho) \gamma_0 \mu_2 V, \quad (4)$$

trong đó, $\gamma_0 \triangleq \frac{P_0}{\sigma^2}$ là tỉ số tín hiệu trên nhiễu phát trung bình; $\mu_1 \triangleq d_1^{-\alpha_1}$, $\mu_2 = d_{21}^{-\alpha_2} d_{22}^{-\alpha_3}$, $U \triangleq |h_1|^2$, $V \triangleq |\mathbf{h}_2^H \mathbf{\Theta} \mathbf{g}|^2$.

Thời gian truyền các khối dữ liệu của U_1 và U_2 lần lượt được tính như sau:

$$t_{s_1} = \frac{L_1}{W \log_2(1 + \gamma_{s_1})}, \quad (5)$$

$$t_{s_2} = \frac{L_2}{W \log_2(1 + \gamma_{s_2})}, \quad (6)$$

trong đó, W là băng thông của kênh truyền.

Thời gian truyền tối đa của hệ thống là:

$$\tau_1 = \max(t_{s_1}, t_{s_2}). \quad (7)$$

Thời gian tính toán hai tác vụ của U_1 và U_2 tại AP là:

$$\tau_2 = \frac{\zeta(L_1 + L_2)}{f}, \quad (8)$$

trong đó, ζ là số chu kì CPU cần thiết để xử lý dữ liệu tại **AP**, và f là tần số hoạt động của máy chủ tại **AP**.

Bước 3: Sau khi tính toán thành công, **AP** gửi trả kết quả về cho **U₁** và **U₂**. Kết quả sau quá trình tính toán ở **AP** thông thường là các thông tin điều khiển, nên có độ dài bit rất thấp, vì vậy, thời gian phản hồi thông tin τ_3 sẽ rất nhỏ so với τ_1 cũng như τ_2 nên có thể được bỏ qua [6], [7].

Với fading Nakagami- m , hàm phân bố tích lũy (CDF) và hàm mật độ xác suất (PDF) của $U = |h_1|^2$ như sau:

$$F_U(x) = 1 - \sum_{k=0}^{m_1-1} \frac{m_1^k x^k}{k! \lambda_1^k} e^{-\frac{m_1 x}{\lambda_1}}, \quad (9)$$

$$f_U(x) = \frac{m_1^{m_1} x^{m_1-1}}{\Gamma(m_1) \lambda_1^{m_1}} e^{-\frac{m_1 x}{\lambda_1}}, \quad (10)$$

trong đó, $\lambda_1 = \mathbb{E}[|h_1|^2]$ với $\mathbb{E}[\cdot]$ là toán tử kỳ vọng.

Để hỗ trợ cho **U₂** truyền dữ liệu, IRS được lập trình cấu hình thời gian thực sao cho tối đa hóa giá trị $V = |\mathbf{h}_2^H \mathbf{\Theta} \mathbf{g}|^2 = \left| \sum_{n=1}^N \beta_n g_n h_{2,n} e^{j\theta_n} \right|^2$. Tức là, giá trị dịch pha θ_n được điều chỉnh sao cho đạt được $V_{\max} = \beta^2 \left| \sum_{n=1}^N g_n h_{2,n} \right|^2$ với giả thiết $\beta_n = \beta, \forall n$.

Theo kết quả của công trình [17], hàm phân bố xác suất tích lũy (CDF) và hàm mật độ xác suất (PDF) của $X = \left| \sum_{n=1}^N g_n h_{2,n} \right|^2$ có được như sau:

$$F_X(x) = \frac{m^N (4m_s m_l)^{-m_s N}}{\Gamma(2m_s N)} \gamma\left(2m_s N, 2\sqrt{m_s m_l} x\right), \quad (11)$$

$$f_X(x) = \frac{m^N}{\Gamma(2m_s N)} x^{2m_s N-1} e^{-2\sqrt{m_s m_l} x}, \quad (12)$$

Chúng tôi có được Bổ đề 1 như sau:

Bổ đề 1. Đối với hệ thống mạng MEC đề xuất, xác suất tính toán thành công được tính theo biểu thức dạng tường minh sau:

$$\text{trong đó, } m_s = \min\{m_s, m_2\}, \quad m_l = \max\{m_s, m_2\}, \\ m = \frac{\sqrt{\pi} 4^{m_s - m_l + 1} (m_s m_l)^{m_s} \Gamma(2m_s) \Gamma(2m_l - 2m_s)}{\Gamma(m_s) \Gamma(m_l) \Gamma(m_l - m_s + \frac{1}{2})}$$

Từ kết quả trên, ta suy ra được hàm CDF và hàm PDF của $V_{\max} = \beta^2 X^2$ lần lượt là:

$$F_{V_{\max}}(x) = \frac{m^N (4m_s m_l)^{-m_s N}}{\Gamma(2m_s N)} \gamma\left(2m_s N, \frac{2\sqrt{m_s m_l} x}{\beta}\right), \quad (13)$$

$$f_{V_{\max}}(x) = \frac{m^N x^{m_s N-1}}{2\Gamma(2m_s N) \beta^{2m_s N}} e^{-\frac{2\sqrt{m_s m_l} x}{\beta}}. \quad (14)$$

3. Phân tích hiệu năng

Trong phần này, chúng tôi phân tích hiệu năng hệ thống bằng cách đưa ra xác suất tính toán thành công và xác suất tiêu thụ năng lượng của hệ thống mạng đề xuất.

3.1. Xác suất tính toán thành công

Xác suất tính toán thành công (Φ) được định nghĩa là xác suất tất cả các tác vụ được hoàn thành đúng thời gian trễ tối đa cho phép $T > 0$. Trong hệ thống đề xuất, Φ được cho bởi công thức:

$$\Phi = \Pr(\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 < T) \\ = \Pr\left(\max\{t_{s_1}, t_{s_2}\} < T - \frac{\zeta(L_1 + L_2)}{f}\right) \quad (15) \\ = \Pr(\gamma_{s_1} > \gamma_1^{th}, \gamma_{s_2} > \gamma_2^{th}),$$

trong đó, γ_{s_1} và γ_{s_2} được tính theo công thức (3)

$$\text{và } (4), \quad \gamma_1^{th} = 2^{\frac{L_1}{WT}} - 1, \quad \gamma_2^{th} = 2^{\frac{L_2}{WT}} - 1, \\ T = T - \frac{\zeta(L_1 + L_2)}{f}.$$

$$\Phi = \frac{\pi m^N e^{-\frac{m_1 b_1}{\lambda_1}}}{2Q_1 \beta^{2m_s N} \Gamma(2m_s N)} \sum_{k=0}^{m_1-1} \frac{m_1^k}{k! \lambda_1^k} \sum_{q=1}^{Q_1} (a_1 v_q + b_1)^k v_q^{m_s N-1} e^{-\frac{m_1 a_1 v_q}{\lambda_1} - \frac{2\sqrt{m_s m_1 v_q}}{\beta}} \sqrt{\frac{1-\varphi_q}{1+\varphi_q}}. \tag{16}$$

Trong đó, $a_1 = \frac{\gamma_1^{th} (1-\rho)\mu_2}{\rho\mu_1}$, $b_1 = \frac{\gamma_1^{th}}{\rho\gamma_0\mu_1}$, $c_1 = \frac{\gamma_2^{th}}{(1-\rho)\gamma_0\mu_2}$, $v_q = -\ln\left[\frac{(\varphi_q + 1)e^{-c_1}}{2}\right]$, $\varphi_q = \cos\left(\frac{2q-1}{2Q_1}\pi\right)$,

Q_1 là hệ số cân bằng giữa độ phức tạp và độ chính xác.

Chứng minh: Xem Phụ lục 1.

3.2. Xác suất năng lượng tiêu thụ

Xác suất tiêu thụ năng lượng (Ψ) được định nghĩa là xác suất năng lượng tiêu thụ dùng cho truyền giảm tải nhỏ hơn ngưỡng cho trước (E_{th}).

$$\Psi = \Pr(\max\{E_1, E_2\} < E_{th}), \tag{17}$$

$$\Psi = \frac{\pi m^N e^{-\frac{m_1 b_2}{\lambda_1}}}{2Q_2 \beta^{2m_s N} \Gamma(2m_s N)} \sum_{k=0}^{m_1-1} \frac{m_1^k}{k! \lambda_1^k} \sum_{q=1}^{Q_2} (a_2 u_q + b_2)^k u_q^{m_s N-1} e^{-\frac{m_1 a_2 u_q}{\lambda_1} - \frac{2\sqrt{m_s m_1 u_q}}{\beta}} \sqrt{\frac{1-\varphi_q}{1+\varphi_q}}. \tag{18}$$

Trong đó, $\omega_1^{th} = 2^{\frac{\rho R_1 L_1}{WE_{th}}} - 1$, $\omega_2^{th} = 2^{\frac{(1-\rho)R_0 L_2}{WE_{th}}} - 1$, $a_2 = \frac{\omega_1^{th} (1-\rho)\mu_2}{\rho\mu_1}$, $b_2 = \frac{\omega_1^{th}}{\rho\gamma_0\mu_1}$, $c_2 = \frac{\omega_2^{th}}{(1-\rho)\gamma_0\mu_2}$,

$u_q = -\ln\left[\frac{(\varphi_q + 1)e^{-c_2}}{2}\right]$, $\varphi_q = \cos\left(\frac{2q-1}{2Q_2}\pi\right)$, Q_2 là hệ số cân bằng giữa độ phức tạp và độ chính xác.

Chứng minh: Xem Phụ lục 2.

4. Kết quả số và thảo luận

Trong phần này, chúng tôi trình bày kết quả số của xác suất tính toán thành công và xác suất tiêu thụ năng lượng của hệ thống mạng đã đề

trong đó, E_1 và E_2 lần lượt là năng lượng tiêu thụ khi truyền giảm tải của U_1 và U_2 .

Thông số này cho thấy mức độ tiêu thụ năng lượng khi tiến hành truyền tác vụ/dữ liệu cho AP.

Bổ đề 2. Đối với hệ thống mạng MEC đề xuất, biểu thức xác suất tiêu thụ năng lượng của hệ thống như sau:

xuất. Chúng tôi sử dụng phương pháp mô phỏng Monte-Carlo để kiểm tra tính chính xác của việc phân tích hệ thống. Các thông số dùng trong việc mô phỏng chi tiết như tại Bảng 1.

Bảng 1. Các thông số mô phỏng

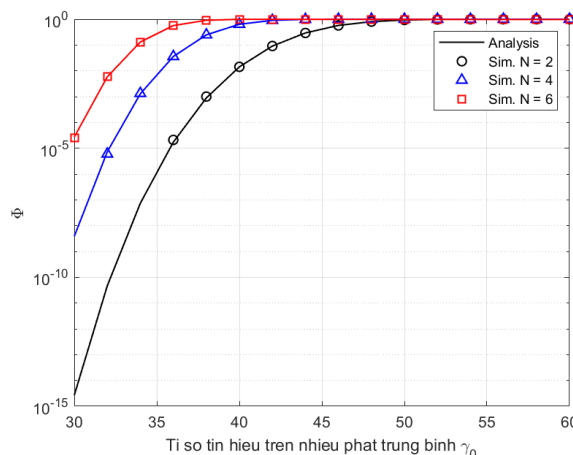
Thông số	Ký hiệu	Giá trị sử dụng
Môi trường		Nakagami - m
Thông số fading	m_1, m_2, m_g	2.0, 2.5, 3.0
Số lượng phần tử của IRS	N	2, 4, 6
Tín hiệu trên nhiễu phát trung bình	γ_0	30-60 dB
Khoảng cách	d_1, d_{21}, d_{22}	10m, 20m, 10m
Hệ số suy hao đường truyền	$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$	2.5, 2.5, 2.5
Tần số chu kỳ xử lý của CPU tại AP	f	1GHz
Số chu kỳ của CPU/1 bit	ζ	2

Băng thông kênh truyền	W	500MHz
Thời gian xử lý tới hạn	T_{th}	0.05s
Năng lượng tiêu hao tới hạn	E_{th}	2J
Hệ số cân bằng giữa độ chính xác và độ phức tạp của phương pháp Gaussian – Chebyshev	Q_1, Q_2	100, 100

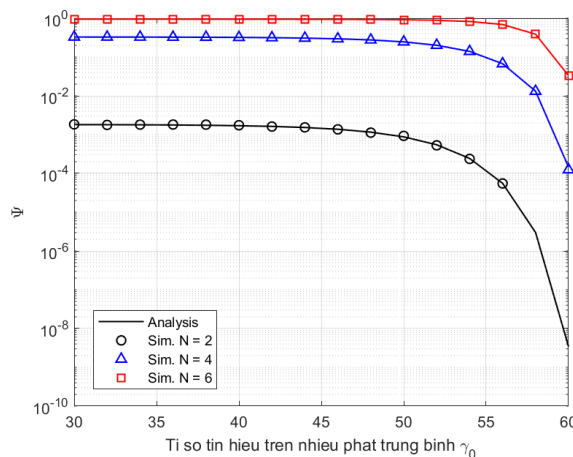
4.1. Ảnh hưởng của SNR trung bình và số lượng phần tử phản xạ của IRS

Ở Hình 2, chúng tôi khảo sát ảnh hưởng của tỷ số tín hiệu trên nhiễu phát trung bình và số lượng phần tử phản xạ đến hiệu năng của hệ thống thông qua xác suất tính toán thành công của hệ thống. Từ đồ thị, chúng ta có thể thấy rằng khi SNR trung bình cũng như số lượng phần tử phản xạ của IRS tăng lên thì xác suất tính toán thành công của hệ thống cũng tăng lên. Điều này có nghĩa là chúng ta có thể tăng hiệu năng của hệ thống bằng cách tăng số lượng phần tử phản xạ của IRS hoặc nâng cao công suất phát.

Tuy nhiên, ở Hình 3, khi khảo sát xác suất tiêu thụ năng lượng của hệ thống, chúng ta lại thấy rằng trong trường hợp nâng cao công suất phát để tăng SNR trung bình thì xác suất năng lượng tiêu thụ của hệ thống cũng sẽ giảm đi. Vì vậy, chúng ta phải chấp nhận sự đánh đổi giữa hiệu suất hệ thống và năng lượng tiêu thụ khi lựa chọn công suất phát của hệ thống. Cũng trong khảo sát ở Hình 3, với cùng mức SNR trung bình thì việc tăng số lượng phần tử phản xạ N của IRS cũng giúp nâng cao xác suất tiêu thụ năng lượng của hệ thống, đồng nghĩa với việc làm giảm năng lượng tiêu hao của hệ thống.



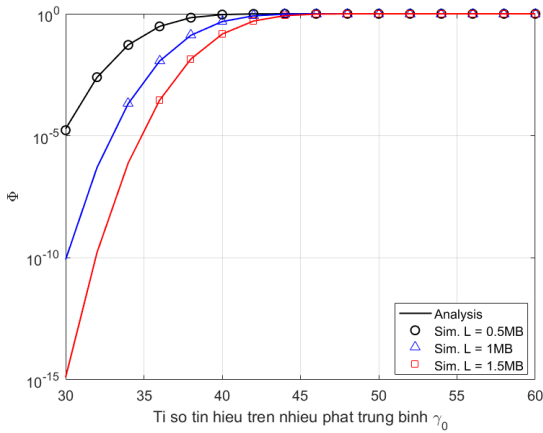
Hình 2. Xác suất tính toán thành công theo SNR và số phần tử phản xạ



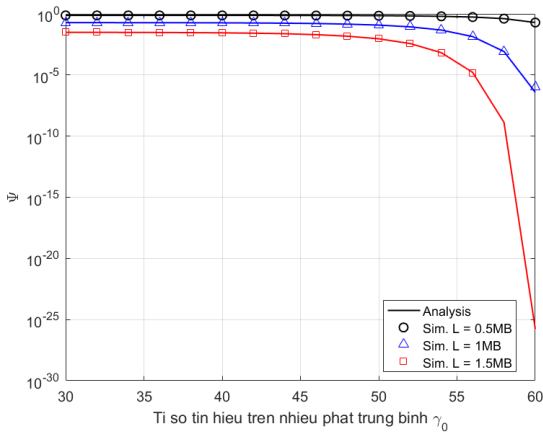
Hình 3. Xác suất tiêu thụ năng lượng theo SNR và số phần tử phản xạ

4.2. Ảnh hưởng của độ dài tác vụ

Tương tự, Hình 4 và Hình 5 trình bày kết quả khảo sát ảnh hưởng của độ dài tác vụ đến hiệu năng của hệ thống thông qua hai thông số xác suất tính toán thành công và xác suất năng lượng tiêu thụ. Qua kết quả thể hiện trong cả hai trường hợp, chúng ta có thể thấy rằng việc sử dụng tác vụ có độ dài càng lớn thì hiệu năng của hệ thống càng giảm và ngược lại.



Hình 4. Xác suất tính toán thành công theo SNR và độ dài tác vụ



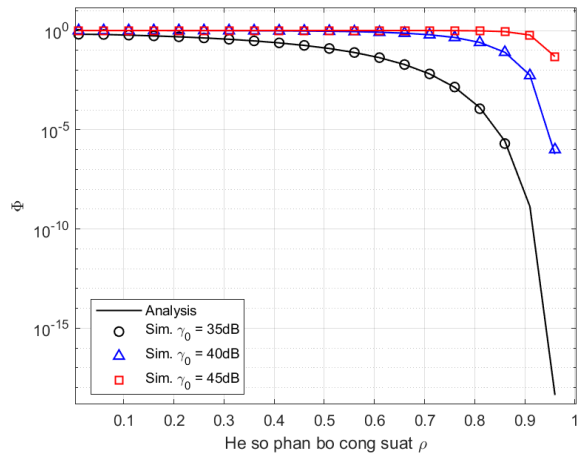
Hình 5. Xác suất tiêu thụ năng lượng theo SNR và độ dài tác vụ

4.3. Ảnh hưởng của hệ số phân bố công suất

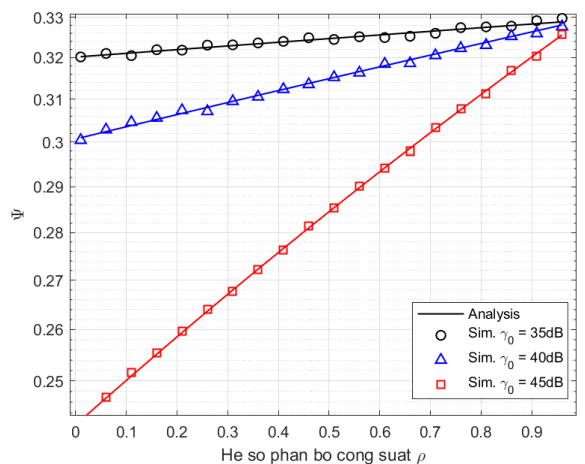
Hệ thống có sử dụng cơ chế đa truy cập NOMA nên chúng tôi khảo sát ảnh hưởng của hệ số phân bố công suất ρ đến hiệu năng của hệ thống. Theo kết quả thu được tại Hình 6 và Hình 7, chúng ta có thể thấy rằng khi hệ số phân bố công suất ρ tăng dần thì xác suất tính toán thành công của hệ thống giảm dần và xác suất năng lượng tiêu thụ của hệ thống sẽ tăng dần. Kết quả này cho chúng ta thấy có sự đánh đổi giữa hiệu năng và mức năng lượng tiêu thụ. Điều này dẫn đến tương ứng với mỗi mức công suất phát khác nhau sẽ tồn tại một giá trị ρ tối ưu để hệ thống có thể đạt được hiệu năng/năng lượng tiêu thụ tối ưu. Giá trị ρ tương ứng có thể xác định được thông qua điểm giao cắt của hai đường cong $\Phi - \Psi$ trong các Hình 8 và 9. Trong Hình 8 và 9,

đường nét liền màu đen là giá trị của xác suất tính toán thành công của hệ thống biến thiên theo giá trị ρ , đường nét đứt màu xanh dương là giá trị của xác suất tiêu thụ năng lượng biến thiên theo giá trị ρ , với các mức giá trị SINR tương ứng lần lượt là 35dB, 40dB.

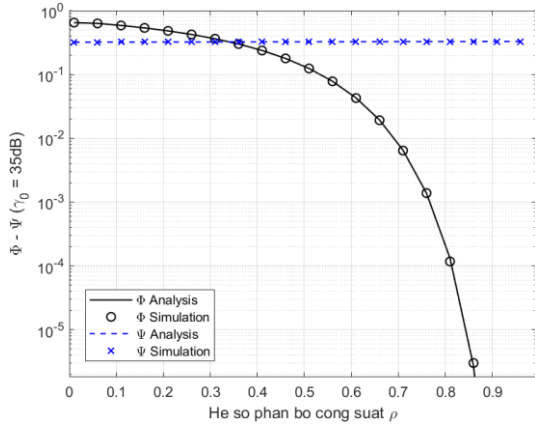
Từ các kết quả thu được ở trên, chúng ta có thể thấy kết quả thu từ công thức lý thuyết trùng khớp với mô phỏng hệ thống. Điều này đã kiểm chứng tính đúng đắn của công thức lý thuyết. Tuy nhiên, mức độ chính xác của kết quả thu được còn phụ thuộc vào hệ số cân bằng giữa độ phức tạp và độ chính xác của phương pháp Gaussian – Chebyshev được áp dụng trong quá trình tính toán.



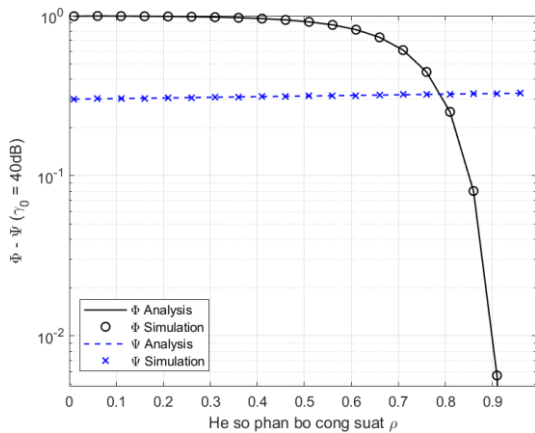
Hình 6. Xác suất tính toán thành công theo hệ số phân bố công suất và SNR



Hình 7. Xác suất tiêu thụ năng lượng theo hệ số phân bố công suất và SNR



Hình 8: Hiệu năng của hệ thống theo hệ số phân bổ công suất tại mức $\gamma_0 = 30\text{dB}$



Hình 9: Hiệu năng của hệ thống theo hệ số phân bổ công suất tại mức $\gamma_0 = 40\text{dB}$

PHỤ LỤC A: Chứng minh Bổ đề 1.

$$\begin{aligned}
 \Phi &= \Pr\left(\frac{\rho\gamma_0\mu_1 U}{(1-\rho)\gamma_0\mu_2 V_{\max} + 1} > \gamma_1^{th}, (1-\rho)\gamma_0\mu_2 V_{\max} > \gamma_2^{th}\right) \\
 &= \Pr\left(U > \frac{\gamma_1^{th} [(1-\rho)\gamma_0\mu_2 V_{\max} + 1]}{\rho\gamma_0\mu_1}, V_{\max} > \frac{\gamma_2^{th}}{(1-\rho)\gamma_0\mu_2}\right) \\
 &= \int_{c_1}^{\infty} [1 - F_U(a_1 v + b_1)] f_{V_{\max}}(v) dv \\
 &= \frac{m^N e^{-\frac{m_1 b_1}{\lambda_1}}}{2\beta^{2m_s N} \Gamma(2m_s N)} \sum_{k=0}^{m_1-1} \frac{m_1^k}{k! \lambda_1^k} \int_{c_1}^{\infty} (a_1 v + b_1)^k v^{m_s N-1} e^{-\frac{m_1 a_1 v}{\lambda_1} - \frac{2\sqrt{m_s m_1} v}{\beta}} dv \\
 &\stackrel{(1)}{=} \frac{m^N e^{-\frac{m_1 b}{\lambda_1}}}{2\beta^{2m_s N} \Gamma(2m_s N)} \sum_{k=0}^{m_1-1} \frac{m_1^k}{k! \lambda_1^k} \int_0^{\infty} \frac{[a_1(-\ln t) + b_1]^k (-\ln t)^{m_s N-1} e^{-\frac{m_1 a_1 (-\ln t)}{\lambda_1} - \frac{2\sqrt{m_s m_1} (-\ln t)}{\beta}}}{t} dt \\
 &\stackrel{(2)}{=} \frac{\pi m^N e^{-\frac{m_1 b_1}{\lambda_1}}}{2Q_1 \beta^{2m_s N} \Gamma(2m_s N)} \sum_{k=0}^{m_1-1} \frac{m_1^k}{k! \lambda_1^k} \sum_{q=1}^{Q_1} (a_1 v_q + b_1)^k v_q^{m_s N-1} e^{-\frac{m_1 a_1 v_q}{\lambda_1} - \frac{2\sqrt{m_s m_1} v_q}{\beta}} \sqrt{\frac{1-\varphi_q}{1+\varphi_q}}.
 \end{aligned} \tag{A-1}$$

5. Kết luận

Trong bài báo này, chúng tôi đã đề xuất một mô hình mạng điện toán biên di động sử dụng phương thức đa truy cập NOMA được hỗ trợ bởi một bề mặt phản xạ thông minh. Từ mô hình này, chúng tôi đã xây dựng được biểu thức xác suất tính toán thành công và xác suất tiêu thụ năng lượng nhằm khảo sát hiệu năng của hệ thống. Cuối cùng, từ công thức xây dựng được, chúng tôi đã trình bày kết quả số của việc khảo sát ảnh hưởng của những tham số chính lên hiệu năng của hệ thống. Từ những kết quả thu được, chúng tôi kết luận rằng hiệu năng của hệ thống đề xuất có thể được cải thiện bằng cách tăng số lượng phần tử phản xạ hỗ trợ cho người dùng. Nói cách khác, việc áp dụng bề mặt phản xạ thông minh sẽ giúp nâng cao hiệu năng của một mạng điện toán biên di động.

$$\text{Trong đó, } a_1 = \frac{\gamma_1^{th}(1-\rho)\mu_2}{\rho\mu_1}, \quad b_1 = \frac{\gamma_1^{th}}{\rho\gamma_0\mu_1}, \quad c_1 = \frac{\gamma_2^{th}}{(1-\rho)\gamma_0\mu_2}, \quad v_q = -\ln\left[\frac{(\varphi_q+1)e^{-c_1}}{2}\right], \quad \varphi_q = \cos\left(\frac{2q-1}{2Q_1}\pi\right).$$

Lưu ý, Bước (1) có được bằng cách đặt $t = e^{-v}$; Bước (2) có được bằng cách áp dụng lại phương pháp trực giao Gaussian-Chebyshev với Q_1 là hệ số cân bằng giữa độ phức tạp và độ chính xác.

Bổ đề 1 đã được chứng minh.

PHỤ LỤC B: Chứng minh Bổ đề 2.

$$\begin{aligned} \Psi &= \Pr(\max\{E_1, E_2\} < E_{th}) \\ &= \Pr(\max\{\rho P_0 t_{s_1}, (1-\rho)P_0 t_{s_2}\} < E_{th}) \\ &= \Pr\left(\frac{\rho\gamma_0\mu_1 U}{(1-\rho)\gamma_0\mu_2 V_{\max} + 1} > \omega_1^{th}, (1-\rho)\gamma_0\mu_2 V_{\max} > \omega_2^{th}\right). \end{aligned} \quad (\text{B-1})$$

Các bước còn lại được tính tương tự như Phụ lục A để được kết quả cuối cùng. Bổ đề 2 đã được chứng minh.

Tài liệu tham khảo

- [1] Y. Mao, C. You, J. Zhang, K. Huang, K. B. Letaief. (2017), *A survey on mobile edge computing: The communication perspective*. IEEE Communications Survey Tutorials, vol. 19, no. 4, pp. 2322–2358.
- [2] F. Zhou, Y. Wu, R. Q. Hu, Y. Qian. (2018), *Computation rate maximization in UAV-enabled wireless powered mobile-edge computing systems*. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 36, no. 9, pp. 1927–1941.
- [3] H. Sun, F. Zhou, R. Q. Hu. (2019), *Joint offloading and computation energy efficiency maximization in a mobile edge computing system*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 68, no. 3, pp. 3052–3056.
- [4] Y. Zhang, X. Lan, Y. Li, L. Cai, J. Pan. (2019), *Efficient computation resource management in mobile edge-cloud computing*. IEEE Internet of Things Journal, vol. 6, no. 2, pp. 3455–3466.
- [5] D. H. Ha, D.-B. Ha, V.-T. Truong, V.-D. Phan, Q. S. Vu. (2021), *Performance enhancement of wireless sensor network by using non-orthogonal multiple access and sensor node selection schemes*. Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, vol. 21, no. 2, pp. 886–894, Feb.
- [6] F. Zhou, Y. Wu, R. Q. Hu, Y. Qian. (2019), *Computation efficiency in a wireless-powered mobile edge computing network with NOMA*. IEEE International Conference on Communications (ICC).
- [7] Y. Ye, G. Lu, R. Q. Hu, L. Shi. (2019), *On the performance and optimization for MEC networks using uplink NOMA*. IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops).
- [8] D.-B. Ha, V.-T. Truong, Y. Lee. (2021), *Performance analysis for RF energy harvesting mobile edge computing networks with SIMO/MISONOMA schemes*. EAI Endorsed Transactions on Industrial Networks and Intelligent Systems, vol. 8, no. 27, pp. 1–14.
- [9] V.-T. Truong, D.-B. Ha, V. N. Vo, C. So-In. (2022), *On the system performance of mobile edge computing in an uplink NOMA WSN with a multi-antenna access point over Nakagami-m fading*. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, vol. 9, no. 4, pp. 253–264.
- [10] R. Alghamdi. (2020), *Intelligent surfaces for 6G wireless networks: A survey of optimization and performance analysis techniques*. IEEE Access, vol. 8, pp. 202 795–202 818.
- [11] Z. Chen, X. Ma, C. Han, Q. Wen. (2021), *Towards intelligent reflecting surface empowered 6G terahertz communications: A survey*. China Communications, vol. 18, no. 5, pp. 93–119.
- [12] T. Bai, C. Pan, Y. Deng, M. Elkashlan, A. Nallanathan, L. Hanzo. (2020), *Latency minimization for intelligent reflecting surface aided mobile edge computing*. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 38, pp. 2666–2682.
- [13] Z. Chu, P. Xiao, M. Shojafar, D. Mi, J. Mao, W. Hao. (2021), *Intelligent reflecting surface assisted mobile edge computing for internet of things*. IEEE Wireless Communications Letters, vol. 10, no. 3, pp. 619–623.
- [14] Zhou F., You C., Zhang R. (2021), *Delay-Optimal Scheduling for IRS-Aided Mobile Edge Computing*. IEEE Wireless Communications Letters, Volume: 10, Issue: 4, 740-744.
- [15] Wang Q., Zhou F., Hu H., Hu R.Q. (2021), *Energy-efficient design for IRS-assisted MEC networks with NOMA*. 13th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP).
- [16] Li X., Xie Z., Chu Z., Menon V.G., Mumtaz S., Zhang J. (2022), *Exploiting benefits of IRS in wireless powered NOMA networks*. IEEE Trans. on Green Communication and Networks, 6(1): 175-186.
- [17] Y. Cheng, K. H. Li, Y. Liu, K. C. Teh, H. Vincent Poor. (2021), *Downlink and uplink intelligent reflecting surface aided networks: NOMA and OMA*. IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 20, no. 6.