

# TỐI ƯU HIỆU SUẤT NĂNG LƯỢNG CỦA HỆ THỐNG MASSIVE MIMO KẾT HỢP ĐIỆN TOÁN BIÊN DI ĐỘNG

## ENERGY EFFICIENCY OPTIMIZATION FOR MOBILE EDGE COMPUTING-AIDED MASSIVE MIMO NETWORKS

Nguyễn Lê Hùng<sup>1</sup>, Lê Thị Phương Mai<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Trường Đại học Sư Phạm Kỹ thuật – Đại học Đà Nẵng, Việt Nam

<sup>2</sup>Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng, Việt Nam

\*Tác giả liên hệ / Corresponding author: lpm@dut.udn.vn

(Nhận bài / Received: 15/3/2024; Sửa bài / Revised: 18/5/2024; Chấp nhận đăng / Accepted: 22/5/2024)

**Tóm tắt** - Việc tối ưu hóa năng lượng tiêu thụ được xem là một trong những mục tiêu hàng đầu cho mạng truyền thông xanh. Bài báo này tập trung vào việc tối thiểu hóa năng lượng tiêu thụ cho một mạng massive MIMO (Multiple Input Multiple Output) được hỗ trợ bởi công nghệ điện toán biên di động MEC (Mobile Edge Computing). Trong mô hình mạng này, nhóm tác giả nghiên cứu vấn đề tối thiểu năng lượng tiêu thụ với ràng buộc về công suất của các thiết bị người dùng và ràng buộc tỷ lệ giữa quá trình tải dữ liệu (offloading) và tính toán cục bộ. Để giải được bài toán đặt ra, nhóm tác giả biến đổi vấn đề ban đầu về dạng khả giải dựa trên thuật toán bất đẳng thức ma trận tuyến tính LMI (Linear Matrix Inequality Programming). Trong phần kết quả tính toán số, nhóm tác giả sử dụng công cụ mô phỏng trong MatLAB để kiểm chứng tính hiệu quả của giải thuật đề xuất và đưa các thảo luận về các tham số hệ thống để đạt được mức năng lượng tiêu thụ tối ưu.

**Từ khóa** – Massive MIMO; điện toán biên di động (MEC); hiệu suất năng lượng; LMI; truyền thông xanh.

### 1. Giới thiệu chung

Trong những năm gần đây, sự phát triển của các ứng dụng và dịch vụ mới đã dẫn đến nhu cầu chưa từng có về mạng không dây; điều này thúc đẩy cho sự phát triển của mạng không dây thế hệ thứ sáu (6G) [1, 2].

Trong số các công nghệ tiềm năng cho 6G, massive Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) đã thu hút sự chú ý đáng kể từ cộng đồng nghiên cứu nhờ khả năng cải thiện hiệu suất phổ và năng lượng [3]. Bằng cách sử dụng một số lượng lớn ăng-ten tại trạm thu phát gốc, massive MIMO cho phép cung cấp dữ liệu dịch vụ đồng thời cho một số lượng người dùng rất lớn, dẫn đến tốc độ truyền và hiệu suất hệ thống của mạng cải thiện gấp nhiều lần [4]. Việc tích hợp massive MIMO với các công nghệ mới nổi khác cũng đã được chứng minh là rất có lợi [1].

Ngoài massive MIMO, kỹ thuật điện toán biên di động (MEC) được đề xuất như một giải pháp lý tưởng cho các ứng dụng yêu cầu độ trễ thấp và khả năng tính toán cao [5]. Cụ thể, trong các hệ thống MEC, người dùng chuyển giao các tác vụ tính toán tải phức tạp cho các máy chủ MEC (có khả năng xử lý tính toán mạnh mẽ và được đặt gần người dùng để thực thi) [6]. Điều này giúp MEC giảm đáng kể độ trễ tính toán và giảm tải lưu lượng trên mạng backhaul.

**Abstract** – The optimization of energy consumption is widely recognized as one of the foremost objectives for green communications. This study delves into the task of minimizing energy consumption within a Mobile Edge Computing (MEC)-aided massive MIMO (Multiple Input Multiple Output) network. In this network model, the authors investigate the problem of minimizing energy consumption with constraints on the power of user equipments (UEs) and the ratio between data offloading and local computation. To address the formulated problem, the authors transform it into a solvable form using Linear Matrix Inequality Programming (LMI) algorithm. In the numerical results section, the authors utilize MATLAB simulation tools to validate the effectiveness of the proposed algorithm and provide discussions on system parameter settings to achieve the optimal energy.

**Key words** - Massive MIMO; Mobile Edge Computing (MEC); energy efficiency; Linear Matrix Inequality Programming; green communications.

Ngoài ra, sự thành công của một hệ thống ứng dụng kỹ thuật MEC cũng phụ thuộc vào khả năng đạt được tốc độ truyền dữ liệu cao hay không. Với ưu điểm cải thiện đáng kể hiệu suất phổ và hiệu suất năng lượng, việc tích hợp massive MIMO với các hệ thống sử dụng MEC có thể tận dụng ưu điểm của cả hai công nghệ này, mang lại tiềm năng lớn cho các ứng dụng đang phát triển mạnh mẽ như thực tế mở rộng, lái xe tự động và hệ thống vận tải thông minh [6]. Ngoài ra, việc kết hợp massive MIMO với MEC có thể cung cấp tốc độ truyền dữ liệu cao hơn và hỗ trợ một số lượng người dùng lớn hơn khi giảm tải (offloading) và giảm độ trễ truyền dữ liệu không dây, đặc biệt là trong đường lên (uplink - UL) [7].

Các nghiên cứu gần đây về hệ thống tích hợp MEC-massive MIMO (MEC-mMIMO) tập trung hai hướng nghiên cứu chính: tối ưu độ trễ tối đa và tối ưu hiệu suất năng lượng hệ thống. Về hướng nghiên cứu tối thiểu hóa độ trễ của hệ thống MEC-mMIMO, các tác giả trong [8] đã giải quyết bài toán giảm độ trễ offloading cho hệ thống MEC-MIMO đơn cell đa người dùng. Để giải quyết bài toán đề xuất, công trình [8] đưa ra các ràng buộc về công suất phát và tài nguyên tính toán. Cũng hướng tới mục tiêu giảm độ trễ thời gian offloading, nghiên cứu [9] đề xuất giải thuật phân bổ tài nguyên tính toán và công

<sup>1</sup> The University of Danang - University of Technology and Education, Vietnam (Nguyen Le Hung)

<sup>2</sup> The University of Danang - University of Science and Technology, Vietnam (Le Thi Phuong Mai)

suất điều khiển đồng thời cho truyền dẫn tín hiệu pilot và dữ liệu.

Về hướng tối ưu hiệu suất năng lượng của hệ thống sử dụng MEC, các tác giả trong [10] tập trung vào việc tối ưu hướng beamforming và phân bố tài nguyên năng lượng cho hệ thống MEC với các điểm truy cập đa ăng-ten. Bài toán tối ưu tổng năng lượng tiêu thụ cho hệ thống MEC nhiều người dùng cũng được nghiên cứu trong công trình [11] dưới ràng buộc độ trễ tối thiểu của đường lên (uplink) và đường xuống (downlink) vẫn được đảm bảo.

Trong khi các nghiên cứu tối ưu năng lượng của hệ thống massive MIMO sử dụng MEC vẫn còn khá hạn chế, nhóm tác giả đề xuất bài toán tối đa hiệu suất năng lượng cho hệ thống MEC-mMIMO thông qua việc tối ưu phân bố công suất và tỉ lệ offloading của quá trình offload tại các máy chủ MEC. Tương ứng, bài toán đề xuất ở trên thuộc dạng MINC (Mixed-Integer Non-Convex) không liên tục và được coi là dạng bài toán rất khó giải quyết do sự kết hợp của các ràng buộc không lồi và biến nguyên. Để xử lý dạng bài toán tối ưu này, nhóm tác giả đề xuất một thuật toán dựa trên lập trình bất đẳng thức ma trận tuyến tính LMI (Linear Matrix Inequality Programming), được trình bày chi tiết như trong Phần 3 của bài báo này.

*Chú thích:* Trong bài báo này, vector cột và ma trận được ký hiệu bằng chữ cái viết đậm chữ thường và chữ cái viết đậm in hoa. Các ký hiệu  $E[\cdot]$ ,  $|\cdot|$ ,  $\text{Var}(\cdot)$ , và  $\|\cdot\|$  ký hiệu lần lượt cho các toán tử kỳ vọng, giá trị tuyệt đối, phương sai và chuẩn Euclid.  $\mathbf{x}^H$  và  $\mathbf{A}^H$  là ký hiệu cho toán tử Hermitian của vector  $\mathbf{x}$  và ma trận  $\mathbf{A}$ . Nhóm tác giả ký hiệu  $x \sim \mathcal{CN}(0,1)$  cho biểu diễn của biến  $x$  tuân theo phân phối Gaussian phức đối xứng với trung bình bằng không và phương sai bằng một.

## 2. Mô hình hệ thống

Bài báo này nghiên cứu việc tối ưu năng lượng cho một hệ thống đa người dùng MEC-mMIMO, trong đó trạm phát BS (base station) được trang bị  $M$  ăng-ten massive MIMO nhằm phục vụ cho  $K$  thiết bị người dùng UE (user equipment). Trong bài báo này, nhóm tác giả xem xét trường hợp các UEs sử dụng đơn ăng-ten với mật độ UEs cao. Để hỗ trợ khả năng tính toán cho kịch bản hệ thống đề xuất, một máy chủ (server) MEC được đặt tại trạm phát BS nhằm nhận dữ liệu (offloading) từ các thiết bị UEs. Ngoài ra, việc truyền dữ liệu giữa BS và UEs được thực hiện qua  $N$  sóng mang con (sub-carriers) và quá trình offloading được thực hiện ở đường lên UL (uplink).

Ký hiệu  $\mathbf{h}_{n,k} = \beta_k \bar{\mathbf{h}}_{n,k}$  là vector kênh truyền từ UE  $k$  ( $k \in \mathcal{K} \triangleq \mathbf{1}, \mathbf{2}, \dots, \mathbf{K}$ ) đến trạm phát BS, trong đó  $\beta_k$  biểu thị cho fading quy mô lớn (gây ra bởi hiện tượng shadowing và mất mát đường truyền) và  $\bar{\mathbf{h}}_{n,k} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$  là vector biểu thị cho hiện tượng fading quy mô nhỏ, có thể mô tả bởi một vector ngẫu nhiên, với mỗi phần tử của vector là biến ngẫu nhiên có phân phối chuẩn với trung bình 0 và phương sai đơn vị, ký hiệu bởi  $\mathcal{CN}(0,1)$ .

Giả sử tại trạm phát sử dụng một bộ thu tuyến tính, ký hiệu bởi  $\mathbf{A}_n \in \mathbb{C}^{M \times K}$ , tín hiệu được xử lý từ  $K$  UEs được biểu diễn như sau:

$$\mathbf{y}_n = \mathbf{A}_n^H \mathbf{H}_n \mathbf{P}_n \mathbf{x}_n + \mathbf{A}_n^H \mathbf{z}_n, \quad (1)$$

Trong đó, kênh truyền của  $K$  Ues với BS trên sóng mang con thứ  $n$ ,  $\forall n \in \mathcal{N}$  được biểu diễn bởi ma trận kênh truyền  $\mathbf{H}_n \triangleq [\mathbf{h}_{n,1} \ \mathbf{h}_{n,2} \ \dots \ \mathbf{h}_{n,K}] \in \mathbb{C}^{M \times K}$ . Trong (1), nhiễu trắng cộng (AWGN) được ký hiệu bởi  $\mathbf{z} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$  với mỗi thành phần của vector  $\mathbf{z}$  có phân phối chuẩn phức  $\mathcal{CN}(0, \sigma_{BS}^2)$ , trong đó  $\sigma_{BS}^2$  ký hiệu cho công suất nhiễu của mỗi thành phần ở trên. Tín hiệu phát đi được ký hiệu  $\mathbf{x}_n \in \mathbb{C}^{K \times 1}$ , trong đó mỗi thành phần  $\mathbf{x}_{n,k}$ ,  $\forall k \in \mathcal{K}$  có kỳ vọng công suất được xác định với  $E[|\mathbf{x}_{n,k}|^2] = 1$ , và ma trận phân bố công suất cho các Ues ký hiệu bởi  $\mathbf{P}_n \triangleq \text{diag}([\sqrt{p_{n,1}} \ \sqrt{p_{n,2}} \ \dots \ \sqrt{p_{n,K}}])$ , với  $p_{n,k}$  là hệ số công suất phân bố cho UE  $k$  trên sóng mang con thứ  $n$ .

Trong công thức (1), cột  $\mathbf{a}_k$  thứ  $k$  của ma trận tách sóng tuyến tính  $\mathbf{A}_n \in \mathbb{C}^{M \times K}$  được chuẩn hóa như sau  $\|\mathbf{a}_{n,k}^H \mathbf{a}_{n,k}\|^2 = 1$ . Từ đây, tỉ số tín hiệu trên nhiễu SINR (signal-to-interference-plus-noise) để giải mã tín hiệu UE  $k$  được tính như sau:

$$\gamma_{n,k} = \frac{p_{n,k} \bar{p}_k |\mathbf{a}_{n,k}^H \mathbf{h}_{n,k}|^2}{\sum_{k'=1, k' \neq k}^K p_{k',n} \bar{p}_{k'} |\mathbf{a}_{n,k}^H \mathbf{h}_{n,k'}|^2 + 1}, \quad (2)$$

với công suất chuẩn hóa được xác định bởi  $\bar{p}_k \triangleq P_k^{\max} / \sigma_{BS}^2$ , trong đó  $P_k^{\max}$  là công suất tối đa của UE  $k$ .

Từ đây, nhóm tác giả xác định được tốc độ dữ liệu khả thi cho việc offloading của UE  $k$  trên  $n$  sóng mang con như sau:

$$R_k(\mathbf{p}) = \sum_n B \log_2(1 + \gamma_{n,k}), \quad [\text{bits/s}] \quad (3)$$

Trong đó, vector phân bố công suất được định nghĩa như sau  $\mathbf{p} \triangleq [\mathbf{p}_1 \ \mathbf{p}_2 \ \dots \ \mathbf{p}_N]^T$ , và  $B$  là băng thông hệ thống.

## 3. Đề xuất bài toán tối thiểu năng lượng cho hệ thống đề xuất

### 3.1. Mô hình tiêu thụ năng lượng

Để giảm tải tính toán ở UE  $k$ , quá trình truyền tín hiệu được phân chia thành hai giai đoạn gồm offloading và tính toán cục bộ. Tương ứng, thời gian xử lý cho các thành phần này được biểu diễn lần lượt bởi  $\tau_k^{\text{off}}$  và  $\tau_k^{\text{loc}}$ :

$$\tau_k^{\text{off}} = \frac{\rho_k Z_k}{R_k(\mathbf{p})} + \frac{\rho_k Z_k C_k}{f^{\text{SER}}}, \quad (4)$$

$$\tau_k^{\text{loc}} = \frac{(1-\rho_k) Z_k C_k}{f_k} \quad (5)$$

Trong đó,  $f^{\text{SER}}$  là tần số tính toán tại máy chủ MEC,  $f_k$  là tần số tính toán tại UE  $k$ . Ngoài ra, nhóm tác giả ký hiệu  $\rho_k$  cho tỷ lệ và  $Z_k$  cho kích thước (dưới dạng bit) của nhiệm vụ offloading được yêu cầu bởi UE  $k$ . Trong khi đó,  $C_k$  là số chu kỳ CPU cần thiết để thực thi một bit trong nhiệm vụ gồm  $Z_k$  bit.

Từ (5), ta có thể tính toán được năng lượng tiêu thụ cho quá trình tính toán cục bộ như sau:

$$E_k^{\text{loc}} = (1 - \rho_k) Z_k C_k f_k^2 \quad (6)$$

Khác với quá trình tính toán cục bộ, độ trễ của quá trình offloading bao gồm thời gian truyền dẫn tín hiệu và thời gian tính toán offloading. Vì độ trễ trong quá trình truyền dữ liệu phần lớn phụ thuộc vào điều kiện môi trường và điều kiện thiết bị, tức là chất lượng của kênh truyền và quá

trình điều chế, vốn là những yếu tố khó có thể xác định trong các nguồn tài nguyên kênh riêng biệt. Để đánh giá năng lượng tiêu thụ của quá trình truyền dữ liệu, ta có thể ước tính bằng cách sử dụng công suất phát tổng và thời gian truyền. Tương ứng, năng lượng tiêu thụ cho việc thực thi offloading được khai triển từ (4) như sau:

$$E_k^{\text{off}} = \frac{\rho_k Z_k \|p_k\|}{R_k(p)} + \rho_k Z_k C_k (f^{SER})^2. \quad (7)$$

### 3.2. Thiết lập bài toán tối ưu

Trong bài báo này, vấn đề tối ưu năng lượng tiêu thụ của hệ thống có thể được xác định bằng cách tối thiểu hóa tổng năng lượng tiêu thụ cho quá trình offloading và xử lý cục bộ từ tất cả UE. Vấn đề này có thể được trình bày tường minh dưới dạng:

$$\text{minimize}_{p, \rho} \sum_{k=1}^K E_k^{\text{loc}} + E_k^{\text{off}} \quad (8a)$$

$$\text{s. t. } 0 \leq \sum_{n \in N} p_{kn} \leq 1, k \in \mathcal{K} \quad (8b)$$

$$\rho_k \in [0, 1], k \in \mathcal{K}, \quad (8c)$$

Trong vấn đề trên, ràng buộc (8b) đưa ra giới hạn về phân bổ công suất, trong đó tổng công suất chuẩn hóa của tất cả UE xét trên toàn bộ sóng mang con không âm và không vượt quá 1. Trong khi đó, điều kiện ràng buộc (8c) quy ước việc xử lý dữ liệu cho UE  $k$  được thực hiện thông qua tính toán cục bộ ( $\rho_k = 0$ ) hoặc offload dữ liệu ( $\rho_k = 1$ ).

### 3.3. Giải thuật đề xuất cho bài toán (8) dựa trên LMI

Để giải vấn đề tối ưu năng lượng trong (8), nhóm tác giả chuyển vấn đề này thành dạng khả giải với các ràng buộc được trình bày trong hệ LMI [12,13]. Gọi  $\mathbf{v} = [\text{vec}(\mathbf{p})^T \boldsymbol{\rho}^T]^T$ , vấn đề (8) có thể viết lại dưới dạng sau:

$$\text{minimize}_{\mathbf{v} \geq \mathbf{0}} \sum_{k=1}^K E_k^{\text{loc}} + E_k^{\text{off}}, \quad (9a)$$

$$\text{s. t. } \mathbf{X}\mathbf{v} \preceq \mathbf{y}, \quad (9b)$$

trong đó ma trận  $\mathbf{X}$  và vector  $\mathbf{y}$  xác định bởi:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{1}_{1 \times N} \otimes \mathbf{I}_K & \mathbf{0}_{K \times K} \\ \mathbf{0}_{K \times N \cdot K} & \mathbf{I}_K \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{1}_{2K \times 1} \quad (11)$$

Từ đây, bài toán (9) có thể được giải một cách hiệu quả bằng cách sử dụng các công cụ tối ưu, điển hình như công cụ *fmincon* trong lập trình MatLAB.

## 4. Kết quả mô phỏng và thảo luận

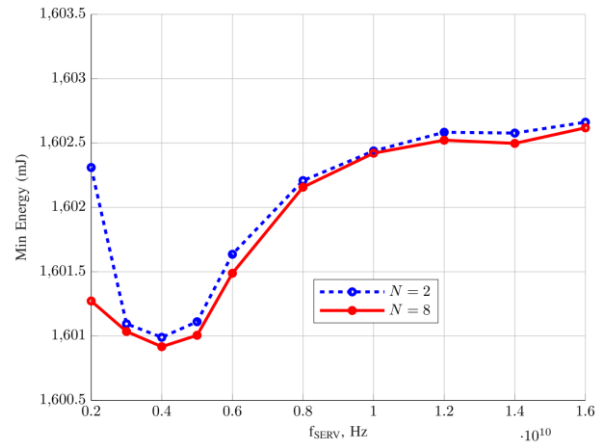
Để đánh giá hiệu quả của thuật toán đề xuất cho bài toán tối ưu năng lượng hệ thống, nhóm tác giả kiểm chứng thông qua mô phỏng MatLAB với năng lượng trung bình thu được từ 1000 kênh vô tuyến được tạo ngẫu nhiên.

Nhóm tác giả xây dựng hệ thống mô phỏng cho một mạng massive MIMO sử dụng  $M = 64$  ăng-ten, trong đó trạm phát được hỗ trợ bởi một máy chủ MEC có tần số máy chủ  $f_{SER}$  dao động từ 2 đến 16 GHz. Mỗi block tài nguyên chứa từ 2 đến 8 sóng mang con. Trạm phát BS được đặt ở trung tâm của một cell có bán kính  $r = 100\text{m}$  phục vụ cho  $K$  UE phân bố ngẫu nhiên trong cell. Tần số tính toán cục bộ của mỗi UE trong hệ thống xem xét là 1 GHz. Các tham số còn lại có thể tham khảo ở Bảng 1.

**Bảng 1.** Tham số mô phỏng

Tham số	Giá trị
Bán kính của cell	$r = 100 \text{ m}$
Băng thông hệ thống	20 MHz
Công suất nhiễu tại UE	-174 dBm/Hz
Số lượng UE	$K = 8$
Số lượng anten ở BS	$M = 64$
Số lượng sóng mang con	$N = [2:8]$
Tần số tính toán tại máy chủ MEC	$f_{SER} = [2:16] \text{ GHz}$
Tần số tính toán tại UE $k$	$f_k = 1 \text{ GHz}$

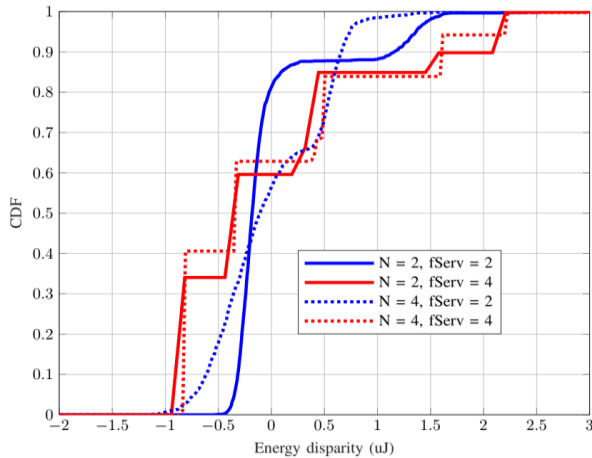
Hình 1 biểu diễn năng lượng tối ưu (tính bằng J) của hệ thống khi thay đổi tần số máy chủ với các mức sóng mang con khác nhau:  $N = 2$  và  $N = 8$ . Với cả hai mức sóng mang con khảo sát, kết quả mô phỏng cho thấy thuật toán đều đạt được mức năng lượng tối ưu tại  $f_{SER} = 4\text{GHz}$ , cho thấy tính ổn định và hiệu quả của thuật toán với các tham số mô phỏng khác nhau. Từ Hình 1, ta quan sát thấy rằng, với tần số nhỏ ( $f_{SER} < 4\text{GHz}$ ), hệ thống có mức tiêu thụ năng lượng tối thiểu với số sóng mang con lớn hơn ( $N = 8$ ) tốt hơn với số sóng mang con nhỏ ( $N = 2$ ). Điều này có thể lý giải từ vấn đề đặt ra trong (8), trong đó, với tần suất thấp thì thuật toán thiên về phân offloading khi tối ưu năng lượng, và số sóng mang con lớn hơn thì có thể giảm nhiễu tốt hơn, vì vậy truyền dẫn offloading hiệu quả hơn. Ngược lại, với tần số lớn, để giảm năng lượng tiêu thụ thì hệ thống ưu tiên phần tính toán cục bộ nên ảnh hưởng của  $N$  đến hiệu năng hệ thống là không đáng kể. Vì vậy, với  $f_{SER} > 4\text{GHz}$ , năng lượng tiêu thụ tối ưu cho hai trường hợp  $N = 2$  và  $N = 8$  là xấp xỉ nhau và cùng tăng dần khi  $f_{SER}$  tăng.



**Hình 1.** Năng lượng tối thiểu hệ thống (mJ) khi thay đổi tần số máy chủ  $f_{SER} \in [2 - 16]\text{MHz}$ .

Trong Hình 2, nhóm tác giả khảo sát mức sai khác về năng lượng (energy disparity), tính bằng uJ, trong các kênh ngẫu nhiên đã tạo thông qua hàm phân phối tích lũy CDF (cumulative density function). Mức sai khác năng lượng này được xác định bởi độ lệch của năng lượng tiêu thụ từng kênh so với mức năng lượng trung bình. Nhóm tác giả phân tích kết quả mô phỏng cho hai trường hợp  $f_{SER} = 2 \text{ GHz}$  (đường màu xanh) và  $f_{SER} = 4 \text{ GHz}$  (đường màu đỏ), mỗi trường hợp được khảo sát với hai mức sóng mang con:  $N = 2$  (đường nét liền) và  $N = 4$  (đường nét đứt). Từ Hình

2, có thể nhận thấy với mức bách phân vị 50%, giá trị CDF tại  $f_{SER} = 4$  GHz thấp hơn so với giá trị CDF tại  $f_{SER} = 2$  GHz, khẳng định sự đúng đắn của Hình 1. Hơn nữa với  $f_{SER} = 4$  GHz, năng lượng tiêu thụ tập trung nhiều ở phần tính toán cục bộ nên số sóng mang con không ảnh hưởng nhiều tới hiệu quả năng lượng hệ thống. Trong khi đó, với tần số máy chủ thấp hơn như  $f_{SER} = 2$  GHz, ảnh hưởng của N đối với CDF của sự sai khác mức năng lượng giữa các kênh là rõ rệt hơn. Ngoài ra, ở tần số tối ưu  $f_{SER} = 4$  GHz, hàm CDF của hai mức sóng mang con có dạng bậc thang. Điều này có thể lý giải là vì ở tần số tối ưu này, nhiều kênh truyền cùng đạt được mức năng lượng tối thiểu, dẫn đến mức sai khác với trung bình của nhiều kênh là bằng nhau và cùng bậc thang.



Hình 2. Hàm CDF của mức chênh lệch năng lượng giữa các kênh khảo sát (uJ)

Như vậy, các kết quả mô phỏng nhấn mạnh tính hiệu quả của thuật toán đề xuất trong việc tối ưu hiệu quả năng lượng hệ thống MEC-mMIMO. Để đạt được mức năng lượng tiêu thụ tối ưu, hệ thống hoặc ưu tiên tính toán cục bộ với tần số máy chủ cao, hoặc ưu tiên offloading với tần số máy chủ thấp. Ngoài ra, từ biểu thức (7), (8), khác với bài toán tối ưu hiệu suất phổ, tăng công suất UE cũng đồng thời tăng năng lượng tiêu thụ của hệ thống, nên kết quả của bài toán tối ưu không chỉ là việc cân bằng giữa tỉ lệ offloading và tỉ lệ tính toán cục bộ, mà còn là giữa công suất và tần số máy chủ.

## 5. Kết luận

Trong bài báo này, nhóm tác giả nghiên cứu bài toán tối thiểu hóa năng lượng tiêu thụ cho mạng MEC-mMIMO, trong đó xét đến điều kiện ràng buộc về công suất của các UEs và tỷ lệ offloading và tính toán cục bộ. Để giải quyết bài toán đề xuất, nhóm tác giả biến đổi vấn đề thiết lập về dạng khả giải dựa trên thuật toán bất đẳng thức ma trận tuyến tính. Hiệu quả của giải thuật cuối cùng được đánh giá dựa trên kết quả mô phỏng cho hệ thống đề xuất. Các kết quả mô phỏng số cho thấy, đối với các tham số cho trước,

giải thuật có thể đưa ra được tần số máy chủ tối ưu nhất cho việc tối thiểu hóa năng lượng tiêu thụ hệ thống. Ngoài ra, kết quả mô phỏng số cho thấy, với mỗi thiết lập của hệ thống, năng lượng tiêu thụ tối ưu là kết quả của sự kết hợp của việc cân bằng giữa tỉ lệ offloading và tỉ lệ tính toán cục bộ, đồng thời là sự kết hợp giữa công suất và tần số máy chủ.

**Lời cảm ơn:** Nghiên cứu này được hỗ trợ bởi Đề tài cấp Bộ Giáo Dục và Đào Tạo, mã số B2024.DNA.19.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] B. Ji *et al.*, "Several key technologies for 6G: Challenges and opportunities", *IEEE Wireless Commun. Stand. Mag.*, vol. 5, no. 2, pp. 44-51, Jun. 2021.
- [2] H. Nguyen-Kha, H.V. Nguyen, M. T. P. Le, and O.-S. Shin. "Joint UAV placement and IRS phase shift optimization in downlink networks", *IEEE Access*, vol. 10, pp. 111221-111231, 2022.
- [3] M. T. P. Le, L. Sanguinetti, E. Björnson, and M.-G. D. Benedetto, "Code-domain NOMA in massive MIMO: When is it needed?", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 70, no. 5, pp. 4709-4723, Apr. 2021.
- [4] M. T. P. Le, H. V. Nguyen, V. Nguyen-Duy-Nhat, and L. Sanguinetti, "QoE-Aware Power Allocation for Aerial-Relay Massive MIMO Networks", *IEEE Transactions on Network and Service Management*, vol. 21, no.1, pp. 477-489, 2024.
- [5] S. S. Yilmaz, B. Ozbek, and R. Mumtaz, "Delay Minimization for Massive MIMO Based Cooperative Mobile Edge Computing System With Secure Offloading", *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*, vol. 4, pp. 149-161, 2023.
- [6] G. Femenias and F. Riera-Palou, "Mobile Edge Computing Aided Cell-Free Massive MIMO Networks", *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 23, no. 2, pp. 1246-1261, 2024.
- [7] C. Zhao, Y. Cai, A. Liu, M. Zhao, and L. Hanzo, "Mobile Edge Computing Meets mmWave Communications: Joint Beamforming and Resource Allocation for System Delay Minimization", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 19, no. 4, pp. 2382-2396, 2020.
- [8] T. Huang, Y. Zhang, H. Wu, W. Jiang, C. Yao, M. Xu, and J. Feng, "Joint Pilot and Data Transmission Power Control and Computing Resource Allocation for the Massive MIMO Based MEC Network", in *2019 IEEE 19th International Conference on Communication Technology (ICCT)*, 2019, pp. 860-865.
- [9] W. Feng, J. Zheng, and W. Jiang, "Joint Pilot and Data Transmission Power Control and Computing Resource Allocation Algorithm for Massive MIMO-MEC Networks", *IEEE Access*, vol. 8, pp. 80 801-80 811, 2020.
- [10] H. Lim and T. Hwang, "Energy-Efficient Beamforming and Resource Allocation for Multi-Antenna MEC Systems", *IEEE Access*, vol. 10, pp. 18 008-18 022, 2022.
- [11] D. Gao, H. Cheng, Z. Han, and S. Yang, "Resource Optimization for the Multi-user MIMO Systems Assisted Edge Cloud Computing", in *2021 IEEE 6th International Conference on Signal and Image Processing (ICSIP)*, 2021, pp. 948-953.
- [12] W. -Y. Chiu, "Method of Reduction of Variables for Bilinear Matrix Inequality Problems in System and Control Designs", in *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, vol. 47, no. 7, pp. 1241-1256, July 2017
- [13] V. Nguyen-Duy-Nhat, M. T. P. Le, and H. Nguyen-Le, "On the optimization of weighted sum rate for MIMO broadcast channels", *University of Danang - Journal of Science and Technology*, vol. 20, no. 6.2, pp. 44-51, 2022.