

TỐI ƯU HIỆU SUẤT NĂNG LƯỢNG CHO HỆ THỐNG MASSIVE MIMO ĐƯỜNG XUỐNG

ENERGY EFFICIENCY OPTIMIZATION FOR DOWNLINK MASSIVE MIMO

Nguyễn Trung Hiếu^{1,2}, Lê Thị Phương Mai^{2*}, Nguyễn Văn Hiếu²

¹VNPT Đà Nẵng, Việt Nam

²Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng, Đà Nẵng, Việt Nam

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

(Nhận bài / Received: 15/3/2023; Sửa bài / Revised: 25/4/2023; Chấp nhận đăng / Accepted: 18/5/2023)

Tóm tắt - Massive MIMO (mMIMO) được xem là công nghệ cốt lõi cho mạng 5G và là thành phần chính cho các thế hệ mạng tiếp theo (6G trở đi). Việc sử dụng mMIMO mang lại nhiều lợi ích đáng kể như tăng tốc độ truyền dữ liệu, tăng độ tin cậy, giảm thời gian trễ, tăng hiệu suất phổ và hiệu suất năng lượng. Tuy nhiên, khi mMIMO sử dụng hàng trăm hoặc thậm chí hàng ngàn ăng-ten dẫn đến lãng phí năng lượng và gây ra khí thải nhà kính có hại cho môi trường. Bài báo này nghiên cứu việc phân bổ công suất nhằm tối ưu hóa hiệu suất năng lượng của hệ thống mMIMO đường xuống thông qua tối ưu lồi. Hiệu quả của giải thuật đề xuất trong nghiên cứu này sẽ được kiểm chứng thông qua mô phỏng Monte Carlo và kết quả số.

Từ khóa - Massive MIMO (mMIMO); tối ưu lồi; hiệu suất năng lượng; hiệu suất phổ; 6G

1. Giới thiệu chung

Massive MIMO (mMIMO) là công nghệ mạng di động, trong đó các trạm gốc BS (Base Station) được trang bị một số lượng rất lớn ăng-ten để phục vụ nhiều người dùng UE (User Equipment) bằng cách ghép kênh không gian [1]. Khi sử dụng vector kết hợp/ tiền xử lý MMSE (Minimum mean square error) tối ưu và kênh không gian có tương quan thấp, dung lượng tăng lên không giới hạn ở đường lên UL (Uplink) và đường xuống DL (Downlink) khi tăng số lượng ăng-ten [2].

Theo báo cáo của Qualcomm [3], tốc độ tăng trưởng hàng năm của mạng di động dự kiến tăng từ 41% đến 59%, và điều này dẫn đến sự tăng lượng dữ liệu gấp 1000 lần trong vòng 15-20 năm tới. Điều này đặt ra thách thức lớn cho công suất tiêu thụ PC (Power Consumption) do các mạng hiện tại chủ yếu được cấp nguồn cố định dựa trên lưu lượng đỉnh và hầu như không thay đổi so với lưu lượng thực tế của cell. Trong khi đó, số lượng UEs hoạt động trong một cell có thể thay đổi nhanh chóng do sự thay đổi trong hành vi người dùng và tính chất truyền loạt của truyền dữ liệu theo gói. Các đo lường được báo cáo trong [4] cho thấy tải mạng tối đa hàng ngày cao gấp từ 2 đến 10 lần so với tải tối thiểu hàng ngày. Do đó, năng lượng bị lãng phí rất nhiều tại các BS vào giờ không cao điểm hoặc hoàn toàn bị lãng phí khi không có UE nào hoạt động trong khu vực phủ sóng của một BS (thường xảy ra ở các khu vực nông thôn) [5].

Công nghệ mMIMO hướng đến việc phát triển vùng phủ của các trạm BS bằng cách sử dụng các mảng với hàng trăm hoặc hơn các ăng-ten, mỗi ăng-ten phát với công suất tương

Abstract - Massive MIMO (mMIMO) is regarded as a core technology for 5G networks and a key component for the next generation of networks (6G and beyond). The use of mMIMO can provide significant benefits such as increasing data transmission rates, increasing reliability, reducing delay time, increasing spectrum efficiency and energy efficiency. However, a mMIMO system typically uses hundreds or even thousands of antennas to transmit and receive data, which may lead to a huge waste of energy and cause greenhouse gas emissions that are harmful to the environment. This paper investigates the power allocation optimization problem to maximize the energy efficiency of the proposed downlink mMIMO system by adopting convex optimization tool. The effectiveness of the proposed algorithm is then verified via numerical results and implemented through Monte Carlo simulation.

Key words - Massive MIMO (mMIMO); convex optimization; energy efficiency; spectral efficiency; 6G

đôi thấp. Điều này cho phép truyền đồng thời cho nhiều người dùng UEs, với hàng chục người dùng được ghép kênh (multiplexing) ở cả đường lên (UL) và đường xuống (DL) của mỗi cell, từ đó tăng đáng kể thông lượng của hệ thống thông qua hệ số ghép kênh [2]. Tuy nhiên, độ lợi thông lượng kênh truyền mang lại từ mMIMO lại đến phần nhiều từ việc triển khai nhiều phần cứng hơn (tức là sử dụng nhiều chuỗi cao tần RF (Radio Frequency) tại mỗi trạm BS) và tăng độ phức tạp của việc xử lý tín hiệu số (tức là sử dụng bộ kết hợp/ tiền mã hóa). Lưu ý rằng, trong hệ thống massive MIMO, mỗi ăng-ten thường gắn với một chuỗi RF [2]. Điều này đồng thời lại làm tăng công suất mạch CP (Circuit Power) của trạm BS [2]. Do đó, để tối ưu hóa hiệu suất năng lượng của mạng, cần cân bằng các yếu tố này một cách đúng đắn.

Với tầm quan trọng của việc tối ưu hóa hiệu suất năng lượng cho hệ thống mMIMO, đã có khá nhiều công trình liên quan đến hướng nghiên cứu này, một số công trình gần đây có thể kể đến như [6, 7]. Cụ thể, công trình [6] nghiên cứu việc thiết kế bộ tiền mã hóa và kết hợp chéo khối nhằm tăng hiệu suất năng lượng cho hệ thống mMIMO ở tần số mmWave. Trong khi đó, các tác giả trong [7] lại tập trung tối ưu hóa hiệu suất năng lượng cho hệ thống mMIMO đơn cell với giả sử là phía BS chỉ có thông tin thông kê về kênh truyền.

Trong bài báo này, nhóm tác giả sẽ phát triển giải thuật tối ưu hiệu suất năng lượng của hệ thống mMIMO đa cell đường xuống dựa trên lý thuyết phân tích hiệu suất năng lượng phát triển trong tham khảo [2], từ đó dẫn ra bài toán tối ưu hiệu suất năng lượng và đưa ra giải thuật giải quyết

¹ Da Nang VNPT, Vietnam (Nguyen Trung Hieu)

² The University of Danang - University of Science and Technology, Danang, Vietnam (Nguyen Trung Hieu, Le Thi Phuong Mai, Nguyen Van Hieu)

bài toán tối ưu này thông qua thiết kế mức phân bổ công suất đến các UEs. Theo tìm hiểu của nhóm tác giả, giải thuật đề xuất nhằm giải quyết bài toán tối ưu hóa hiệu suất phổ cho mô hình hệ thống mMIMO trong bài báo này chưa được nghiên cứu ở các công trình nào trước đó. Và đó là lý do để nhóm tác giả thực hiện nghiên cứu này.

2. Mô hình hệ thống mMIMO đường xuống

Trước tiên, nhóm tác giả xem xét mô hình mạng mMIMO đa cell đường xuống với L cell, mỗi cell bao gồm một BS được trang bị M ăng-ten và phục vụ đồng thời cho K UEs [2].

2.1. Mô hình kênh truyền

Trong bài báo này, nhóm tác giả sử dụng mô hình kênh truyền Rayleigh – mô hình kênh thường gặp trong thực tế [2], ký hiệu là $\mathbf{h}_{li}^j \in \mathbb{C}^M$ là kênh truyền giữa UE i trong cell l và BS j và giả sử rằng trạm phát BS chỉ biết thông tin thống kê CSI (Channel state information) của kênh truyền này.

$$\mathbf{h}_{li}^j \sim \mathcal{N}_{\mathbb{C}}(\mathbf{0}_M, \mathbf{R}_{li}^j), \quad (1)$$

Trong đó:

- \mathbf{h}_{li}^j là đáp ứng kênh truyền giữa trạm gốc BS thứ j và người dùng UE thứ i trong cell thứ l .

- $\mathcal{N}_{\mathbb{C}}(\mathbf{0}_M, \mathbf{R}_{li}^j)$ là phân phối Gaussian phức với ma trận trung bình $\mathbf{0}_M$ và ma trận tương quan không gian $\mathbf{R}_{li}^j \in \mathbb{C}^{M \times M}$ đã biết tại BS.

- Vết chuẩn hóa (normalized trace) $\beta_{li}^j = 1/M \text{tr}(\mathbf{R}_{li}^j)$ dùng để tính độ lợi kênh trung bình từ 01 ăng-ten tại BS j đến UE i trong cell l và được mô hình là:

$$\beta_{li}^j = Y - 10\alpha \log_{10} \left(\frac{d_{li}^j}{1 \text{ km}} \right), \quad \text{dB} \quad (2)$$

Trong đó, $Y = -148 \text{ dB}$ là độ lợi kênh trung bình ở khoảng cách tham chiếu 1km và $\alpha = 3,76$ là hệ số tổn hao đường truyền; d_{li}^j là khoảng cách của UE i trong cell l từ BS j , tính bởi công thức $d_{li}^j = \|\mathbf{x}_{li}^j\|$ với $\mathbf{x}_{li}^j \in \mathbb{R}^2$ là vị trí người dùng UE trong không gian Euclidian.

2.2. Ước lượng kênh truyền

Để ước lượng các vector kênh tại BS j , ta sử dụng phương pháp huấn luyện kênh truyền dựa trên tín hiệu điều khiển (gọi là tín hiệu pilot). Giả sử rằng BS và UEs được đồng bộ hoàn toàn và hoạt động theo giao thức TDD (Time Division Duplex), trong đó giai đoạn truyền dẫn dữ liệu DL được tiến hành sau một giai đoạn huấn luyện ước lượng kênh UL. Mỗi cell có K tín hiệu điều khiển pilot, với hệ số tái sử dụng pilot là 1. Người dùng UE i trong mỗi cell sử dụng cùng một tín hiệu điều khiển pilot. Mỗi UE sử dụng tổng công suất pilot UL ρ^{tr} và kỹ thuật ước lượng MMSE tiêu chuẩn [2], BS j đạt được ước lượng của \mathbf{h}_{li}^j như sau:

$$\hat{\mathbf{h}}_{li}^j = \mathbf{R}_{li}^j \mathbf{Q}_{li}^{-1} \left(\sum_{l'=1}^L \mathbf{h}_{l'i}^j + \frac{1}{\tau_p} \frac{\sigma^2}{\rho} \mathbf{n}_{li} \right) \sim \mathcal{N}_{\mathbb{C}}(\mathbf{0}, \Phi_{li}^j) \quad (3)$$

Trong đó, $\mathbf{n}_{li} \sim \mathcal{N}_{\mathbb{C}}(\mathbf{0}, \mathbf{I}_M)$ là nhiễu;

$$\mathbf{Q}_{li} = \sum_{l'=1}^L \mathbf{R}_{l'i}^j + \frac{1}{\rho^{\text{tr}}} \mathbf{I}_M \text{ và } \Phi_{li}^j = \mathbf{R}_{li}^j \mathbf{Q}_{li}^{-1} \mathbf{R}_{li}^j.$$

Lỗi ước lượng $\tilde{\mathbf{h}}_{li}^j = \mathbf{h}_{li}^j - \hat{\mathbf{h}}_{li}^j$, $\tilde{\mathbf{h}}_{li}^j \sim \mathcal{N}_{\mathbb{C}}(\mathbf{0}, \mathbf{R}_{li}^j - \Phi_{li}^j)$, theo tính chất của kỹ thuật ước lượng MMSE [2], độc lập với $\hat{\mathbf{h}}_{li}^j$.

2.3. Vector tiền mã hóa và vector kết hợp thu

Sau khi có ước tính kênh $\hat{\mathbf{h}}_{li}^j$, BS j chọn vector kết hợp $\mathbf{v}_{jk} \in \mathbb{C}^M$ cho UE thứ k và tương quan với tín hiệu thu được để tìm tín hiệu UL phát đi bởi UE k trong cell j . Trong bài báo này nhóm tác giả giả định \mathbf{v}_{jk} được thiết kế theo 02 kỹ thuật phổ biến MR (Maximal-ratio) và M-MMSE (Multi-cell minimum mean square error) [2] với:

- MR combining:

$$\mathbf{v}_{jk}^{\text{MR}} = \hat{\mathbf{h}}_{jk}^j \quad (4)$$

- M-MMSE combining:

$$\mathbf{v}_{jk}^{\text{M-MMSE}} = \left(\sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^K \hat{\mathbf{h}}_{li}^j (\hat{\mathbf{h}}_{li}^j)^H + \mathbf{Z}_j \right)^{-1} \hat{\mathbf{h}}_{jk}^j \quad (5)$$

với: $\mathbf{Z}_j = \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^K (\mathbf{R}_{li}^j - \Phi_{li}^j) + \frac{\sigma_{ul}^2}{\rho_{ul}} \mathbf{I}_M$.

Trong hai kỹ thuật trên, M-MMSE là lựa chọn tối ưu nhưng có sự tính toán phức tạp. MR tuy có độ phức tạp thấp nhất nhưng hiệu năng hệ thống không cao.

Không giống như kênh UL, việc tìm ra bộ tiền mã hóa tối ưu là một quá trình thử thách vì hiệu suất phổ DL phụ thuộc vào vector tiền mã hóa $\{\mathbf{w}_{li}\}$ của tất cả UE trong toàn mạng. Do tính đối ngẫu UL-DL [2, section 4.3], phương pháp tiếp cận phổ biến có thiết kế \mathbf{w}_{jk} như sau:

$$\mathbf{w}_{jk} = \frac{\mathbf{v}_{jk}}{\|\mathbf{v}_{jk}\|}$$

3. Hiệu suất hệ thống

3.1. Hiệu suất phổ đường xuống

Với mô hình hệ thống mô tả ở trên, tín hiệu phát DL từ cell l có dạng $\mathbf{x}_l = \sum_{i=1}^K \mathbf{w}_{li} \zeta_{li}$. Trong đó, $\zeta_{li} \sim \mathcal{N}_{\mathbb{C}}(0, \rho_{li})$ là dữ liệu của UE i trong cell l , với ρ_{li} là công suất phát, được chỉ định cho 1 vector tiền mã hóa $\mathbf{w}_{li} \in \mathbb{C}^M$ xác định hướng không gian của đường truyền và thỏa mãn $\|\mathbf{w}_{li}\|^2 = 1$.

Theo [2], hiệu suất phổ của UE k trong cell j trong hệ thống DL mMIMO được tính như sau:

$$SE_{jk}^{\text{dl}} = \frac{\tau_d}{\tau_c} \log_2(1 + \gamma_{jk}^{\text{dl}}) \text{ [bit/s/Hz]} \quad (7)$$

với hệ số tỉ lệ tín hiệu trên nhiễu và giao thoa SINR có dạng

$$\gamma_{jk}^{\text{dl}} = \frac{\rho_{jk} \mathbb{E}\{\|\mathbf{w}_{jk}^H \mathbf{h}_{jk}^j\|^2\}}{\sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^K \rho_{li} \mathbb{E}\{\|\mathbf{w}_{li}^H \mathbf{h}_{li}^j\|^2\} - \rho_{jk} \mathbb{E}\{\|\mathbf{w}_{jk}^H \mathbf{h}_{jk}^j\|^2\} + \sigma^2} \quad (8)$$

Trong đó, $\mathbb{E}\{x\}$ là biểu thức kỳ vọng toán học của x . Hệ số pre-log $\frac{\tau_d}{\tau_c}$ là tỉ số giữa số tín hiệu dữ liệu trên tổng số tín hiệu của 1 khối kết hợp (coherent block) được dùng cho dữ liệu DL.

3.2. Công suất tiêu thụ

Để xác định hiệu suất năng lượng của hệ thống, ta cần xem xét chi tiết mô hình công suất tiêu thụ của hệ thống. Một chỉ số được sử dụng để đo mức độ tiêu thụ năng lượng của một mạng không dây là công suất phát vùng (ATP - Area transmit power), được định nghĩa là mức sử dụng điện năng trung bình của mạng để truyền dữ liệu trên một đơn vị diện tích. Số liệu này được đo bằng W/km^2 :

$$\text{ATP} = \text{công suất phát [W/cell]} \times D \text{ [cells/km}^2\text{]} \quad (9)$$

Trong đó, D là mật độ cell trung bình. Xem xét DL của

mạng mMIMO với L cell. BS j giao tiếp với K UEs. Như được mô tả trong Phần II, BS j sử dụng vectơ tiền mã hóa $\mathbf{w}_{jk} \in \mathbb{C}^{M_j}$ để truyền tín hiệu dữ liệu $\zeta_{jk} \sim \mathcal{N}_c(0, \rho_{jk})$ dành cho UE k trong cell j . Vì vector tiền mã hóa được chuẩn hóa là $\mathbb{E}\{\|\mathbf{w}_{jk}\|^2\} = 1$, công suất phát được phân bổ cho UE này bằng với phương sai tín hiệu ρ_{jk} . ATP của BS j do đó được cung cấp bởi

$$\text{ATP}_j^{\text{DL}} = D \sum_{k=1}^{K_j} \rho_{jk} \quad (10)$$

Biểu thức UL tương ứng thu được nếu thay ρ_{jk} bằng p_{jk} .

Xét kịch bản gồm $K = 10$ UE trong mỗi cell và công suất phát DL là 20 dBm trên mỗi UE, tương ứng với $\rho_{jk} = 100 \text{ mW} \forall j, k$. Khi đó, tổng công suất phát DL mỗi BS là 30 dBm. Mỗi BS có diện tích hình vuông $0,25 \text{ km} \times 0,25 \text{ km}$ và được trang bị cùng một số lượng ăng ten M. ATP của BS j là $\text{ATP}_j^{\text{DL}} = 16 \text{ W} / \text{km}^2$. Tuy nhiên, để có ý nghĩa, ATP cần được xem xét bổ sung chỉ số liên quan đến thông lượng khu vực. Bảng 1 tóm tắt tổng thông lượng DL trung bình trên mỗi cell trên kênh 20 MHz.

Bảng 1. So sánh thông lượng mMIMO [2]

Kỹ thuật	M = 10	M = 50	M = 100
M-MMSE	243Mbit/s	795Mbit/s	1053Mbit/s
MR	118Mbit/s	345Mbit/s	482Mbit/s

Trong trường hợp $M = 100$, ta thấy rằng thông lượng DL có thể lớn tới 482 Mbit/s/cell với MR và 1053 Mbit/s/cell với M-MMSE, lớn hơn 8–16 lần trong LTE.

Thông lượng trên mỗi cell này tương ứng với thông lượng vùng lân cận là 7,72 Gbit/s/km² và 16,8 Gbit/s/km².

Phân tích trên cho thấy, mMIMO có thể đạt được thông lượng khu vực và tiết kiệm công suất phát -ATP hơn hẳn so với mạng LTE hiện tại. Việc phân chia tổng công suất phát giữa M ăng-ten dẫn đến công suất phát thấp trên mỗi ăng-ten. Với $M = 100$ và tổng công suất phát DL là 1 W, mỗi ăng-ten trong kịch bản đang xét ($M = 100$ ăng-ten trên mỗi BS) chỉ có 10 mW. Điều này cho phép thay thế các bộ khuếch đại công suất PA (Power amplifier) công suất cao đắt tiền được sử dụng trong các mạng di động hiện tại (tiêu thụ hầu hết công suất trong BS) bằng hàng trăm PA công suất thấp và chi phí thấp với công suất đầu ra trong dải mW. Với việc sử dụng công suất thấp trên mỗi ăng-ten, thậm chí có thể không cần khuếch đại tín hiệu bằng PA chuyên dụng mà cấp nguồn trực tiếp cho từng ăng-ten từ một mạch [2]. Điều này có thể có tác động rất tích cực đến tổng điện năng tiêu thụ. Mặt khác, lưu ý rằng mức công suất tiết kiệm này có thể đạt được bằng việc triển khai nhiều chuỗi RF trên mỗi BS, dẫn đến việc tăng công suất tiêu thụ của mạch của mạng. Do đó, chỉ số ATP không cung cấp đầy đủ thông tin điện năng tiêu thụ do mMIMO cung cấp. Đây là lý do tại sao nhóm tác giả sử dụng số liệu hiệu suất năng lượng EE, sẽ được định nghĩa trong phần tiếp theo.

3.3. Hiệu suất năng lượng

Định nghĩa: (Hiệu suất năng lượng - EE): EE của mạng di động là số bit có thể được truyền đi một cách đáng tin cậy trên một đơn vị năng lượng.

$$\text{EE} = \frac{\text{Thông lượng [bit/s/cell]}}{\text{Điện năng tiêu thụ [W/cell]}} \quad (11)$$

có đơn vị bit / Joule và có thể được coi là tỷ số giữa lợi ích - chi phí, trong đó chất lượng dịch vụ (thông lượng) được so sánh với chi phí liên quan (lượng điện năng tiêu thụ).

Để đánh giá chính xác EE, điện năng tiêu thụ phải được tính toán dựa trên công suất phát hiệu dụng ETP (không tính phần công suất phát bức xạ) và công suất tiêu thụ của mạch cần thiết để mạng di động hoạt động:

$$\underbrace{\text{PC}}_{\text{Power consumption}} = \underbrace{\text{ETP}}_{\text{Effective transmit power}} + \underbrace{\text{CP}}_{\text{Circuit power}}$$

Gọi μ là hiệu suất bộ khuếch đại công suất RF ($0 < \mu < 1$) vậy $\text{ETP} = \frac{1}{\mu} p$ là công suất phát hiệu dụng ETP. Để tính công suất tiêu thụ của mạch ta có công thức:

$$\text{CP} = P_{\text{FIX}} + MP_{\text{BS}} + KP_{\text{UE}}.$$

Trong đó:

- P_{UE} : Công suất được yêu cầu bởi tất cả các thành phần mạch (ví dụ: DAC, bộ trộn I/Q, bộ lọc, v.v.) cho mỗi ăng-ten của UE.

- P_{BS} là công suất được tiêu thụ bởi các thành phần mạch (ví dụ: ADC, DAC, bộ trộn I/Q, LO, bộ lọc và điều chế / giải điều chế OFDM) cần thiết cho hoạt động của mỗi ăng ten trạm BS.

- P_{FIX} là một đại lượng công suất cố định cần thiết cho tín hiệu điều khiển và công suất không phụ thuộc vào tải của cơ sở hạ tầng backhaul và bộ xử lý băng tần cơ sở.

Vậy ta có hiệu suất năng lượng của cell l là:

$$\text{EE}_l^{\text{dl}} = \frac{B \sum SE_{jk}^{\text{dl}}}{\frac{1}{\mu} p + P_{\text{FIX}} + MP_{\text{BS}} + KP_{\text{UE}}}, \quad (12)$$

Trong đó, hiệu suất phổ DL của UE k trong cell j được tính:

$$SE_{jk}^{\text{dl}} = \frac{\tau_d}{\tau_c} \log_2 \left(1 + \frac{\rho_{jk} a_{jk}}{\sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^K \rho_{li} b_{lij} + \sigma^2} \right) \forall j, k, \quad (13)$$

với độ lợi kênh trung bình a_{jk} và độ lợi nhiễu trung bình b_{lij} được cho tương ứng như sau:

$$a_{jk} = \left| \mathbb{E} \{ \mathbf{w}_{jk}^H \mathbf{h}_{jk}^j \} \right|^2, \quad (14)$$

$$b_{lij} = \begin{cases} \mathbb{E} \{ |\mathbf{w}_{jk}^H \mathbf{h}_{jk}^j|^2 \} & (l, i) \neq (j, k) \\ \mathbb{E} \{ |\mathbf{w}_{jk}^H \mathbf{h}_{jk}^j|^2 \} - |\mathbb{E} \{ \mathbf{w}_{jk}^H \mathbf{h}_{jk}^j \}|^2 & (l, i) = (j, k) \end{cases} \quad (15)$$

Giá trị trung bình được tính liên quan với small-scale fading để DL SE chỉ là một hàm của thống kê large-scale-fading và của vector tiền mã hóa. Đây là một tính năng độc đáo của mMIMO giúp đơn giản hóa phần lớn vấn đề phân bổ công suất so với các hệ thống ăng-ten đơn [2, mục 7.1]. Chú ý rằng, P_{FIX} được bỏ qua trong tính toán của bài báo này do không phụ thuộc tải của BS.

4. Đề xuất tối ưu hiệu suất năng lượng

Ở phần này, trước hết, nhóm tác giả sẽ giới thiệu bài toán tối ưu hiệu suất năng lượng tổng quát. Sau đó, các bước dẫn ra thông số của bài toán sẽ được trình bày và cuối cùng là cách tìm nghiệm của bài toán.

4.1. Bài toán tối ưu hiệu suất năng lượng

Trong số những thuật toán phân bổ công suất, một thuật toán khá phổ biến là max-prod SINR được áp dụng trong bài toán này như sau:

$$\max_{\{\rho_{jk}\}_{\forall j,k}, \{z_j\}_{\forall j}} \prod_{j=1}^L \prod_{k=1}^K \frac{\gamma_{jk}^{dl}}{z_j} \quad (16a)$$

$$\text{với ràng buộc} \quad \sum_{k=1}^K \rho_{jk} \leq P_{max}^{dl}, j = 1, 2, \dots, L, \quad (16b)$$

$$\frac{1}{\mu} \sum_{k=1}^K \rho_{jk} + MP_{BS} + KP_{UE} \leq z_j, \\ j = 1, 2, \dots, L, \quad (16c)$$

Trong đó, P_{max}^{dl} là công suất DL tối đa.

4.2. Tính toán các thông số và đề xuất phương pháp giải bài toán tối ưu hiệu suất năng lượng

Trước hết, nhóm tác giả sử dụng các kênh truyền ước lượng và các thông kê của nó để tính các thông số của bài toán như sau:

- 1) Tính toán vector tiền mã hóa \mathbf{w}_{jk} MR hoặc M-MMSE;
- 2) Tính các giá trị $\{a_{jk}\}$ và $\{b_{jk}\}$ tương ứng theo công thức (14) và (15).

Theo đó, γ_{jk}^{dl} trong công thức (16a) được viết lại như sau:

$$\gamma_{jk}^{dl} = \frac{\rho_{jk} a_{jk}}{\sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^K \rho_{li} b_{lij} + \sigma^2}. \quad (17)$$

Mặc dù, bài toán phân bổ công suất để tối ưu hiệu suất năng lượng vẫn chưa phải là bài toán tối ưu lồi, bài toán này vẫn đủ đơn giản để có thể áp dụng các công cụ giải toán tối ưu như fmincon. Tuy nhiên, mục tiêu hướng đến là tìm công suất phân bổ ban đầu nằm trong miền nghiệm khả thi.

Để tìm điểm ban đầu nằm trong miền nghiệm khả thi của bài toán (16), nhóm tác giả giải bài toán tối ưu lồi với điểm ban đầu ngẫu nhiên để giải bài toán đơn giản hơn như sau:

$$\min_{\{\rho_{jk}, t_{jk}, u_{jk}\}_{\forall j,k}} \prod_{j=1}^L \prod_{k=1}^K t_{jk} \quad (17a)$$

$$\text{với ràng buộc} \quad (16b), \quad (17b)$$

$$\frac{\rho_{jk} a_{jk}}{u_{jk}} \leq t_{jk}, \forall j, k, \quad (17c)$$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^K \rho_{li} b_{lij} + \sigma^2 \geq u_{jk}, \forall j, k. \quad (17d)$$

Trong bài toán tương đương này, nhóm tác giả sử dụng biến phụ trợ t_{jk} , xem như chặn trên của hàm SINR γ_{jk}^{dl} trong (17) và sử dụng biến u_{jk} để đơn giản hóa mẫu số của γ_{jk}^{dl} .

Cuối cùng, giá trị $\{\rho_{jk}\}_{\forall j,k}$ vừa tìm được khi giải bài toán (17) được sử dụng làm điểm ban đầu để giải bài toán tối ưu hiệu suất năng lượng (16). Chú ý rằng ta không cần tìm điểm tối ưu cho bài toán (17) mà chỉ cần vài lần lặp để xác định giá trị của $\{\rho_{jk}\}_{\forall j,k}$ sao cho các ràng buộc (17b) - (17d) được thỏa mãn.

5. Đánh giá hiệu suất

Để đánh giá hiệu quả của phương pháp tối ưu đề xuất, nhóm tác giả thực hiện mô phỏng Monte Carlo cho trường hợp mạng mMIMO với các thông số như Bảng 1 với $L = 4$ cells, mỗi cell có diện tích 250×250 m. Giả sử $K = 5$ UEs được phân bố ngẫu nhiên trong mỗi cell, với ràng buộc là khoảng cách từ trạm BS đến mỗi UE phải lớn hơn 35m. Trong cấu hình mô phỏng này, nhóm tác giả xét băng thông 20MHz và công suất nhiễu thu tổng là $\sigma^2 = -94$ dBm, số lượng tín hiệu pilot $\tau_p = K$ và công suất phát UL trên mỗi UE là $\rho = 20$ dBm.

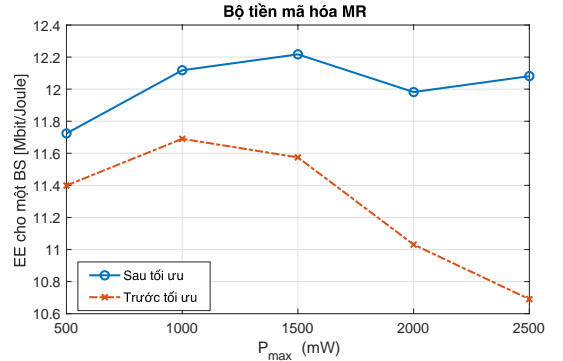
Quy trình thực hiện thông qua phương pháp Monte Carlo như sau:

- 1) Hiệu ứng lan truyền vĩ mô:
 - a) Đặt ngẫu nhiên UE vào vị trí x_{li}^j ;
 - b) Tính toán hệ số fading quy mô lớn β_{lk}^j ;
 - c) Tính toán ma trận tương quan kênh truyền R_{lk}^j .
- 2) Hiệu ứng lan truyền vi mô: Tạo ra ước lượng ngẫu nhiên vector kênh truyền \hat{h}_{lk}^j bằng cách sử dụng bộ ước lượng MMSE.

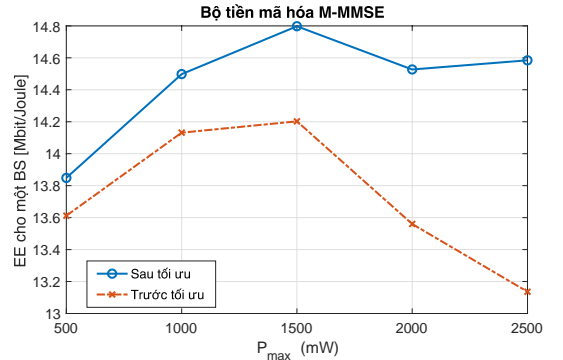
Bảng 2. Cấu hình mô phỏng hệ thống mMIMO

Diện tích cell	250x250m
Băng thông	20 MHz
Số cells	$L = 4$
Số UEs mỗi cell	$K = 5$
Công suất nhiễu nhiệt UL	-94 dBm
Công suất phát UL	20 dBm
Số mẫu trong một khối kết hợp	$\tau_c = 200$

Để kiểm chứng tính hiệu quả của giải thuật tối ưu đề xuất, hiệu suất năng lượng EE của hệ thống trước và sau khi tối ưu được so sánh khi thay đổi mức công suất phát tối đa P_{max} của BS như trong Hình 1 và 2. Cụ thể, hiệu năng của hệ thống khi sử dụng bộ tiền xử lý MR được biểu diễn ở Hình 1 và khi sử dụng bộ tiền xử lý M-MMSE được biểu diễn ở Hình 2, với P_{max} thay đổi từ 500mW đến 2500mW.



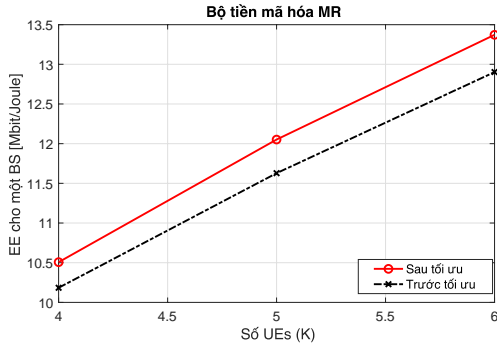
Hình 1. Hiệu suất năng lượng của hệ thống mMIMO sử dụng bộ tiền xử lý MR với mức công suất phát tối đa P_{max} của BS thay đổi



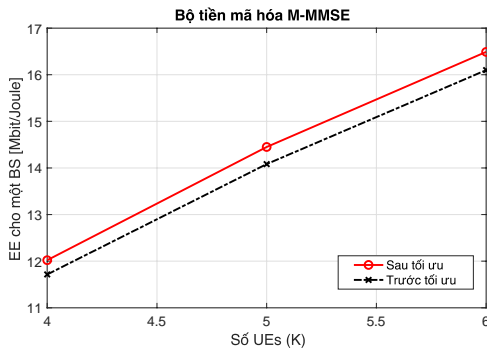
Hình 2. Hiệu suất năng lượng của hệ thống mMIMO sử dụng bộ tiền xử lý M-MMSE với mức công suất phát tối đa P_{max} của BS thay đổi

Các kết quả mô phỏng số cho thấy, hiệu suất năng lượng của hệ thống mMIMO được cải thiện rõ rệt sau khi áp dụng thuật toán tối ưu đề xuất, đối với cả bộ tiền xử lý MR và M-MMSE. Hơn nữa, hiệu quả của giải thuật hệ thống tăng tỉ lệ thuận với mức tăng của công suất phát P_{max} với hai kỹ thuật tiền xử lý. Điều này thể hiện thông qua việc khoảng cách giữa hiệu suất EE trước và sau khi tối ưu tăng mạnh khi P_{max} tăng.

Cụ thể, với bộ tiền xử lý MR, hiệu suất EE của hệ thống thông thường bắt đầu có xu hướng giảm mạnh khi P_{\max} của BS tăng quá 1,5W. Điều này là do công suất của tất cả các UE được phân bổ bằng nhau khi không được tối ưu dẫn tới EE giảm nhanh chóng khi công suất ngày càng lớn. Thông qua Hình 2, hiệu quả của giải thuật phát huy mạnh mẽ hơn với trường hợp bộ tiền xử lý M-MMSE do khả năng triệt nhiễu tương quan giữa các UEs của kỹ thuật xử lý tín hiệu này.



Hình 3. Hiệu suất năng lượng của hệ thống mMIMO sử dụng bộ tiền xử lý MR với số UEs thay đổi



Hình 4. Hiệu suất năng lượng của hệ thống mMIMO sử dụng bộ tiền xử lý M-MMSE với số UEs thay đổi

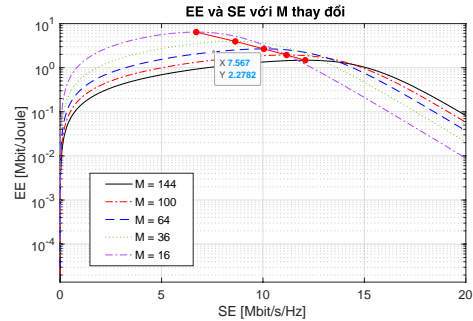
Tiếp theo, nhóm tác giả so sánh hiệu suất năng lượng EE trước và sau khi áp dụng giải thuật đề xuất khi thay đổi số lượng UEs trong 1 cell với bộ tiền xử lý MR trong Hình 3 và bộ tiền xử lý M-MMSE trong Hình 4. Ở cả hai hình, ta có thể nhận thấy một xu hướng chung là khi số UE tăng lên, hiệu suất EE trước và sau khi tối ưu đều tăng, và việc áp dụng thuật toán tối ưu đều giúp cải thiện hiệu suất năng lượng EE, như đã kiểm chứng ở Hình 1 và 2.

Một điều cần lưu ý rằng, hiệu suất phổ SE của một cell có thể được tăng lên bằng cách sử dụng nhiều công suất phát hơn, triển khai nhiều ăng-ten BS hoặc phục vụ nhiều UE trên mỗi cell. Tuy nhiên, tất cả những cách tiếp cận này chắc chắn sẽ làm tăng diện năng tiêu thụ của mạng, trực tiếp (bằng cách tăng công suất phát) hoặc gián tiếp (bằng cách sử dụng nhiều phần cứng hơn), và do đó có thể có khả năng làm giảm hiệu suất năng lượng EE của hệ thống. Vì vậy, việc kiểm tra tính đánh đổi giữa hai hiệu suất năng lượng EE và hiệu suất phổ SE, sử dụng mô hình được giới thiệu trong phần trên, là rất cần thiết.

Hình 5 minh họa EE như một hàm của thông lượng trung bình trên mỗi cell với các giá trị thông lượng khác nhau đạt được với $K = 10$ UE và bằng cách cho số lượng ăng-ten BS thay đổi từ $M = 16$ đến $M = 144$ với $P_{BS} = 1W$. Các điểm màu đỏ là các điểm mà tại đó EE của đường ăng-

ten tương ứng đạt giá trị lớn nhất.

Từ Hình 5, ta nhận thấy rằng EE là một hàm đơn thức của SE tăng đơn điệu đối với $M \leq 16$ và đơn điệu giảm đối với $M > 16$. Giá trị lớn nhất đạt được khi $M = 16$. Điều này là do khi số lượng phần cứng tăng lên (nhiều ăng-ten hơn) thì tiêu thụ công suất lớn hơn làm giảm hiệu suất EE.



Hình 5. Sự đánh đổi (tradeoff) giữa EE và SE theo số lượng ăng-ten M

6. Kết luận

Trong bài báo này, nhóm tác giả tìm hiểu về hiệu suất năng lượng của hệ thống mMIMO và phát triển thuật toán nhằm tối ưu hiệu suất năng lượng thông qua các công cụ tối ưu lồi. Kết quả số của bài báo thông qua mô phỏng đã chứng minh được tính hiệu quả của giải thuật đề xuất trong việc phân bổ công suất của các người dùng UE trong mạng mMIMO, qua đó cho thấy giải thuật này có thể cải thiện rõ rệt hiệu suất năng lượng tiêu thụ của mạng với các mức công suất hoặc số lượng UE khác nhau. Cuối cùng, kết quả mô phỏng cũng khẳng định tính hiệu quả của bộ tiền xử lý sử dụng kỹ thuật MMSE so với MR nhờ vào khả năng triệt nhiễu giao thoa, nhờ đó nâng cao được hiệu suất năng lượng.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Tập đoàn Vingroup - Công ty CP và hỗ trợ bởi Chương trình học bổng sau tiến sĩ trong nước của Quỹ Đổi mới sáng tạo Vingroup (VINIF), Viện nghiên cứu dữ liệu lớn, mã số VINIF.2022.STS.08.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] B. Emil, L. Sanguinetti, H. Wymeersch, J. Hoydis, and T. L. Marzetta, "Massive MIMO is a reality - What is next?: Five promising research directions for antenna arrays", *Digital Signal Processing*, vol. 94, pp. 3-20, 2019.
- [2] B. Emil, J. Hoydis, and L. Sanguinetti, "Massive MIMO networks: Spectral, energy, and hardware efficiency", *Foundations and Trends® in Signal Processing*, vol. 11, no. 3-4, pp. 154-655, 2017.
- [3] Qualcomm, "Rising to meet the 1000x mobile data challenge", 2012.
- [4] A. Gunther *et al.*, "How much energy is needed to run a wireless network?", *IEEE wireless communications*, vol. 18, no. 5, pp. 40-49, 2011.
- [5] Z. Hasan, H. Boostanimehr, and V. K. Bhargava, "Green cellular networks: a survey, some research issues and challenges", *IEEE Commun. Surveys Tuts*, vol. 13, no. 4, pp. 524-540, 2011.
- [6] Z. Yinghui, Y. Lian, Y. Liu, Q. Zhang, M. Jin, and T. Qiu, "Energy-efficient multi-antenna hybrid block diagonalization precoding and combining for mmWave massive multi-user MIMO systems", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 70, no. 10, pp. 10461-10476, 2021.
- [7] Y. Li, J. Xiong, X. Yi, J. Wang, W. Wang, and X. Gao, "Energy efficiency optimization for downlink massive MIMO with statistical CSIT", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 19, no. 4, pp. 2684-2698, 2020.