

GIẢI PHÁP TỐI ƯU HIỆU SUẤT NĂNG LƯỢNG CHO TRUYỀN DẪN BƯỚC SÓNG MILIMET ỨNG DỤNG CHO CÔNG NGHỆ DI ĐỘNG 5G

Nguyễn Thạc Dũng¹, Nguyễn Văn Anh¹, Đinh Công Hùng¹

¹Trường Đại học Thông tin liên lạc

Tóm tắt: Cần tối ưu hóa hiệu suất năng lượng (EE) cho các hệ thống không dây sóng milimet (sóng mm), vì vấn đề tiêu thụ điện năng ngày càng trở nên quan trọng ở các dải tần số cao. Trong các hệ thống sóng mm tiền mã hóa lai, các phần tử được tối ưu hóa theo hướng EE bao gồm các bộ tiền mã hóa tương tự và số kỹ thuật số tại máy phát, các bộ điều hợp tương tự và kỹ thuật số tại máy thu, cũng như số lượng các chuỗi tần số radio (RF) mở tương ứng. Trái với tính toán các ma trận tiền mã hóa/kết hợp tối ưu một cách triệt để tất cả các số có thể có của chuỗi RF như trong các công trình hiện có, bài báo này đề xuất một phương pháp thay thế gồm hai giai đoạn có tổng hiệu suất tỉ lệ gần như tối ưu và độ phức tạp tính toán thấp hơn nhiều. Các kết quả mô phỏng được cung cấp thêm để xác minh tính hợp lệ của phương pháp đề xuất.

Từ khóa: Sóng mm; tiền mã hóa lai, hiệu năng, ít phức tạp.

1. Mở đầu

Dải sóng milimet (mmWave) tương ứng với dải tần từ 30 GHz đến 300 GHz hiện nay đang được sử dụng trong các hệ thống liên lạc điểm – điểm, hệ thống đường trục, hệ thống liên lạc trong nhà tốc độ cao (Wigig, WirelessHD). mmWave giúp giảm kích thước anten, cho phép sử dụng các mảng anten lớn ở cả phía phát và phía thu sẽ bù đắp được sự suy hao trong không gian tự do [4]. Do đó, hệ thống massive MIMO sử dụng dải sóng milimet đang được nghiên cứu rộng rãi để áp dụng vào hệ thống di động thế hệ thứ 5 (5G). [1-3]. Ngược lại so với các hệ thống massive MIMO ở dải tần thấp sử dụng tiền mã hóa toàn bộ trong miền số (fully digital precoding), hệ thống mmWave massive MIMO thường sử dụng tiền mã hóa lai tương tự và số (hybrid analog and digital precoding) để có được sự cân bằng tốt hơn giữa hiệu suất hệ thống và giá thành thực hiện [5-7].

Tối ưu hiệu suất năng lượng (EE) hiện nay được chia thành 2 hướng. Hướng thứ nhất xác định EE là tỷ số giữa tốc độ bit (sum rate) và tổng công suất tiêu thụ [8-11]. Do tính chất không lồi (non-convexity), thuật toán dốc lặp (iterative gradient) [8] và thuật toán khôi phục tín hiệu thưa thớt (sparse signal recovery) [9] được đề xuất để tối ưu bộ tiền mã hóa và bộ kết hợp với điều kiện số RF mở đã được tối ưu hóa. Hướng thứ hai là sử dụng kiến trúc sub-array để giảm công suất tiêu thụ [10,11]. Trong nghiên cứu [10], các tác giả đã đề xuất một thuật toán tiền mã hóa lai dựa vào bộ triệt nhiễu nổi tiếp

(successive interference cancelation - SIC), có thể đạt được hiệu suất cận tối ưu với độ phức tạp thấp. Các tham số liên quan được tối ưu hoá bao gồm các ma trận tiền mã hóa/kết hợp cũng như số lượng các chuỗi RF.

Tuy nhiên, cả 2 hướng tối ưu đều sử dụng giải pháp tính toán tối ưu các ma trận cho mọi giá trị có thể có của số chuỗi RF. Do đó, độ phức tạp trong tính toán là khoảng N lần của số lần phép tính cho một lượt tính toán ma trận, trong đó N là số chuỗi RF tối đa. Một phương pháp thay thế cho việc tối ưu hóa đề cập ở trên được đề xuất như sau: trước tiên thực hiện tối ưu số chuỗi RF mở. Sau đó, các bộ tiền mã hóa và bộ điều hợp cận tối ưu có thể được tính toán với số lượng các chuỗi RF trực tiếp.

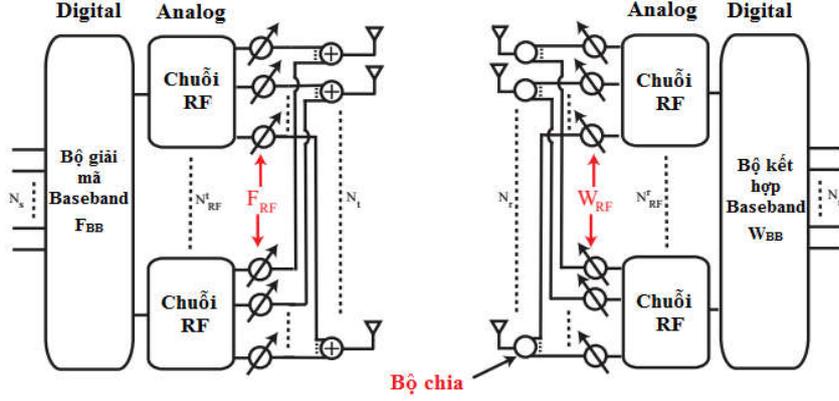
2. Mô hình hệ thống

Xét hệ thống mmWave MIMO đơn người dùng được miêu tả như ở hình 1. Trong đó quá trình tiền mã hóa/kết hợp được thực hiện trong cả miền tương tự và miền số. Tại máy phát với N_t anten thực hiện truyền N_s luồng dữ liệu độc lập tới N_r anten thu. Để truyền dẫn đa luồng dữ liệu, máy phát sử dụng N'_{RF} chuỗi RF, thỏa mãn điều kiện $N_s \leq N'_{RF} \leq N_t$.

Ma trận tiền mã hóa số $\mathbf{F}_{BB} \in \mathbb{C}^{N'_{RF} \times N_s}$. Ma trận tiền mã hóa tương tự $\mathbf{F}_{RF} \in \mathbb{C}^{N_t \times N'_{RF}}$. Vectơ symbol phát $\mathbf{s} \in \mathbb{C}^{N_s \times 1}$ sao cho $E[\mathbf{s}\mathbf{s}^H] = \frac{1}{N_s} \mathbf{I}_{N_s}$. Để đảm bảo

giới hạn công suất máy phát, Các tham số được chọn sao cho $\|\mathbf{F}_{RF}\mathbf{F}_{BB}\|_F^2 \leq N_S$, $N_S \leq \min\{N_{RF}^t, N_{RF}^r\}$,

$$|(\mathbf{F}_{RF})_{i,j}| = \frac{1}{\sqrt{N_t}}, \quad |(\mathbf{W}_{RF})_{i,j}| = \frac{1}{\sqrt{N_r}},$$



Hình 1: Mô hình hệ thống SU-mmWave MIMO

Xét kênh narrowband block-fading, với thông tin trạng thái kênh (CSI) hoàn hảo tại máy phát và máy thu. Tín hiệu tại ăng-ten thu được có thể được biểu diễn dưới dạng:

$$\mathbf{y} = \sqrt{\rho}\mathbf{H}\mathbf{F}_{RF}\mathbf{F}_{BB}\mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (1)$$

trong đó $\sqrt{\rho}$ là công suất thu được trung bình, và \mathbf{n} là véc tơ tạp âm với i.i.d $CN(0, \sigma_2)$.

Tín hiệu thu được sau bộ kết hợp được biểu diễn như sau:

$$\tilde{\mathbf{y}} = \sqrt{\rho}\mathbf{W}_{BB}^H\mathbf{W}_{RF}^H\mathbf{H}\mathbf{F}_{RF}\mathbf{F}_{BB}\mathbf{s} + \mathbf{W}_{BB}^H\mathbf{W}_{RF}^H\mathbf{n} \quad (2)$$

Mô hình kênh mmWave thừa thớt Saleh-Valenzuela (SV) được mô tả như sau:

$$\mathbf{H} = \sqrt{\frac{N_t N_r}{L}} \sum_{l=1}^L \alpha_l \mathbf{a}_r(\phi_r^l, \theta_r^l) \mathbf{a}_t^H(\phi_t^l, \theta_t^l) \quad (3)$$

Không mất tính tổng quát, giả sử rằng $|\alpha_1| \geq |\alpha_2| \geq \dots \geq |\alpha_L|$

Mô hình kênh SV trong (3) có thể được thể hiện dưới dạng rút gọn,

$$\mathbf{H} = \mathbf{A}_r \mathbf{a} \mathbf{A}_t \quad (4)$$

Trong đó \mathbf{a}_r^l là cột thứ l của ma trận $\mathbf{A}_r \in \mathbb{C}^{N_r \times L}$, \mathbf{a}_t^l là cột thứ l của ma trận $\mathbf{A}_t \in \mathbb{C}^{N_t \times L}$ và \mathbf{a} là ma trận chéo kích thước $L \times L$ với

$$\mathbf{a}_{l,l} = \sqrt{\frac{N_t N_r}{L}} \alpha_l$$

- Tốc độ dữ liệu tổng được tính theo công thức:

$$R = \log_2 \left| \mathbf{I}_{N_s} + \frac{\rho}{N_s} \mathbf{R}_n^{-1} \mathbf{H}_e \mathbf{H}_e^H \right| \quad (5)$$

trong đó ma trận kênh tương đương \mathbf{H}_e là

$$\mathbf{H}_e = \mathbf{W}_{BB}^H \mathbf{W}_{RF}^H \mathbf{H} \mathbf{F}_{RF} \mathbf{F}_{BB} \quad (6)$$

và ma trận hiệp phương sai nhiễu \mathbf{R}_n là

$$\mathbf{R}_n = \sigma^2 \mathbf{W}_{BB}^H \mathbf{W}_{RF}^H \mathbf{W}_{RF} \mathbf{W}_{BB} \quad (7)$$

- Mô hình công suất tiêu thụ

Tổng công suất tiêu thụ thường được mô hình là :

$$P_{tot} = P_{tr} + P_{RF} + P_C \quad (8)$$

Trong đó P_{tr} là công suất phát, P_{RF} là công suất của tất cả các chuỗi RF, với mỗi chuỗi RF bao gồm bộ chuyển đổi, bộ trộn, bộ lọc, bộ dịch pha, bộ khuếch đại... P_C là công suất của các thành phần cố định như bộ phận làm lạnh.

- Các phương pháp tối ưu EE hiện tại

Cách đơn giản để tối ưu hóa EE là tối đa hóa tỉ lệ tổng có thể đạt được và tổng tiêu thụ điện năng. Dùng phương pháp trong [8] làm phương pháp đại diện, bài toán mục tiêu là

$$\Phi^{opt} = \arg \max_{\Phi} \eta(\Phi) = \frac{R}{P_{tot}} \quad (9)$$

trong đó $\Phi = \{\mathbf{W}_{BB}, \mathbf{W}_{RF}, \mathbf{F}_{RF}, \mathbf{F}_{BB}, \mathbf{k}\}$, và k là số lượng các chuỗi RF mở tại máy phát. Các ràng

buộc của bài toán được bỏ qua ở đây vì những hạn chế của không gian.

3. Phương pháp đề xuất

Tìm kiếm Φ gần như tối ưu trong cách thay thế có mức độ phức tạp giảm. Thay vì tính toán các kết quả tối ưu đối với tất cả các phần tử bằng Φ , trước tiên chúng tôi cố gắng để có được số lượng chuỗi RF mở tối ưu, tức là, k . Khi đó, các bộ tiền mã hóa và điều hợp được tính cho k cụ thể chỉ trong một lượt.

3.1. PROBLEM FORMULATION: Xây dựng mô hình tối ưu EE

Với giả thiết $N'_{RF} = N''_{RF}$ và thông tin trạng thái kênh hoàn hảo (perfect CSI) tại phía phát và phía thu. Mô hình hóa bài toán tối ưu EE như sau:

$$k^{opt} = \arg \max_{k, k \in [1, N'_{RF}]} \eta_k \quad (10)$$

trong đó, C_k là dung lượng kênh tương đương với k chuỗi RF mở (opened RF),

$$C_k = \log_2 \det \left(\mathbf{I}_k + \frac{\rho}{N_s \sigma^2} \mathbf{H}_k \mathbf{H}_k^H \right) \\ \square \sum_{i=1}^k \log_2 \left(1 + \frac{\rho}{N_s} \frac{|\alpha_i|^2}{\sigma^2} \right) \quad (11)$$

cũng có thể xem là cận trên xấp xỉ của tổng tốc độ có thể đạt được (achievable sum rate) R_k .

Công suất tiêu thụ tăng chủ yếu do các chuỗi RF, do đó, mô hình công suất tiêu thụ đơn giản P_k được sử dụng thay thế (9) như sau:

$$P_k = P_{RF,0} k + P_{tr}, \quad (12)$$

trong đó $P_{RF,0}$ là mức tiêu thụ điện năng của một chuỗi RF.

3.2. SOLUTION: Tìm kiếm lặp lại

Theo công thức EE đề xuất trên, có thể thấy rằng việc tính toán Φ có thể được tách riêng thành

hai giai đoạn riêng biệt. Trong giai đoạn đầu tiên, số lượng chuỗi RF mở tối ưu, k^{opt} được tính bằng cách giải phương trình (11). Sau đó trong giai đoạn thứ hai, đối với giá trị k^{opt} thu được, các ma trận tiền mã hóa/kết hợp có thể tiếp tục tính được với một vòng số lần tính toán.

Đối với giá trị k^{opt} xác định, các ma trận $\{\mathbf{W}_{BB}, \mathbf{W}_{RF}, \mathbf{F}_{RF}, \mathbf{F}_{BB}\}$ có thể được tính toán bằng cách sử dụng thuật toán dốc (gradient algorithm) như trong [8] hoặc thuật toán tìm kiếm phù hợp trực giao (orthogonal matching pursuit - OMP) như trong [5].

Quá trình xử lý quan trọng hiện nay là việc tính toán k^{opt} . Từ các biểu thức trong (10) - (12), có thể thấy rằng hàm mục tiêu là một bài toán lập trình số nguyên không tuyến tính. Do đó, chúng tôi sử dụng các bước tìm kiếm được tóm tắt trong thuật toán 1 để tìm ra lời giải thực tế.

Thuật toán : tính k

Yêu cầu: \mathbf{H} For $k = N_s : N'_{RF}$

1. Đặt giá trị đầu $\eta_0 = 0$
2. Xác định $\alpha_i, i \in [1, k]$ từ ma trận kênh thưa thớt \mathbf{H} ;
3. Tính $\{C_k, P_k, \eta_k\}$, cho tới khi $\delta_k \leq 0$

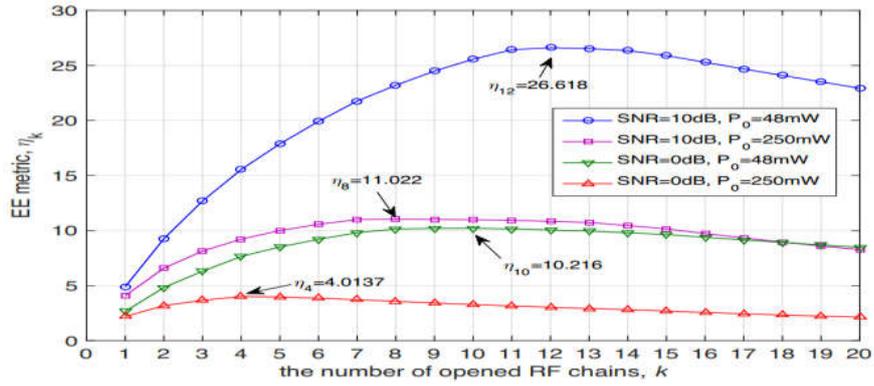
Trong đó $\delta_k = \eta_k - \eta_{k-1}$;

Kết thúc vòng

Đầu ra: $k^{opt} = k$

4. Mô phỏng

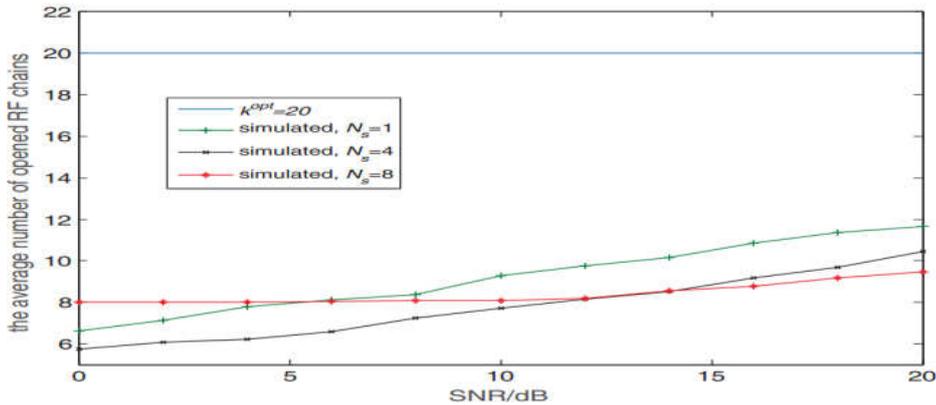
Kịch bản mô phỏng: Sử dụng phần mềm matlab mô phỏng các mảng anten tuyến tính đều (uniform linear arrays - ULA) có khoảng cách bằng nửa bước sóng được sử dụng ở cả máy phát và máy thu. Các góc phương vị và góc nâng $\{\phi, \theta\}$ được giả thiết là phân bố đều trong $[0, 2\pi]$. Công suất tiêu thụ của mỗi chuỗi RF ($P_{RF,0}$) được thiết lập là 48 mW [8] và 250mW [10]. Số lượng tối đa chuỗi RF được cấu hình $N'_{RF} = 20$. Số lượng ăng-ten phát, thu $N_t = N_r = 100$. Và số lượng tia của kênh thưa thớt là $L = 20$.



Hình 2. Hiệu suất năng lượng đề xuất với số lượng chuỗi RF mở k khác nhau

Hình 2 cho thấy hiệu suất năng lượng (energy efficiency - EE) η_k đề xuất thay đổi so với k chuỗi RF mở. $N_s = 1$ được sử dụng trong trường hợp này. Kết quả mô phỏng với các giá trị khác nhau của tỉ số tín hiệu cực đại trên nhiễu (SNR) và P_{RF}, ρ . Có thể quan sát thấy rằng luôn luôn có một điểm tối ưu duy nhất cho k chuỗi RF mở. Ứng với SNR và công suất tiêu thụ của chuỗi RF khác nhau sẽ có các điểm tối ưu tương ứng $\{12,8,10,4\}$ như thể hiện trong hình 2.

Lấy $P_0 = 48\text{mW}$ làm ví dụ. Kết quả thực hiện của tỉ lệ tổng có thể đạt được đại diện cho số lượng luồng dữ liệu khác nhau, tức là, $N_s = 1,2,4,8$ tương ứng. Trong mô phỏng này, tỉ lệ tổng được tính theo số lượng chuỗi RF mở tối ưu theo số liệu EE. Và các ma trận tiền mã hóa/điều hợp tương ứng tại máy phát và thu được tính qua thuật toán OMP sau khi nhận được k^{opt} . Công suất tiêu thụ nhánh RF phát/thu $P_{RF}=35\text{mW}$ chiếm 72,9% tiết kiệm được 27,1% năng lượng. Chương trình này có thể áp dụng trong các trường hợp khác khi ta thay đổi k chuỗi RF mở.



Hình 3. Số chuỗi RF mở trung bình

Hình 3 cho thấy sự phụ thuộc của số chuỗi RF mở trung bình với số lượng luồng dữ liệu khác nhau, $N_s = \{1,2,4,8\}$, $P_0 = 48\text{mW}$, SNR thay đổi từ 0 đến 20 dB. Số lượng tối ưu k^{opt} ít hơn nhiều so với giá trị tối đa là 20, đặc biệt là ở vùng SNR thấp. Điều này có nghĩa là không cần thiết phải mở tất cả các chuỗi RF trong hầu hết các trường hợp. Trong khi đó, việc giảm số lượng các chuỗi RF mở sẽ góp phần làm giảm mức tiêu thụ điện năng do RF tạo ra.

5. Kết luận

Bài báo đã đề xuất phương pháp tối ưu EE độ phức tạp thấp cho hệ thống sóng mm. Phương pháp đề xuất dựa trên thuộc tính gần đúng của hệ thống sóng mm có các mảng ăng ten lớn, cũng như đặc tính thừa thớt của kênh giảm dần. Từ đó tính toán số lượng chuỗi RF mở tối ưu. Thông qua các kết quả mô phỏng, chỉ ra rằng ứng với SNR và công suất tiêu thụ của chuỗi RF khác nhau sẽ có các điểm tối ưu EE tương ứng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. S. Rangan, T. Rappaport, and E. Erkip, "Millimeter-wave Cellular Wire- less Networks Potentials and Challenges (Invited)," . 3, Mar. 2014, pp. 366-385.
2. P. Wang, Y. Li, L. Song, and B. "Multi-gigabit Millimeter Wave Wireless Communications for 5G from Fixed Access to Cellular Networks," 1, Jan. 2015,
3. T. Rappaport, R. Heath, R. Daniels, and J. Murdock, Millimeter Wave Wireless Communications, Prentice Hall, Sep. 2014.
4. X. Wu, C-X. Wang, J. Sun, J. Huang, R. Feng, Y. Yang, and X. Ge, "60 GHz Millimeter-wave Channel Measurements and Modeling for Indoor Office Environments," 4, April 2017,
5. Ayach, S. Rajagopal, S. Abu-Surra, Z. Pi, and R. W. Heath Jr., "Spatially Sparse Precoding in Millimeter Wave MIMO Systems," 3, Mar. 2014,
6. E. Ayach, R. W. Heath Jr., S. A. Surra, S. Rajagopal, and Z. Pi, "The Capacity Optimality of Beam Steering in Large Millimeter Wave MIMO Systems," June 2012,
7. A. Alkhateeb, and R. W. Heath Jr., "Frequency Selective Hybrid Precoding for Limited Feedback Millimeter Wave Systems," . 5, May 2016, pp. 1801-1818.
8. R. Zi, X. Ge, J. Thompson, C-X. Wang, H. Wang, and H. Tao, "Energy Efficiency Optimization of 5G Radio Frequency Chain Systems," , April 2016.
9. C. Ma, J. Shi, N. Huang, and M. Chen, "Energy-Efficient Hybrid Pre- coding for Millimeter Wave Systems in MIMO Interference Channels," , May 2016, pp. 1-5.
10. X. Gao, L. Dai, S. Huan, Jr, "Energy-efficient Hybrid Analog April 2016.
11. S. He, C. Qi, Y. Wu,, "Energy-efficient Transceiver Design for Hybrid Sub-array Architecture MIMO Systems," Jan. 2017, pp. 9895-9905.

OPTIMIZED ENERGY EFFICIENCY SOLUTION FOR MICROPHONE MILIMET APPLICATION FOR 5G MOBILE TECHNOLOGY

Nguyen Thac Dung¹, Nguyen Van Anh¹, Dinh Cong Hung¹

¹Telecommunication University

Abstract: It is necessary to optimize the energy-efficient (EE) performance for millimeter-wave (mmWave) wireless systems, since the power consumption problem becomes increasingly crucial at high frequency bands. In hybrid precoding mmWave systems, the EE-oriented optimized elements include the analog and digital precoders at the transmitter, the analog and digital combiners at the receiver, as well as the corresponding number of opened radio frequency (RF) chains. In contrary to calculate the optimal precoding/combining matrices exhaustively for all possible numbers of RF chains as in the existing works, this paper proposes a two-stage alternative method with nearly optimal sum rate performance and much lower computation complexity. Simulation results are further provided to verify the validation of the proposed method.

Keywords: mmWave; Hybrid precoding; Energy efficiency; Low complexity.