

ĐIỀU KHIỂN CÔNG SUẤT ĐƯỜNG XUỐNG CHO DUNG LƯỢNG NGƯỜI DÙNG ĐỒNG ĐỀU TRONG HỆ THỐNG MASSIVE MIMO ĐƠN TẾ BÀO

Phạm Thị Quỳnh Trang¹, Trịnh Anh Vũ^{2*}, Phùng Trung Nghĩa³

¹Đại học Công nghiệp Hà Nội, ²Trường Đại học Công nghệ - Đại học Quốc gia Hà Nội

³Trường Đại học Công nghệ Thông tin - ĐH Thái Nguyên

TÓM TẮT

Bài báo đề xuất kỹ thuật điều khiển công suất đường xuống nhằm làm cho dung lượng người dùng đồng đều trong hệ thống Massive MIMO đơn tế bào sau khi xây dựng các biểu thức tính toán phẩm chất kênh. Khác với những nghiên cứu về điều khiển công suất phức tạp nhằm tối ưu hệ thống với những điều kiện ràng buộc khác nhau, bài báo này đề xuất một kỹ thuật đơn giản chỉ nhắm đến mục tiêu là cung cấp dung lượng người dùng *bình đẳng* khi ràng buộc công suất tổng tại trạm cơ sở không đổi, đó là chỉ cần phân công suất tỷ lệ nghịch với suy giảm đường truyền. Ngoài ra một số liên hệ cơ bản khi thiết kế hệ thống cũng được rút ra. Kết quả mô phỏng cho thấy hiệu quả của phương pháp đề xuất này.

Từ khóa: MIMO, MIMO tập hợp lớn, điều khiển công suất đường xuống, suy giảm kênh, phân bố đều, dung năng đều

GIỚI THIỆU

Mạng tế bào truyền thông khó phân dung lượng đồng đều đến người dùng khác nhau do hiệu ứng xa-gần [1]. Theo công thức tính dung năng kênh: $= B \times \log_2(1 + S/N)$, ở đây B là độ rộng băng tần kênh, S, N là công suất tín hiệu và tạp âm trong kênh, thì đối với người ở xa trạm cơ sở, tỷ số S/N nhỏ cần phải phân băng tần lớn hơn để đảm bảo dung năng của mọi người dùng đồng đều. Điều này gắn với thuật toán phân bổ băng tần phức tạp trong khi mục tiêu dung năng đồng đều có thể thực hiện đơn giản trong hệ thống Massive MIMO chỉ bằng điều khiển công suất.

Kỹ thuật Massive MIMO, nổi lên trong thập niên qua như một ứng cử viên cho công nghệ 5G, đã tạo nên bước đột phá mới trong truyền tin vô tuyến với độ lợi cao cả về băng tần và năng lượng. So với điều khiển công suất trong hệ thống P2P (peer-to-peer), điều khiển công suất trong hệ thống Massive MIMO có nhiều điểm khác. Do có một lượng lớn anten tại trạm cơ sở trong hệ thống Massive MIMO nên việc ước lượng kênh chính xác là khó khăn vì vậy cần phải tính toán cả công suất

pilot và công suất dữ liệu, điều này làm cho điều khiển tối ưu trở nên khó khăn hơn.

Mặt khác việc “cứng hóa” kênh trong Massive MIMO lại làm cho hệ thống này được điều khiển dễ dàng hơn dựa trên phading kênh kích thước lớn chứ không phải phading kênh kích thước nhỏ. Xung quanh vấn đề này nhiều công bố như [3,4,5] đã nhắm đến điều khiển hệ thống với nhiều mục tiêu tối ưu khác nhau và với nhiều thuật toán phức tạp khác nhau như Max-min, Max-Sum..

Nhắm đến sự đơn giản và hiệu quả, bài báo này giới hạn mục tiêu điều khiển công suất đường xuống là làm cho dung năng cho tất cả người dùng bằng nhau, đảm bảo tính công bằng cho các thuê bao trong điều kiện ràng buộc công suất tổng ở trạm cơ sở. Để đạt mục tiêu này, thuật toán chỉ là sự phân chia công suất tổng thành các phần tỷ lệ nghịch với suy giảm kênh truyền ở mỗi thuê bao. Thêm vào đó bài báo cũng chỉ ra các mối liên hệ cơ bản giữa dung năng người dùng, số anten trạm cơ sở và tỷ số tín/tạp yêu cầu tối thiểu tại máy thu. Các liên hệ này phải được thỏa mãn khi xem xét thiết kế hệ thống.

Bài báo được sắp xếp tiếp theo như sau: mục tiếp theo trình bày mô hình kênh tương đương

* Tel: 0915 509358, Email: anhtrinhvu1811@gmail.com

của hệ thống Massive MIMO đơn tế bào. Kế tiếp là phân mô tả phẩm chất kênh và kỹ thuật điều khiển công suất. Mục tiếp theo đánh giá hiệu quả của phương pháp đề nghị bằng một số mô phỏng. Phần sau cùng đưa ra một số kết luận và nghiên cứu trong tương lai.

MÔ HÌNH KÊNH TƯƠNG ĐƯƠNG

Ước lượng kênh với kỹ thuật MMSE

Xét tế bào có M anten ở trạm cơ sở và K máy di động với anten đơn (trong Massive MIMO $M \gg K$). Phương trình truyền pilot đường lên theo [2] là:

$$Y_p = \sqrt{\rho_p \tau_p} H \psi + N_p \quad (1)$$

Ở đây: Ψ là ma trận pilot $K \times \tau$ có tính chất unitary $\Psi \Psi^H = I_K$. ρ_p là SNR của pilot tại nơi thu, τ_p là độ dài pilot. H là ma trận kênh $C^{M \times K}$, N_p là ma trận tạp âm. Ma trận thu được tại trạm cơ sở là Y_p kích thước $C^{M \times \tau}$.

Cũng theo kết quả của [2] ma trận ước lượng kênh dùng kỹ thuật MMSE là:

$$\hat{H} = \frac{\sqrt{\rho_p \tau_p}}{\rho_p \tau_p + 1} \psi^T Y_p^T = \frac{\sqrt{\rho_p \tau_p}}{\rho_p \tau_p + 1} Q_p = \frac{\rho_p \tau_p}{\rho_p \tau_p + 1} H + \frac{\sqrt{\rho_p \tau_p}}{\rho_p \tau_p + 1} W \quad (2)$$

Ở đây $W = \psi^T N_p$ và Q_p đều là ma trận $C^{M \times K}$. Do H và W không tương quan nên:

$$E[\hat{H}^2] = E \left[\left(\frac{\rho_p \tau_p}{\rho_p \tau_p + 1} \right)^2 H H^H \right] + E \left[\left(\frac{\sqrt{\rho_p \tau_p}}{\rho_p \tau_p + 1} \right)^2 W W^H \right] = \frac{\rho_p \tau_p}{\rho_p \tau_p + 1} \quad (3)$$

Sai số ước lượng kênh có phương sai là:

$$E[\varepsilon^2] = E \left[(H - \hat{H})^2 \right] = E \left[\left(\frac{1}{\rho_p \tau_p + 1} \right)^2 H H^H \right] + E \left[\left(\frac{\sqrt{\rho_p \tau_p}}{\rho_p \tau_p + 1} \right)^2 W W^H \right] = \frac{1}{\rho_p \tau_p + 1} \quad (4)$$

Để chuẩn hóa kênh ước lượng được, ta đưa thêm biến Z :

$$Z = \frac{\hat{H}}{\sqrt{E[\hat{H}^2]}} = \frac{\frac{\sqrt{\rho_p \tau_p}}{\rho_p \tau_p + 1} Q_p}{\sqrt{\frac{\rho_p \tau_p}{\rho_p \tau_p + 1}}} = \frac{Q_p}{\sqrt{\rho_p \tau_p + 1}} \quad (5)$$

Hay

$$\hat{H} = \sqrt{E[\hat{H}^2]} Z = \sqrt{\frac{\rho_p \tau_p}{\rho_p \tau_p + 1}} Z = \sqrt{k^p} Z \quad (6)$$

Chú ý rằng $\sqrt{k^p} < 1$ biểu diễn như hệ số *suy giảm kênh bổ sung* do ước lượng kênh gần đúng (hệ số này gần bằng 1 và phụ thuộc công suất pilot)

Kênh tương đương

Từ phương trình đường xuống tổng quát:

$$y = \sqrt{\rho} H x + n \quad (7)$$

Với y, x, n lần lượt là các vecto thu được ở đầu cuối máy di động, vecto dữ liệu truyền, vecto tạp âm, còn H là ma trận kênh ($K \times M$), khi không thể biết H chính xác mà chỉ biết ước lượng \hat{H} qua pilot ta đặt $H = \hat{H} + \varepsilon$, với ε là sai số ước lượng, phương trình (7) có thể viết lại thành:

$$y = \sqrt{\rho} \hat{H} x + \sqrt{\rho} \varepsilon x + n = \sqrt{\rho} \hat{H} x + v = \sqrt{\rho k^p} Z x + v \quad (8)$$

Phương trình (8) tương đương với (7), trong đó Z được *biết chính xác* qua ước lượng \hat{H} . Còn v là *tạp âm tương đương* bằng tạp âm thật cộng thêm phần do sai số ước lượng kênh.

Mô hình kênh thực tế.

Áp dụng vào kênh truyền thực tế của hệ thống Massive MIMO, có thể thay thế phần tử trong ma trận kênh H là h_{km} thành $g_{km} = \sqrt{\beta_k} h_{km}$. Ở đây:

- β_k là hệ số diễn tả suy giảm công suất *chung* theo khoảng cách từ máy di động thứ k đến *tất cả* anten của trạm cơ sở (do khoảng cách giữa các anten tại trạm cơ sở là nhỏ so với khoảng cách kênh truyền nên suy giảm công suất là giống nhau), suy giảm này thay đổi chậm theo thời gian và là $CN(0,1)$, với phân bố log normal.

- Thừa số h_{km} còn lại diễn tả sự thay đổi nhanh độ lợi kênh của kênh theo thời gian và là $CN(0,1)$ có phân bố Rayleigh.

Các tính toán ở kênh thực giống như mô hình tương đương ở trên trong đó giữ nguyên cho

h, chỉ cần bổ sung thêm thừa số $\sqrt{\beta}$ (do là thừa số biến đổi chậm) ngoài ra công suất tín/tạp ở nơi thu là ρ được thay bằng $P\beta$ (với P là công suất ở bên phát chuẩn hóa với tạp âm máy thu)

Theo đó:

$$\hat{g}_{km} = \sqrt{\beta_k} \hat{h}_{km} = \sqrt{\beta_k k_{\beta_k}^p} z_{km} \quad (9)$$

$$E[\hat{g}_{km}^2] = \beta_k E[\hat{h}_{km}^2] = \beta_k k_{\beta_k}^p \text{ với}$$

$$k_{\beta_k}^p = \frac{\rho_p \tau_p}{1 + \rho_p \tau_p} = \frac{P_p \beta_k \tau_p}{1 + P_p \beta_k \tau_p} < 1 \quad (10)$$

$$E[\varepsilon_k^2] = \frac{\beta_k}{P_p \tau_p \beta_k + 1} = \beta_k (1 - k_{\beta_k}^p) \quad (11)$$

TÍNH TOÁN PHẨM CHẤT KÊNH TRUYỀN VÀ ĐIỀU KHIỂN CÔNG SUẤT

Bài viết này sử dụng kỹ thuật mã trước là MRT.

Phương trình đường xuống

Gọi A là ma trận mã trước, phương trình đường xuống sau khi ước lượng kênh và mã trước với ma trận A được viết lại là:

$$y_{dl} = \sqrt{\frac{E_{dl}}{KM}} G A x + n = \sqrt{\frac{E_{dl}}{KM}} \hat{G} A x + \sqrt{\frac{E_{dl}}{KM}} \varepsilon A x + n \quad (12)$$

Ở đây E_{dl} là công suất tổng của trạm cơ sở, khi không điều khiển công suất thì chia đều cho K dòng dữ liệu và M anten. Đặt:

$$\hat{g}_{km} = \sqrt{\beta_k} \hat{h}_{km} = \sqrt{\beta_k k_{\beta_k}^p} z_{km} \quad (13)$$

Để chuẩn hóa ta chọn A theo kỹ thuật MRT là: $A = \frac{1}{\sqrt{M}} Z^H$

Thay vào phương trình đường xuống (12) với minh họa $K=2$ (kênh A và B) để dễ theo dõi biến đổi như sau:

$$\begin{bmatrix} y_A \\ y_B \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{E_{dl}}{2M}} \begin{bmatrix} \sqrt{\beta_A k_{\beta_A}^p} & 0 \\ 0 & \sqrt{\beta_B k_{\beta_B}^p} \end{bmatrix} [ZZ^H] \frac{1}{\sqrt{M}} \begin{bmatrix} x_A \\ x_B \end{bmatrix} + \sqrt{\frac{E_{dl}}{2M^2}} \varepsilon Z^H \begin{bmatrix} x_A \\ x_B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_A \\ n_B \end{bmatrix} \quad (14)$$

Sử dụng tính chất của ma trận ngẫu nhiên [6, A.2.4] ta có

$$\log_{M \rightarrow \infty} \text{var}[ZZ^H] = \begin{bmatrix} M^2 + M & M \\ M & M^2 + M \end{bmatrix} \quad (15)$$

và

$$\log_{M \rightarrow \infty} \text{var}(\varepsilon Z^H) = \begin{bmatrix} M\beta_A(1 - k_{\beta_A}^p) & M\beta_A(1 - k_{\beta_A}^p) \\ M\beta_B(1 - k_{\beta_B}^p) & M\beta_B(1 - k_{\beta_B}^p) \end{bmatrix} \quad (16)$$

Ta tính được:

$$\begin{aligned} E[y_A^2] &= \left(\frac{E_{dl}\beta_A k_{\beta_A}^p}{2} + \frac{E_{dl}\beta_A k_{\beta_A}^p}{2M} \right) E[x_A^2] + \\ &\frac{E_{dl}\beta_A k_{\beta_A}^p}{2M} E[x_B^2] + \frac{E_{dl}}{2M} \beta_A (1 - k_{\beta_A}^p) E[x_A^2] + \\ &\frac{E_{dl}}{2M} \beta_A (1 - k_{\beta_A}^p) E[x_B^2] + E[n_A^2] = \\ &\frac{E_{dl}\beta_A k_{\beta_A}^p}{2} E[x_A^2] + \frac{E_{dl}\beta_A}{2M} (E[x_A^2] + E[x_B^2]) + \\ &E[n_A^2] \end{aligned} \quad (17)$$

$$\text{Hay: } SINR_A = \frac{E_{dl}\beta_A k_{\beta_A}^p / 2}{1 + \frac{E_{dl}\beta_A}{M}} \quad (18)$$

Để dàng tổng quát hóa cho K người dùng:

$$SINR_k = \frac{E_{dl}\beta_k k_{\beta_k}^p / K}{1 + \frac{E_{dl}\beta_k}{M}} = \frac{E_{dl}}{K} \beta'_k \quad (19)$$

$$\text{Với: } \beta'_k = \frac{\beta_k k_{\beta_k}^p}{1 + \frac{E_{dl}\beta_k}{M}} \quad (20)$$

Nhận xét:

- Khi $M \rightarrow \infty$, $SINR_k \rightarrow \frac{E_{dl}\beta_k}{K} k_{\beta_k}^p$. Tức là SNR của máy thu suy giảm theo hệ số kênh β_k truyền đến nó. So với trường hợp biết kênh chính xác, SNR có thêm hệ số $k_{\beta_k}^p$ diễn tả suy giảm kênh bổ sung do ước lượng kênh không chính xác. Hệ số này cũng phụ thuộc β_k và công suất pilot

- Bài toán điều khiển dung lượng đồng đều cho K người dùng thực ra là bài toán phân chia công suất tỷ lệ nghịch với các hệ số β_k .

Điều khiển công suất đường xuống

Tại trạm cơ sở sau khi xác định các β_k (20) dùng pilot đường lên, hệ số điều khiển công suất đường xuống cho dòng dữ liệu đến người thứ k được xác định đơn giản là

$$\eta_k = \sqrt{E_{dl}} \left(\frac{1}{\beta_k} / \left(\frac{1}{\beta_1} + \frac{1}{\beta_2} + \dots + \frac{1}{\beta_K} \right) \right)^{1/2} \quad (21)$$

Khi đó SNR ở mỗi máy thu đầu cuối sau khi điều khiển công suất là

$$SNR_{control} = \frac{E_{dl}}{\frac{1}{\beta_1} + \frac{1}{\beta_2} + \dots + \frac{1}{\beta_K}} \quad (22)$$

Khi không điều khiển công suất (các hệ số β_k được coi là bằng nhau)

$$\eta_k = \sqrt{E_{dl}/K}$$

Ta lại nhận được công thức (19)

Khi hệ thống nhiễu trội hơn tạp âm, và $k_{\beta_k}^p \approx 0.9$ có thể xấp xỉ

$$SNR_{control} = \frac{E_{dl}}{\frac{1 + \frac{E_{dl}\beta_k}{M}}{\beta_k k_{\beta_k}^p}} \approx \frac{0.9M}{K} > \gamma \quad (23)$$

Ở đây γ là SNR tối thiểu của máy thu di động, K là số người dùng cực đại. Đây cũng thể coi là tiêu chí thiết kế đơn giản cần thỏa mãn

MÔ PHỎNG VÀ ĐÁNH GIÁ

Hệ thống Massive MIMO đơn tế bào được mô phỏng với M anten tại trạm cơ sở, K người dùng anten đơn phân bố đều trong tế bào. Hàm CDF của dung năng tổng cộng được so sánh trong 2 trường hợp: khi có điều khiển và khi không điều khiển công suất:

Các bước tiến hành mô phỏng như sau:

1. Gieo ngẫu nhiên theo phân bố đều vị trí của K người dùng trong tế bào bán kính kênh $r=1000m$. Các vị trí không gần tâm hơn $r_h=100m$ (để tránh xử lý số quá lớn).

2. Tính SNR của người dùng thứ k theo

$$\text{Hệ số suy giảm công suất: } \beta_k = z/(r_k/r_h)^\alpha$$

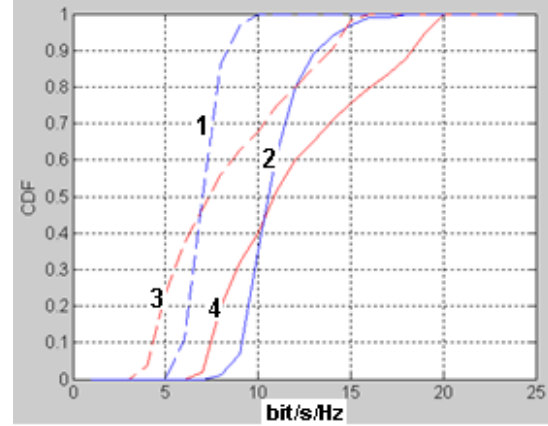
ở đây $z=10^{\sigma/10}$ với số mũ suy giảm $\alpha=3.5$, độ lệch chuẩn che khuất $\sigma=6.5$ (dB)

3. Tính dung năng $C=\log_2(1+SNR)$ của mỗi người sau đó tính CDF qua histogram.

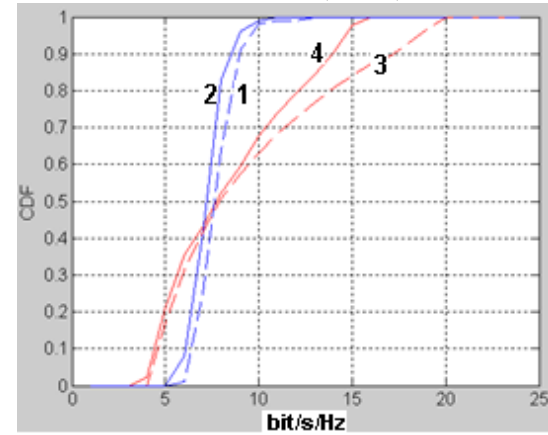
Kết quả mô phỏng được thể hiện trên hình 1 và hình 2.

Trong đó hình 1 mô phỏng với $M=100$ và với 2 tình huống $K=10$ và $K=5$. Trong 2 tình

huống này các đường 1,2 là kết quả có điều khiển công suất còn các đường 3 và 4 tương ứng với không điều khiển công suất.



Hình 1. $M=100, k=10,5$



Hình 2. $k=10, M=100,200$

Hình 2 mô phỏng với $K=10$ cũng với 2 tình huống $M=100$ và $M=200$. Trong 2 tình huống này đường 1,2 ứng với kết quả có điều khiển công suất còn đường 3,4 ứng với kết quả không điều khiển công suất.

Từ kết quả nhận được ở hình 1 và hình 2 có thể rút ra một số kết luận sau:

- Khi áp dụng điều khiển công suất, CDF không trải ra mà tập trung tại một dải giá trị bit/s/Hz xác định. Điều này có nghĩa dung lượng người dùng được phân đồng đều hơn khi không điều khiển.

- Khi $M=100$, K giảm từ 10 đến 5 người dùng, đường cong dịch mạnh về bên phải. Điều này có nghĩa là công suất tổng phân chia

cho số người dùng ít hơn thì dung lượng của mỗi người dùng tăng mạnh thêm.

- Khi M tăng từ 100 đến 200, K giữ nguyên là 10, dung lượng của mỗi người cũng được cải thiện song không nhiều do nhiễu giữa các dòng dữ liệu giảm đi làm SINR tăng lên

KẾT LUẬN

Bài báo trình bày kỹ thuật điều khiển công suất đường xuống để dung lượng người dùng đồng đều trong hệ thống Massive MIMO đơn tế bào. Khác với các thuật toán tối ưu max-min phức tạp. Kỹ thuật này đơn giản chỉ là phân công suất tỷ lệ nghịch với suy giảm kích thước lớn của đường truyền. Ngoài ra công thức tính toán cũng cho ước lượng thô giữa các đại lượng M, K, SNR . Mô phỏng cho thấy hiệu quả của phương pháp này đồng thời cũng cho thấy ảnh hưởng của số anten trạm cơ sở và số người dùng lên dung năng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. K. Guna Sundari, K.Jayanthi, R. Gunasundari, "Priority Dynamic Multitrafic Scheduler For

Downlink in LTE", IEEE Conference on Electronics and Communications System (ICECS), 2015

2. Thomas L. Marzetta, "How much Training is Required for Multiuser MIMO?," IEEE Fortieth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers - Pacific Grove, CA, USA, 2006.

3. Hong Yang and Thomas L. Marzetta, "A Macro Cellular Wireless Network with Uniformly High User Throughputs," IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall) - Vancouver, BC, Canada, 2014.

4. Hei Victor Cheng, Emil Björnson, and Erik G. Larsson, "Sweden Uplink Pilot and Data Power Control for Single Cell Massive MIMO Systems with MRC," IEEE International Symposium on Wireless Communication Systems - Brussels, Belgium, 2015.

5. Hien Quoc Ngo, Matthaiou, M., & G. Larsson, E. "Massive MIMO with Optimal Power and Training Duration Allocation," IEEE Wireless Communications Letters, vol. 3, no. 6, pp.605-608, 2014.

6. Thomas L. Marzetta, Erik G. Larsson, Hong Yang, Hien Quoc Ngo, "Fundamentals of Massive MIMO," Cambridge University Press 2016.

SUMMARY

DOWNLINK POWER CONTROL FOR UNIFORM USER CAPACITY IN SINGLE CELL MASSIVE MIMO SYSTEM

Thi Quynh Trang Pham¹, Anh Vu Trinh^{2*}, Trung Nghia Phung³

¹Hanoi University of Industry

²University of Engineering and Technology -VNU Hanoi

³University of Information Technology - TNU

This paper proposes a power allocation design for the single-cell massive MIMO downlink, which guarantees uniform capacity among users under a total power constraint, and hence improve the users' fairness based on the analyzed capacity. The power control factor for each user is derived in closed-form expression, which is inversely proportional to the channel attenuation (path loss). Compared with the existing algorithms, the proposed power control achieves much less complexity. Moreover, some basic relations are also derived for the system design. Numerical results demonstrate the effectiveness of the proposed algorithm.

Keywords: Massive MIMO, Downlink Control Algorithm, Channel Attenuation, Uniform Distribution, Uniform Capacity

Ngày nhận bài: 06/10/2017; Ngày phản biện: 09/11/2017; Ngày duyệt đăng: 30/11/2017

* Tel: 0915 509358, Email: anhtrinhvu1811@gmail.com