

HIỆU QUẢ SỬ DỤNG NĂNG LƯỢNG CỦA HỆ THỐNG FD-MIMO TRONG MẠNG 5G

Nguyễn Thị Thanh Hương*, Trương Trung Kiên**

* Phòng thí nghiệm Hệ thống Vô tuyến và Ứng dụng

+ Bộ môn Xử lý Tín hiệu và Truyền thông, Khoa Kỹ thuật Điện tử I

Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông

Tóm tắt—Việc sử dụng hợp lý rất nhiều ăngten ở trạm gốc để phục vụ đồng thời nhiều thuê bao tạo ra một sự đột phá về tốc độ dữ liệu trong mạng thông tin di động. Hệ thống này có tên gọi FD-MIMO (Full-Dimension Multiple-Input Multiple-Output) và đã được lựa chọn là một ứng cử cho mạng thông tin di động thế hệ 5 (5G). Tuy nhiên, đa số các bài báo có liên quan tập trung vào hoặc tăng tổng dung lượng truyền tin với một công suất tiêu thụ cố định hoặc khả năng giảm công suất tiêu thụ nhưng vẫn đảm bảo tổng dung lượng truyền tin cho trước. Một số ít bài báo nghiên cứu hiệu quả sử dụng năng lượng của hệ thống này nhưng chủ yếu cho mô hình đơn cell, do đó bỏ qua một số tính chất quan trọng của hệ thống như nhiều tín hiệu hoa tiêu. Trong bài báo này, chúng tôi đề xuất một phương pháp mới để phân tích hiệu quả sử dụng năng lượng của hệ thống FD-MIMO và với nhiều cell hoạt động trên cùng băng tần. Các kết quả tính toán số cho phép chúng tôi đưa ra những nhận xét thú vị về cách làm tăng hiệu quả sử dụng năng lượng của hệ thống này.

Từ khóa—Mạng 5G, hiệu quả sử dụng năng lượng, hệ thống MIMO cỡ rất lớn, hệ thống MIMO với rất nhiều ăngten ở trạm gốc, thông tin "xanh".

I. GIỚI THIỆU

Mạng thông tin di động thế hệ 5 (5G) vẫn đang trong giai đoạn hình thành, một trong những mục tiêu thiết kế quan trọng nhất vẫn là tiếp tục tăng tốc độ dữ liệu. Thông tin đa đầu vào đa đầu ra

Tác giả liên hệ: Trương Trung Kiên, email: kientt@ptit.edu.vn. Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển Khoa học và Công nghệ Quốc gia (NAFOSTED) trong đề tài mã số 102.02-2013.09. Một phần kết quả của bài báo này đã được trình bày tại Hội thảo ECIT'2015.

Đến tòa soạn: 11/12/2016, chỉnh sửa: 30/12/2016, chấp nhận đăng: 30/01/2017.

(MIMO - Multiple-Input Multiple-Output) là một trong những kỹ thuật thông tin quan trọng hướng tới mục tiêu trên thông qua việc sử dụng nhiều ăng-ten ở trạm phát và/hoặc máy thu. Tuy nhiên, thực tế là các hệ thống di động tế bào thế hệ thứ 4 (4G) trở về trước vẫn chưa đạt được mức tốc độ cao mà công nghệ MIMO hứa hẹn do mối xem xét sử dụng số lượng ăng-ten chưa lớn [1]. Ví dụ trong hệ thống 3GPP LTE/LTE-Advanced (hay 4G), mỗi trạm gốc có tối đa 8 ăngten trong khi thiết bị người dùng có tối đa 4 ăngten. Tăng số ăng-ten ở trạm gốc để phục vụ đồng thời nhiều thuê bao hơn trên cùng một tài nguyên vô tuyến là một hướng nghiên cứu hứa hẹn để phát huy hết khả năng của kỹ thuật MIMO trong các hệ thống di động tế bào [2]. Trong khuôn khổ bộ tiêu chuẩn 3GPP LTE-Advanced Pro (từ Phiên bản 13 trở đi hay mạng 5G), kỹ thuật FD-MIMO đã được lựa chọn là một trong các công nghệ ứng cử để tăng tốc độ dữ liệu. Cụ thể, bằng việc sử dụng hàng chục hay thậm chí hàng trăm ăngten ở từng trạm gốc và sử dụng phương pháp truyền dẫn MIMO đa người dùng (MU-MIMO - Multiple-User MIMO) để phục vụ đồng thời hàng chục người dùng [2], kỹ thuật FD-MIMO có tiềm năng tăng tốc độ dữ liệu tổng cộng của mạng 5G lên nhiều lần.

Đa phần các bài báo trước đây khi nghiên cứu các hệ thống thông tin MIMO với rất nhiều ăngten ở trạm gốc thường tập trung vào hoặc khả năng cải thiện tổng dung lượng truyền tin với một công suất tiêu thụ cố định [2]–[4] hoặc khả năng giảm công suất tiêu thụ những vẫn đảm bảo tổng dung lượng truyền tin cho trước [5]. Trong thực tế, một cách tiếp cận để dung hoà hai mục tiêu thiết kế có phần mâu thuẫn nhau này là tối đa hoá tỷ số hiệu quả sử dụng năng lượng của hệ thống. Theo định nghĩa, hiệu quả sử dụng năng lượng của một hệ thống

thông tin là tỷ số giữa tổng dung lượng thông tin được truyền đi trên tổng công suất tiêu thụ tương ứng. Trong khả năng hiểu biết của chúng tôi, đến nay có khá ít bài báo đã nghiên cứu hiệu quả sử dụng năng lượng của hệ thống thông tin MIMO với rất nhiều ăngten ở trạm gốc [6]–[9]. Bài báo [6] so sánh hiệu quả sử dụng hiệu quả năng lượng giữa hệ thống MIMO với nhiều ăngten ở trạm gốc và hệ thống sử dụng cell cỡ nhỏ. Tuy nhiên, bài báo này mới chỉ tính đến công suất tiêu thụ liên quan đến bức xạ tín hiệu. Bài báo [7] đề xuất một mô hình công suất tiêu thụ mới không chỉ bao gồm công suất phát trên bộ khếch đại công suất mà còn là công suất tiêu thụ mạch bởi các thành phần của trạm gốc và bởi các thiết bị tương tự. Từ mô hình mới đưa ra được công thức tính hiệu quả năng lượng, sau đó xác định được số ăngten cần thiết để mang lại hiệu quả năng lượng cho hệ thống MIMO cỡ rất lớn. Tuy nhiên, mô hình công suất tiêu thụ sử dụng trong bài báo [7] khá đơn giản và chưa phản ánh được các đặc trưng riêng của truyền dẫn MIMO đa người dùng. Các bài báo [8], [9] đề xuất một mô hình công suất tiêu thụ thực tế hơn và có khả năng phản ánh cơ chế xử lý tín hiệu và truyền dẫn MIMO đa người dùng để nghiên cứu hiệu quả sử dụng năng lượng của hệ thống MIMO đơn cell với nhiều ăngten ở trạm gốc. Việc xem xét chỉ một cell duy nhất bỏ qua một số tính chất quan trọng của hệ thống này như nhiều tín hiệu hoa tiêu và nhiều liên cell khi truyền dữ liệu.

Trong bài báo này, chúng tôi xem xét hệ thống thông tin MIMO với rất nhiều ăngten ở trạm gốc và với nhiều cell hoạt động trên cùng một băng tần. Chúng tôi giả thiết hệ thống này hoạt động ở chế độ song công phân chia theo thời gian (TDD - Time Division Duplexing) trong đó trạm gốc ước lượng các hệ số kênh truyền dựa trên tín hiệu hoa tiêu ở đường lên. Chúng tôi giả thiết trạm gốc sử dụng mã trước truyền tỷ số cực đại (MRT - Maximal Ratio Transmission) để truyền dữ liệu ở đường xuống. Đóng góp chính của chúng tôi trong bài báo này là đề xuất một phương pháp mới để phân tích hiệu quả sử dụng năng lượng của hệ thống trên bằng cách sử dụng các tiếp cận tìm giá trị tối định tương đương và một mô hình

công suất tiêu thụ được sửa đổi từ mô hình đề xuất trong các bài báo [8], [9]. Kết quả phân tích cho ra một giá trị xấp xỉ của hiệu quả sử dụng năng lượng của hệ thống dưới dạng một hàm số của một số tham số hệ thống như hệ số pha đỉnh phạm vi lớn, số ăngten ở trạm gốc, số thuê bao trong mỗi cell, công suất tiêu thụ của mỗi phần tử trong mạng. Kết quả mô phỏng số cho phép chúng tôi có một số nhận xét quan trọng về ảnh hưởng của các tham số hệ thống lên hiệu quả sử dụng năng lượng của hệ thống. Ví dụ, khi cố định số thuê bao trong một cell, tồn tại một giá trị số ăngten trên trạm gốc tối ưu. Đáng chú ý là giá trị tối ưu này nằm trong giới hạn cho phép của các công nghệ chế tạo ăngten hiện nay. Bên cạnh đó, khi cố định số ăngten trên trạm gốc, tăng số thuê bao trong một cell có thể góp phần làm tăng hiệu quả sử dụng năng lượng. Chú ý rằng, một phần kết quả của bài báo này đã được trình bày trong [10]. Tuy nhiên, [10] chỉ tập trung vào truyền dẫn ở đường xuống trong khi bài báo này nghiên cứu truyền dẫn ở cả đường lên và đường xuống. Ngoài ra, so với [10], bài báo này cung cấp thêm các kết quả mô phỏng mới và từ đó có những quan sát và nhận xét mới về hiệu quả sử dụng năng lượng của hệ thống thông tin MIMO sử dụng nhiều ăng-ten ở trạm gốc.

Các mục còn lại của bài báo được tổ chức như sau. Mục II mô tả mô hình hệ thống và quá trình dò và ước lượng kênh của hệ thống. Mục III phân tích lượng dữ liệu tổng cộng có thể truyền được và tổng công suất tiêu thụ tương ứng trong một khung truyền dẫn để từ đó phân tích hiệu quả sử dụng năng lượng của hệ thống. Mục IV cung cấp kết quả mô phỏng và tính toán số để kiểm chứng kết quả phân tích. Cuối cùng, mục V đưa ra một số kết luận và hướng nghiên cứu tiếp theo.

Quy ước ký hiệu toán học: Các ký tự thường viết nghiêng (ví dụ, a) ký hiệu các giá trị vô hướng, các ký tự được tô đậm thường (ví dụ, \mathbf{h}) ký hiệu các vector trong khi các ký tự được tô đậm và in hoa (ví dụ, \mathbf{H}) ký hiệu các ma trận. \mathbf{I}_N và $\mathbf{0}_N$ ký hiệu ma trận đơn vị và ma trận toàn giá trị không với kích thước $N \times N$. Đối với ma trận \mathbf{A} thì \mathbf{A}^T là ma trận nghịch đảo, \mathbf{A}^* là ma trận chuyển vị liên hợp phức, và $\text{tr}(\mathbf{A})$ là vết của ma trận. $\mathbb{E}[\cdot]$ ký hiệu phép toán kỳ vọng thống kê.

II. MÔ HÌNH HỆ THỐNG

Xét một mạng thông tin di động tế bào dựa trên TDD FD-MIMO với C cell, hay ô tế bào. Mỗi cell có một trạm gốc với N_t ăngten để phục vụ đồng thời cho U người dùng được phân bố một cách ngẫu nhiên trong cùng cell, trong đó $N_t \gg U$. Các cell và trạm gốc được đánh số bởi tập $\mathcal{C} = \{1, 2, \dots, C\}$. Người dùng trong cell $c \in \mathcal{C}$ được đánh số bởi tập $\mathcal{U}_c = \{1, 2, \dots, U\}$. Thiết bị đầu cuối người dùng sử dụng chỉ có một ăngten. Giả thiết rằng hệ thống hoạt động ở chế độ TDD trong đó truyền dẫn ở đường lên và đường xuống ở tất cả các cell dùng chung một băng tần. Giả thiết rằng tất cả các truyền dẫn được đồng bộ cả về cấu trúc khung, về thời gian và về tần số.

Giả thiết mô hình kênh pha đỉnh khối cận tĩnh trong đó các hệ số kênh truyền được coi như không thay đổi trong mỗi khối tài nguyên thời gian-tần số có kích thước $\tau_t = B_C T_C$ lần sử dụng kênh, trong đó B_C (Hz) là độ rộng băng thông kết hợp và T_C (giây) là thời gian kết hợp của kênh truyền, và $\tau_t > U$. Bên cạnh đó, giả thiết rằng các khung truyền dẫn được đồng bộ trên toàn mạng và ứng với các khối tài nguyên thời gian-tần số. Giả thiết rằng một khung bao gồm τ_p lần sử dụng kênh để truyền tín hiệu hoa tiêu ở đường lên, τ_{dd} lần sử dụng dụng kênh để truyền dữ liệu đường xuống và τ_{du} lần sử dụng dụng kênh để truyền dữ liệu đường lên, trong đó $\tau_p + \tau_{dd} + \tau_{du} = \tau_t$, $\tau_p \geq U$, $\tau_{dd} \geq 0$ và $\tau_{du} \geq 0$.

Ký hiệu $\mathbf{h}_{bcu} \in \mathbb{C}^{N_t \times 1}$ là vector hệ số kênh truyền đường lên từ thuê bao $u \in \mathcal{U}_c$ tới trạm gốc $b \in \mathcal{C}$. Bài báo này xem xét mô hình kênh truyền không tương quan về không gian [2], [3]

$$\mathbf{h}_{bcu} = \beta_{bcu}^{1/2} \mathbf{g}_{bcu} \quad (1)$$

trong đó $\mathbf{g}_{bcu} \in \mathbb{C}^{N_t \times 1}$ là vector hệ số kênh truyền pha đỉnh nhanh và β_{bcu} là giá trị tất định biểu diễn hệ số kênh truyền pha đỉnh phạm vi lớn bao gồm các hiệu ứng như suy hao đường truyền, che khuất và suy hao xuyên tường. Giả thiết rằng các hệ số của \mathbf{g}_{bcu} là độc lập thống kê và cùng tuân theo phân bố chuẩn, tức là $\mathbf{g}_{bcu} \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \mathbf{I}_{N_t})$. Chúng tôi cũng giả thiết kênh đường lên và kênh đường xuống có tính chất thuận nghịch (reciprocity) hoàn

hảo. Để tiện viết các biểu thức toán học, giả thiết $\mathbf{h}_{bcu}^* \in \mathbb{C}^{1 \times N_t}$ là vector hệ số kênh truyền đường xuống từ trạm gốc $b \in \mathcal{C}$ tới thuê bao $u \in \mathcal{U}_c$. Ký hiệu $\mathbf{H}_{bc} = [\mathbf{h}_{bc1} \ \mathbf{h}_{bc2} \ \dots \ \mathbf{h}_{bcU}] \in \mathbb{C}^{N_t \times U}$ là ma trận kênh đường lên tổng hợp từ tất cả các thuê bao trong cell $c \in \mathcal{C}$ tới trạm gốc $b \in \mathcal{C}$. Khi đó, \mathbf{H}_{bc}^* là ma trận kênh đường xuống tổng hợp.

Trong giai đoạn đào tạo và ước lượng kênh truyền, các thiết bị đầu cuối trong cùng một cell truyền các tín hiệu hoa tiêu tương hỗ trực giao từng cặp ở đường lên [2], [11]–[13]. Giả thiết toàn mạng dùng cùng một tập tín hiệu hoa tiêu. Các trạm gốc ước lượng các hệ số kênh truyền tức thời dựa trên tín hiệu hoa tiêu này để sử dụng khi truyền dữ liệu trong các lần sử dụng kênh còn lại của khung. Ký hiệu các biến trung gian sau

$$\theta_{bu} = \frac{\sigma^2}{p_p \tau_p} + \sum_{c=1}^C \beta_{bcu} \quad (2)$$

$$\xi_{bcu} = \frac{\beta_{bbu} \beta_{bcu}}{\theta_{bu}}. \quad (3)$$

Mỗi trạm gốc b sử dụng phương pháp ước lượng kênh sai số trung phương nhỏ nhất (MMSE - Minimum Mean Squared Error) để thu được một ước lượng sau của \mathbf{h}_{bbu} [2], [3]

$$\hat{\mathbf{h}}_{bbu} = \frac{\beta_{bbu}}{\theta_{bu}} \left(\mathbf{h}_{bbu} + \sum_{c \neq b} \mathbf{h}_{bcu} + \tilde{\mathbf{z}}_{p,b} \right). \quad (4)$$

Chú ý rằng $\hat{\mathbf{h}}_{bbu} \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \xi_{bbu} \mathbf{I}_{N_t})$. Sai số ước lượng kênh được cho bởi $\tilde{\mathbf{h}}_{bbu} = \mathbf{h}_{bbu} - \hat{\mathbf{h}}_{bbu}$ trong đó $\tilde{\mathbf{h}}_{bbu} \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, (\beta_{bbu} - \xi_{bbu}) \mathbf{I}_{N_t})$. Do tính chất trực giao của phương pháp ước lượng MMSE, $\hat{\mathbf{h}}_{bbu}$ và $\tilde{\mathbf{h}}_{bbu}$ không tương quan với nhau. Thêm vào đó, vì cả $\hat{\mathbf{h}}_{bbu}$ và $\tilde{\mathbf{h}}_{bbu}$ tuân theo phân bố Gauss, nên hai vector này độc lập tương hỗ. Chú ý rằng mỗi thiết bị đầu cuối chỉ có thông tin thống kê về trạng thái kênh truyền giữa thiết bị đó và trạm gốc trong cùng cell.

III. HIỆU QUẢ SỬ DỤNG NĂNG LƯỢNG

Không mất tính tổng quát, hiệu quả sử dụng năng lượng sẽ được tính toán dựa trên lượng dữ liệu tổng cộng được truyền trong một khung truyền dẫn và công suất tiêu thụ tương ứng. Giả thiết rằng các phần tử thiết bị tương đương ở các

trạm gốc có giá trị tham số hoạt động giống nhau. Tương tự, giả thiết rằng các phần tử thiết bị tương đương ở các thiết bị đầu cuối cũng có giá trị tham số hoạt động giống nhau.

A. Phân tích tổng tốc độ dữ liệu đạt được

1) *Truyền dữ liệu ở đường xuống*: Ký hiệu $x_{f,bu}$ là dữ liệu mà trạm gốc $b \in \mathcal{C}$ truyền cho thuê bao $u \in \mathcal{U}_b$ trong một lần sử dụng kênh, với $\mathbb{E}[x_{f,bu}] = 0$ và $\mathbb{E}[|x_{f,bu}|^2] = 1$. Trạm gốc $b \in \mathcal{C}$ sử dụng ma trận tiền mã hoá $\mathbf{f}_{bu} \in \mathbb{C}^{N_t \times 1}$ để ánh xạ $x_{f,bu}$ tới các ăngten phát. Ký hiệu $z_{bu} \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_f^2)$ là tạp âm Gauss trắng cộng tại thuê bao $u \in \mathcal{U}_b$. Ký hiệu các trạm gốc sử dụng công suất phát trung bình như nhau và ký hiệu là p_f . Thuê bao $u \in \mathcal{U}_b$ nhận được tín hiệu sau

$$y_{f,bu} = \sqrt{p_f} \sum_{c=1}^C \sum_{k=1}^U \sqrt{\lambda_c} \mathbf{h}_{cbu}^* \mathbf{f}_{ck} x_{f,ck} + z_{f,bu} \quad (5)$$

trong đó λ_b là hệ số chuẩn hoá ứng với giới hạn công suất phát trung bình và được tính như sau

$$\lambda_b = \frac{1}{\sum_{u=1}^U \mathbb{E}[\mathbf{f}_{bu}^* \mathbf{f}_{bu}]}. \quad (6)$$

Trong bài báo này, giả thiết rằng các trạm gốc sử dụng ma trận tiền mã hoá MRT. Ma trận tiền mã hoá này được thiết kế dựa trên ước lượng kênh tương ứng, tức là $\mathbf{f}_{bu} = \hat{\mathbf{h}}_{bbu}$ với mọi $b \in \mathcal{C}$ và $u \in \mathcal{U}_b$. Chúng tôi cũng sử dụng phương pháp tính giá trị tương đương tất định (deterministic equivalence) được sử dụng rộng rãi như trong [3], [4] để tìm giá trị xấp xỉ của tỷ số công suất tín hiệu trên công suất nhiễu và tạp âm (SINR - Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio) đường xuống ứng với thuê bao $u \in \mathcal{U}_b$. Ký hiệu một số biến trung gian sau:

$$\bar{\lambda}_b = \left(\sum_{k=1}^U \xi_{bbk} \right)^{-1} \quad (7)$$

$$A_{bu} = \bar{\lambda}_b \xi_{bbu}^2 \quad (8)$$

$$B_{bu}(\tau_p) = \sum_{c \neq b} \bar{\lambda}_c \xi_{bcu}^2 \quad (9)$$

$$C_{bu}(\tau_p) = \frac{\sigma_f^2}{p_f} + \sum_{(c,k) \neq (b,u)} \bar{\lambda}_c \beta_{bck} \xi_{bbu}. \quad (10)$$

Giá trị SINR tương đương tất định ứng với thuê bao $u \in \mathcal{U}_b$ dưới đây được tính bằng cách thay thế $\mathbf{R}_{bcu} = \beta_{bcu} \mathbf{I}_{N_t}$ vào Định lý 5 trong [3] và sử dụng một số biến đổi toán học cơ bản

$$\bar{\eta}_{f,bu} = \frac{A_{bu} N_t}{B_{bu} N_t + C_{bu}}. \quad (11)$$

Giá trị tất định tương đương của lượng dữ liệu đường xuống đạt được (tính theo bits/s) trong một khung truyền dẫn ứng với thuê bao $u \in \mathcal{U}_b$ là

$$\bar{R}_{f,bu} = \tau_{dd} \log_2 [1 + \bar{\eta}_{f,bu}]. \quad (12)$$

2) *Truyền dữ liệu ở đường lên*: Ký hiệu $x_{r,bu}$ là dữ liệu mà thuê bao $u \in \mathcal{U}_b$ truyền cho trạm gốc $b \in \mathcal{C}$ trong một lần sử dụng kênh với $\mathbb{E}[x_{r,bu}] = 0$ và $\mathbb{E}[|x_{r,bu}|^2] = 1$. Ký hiệu $\mathbf{z}_b \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \sigma_r^2 \mathbf{I}_{N_t})$ là tạp âm Gauss trắng cộng tại trạm gốc $b \in \mathcal{C}$. Giả thiết các thiết bị đầu cuối có công suất phát trung bình như nhau và ký hiệu là p_r . Trạm gốc $b \in \mathcal{C}$ sử dụng một ma trận thu tuyến tính MRC có dạng $\mathbf{w}_{bu} = \hat{\mathbf{h}}_{bbu} \in \mathbb{C}^{N_t \times 1}$ để xử lý và thu được tín hiệu sau đây để tách sóng $x_{r,bu}$

$$y_{r,bu} = \sqrt{p_r} \sum_{c=1}^C \sum_{k=1}^U \mathbf{w}_{bu}^* \mathbf{h}_{cbu}^* \mathbf{f}_{ck} x_{f,ck} + \mathbf{z}_{r,b}. \quad (13)$$

Ký hiệu các biến trung gian độc lập với N_t sau

$$A_{r,bu} = \xi_{bbu}^2 \quad (14)$$

$$B_{r,bu} = \sum_{c \neq b} \xi_{bcu}^2 \quad (15)$$

$$C_{r,bu} = \frac{\sigma_r^2}{p_r} + \sum_{(c,k) \neq (b,u)} \beta_{bck} \xi_{bbu} \quad (16)$$

Thay $\mathbf{R}_{bcu} = \beta_{bcu} \mathbf{I}_{N_t}$ vào Định lý 3 của [3] và sau một số biến đổi toán học cơ bản, chúng tôi thu được giá trị tất định tương đương của SINR ứng với thuê bao $u \in \mathcal{U}_b$ như sau

$$\bar{\eta}_{r,bu} = \frac{A_{r,bu} N_t}{B_{r,bu} N_t + C_{r,bu}}. \quad (17)$$

Giá trị tất định tương đương của lượng dữ liệu đường lên đạt được (tính theo bits/s) trong một khung truyền dẫn ứng với thuê bao $u \in \mathcal{U}_b$ là

$$\bar{R}_{r,bu} = \tau_{du} \log_2 [1 + \bar{\eta}_{r,bu}]. \quad (18)$$

3) *Lượng dữ liệu tổng cộng*: Giá trị tất định tương đương của lượng dữ liệu tổng cộng của cell b được truyền trong một khung truyền dẫn là

$$\bar{R}_b = \sum_{u=1}^U (\bar{R}_{f,bu} + \bar{R}_{r,bu}). \quad (19)$$

B. Phân tích tổng công suất tiêu thụ

Phần này phân tích các thành phần công suất tiêu thụ chính của hệ thống trong một khung truyền dẫn. Cụ thể, trong bài báo này, chúng tôi đề xuất áp dụng một phiên bản sửa đổi của mô hình công suất tiêu thụ của trong hệ thống truyền dẫn MIMO đa người dùng được đề xuất trong [9].

1) *Công suất bức xạ sóng điện từ* được ký hiệu là P_{RP} . Ký hiệu η_{BS} và η_{UE} là hiệu suất của bộ khuếch đại công suất tương ứng tại trạm gốc và tại thiết bị đầu cuối, trong đó $0 < \eta_{BS}, \eta_{UE} \leq 1$. Khi đó, ta có

$$P_{RP} = \frac{U p_p \tau_p}{\eta_{UE}} + \frac{p_f \tau_{dd}}{\eta_{BS}} + \frac{U p_r \tau_{du}}{\eta_{UE}} \quad (20)$$

trong đó các số hạng lần lượt là công suất bức xạ để truyền tín hiệu hoa tiêu, để truyền dữ liệu đường xuống và để truyền dữ liệu đường lên.

2) *Công suất tiêu thụ của chuỗi thu phát* (transceiver chains) được ký hiệu là P_{TC} . Ký hiệu P_{BS} và P_{UE} là công suất tiêu thụ của tất cả các phần tử mạch điện tử dành riêng cho một anten tương ứng ở trạm gốc và ở thiết bị đầu cuối. Chú ý rằng cả P_{BS} và P_{UE} không phụ thuộc vào N_t, U và tốc độ dữ liệu. Do các anten đều hoạt động trong cả khung truyền dẫn nên ta có [14]

$$P_{TC} = N_t P_{BS} + U P_{UE} \quad (W) \quad (21)$$

3) *Công suất tiêu thụ trong quá trình ước lượng kênh* (channel estimation) được ký hiệu là P_{CE} . Ký hiệu L_{BS} và L_{UE} là hiệu suất tính toán ở dạng số các phép toán giá trị phức trên Joule (hay số flop/Watt) tại trạm gốc và tại thiết bị đầu cuối. Khi ước lượng kênh truyền, trạm gốc b thực hiện phép nhân ma trận $\mathbf{Y}_{p,b} \in \mathbb{C}^{N_t \times \tau_p}$ với $\psi_u \in \mathbb{C}^{\tau_p \times 1}$. Đây là một phép tính đại số tuyến tính thông thường và được thực hiện một lần trong mỗi khung truyền dẫn. Như vậy, ta có

$$P_{CE} = \frac{2UN_t\tau_p}{L_{BS}} \quad (W). \quad (22)$$

4) *Công suất tiêu thụ của các khối mã hoá và giải mã kênh* trong cell $b \in \mathcal{C}$ được ký hiệu là $P_{C/D,b}$. Ký hiệu P_{CD} là tổng công suất tiêu thụ (tính theo Watt/bit) để mã hoá và giải mã một bit thông tin. Khi đó, ta có

$$P_{C/D,b} = P_{CD} R_b \quad (W). \quad (23)$$

5) *Công suất tiêu thụ để truyền dữ liệu đường trực* ứng với cell b được ký hiệu là P_{BT} . Ký hiệu P_{BT} là công suất tiêu thụ (tính theo Watt/bit) để truyền 1 bit dữ liệu qua đường trực. Khi đó, ta có

$$P_{BH,b} = P_{BT} R_b \quad (W). \quad (24)$$

6) *Công suất tiêu thụ của quá trình xử lý tín hiệu tuyến tính* được ký hiệu là P_{LP} . Trạm gốc thực hiện hai hoạt động xử lý tín hiệu tuyến tính sau: i) xác định ma trận tiền mã hoá/ma trận thu và ii) nhân vector ký hiệu cần truyền với ma trận tiền mã hoá hoặc nhân tín hiệu thu được với ma trận thu. Chú ý rằng hoạt động đầu tiên chỉ được thực hiện một lần trong mỗi khung trong khi đó hoạt động thứ hai được thực hiện cho mỗi lần sử dụng kênh trong quá trình truyền dữ liệu. Vì vậy, P_{LP} có thể được tính như sau [9]

$$P_{LP} = \frac{3N_t U}{L_{BS}} + (\tau_t - \tau_p) \frac{2N_t U}{L_{BS}} \quad (W). \quad (25)$$

7) *Công suất tiêu thụ cố định* được ký hiệu là $P_{FIX}(W)$. Công suất này thường được dành cho việc làm mát nhà trạm, báo hiệu điều khiển và bộ xử lý băng tần gốc.

8) *Công suất tiêu thụ tổng cộng* trong cell b được ký hiệu là P_b và được tính toán bằng tổng của tất cả thành phần công suất tiêu thụ chính đã nêu ở trên. Cụ thể, ta có

$$P_b = P_{RP} + P_{TC} + P_{CE} + P_{C/D,b} + P_{BH,b} + P_{LP} + P_{FIX}. \quad (26)$$

Thay thế R_b trong (23) and (24) bởi giá trị tất định tương đương \bar{R}_b và thay thế các kết quả nhận được vào (26), chúng tôi nhận được \bar{P}_b là giá trị tất định tương đương của công suất tiêu thụ tổng cộng ứng với cell b .

P_{LP} có thể được tính như sau [9]

$$P_{LP} = \frac{3N_t U}{L_{BS}} + (\tau_t - \tau_p) \frac{2N_t U}{L_{BS}} \text{ (W)}. \quad (25)$$

7) Công suất tiêu thụ cố định được ký hiệu là $P_{FIX}(W)$. Công suất này thường được dành cho việc làm mát nhà trạm, báo hiệu điều khiển và bộ xử lý băng tần gốc.

8) Công suất tiêu thụ tổng cộng trong cell b được ký hiệu là P_b và được tính toán bằng tổng của tất cả thành phần công suất tiêu thụ chính đã nêu ở trên. Cụ thể, ta có

$$P_b = P_{RP} + P_{TC} + P_{CE} + P_{C/D,b} + P_{BH,b} + P_{LP} + P_{FIX}. \quad (26)$$

Thay thế R_b trong (23) and (24) bởi giá trị tất định tương đương \bar{R}_b và thay thế các kết quả nhận được vào (26), chúng tôi nhận được \bar{P}_b là giá trị tất định tương đương của công suất tiêu thụ tổng cộng ứng với cell b .

C. Hiệu quả sử dụng năng lượng

Hiệu quả sử dụng năng lượng của cell b được ký hiệu là EE_b và được tính bằng tỷ số giữa lượng dữ liệu tổng cộng được truyền đi thành công trong một khung truyền dẫn trên tổng công suất tiêu thụ tương ứng. Tức là $EE_b = \frac{\bar{R}_b}{\bar{P}_b}$ (bit/J). Vì vậy, giá trị tất định tương đương của hiệu quả sử dụng năng lượng của cell b được tính như sau

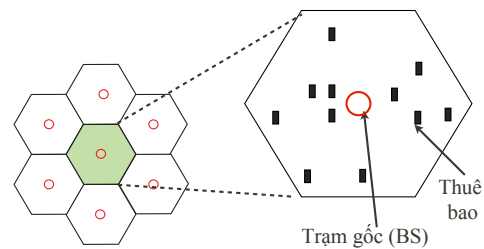
$$\overline{EE}_b = \frac{\bar{R}_b}{\bar{P}_b} \text{ (bit/J)}. \quad (27)$$

Chú ý rằng kết quả trong (27) khi $\tau_{du} = 0$ chính là kết quả trong [10]. Nói cách khác, kết quả phân tích hiệu quả năng lượng trong bài báo này là trường hợp tổng quát của kết quả trong [10]. Ngoài ra, nếu đặt $\tau_{dd} = 0$, ta sẽ thu được hiệu năng sử dụng năng lượng đường lên.

V. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ TÍNH TOÁN SỐ

Trong phần này, chúng tôi mô phỏng một mạng thông tin di động có 7 cell, mỗi cell có hình lục giác đều được bố trí như trong Hình 1. Trong đó, các trạm gốc được đặt ở trung tâm của cell và được miêu tả bằng hình tròn. Thuê bao có vị trí phân bố đều ngẫu nhiên trong diện tích của

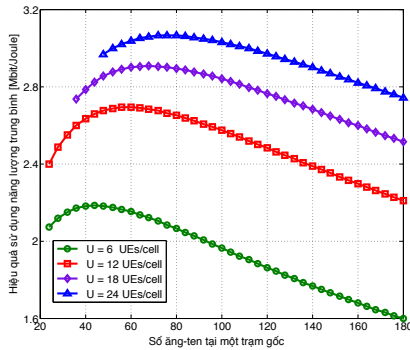
mỗi cell và được miêu tả bằng hình chữ nhật. Do đến thời điểm bài báo được gửi đăng, 3GPP vẫn chưa thống nhất bộ tham số cho hệ thống thông tin di động 5G phát triển trên nền LTE/LTE-Advanced. Vì vậy, chúng tôi có thể sử dụng một phần bộ tham số của hệ thống thông tin di động 4G LTE/LTE-Advanced khi xây dựng kịch bản mô phỏng. Ví dụ, mô hình suy hao đường truyền là $128,1 + 37,6 \log_{10}(d)$ với $d > 0,035\text{km}$ là khoảng cách truyền dẫn tính theo km. Bảng IV trình bày một số tham số hệ thống chính dùng trong mô phỏng. Chúng tôi sẽ khảo sát hiệu quả sử dụng năng lượng của cell trung tâm trong Hình 1.



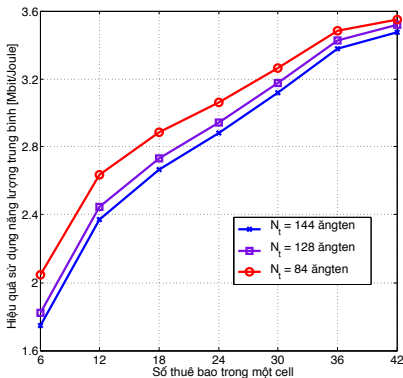
Hình 1. Mô hình mạng được mô phỏng gồm 7 cell.

Hình 2 trình bày kết quả mô phỏng hiệu quả sử dụng năng lượng của hệ thống MIMO sử dụng rất nhiều ăng-ten ở trạm gốc dưới dạng hàm số của N_t cho các giá trị khác nhau của $U \in \{6, 12, 18, 24\}$, $\tau_p = U$, $\tau_{dd} = \tau_{du} = (\tau_t - \tau_p)/2$. Từ các kết quả mô phỏng trên, chúng ta có thể có một số nhận xét như sau. Trước hết, với U cố định, hiệu quả sử dụng năng lượng của hệ thống là một hàm lồi của số ăng-ten tại trạm gốc. Điều này có thể giải thích dựa vào tốc độ tăng của tốc độ bit tổng cộng và của tổng công suất tiêu thụ khi tăng N_t . Chú ý rằng, tổng công suất tiêu thụ là một hàm tuyến tính bậc nhất của N_t . Trong khi đó, tốc độ bit tổng cộng là một hàm logarithm của N_t . Vì vậy, trong miền giá trị N_t nhỏ, khi tăng N_t , hiệu năng sử dụng năng lượng của hệ thống tăng gần như tuyến tính. Nếu tiếp tục tăng N_t , đến một thời điểm nhất định, tốc độ tăng của tốc độ bit tổng cộng sẽ chậm hơn tốc độ tăng của tổng công suất tiêu thụ, khiến cho hiệu quả sử dụng năng lượng của hệ thống bắt đầu giảm. Tiếp theo, với $U \in \{6, 12, 18, 24\}$, số ăng-ten tại trạm gốc tối ưu về hiệu quả sử dụng năng lượng tương ứng là

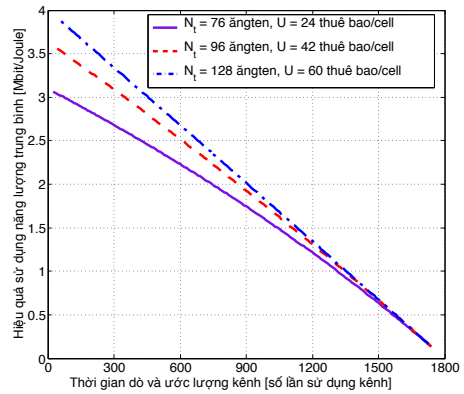
$N_t^* = \{44, 60, 68, 76\}$. Hiện nay, một số công ty đã triển khai thử nghiệm một số hệ thống thông tin di động MIMO có tới 128 ăngten nhằm mục đích nghiên cứu và thử nghiệm. Có thể nhận thấy, để tối ưu hiệu quả sử dụng năng lượng trong hệ thống MIMO sử dụng rất nhiều ăng-ten ở trạm ăngten và phục vụ đồng thời $U = 42$ thuê bao và iii) mỗi trạm gốc có $N_t = 128$ ăngten và phục vụ đồng thời $U = 60$ thuê bao. Giả thiết rằng $\tau_{dd} = \tau_{du} = (\tau_t - \tau_p)/2$. Có thể nhận thấy rằng hiệu quả sử dụng năng lượng của hệ thống giảm theo thời gian dò và ước lượng kênh. Điều này có nghĩa là thời gian dò và ước lượng kênh tối ưu bằng số thuê bao trong một cell. Nhận định này cũng phù hợp với việc sử dụng kênh hoa tiêu trực giao trong hệ thống thông tin MIMO cỡ rất lớn được mô phỏng.



Hình 2. Ảnh hưởng của số lượng ăng-ten tại trạm gốc lên hiệu quả sử dụng năng lượng trung bình với số thuê bao trong một cell cho trước.



Hình 3. Ảnh hưởng của số thuê bao trong một cell lên hiệu quả sử dụng năng lượng trung bình với số ăng-ten tại trạm gốc cho trước.



Hình 4. Ảnh hưởng của thời gian dò và ước lượng kênh (τ_p) lên hiệu quả sử dụng năng lượng trung bình với số ăng-ten tại trạm gốc và số thuê bao trong một cell cho trước.

V. KẾT LUẬN

Trong bài báo này, chúng tôi đề xuất một phương pháp phân tích hiệu quả sử dụng năng lượng của một hệ thống FD-MIMO đa cell. Phương pháp này dựa trên cách tiếp cận tìm giá trị tối định tương đương và một mô hình khá thực tế về công suất tiêu thụ trong mạng. Kết quả mô phỏng cho thấy với số thuê bao trong một cell cho trước, tồn tại một giá trị số ăngten trên trạm gốc tối ưu. Giá trị tối ưu này nằm trong giới hạn cho phép của các công nghệ chế tạo ăngten hiện nay. Bên cạnh đó, với số ăngten trên trạm gốc cho trước, tăng số thuê bao trong một cell có thể góp phần làm tăng hiệu quả sử dụng năng lượng. Một hướng nghiên cứu tiếp theo là xác định tìm cách xác định số ăngten tối ưu tại trạm gốc với số thuê bao trong một cell cho trước. Một hướng nghiên cứu khác là khảo sát hiệu quả năng lượng của các hệ thống FD-MIMO sử dụng các phương pháp xử lý tín hiệu tuyến tính phức tạp hơn.

LỜI CẢM ƠN

Cảm ơn Phòng thí nghiệm Hệ thống Vô tuyến và Ứng dụng, Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông đã hỗ trợ trong quá trình thực hiện bài báo này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] F. Rusek, D. Persson, B. K. Lau, E. G. Larsson, T. L. Marzetta, O. Edfors, and F. Tufvesson, "Scaling up MIMO: Opportunities and challenges with very large arrays," *IEEE Signal Processing Mag.*, vol. 30, no. 1, pp. 40–60, Jan. 2013.

- [2] T. L. Marzetta, "Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 9, no. 11, pp. 3590–3600, Nov. 2010.
- [3] J. Hoydis, S. ten Brink, and M. Debbah, "Massive MIMO in the UL/DL of cellular networks: How many antennas do we need?" *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 31, no. 2, pp. 160–171, February 2013.
- [4] K. T. Truong and R. W. Heath, Jr., "Effects of channel aging in massive MIMO systems," *J. Commun. Networks*, vol. 14, no. 4, pp. 338–351, Aug. 2013.
- [5] H. Q. Ngo, E. G. Larsson, and T. L. Marzetta, "Energy and spectral efficiency of very large multiuser MIMO systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 61, no. 4, pp. 1436–1449, Apr. 2013.
- [6] W. Liu, S. Han, C. Yang, and C. Sun, "Massive MIMO or small cell network: Who is more energy efficient?" in *Proc. of IEEE Wireless Commun. Networking Conf.*, Apr. 2013, pp. 24–29.
- [7] D. Ha, K. Lee, and J. Kang, "Energy efficiency analysis with circuit power consumption in massive MIMO systems," in *Proc. of IEEE Int. Symp. Personal Indoor Mobile Radio Commun.*, Sep. 2013, pp. 938–942.
- [8] E. Bjornson, J. Hoydis, M. Kountouris, and M. Debbah, "Massive MIMO systems with non-ideal hardware: Energy efficiency, estimation, and capacity limits," *IEEE Tran. Info. Theory*, vol. 60, no. 11, pp. 7112–7139, Nov. 2014.
- [9] E. Bjornson, L. Sanguinetti, J. Hoydis, and M. Debbah, "Optimal design of energy-efficient multi-user MIMO systems: Is massive MIMO the answer?" *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 14, no. 6, pp. 3059–3075, Jun. 2015.
- [10] L. Đ. Bằng, N. T. T. Hương và T. T. Kiên, "Hiệu quả sử dụng năng lượng của đường xuống trong hệ thống thông tin MIMO với rất nhiều anten ở trạm gốc," in *Kỷ yếu Hội thảo Quốc gia 2015 về Điện tử, Truyền thông và Công nghệ Thông tin (ECIT)*, 2015.
- [11] B. Hassibi and B. M. Hochwald, "How much training is needed in multiple-antenna wireless links?" *IEEE Trans. Info. Theory*, vol. 49, no. 4, pp. 951–963, Apr. 2003.
- [12] G. Caire, N. Jindal, M. Kobayashi, and N. Ravindran, "Multiuser MIMO achievable rates with downlink training and channel state feedback," *IEEE Trans. Info. Theory*, vol. 56, no. 6, pp. 2845–2866, Jun. 2010.
- [13] K. T. Truong, A. Lozano, and R. Heath, Jr., "Optimal training in continuous flat-fading massive MIMO systems," in *Proc. of IEEE European Wireless Conf.*, Barcelona, Spain, May 2014, pp. 1–6.
- [14] S. Cui, A. Goldsmith, and A. Babai, "Energy efficiency of MIMO and cooperative MIMO techniques in sensor networks," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 22, no. 6, pp. 1089–1098, 2004.

ENERGY EFFICIENCY OF FD-MIMO SYSTEMS IN 5G NETWORKS

Using properly a large number of antennas at the base station to serve simultaneously a smaller number of

users may make a breakthrough in data rates in cellular networks. This technology is often known as FD-MIMO (Full-Dimension Multiple-Input Multiple- Output) and has been chosen as one of the key candidate technologies for the fifth generation (5G) cellular networks. Much prior work on FD-MIMO, however, focused either on improving sum-rate for a given power consumption or on reducing power consumption under a constraint of minimum data rates. Some prior work considered energy efficiency of FD-MIMO systems but only for single-cell scenarios and hence ignored important properties like pilot contamination. In this paper, we propose a new method to analyze energy efficiency of a multi-cell FD-MIMO system. Numerical results give us interesting insights into how to maximize the energy efficiency of this system.



Nguyễn Thị Thanh Hương nhận bằng Thạc sĩ ngành Công nghệ Truyền thông tại Đại Học Waseda, Nhật Bản năm 2008 và bằng Kỹ sư ngành Điện tử Viễn thông tại Đại học Giao thông Vận tải Hà Nội năm 1998. Hiện tại, ThS Hương đang là nghiên cứu sinh và là thành viên của PTN Hệ thống Vô tuyến và Ứng dụng thuộc Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông. Hướng nghiên cứu hiện tại là hiệu quả sử dụng năng lượng của hệ thống FD-MIMO trong mạng 5G. ThS. Hương đã được trao giải thưởng Bài báo xuất sắc của Hội thảo Quốc gia 2015 về Điện tử, Truyền thông và Công nghệ Thông tin (ECIT).



Trương Trung Kiên nhận bằng Tiến sĩ và bằng Thạc sĩ ngành Điện tử Viễn thông tại Đại học Tổng hợp bang Texas cơ sở ở thành phố Austin, Texas, Hoa Kỳ lần lượt vào năm 2012 và 2008, nhận bằng Kỹ sư ngành Điện tử Viễn thông tại Đại học Bách khoa Hà Nội năm 2002. Hướng nghiên cứu hiện tại bao gồm một số công nghệ cho mạng 5G như hệ thống FD-MIMO, hệ thống thông tin ở dải bước sóng mm (mmWave) và hệ thống Internet kết nối vạn vật (Internet of Things). TS. Kiên đã được trao một số giải thưởng NCKH như Bài báo xuất sắc nhất năm 2013 của tạp chí EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking (JWCN), Bài báo xuất sắc nhất năm 2014 của tạp chí KICS Journal of Communications and Networks, và Bài báo xuất sắc của Hội thảo Quốc gia 2015 về Điện tử, Truyền thông và Công nghệ Thông tin (ECIT). TS. Kiên đang phụ trách PTN Hệ thống Vô tuyến và Ứng dụng thuộc Học viện Công nghệ Bưu chính viễn thông và là Thành viên Cao cấp (Senior Member) của IEEE.