

Nghiên cứu đánh giá hiệu suất phổ của một số kỹ thuật ước lượng kênh truyền trong hệ thống MIMO TDD cỡ lớn

Spectral Efficiency Evaluation for Channel Estimation Techniques in Massive MIMO Time Division Duplexing (TDD) System

Vương Hoàng Nam¹, Nguyễn Văn Sơn²

¹ Trường Đại học Bách khoa Hà Nội - Số 1, Đại Cồ Việt, Hai Bà Trưng, Hà Nội

² Viện Đại học Mở Hà Nội - B01 Phố Nguyễn Hiền, Bách Khoa, Hai Bà Trưng, Hà Nội

Tóm tắt

Ngày nay, cuộc cách mạng trong mạng di động tế bào đang diễn ra mạnh mẽ nhằm hướng tới thế hệ thông tin mới 5G. Một trong những kỹ thuật quan trọng trong 5G là sử dụng công nghệ MIMO cỡ lớn (massive Multiple-Input Multiple-Output, m-MIMO) nhằm làm tăng hiệu suất phổ và hiệu suất năng lượng lên nhiều lần so với các mạng LTE hiện tại. Trong hệ thống m-MIMO, các trạm gốc BS sẽ sử dụng số lượng rất lớn anten phục vụ đồng thời trong cùng một nguồn tài nguyên thời gian-tần số cho nhiều thiết bị đơn anten của người dùng. Ước lượng kênh truyền là yếu tố quan trọng trong m-MIMO nhằm cải thiện hiệu suất phổ và năng lượng. Trong quá trình huấn luyện đường lên, người dùng sẽ gửi các tín hiệu hoa tiêu (pilot) trực giao đã biết tới trạm gốc và trạm gốc dựa trên các tín hiệu thu được sẽ ước lượng kênh truyền. Trong bài báo, chúng tôi khảo sát các thuật toán ước lượng kênh cho hệ thống đa tế bào m-MIMO song công phân chia theo thời gian (TDD-Time Division Duplexing). Các mô phỏng trong bài báo được đánh giá dựa trên các kỹ thuật ước lượng kênh nhằm tìm ra phương pháp có hiệu suất phổ tốt nhất.

Từ khóa: Hiệu suất phổ, Kỹ thuật ước lượng kênh truyền, MIMO TDD cỡ lớn, tài nguyên thời gian- tần số.

Abstract

Today, a revolution in cellular network has been set in motion toward 5G. One of the key techniques for 5G is massive multiple-input multiple-output (m-MIMO) technology to achieve multiple orders of spectral and energy efficiency gains over current LTE networks. M-MIMO is a system where a base station (BS) with a large number of antennas simultaneously serves many user terminals, each having a single antenna, in the same time-frequency resource. Channel estimation is crucial for M-MIMO systems to provide significant improvement in spectral and energy efficiency. In uplink training the user sends orthogonal pilot signals that are known to the BS then the BS estimates the channel. In this paper, we study several channel estimation techniques in multi-cell massive MIMO time division duplex (TDD) systems. Simulations were performed for several channel estimation techniques in order to identify the best spectral efficiency.

Keywords: Spectral Efficiency, Channel Estimation Techniques, Massive MIMO TDD, time-frequency resource.

1. Đặt vấn đề

MIMO cỡ lớn (massive MIMO, m-MIMO) là kỹ thuật đẩy hứa hẹn giúp làm tăng hiệu suất phổ (Spectral Efficiency, bit/s/Hz/cell) của mạng di động tế bào bằng cách triển khai các mảng anten gồm hàng trăm (hàng ngàn) phần tử ở trạm gốc BS (Base Station) [1]. Một nguyên tắc cơ bản trong M-MIMO là số lượng anten của trạm BS thường lớn hơn rất nhiều so với số thiết bị người dùng UE (User Equipment) trong cell (tế bào). Thông thường, hệ thống m-MIMO hoạt động ở chế độ truyền song công phân chia theo thời gian TDD (Time Division Duplexing) sử dụng cùng tần số để truyền dữ liệu

theo đường lên UL (uplink) và đường xuống DL (downlink) ở các thời điểm khác nhau. Ở chế độ TDD, trong khoảng thời gian kết hợp (coherence time) kênh truyền được xem là ít thay đổi và tương đương cho cả hai hướng UL và DL. Dựa vào đặc điểm này, quá trình huấn luyện đường lên sẽ được sử dụng để đánh giá kênh truyền ở trạm gốc. Trong quá trình huấn luyện đường lên, UE sẽ gửi các chuỗi ký tự pilot (hoa tiêu) trực giao đã biết tới BS và BS dựa trên các tín hiệu thu được sẽ ước lượng kênh truyền. Một cách lý tưởng, nếu các chuỗi pilot của hai UE luôn trực giao thì việc đánh giá kênh truyền sẽ dễ dàng. Tuy nhiên số lượng chuỗi pilot trực giao luôn bị giới hạn do khoảng thời gian kết hợp T_c của kênh thường nhỏ [2]. Giả thiết mỗi chuỗi pilot gồm r_p ký tự. Điều đó có nghĩa ta chỉ tìm được nhiều nhất r_p

* Địa chỉ liên hệ: Tel: (+84) 912634666
Email: nam.vuonghoang@hust.edu.vn

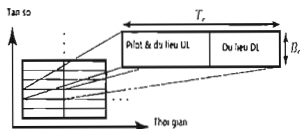
chuỗi pilot (mỗi chuỗi có độ dài τ_p ký tự) trực giao. Việc chọn chuỗi pilot có độ dài lớn hơn sẽ cho phép tạo ra tập chuỗi pilot lớn hơn nhưng phải trả giá bằng lượng dữ liệu truyền tải buộc phải giảm đi [3]. Điều đó dẫn tới việc phải tái sử dụng các pilot. Khi hai hoặc nhiều UE ở các cell liên kề sử dụng các chuỗi pilot không trực giao, hiệu tượng can nhiễu (interference) sẽ xảy ra gây ra lỗi khi ước lượng kênh truyền. Hiện tượng này được gọi là nhiễu hoa tiêu (pilot contamination).

Trong báo cáo này, chúng tôi khảo sát đánh giá một số phương pháp ước lượng kênh truyền m-MIMO thông qua các kịch bản mô phỏng. Kết quả đánh giá được dựa trên việc đánh giá hiệu suất phổ cũng như khối lượng tính toán của từng phương pháp.

2. Mô hình hệ thống

2.1 Giao thức truyền dữ liệu

Giao thức truyền cơ bản của m-MIMO TDD được thực hiện trong từng khối tài nguyên thời gian-tần số minh họa trong hình 1.



Hình 1. Khối tài nguyên thời gian - tần số trong m-MIMO TDD

Khối tài nguyên thời gian - tần số có kích cỡ B_c (Hz) và T_c (s). Số lượng ký tự (symbol) có thể truyền được trong khối sẽ là $\tau_c = B_c T_c$. Giả sử $B_c = 200 \text{ kHz}$ và $T_c = 1 \text{ ms}$ thì τ_c là khối tài nguyên gồm 200 ký tự.

Mỗi khối tài nguyên hoạt động ở chế độ TDD sẽ truyền tải cả dữ liệu đường lên và đường xuống. Để đánh giá kênh truyền ở trạm BS, τ_p ký tự trong khối sẽ được sử dụng để truyền chuỗi pilot (hoa tiêu) UL ($\tau_p \geq K$, K là số người dùng trong cell trạm BS), phần còn lại gồm $\tau_c - \tau_p = \tau_u + \tau_d$ ký tự sẽ được dùng truyền dữ liệu UL và DL (trong đó τ_u là số ký tự dùng truyền dữ liệu lên UL và τ_d là số ký tự dùng truyền dữ liệu xuống DL).

2.2 Ước lượng kênh bằng pilot

Ta giả thiết mạng m-MIMO đa cell sẽ gồm L cell, mỗi cell có 1 trạm BS. Trạm BS j sử dụng M_j anten và phục vụ cho K_j thiết bị người dùng đơn

anten. Đáp ứng kênh giữa trạm j và thiết bị người dùng UE i ở cell l sẽ có ký hiệu bằng $h_{l,i}^j = [h_{l,i}^{j,1} \quad h_{l,i}^{j,2} \quad \dots]^T \in \mathbb{C}^{M_j}$.

Kênh truyền cần được đánh giá tại BS j bằng cách để mỗi UE gửi một chuỗi pilot gồm τ_p ký tự. Chọn $\tau_p = fK_{\max}$, với K_{\max} là số người dùng tối đa trong một cell, f là số nguyên dương, được gọi là hệ số tái sử dụng pilot. Bằng cách này, không chỉ cho phép cung cấp đầy đủ chuỗi pilot cho các UE trong mỗi cell mà còn cung cấp đủ chuỗi pilot cho các UE trong tất cả L cell thông qua việc chia L cell thành f nhóm cell không gần nhau. Các cell liên kề sẽ không sử dụng các tập chuỗi pilot giống nhau.

Tập chuỗi pilot sử dụng trong bài báo xây dựng dựa trên ma trận biến đổi Fourier rời rạc [4] như sau:

$$\phi = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & \omega_{\tau_p} & \omega_{\tau_p}^2 & \dots & \omega_{\tau_p}^{\tau_p-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \omega_{\tau_p}^{\tau_p-1} & \omega_{\tau_p}^{2(\tau_p-1)} & \dots & \omega_{\tau_p}^{(\tau_p-1)^2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

với $\omega_{\tau_p} = e^{-j2\pi/\tau_p}$.

Mỗi trạm BS cần đánh giá kênh truyền từ các UE đang hoạt động trong khoảng thời gian kết hợp. Trạm BS j cần đánh giá kênh truyền từ các UE trong cell j . Mỗi UE truyền một chuỗi pilot τ_p mẫu. Chuỗi pilot của UE trong cell được ký hiệu bởi $\phi_{i,j} \in \mathbb{C}^{\tau_p}$. Các thành phần của $\phi_{i,j}$ được tỷ lệ bởi hệ số công suất truyền UL $\sqrt{p_{i,j}}$. Tín hiệu thu UL tại BS j là $Y_j \in \mathbb{C}^{M_j \times \tau_p}$, sẽ được xác định như sau [3]:

$$Y_j = \underbrace{\sum_{i=1}^{K_j} \sqrt{p_{i,j}} h_{i,j}^j \phi_{i,j}^T}_{\text{Dữ liệu UL}} + \underbrace{\sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^{K_l} \sqrt{p_{i,l}} h_{i,l}^j \phi_{i,l}^T}_{\text{Nhiễu pilot}} + N_j \quad (2)$$

BS j ước lượng kênh $h_{i,j}^j$ từ τ_p ký tự trong cell j dựa vào tín hiệu $Y_{j,i}$ theo cách nhân Y_j với chuỗi pilot $\phi_{i,j}$ của UE i

$$y_{j,i} = Y_j \phi_{i,j} \quad (3)$$

(\cdot) T , (\cdot) H là toán tử chuyển vị và liên hợp phức. Tín hiệu $y_{j,i} \in \mathbb{C}^{M_j}$ sẽ có số thành phần trong kênh $\hat{h}_{i,j}^j$ của $h_{i,j}^j$ dựa trên được thực hiện

theo các phương pháp MSSE (Minimum Mean Squared Error) [2] hoặc LS (Least Square) [1].

2.3 Đánh giá hiệu suất phổ

Việc ước lượng kênh truyền bằng pilot trong 2.2 cho phép các BS phát hiện được các tín hiệu từ các UE trong cell. Ta giả thiết BS j sử dụng một véc-tơ kết hợp tuyến tính ở máy thu $v_{jk} \in \mathbb{C}^{M_j}$ để chọn lọc đại tín hiệu từ UE k và loại bỏ nhiễu trừ các UE khác trong mạng.

Giả thiết UE thứ k trong cell j sẽ truyền đi một tín hiệu ngẫu nhiên $s_{jk} \sim N_C(0, p_{jk})$ với $j = 1, \dots, L$ và $k = 1, \dots, K_j$. Phương sai p_{jk} là công suất truyền đi. Tín hiệu thu UL $y_j \in \mathbb{C}^{M_j}$ tại BS j được mô hình hóa như sau [3]:

$$y_j = \sum_{i=1}^L \sum_{k=1}^{K_i} h_{ji}^j s_{jk} + n_j \quad (4)$$

$$= \underbrace{\sum_{k=1}^{K_j} h_{jk}^j s_{jk}}_{\text{Desired signal}} + \underbrace{\sum_{i=1, i \neq j}^L \sum_{k=1}^{K_i} h_{ji}^j s_{jk}}_{\text{Inter-cell interference}} + \underbrace{n_j}_{\text{Noise}}$$

Trong đó là thành phần nhiễu cộng độc lập ở máy thu được giả thiết trung bình 0 và phương sai σ_{UL}^2 : $n_j \sim N_C(0, \sigma_{UL}^2 I_{M_j})$. Trạm thu BS j sẽ chọn véc-tơ kết hợp $v_{jk} \in \mathbb{C}^{M_j}$ cho UE thứ k như một hàm của ước lượng kênh truyền \hat{h}_{jk}^j dựa trên việc truyền pilot. BS j sẽ dùng véc-tơ kết hợp phía thu v_{jk} để tách tín hiệu thu mong muốn của UE thứ k như sau:

$$v_{jk}^H y_j = \underbrace{v_{jk}^H \hat{h}_{jk}^j s_{jk}}_{\text{Desired signal over estimated channel}} + \underbrace{v_{jk}^H \tilde{h}_{jk}^j s_{jk}}_{\text{Desired signal over unknown channel}} \quad (5)$$

$$+ \underbrace{\sum_{i=1, i \neq j}^L \sum_{k=1}^{K_i} v_{jk}^H h_{ji}^j s_{jk}}_{\text{Inter-cell interference}} + \underbrace{v_{jk}^H n_j}_{\text{Noise}}$$

trong đó \hat{h}_{jk}^j là thành phần kênh truyền ước lượng được (đã biết) và \tilde{h}_{jk}^j là thành phần sai số kênh truyền (không biết). $(.)^H$ là ký hiệu toán tử Hermitian (chuyển vị liên hợp).

Với cấu hình vị trí các BS, UE cố định trong mạng, mô hình kênh NLoS giữa một thiết bị UE và trạm BS sử dụng mảng anten ULA được mô hình hóa thông qua ma trận tương quan không gian (spatial

corelation matrix) $R_u^k \in \mathbb{C}^{M_j \times M_j}$ giữa UE k trong cell l và BS j [3,5,6]. R là dạng ma trận Toeplitz. Khi số lượng anten M_j đủ lớn thì $R_u^k = E \left\{ h_{jk}^l (h_{jk}^l)^H \right\}$ [6]. Ma trận R_u^k được sử dụng để đánh giá sai số ước lượng kênh truyền $\tilde{h}_{jk}^l = h_{jk}^l - \hat{h}_{jk}^l$.

Dựa theo định lý giới hạn Shannon, công suất kênh đường lên của UE k bất kỳ trong cell j luôn bị giới hạn tiệm cận bởi hiệu suất phổ SE_{jk}^{UL} [bit/s/Hz] [2]:

$$SE_{jk}^{UL} = \frac{r_c}{T_c} E \left\{ \log_2 \left(1 + SIRN_{jk}^{UL} \right) \right\} \quad (6)$$

trong đó $SIRN_{jk}^{UL}$ (Signal-to-interference-plus-noise ratio) được định nghĩa là tỷ số tức thời (trong từng khoảng thời gian kết hợp) giữa Công suất tín hiệu nhận được (received signal power) và Tổng công suất can nhiễu và nhiễu (interference plus noise power). $SIRN_{jk}^{UL}$ tức thời (trong khoảng thời gian kết hợp đang xét) được xác định trong [2, Lemma 1 & Lemma 2]:

$$SIRN_{jk}^{UL} = \frac{p_{jk} \left| v_{jk}^H \hat{h}_{jk}^j \right|^2}{\sum_{i=1}^L \sum_{k=1}^{K_i} p_{ik} \left| v_{jk}^H \tilde{h}_{ik}^i \right|^2 + v_{jk}^H \left(\sum_{i=1}^L \sum_{k=1}^{K_i} p_{ik} C_i^k + \sigma_{UL}^2 I_{M_j} \right) v_{jk}} \quad (7)$$

trong đó $C_i^k = E \left\{ \tilde{h}_{ik}^i (\tilde{h}_{ik}^i)^H \right\}$ với $\tilde{h}_{ik}^i = h_{ik}^i - \hat{h}_{ik}^i$ là sai số khi ước lượng kênh truyền h_{ik}^i bằng tập pilot.

Các véc-tơ kết hợp cho tất cả UE trong BS j theo các phương pháp MMSE (Minimum Mean-Squared Error) [3], ZF (Zero-Forcing) và MR (Maximum Ratio)[2], lần lượt được xác định như sau:

$$v_j^{MMSE} = \left[v_{j1} \dots v_{jK_j} \right]$$

$$= \left(\sum_{i=1}^L \hat{H}_i^T P_i \left(\hat{H}_i^T \right)^H + \sum_{i=1}^L \sum_{k=1}^{K_i} p_{ik} C_i^k + \sigma_{UL}^2 I_{M_j} \right)^{-1} \hat{H}_j^T P_j \quad (8)$$

trong đó $P_i = \text{diag}(p_{i1}, \dots, p_{iK_i})$ là ma trận đường chéo gồm công suất UE trong cell i . \hat{H}_i^T là ma trận ước lượng kênh của tất cả UE trong cell i đến cell j [3].

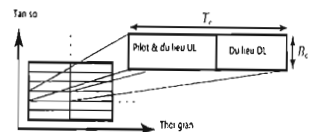
chuỗi pilot (mỗi chuỗi có độ dài r_p ký tự) trực giao. Việc chọn chuỗi pilot có độ dài lớn hơn sẽ cho phép tạo ra tập chuỗi pilot lớn hơn nhưng phải trả giá bằng lượng dữ liệu truyền tải buộc phải giảm đi [3]. Điều đó dẫn tới việc phải tái sử dụng các pilot. Khi hai hoặc nhiều UE ở các cell liên kế sử dụng các chuỗi pilot không trực giao, hiện tượng can nhiễu (interference) sẽ xảy ra gây ra lỗi khi ước lượng kênh truyền. Hiện tượng này được gọi là nhiễu hoa tiêu (pilot contamination).

Trong báo cáo này, chúng tôi khảo sát đánh giá một số phương pháp ước lượng kênh truyền m-MIMO thông qua các kịch bản mô phỏng. Kết quả đánh giá được dựa trên việc đánh giá hiệu suất phổ cũng như khối lượng tính toán của từng phương pháp.

2. Mô hình hệ thống

2.1 Giao thức truyền dữ liệu

Giao thức truyền cơ bản của m-MIMO TDD được thực hiện trong từng khối tài nguyên thời gian-tần số minh họa trong hình 1.



Hình 1. Khối tài nguyên thời gian - tần số trong m-MIMO TDD

Khối tài nguyên thời gian - tần số có kích cỡ B_c (Hz) và T_c (s). Số lượng ký tự (symbol) có thể truyền được trong khối sẽ là $r_c = B_c T_c$. Giả sử $B_c = 200 \text{ kHz}$ và $T_c = 1 \text{ ms}$ thì r_c là khối tài nguyên gồm 200 ký tự.

Mỗi khối tài nguyên hoạt động ở chế độ TDD sẽ truyền tải cả dữ liệu đường lên và đường xuống. Để đánh giá kênh truyền ở trạm BS, r_p ký tự trong khối sẽ được sử dụng để truyền chuỗi pilot (hoa tiêu) UL ($r_p \geq K$, K là số người dùng trong cell trạm BS), phần còn lại gồm $r_c - r_p = r_u + r_d$ ký tự sẽ được dùng truyền dữ liệu UL và DL (trong đó r_u là số ký tự dùng truyền dữ liệu lên UL và r_d là số ký tự dùng truyền dữ liệu xuống DL).

2.2 Ước lượng kênh bằng pilot

Tại giả thiết mạng m-MIMO đa cell sẽ gồm L cell, mỗi cell có 1 trạm BS. Trạm BS j sử dụng M_j anten và phục vụ cho K_j thiết bị người dùng đơn

anten. Đáp ứng kênh giữa trạm BS j và thiết bị người dùng UE i ở cell l sẽ được ký hiệu bằng $h_{i,l}^j = [h_{i,l}^{j,1} \quad h_{i,l}^{j,2}]^T \in \mathbb{C}^{M_j}$.

Kênh truyền cần được đánh giá tại BS j bằng cách để mỗi UE gửi một chuỗi pilot gồm r_p ký tự. Chọn $r_p = \sqrt{K_{\max}}$ với K_{\max} là số người dùng tối đa trong một cell, f là số nguyên dương, được gọi là hệ số tái sử dụng pilot. Bằng cách này, không chỉ cho phép cung cấp đầy đủ chuỗi pilot cho các UE trong mỗi cell mà còn cung cấp đủ chuỗi pilot cho các UE trong tất cả L cell thông qua việc chia L cell thành f nhóm cell không gần nhau. Các cell liên kế sẽ không sử dụng các tập chuỗi pilot giống nhau.

Tập chuỗi pilot sử dụng trong bài xây dựng dựa trên ma trận biến đổi Fourier rời rạc [4] như sau:

$$\phi = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & \omega_r & \omega_r^2 & \dots & \omega_r^{r_p-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \omega_r^{r_p-1} & \omega_r^{2(r_p-1)} & \dots & \omega_r^{(r_p-1)(r_p-1)} \end{bmatrix} \quad (1)$$

với $\omega_r = e^{-j2\pi/r}$.

Mỗi trạm BS cần đánh giá kênh truyền từ các UE đang hoạt động trong khoảng thời gian kết hợp. Trạm BS j cần đánh giá kênh truyền từ các UE trong cell j . Mỗi UE truyền một chuỗi pilot r_p mẫu. Chuỗi pilot của UE trong cell được ký hiệu bởi $\phi_{i,j} \in \mathbb{C}^{r_p}$. Các thành phần của $\phi_{i,j}$ được tỷ lệ bởi hệ số công suất truyền UL $\sqrt{p_{i,j}}$. Tín hiệu thu UL tại BS j là $Y_j \in \mathbb{C}^{M_j \times r_c}$ sẽ được xác định như sau [3]:

$$Y_j = \underbrace{\sum_{k=1}^{K_j} \sqrt{p_{i,k}} h_{i,k}^j \phi_{i,k}^T}_{\text{Desired pilot}} + \underbrace{\sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^{K_l} \sqrt{p_{i,l}} h_{i,l}^j \phi_{i,l}^T}_{\text{Inter-cell pilots}} + \underbrace{N_j}_{\text{Noise}} \quad (2)$$

BS j ước lượng kênh $h_{i,k}^j$ từ UE i bất kỳ trong cell j đưa vào tín hiệu $y_{i,k} \in \mathbb{C}^{M_j}$ cách nhân Y_j với chuỗi pilot $\phi_{i,k}$ của UE đó:

$$y_{i,k} = Y_j \phi_{i,k}^* \quad (3)$$

$(\cdot)^T, (\cdot)^*$ là toán tử chuyển vị và liên hợp phức.

Tín hiệu $y_{i,k} \in \mathbb{C}^{M_j}$ sẽ có số chiều bằng M_j . Ước lượng kênh $h_{i,k}^j$ của $h_{i,k}^j$ dựa trên $y_{i,k}$ được thực hiện

theo các phương pháp MSSE (Minimum Mean Squared Error) [2] hoặc LS (Least Square) [1].

2.3 Đánh giá hiệu suất phổ

Việc ước lượng kênh truyền bằng pilot trong 2.2 cho phép các BS phát hiện được các tín hiệu từ các UE trong cell. Ta giả thiết BS j sử dụng một véc-tơ kết hợp tuyến tính ở máy thu $v_{jk} \in \mathbb{C}^{M_j}$ để chọn lọc đại tín hiệu từ UE k và loại bỏ nhiễu từ các UE khác trong mạng.

Giả thiết UE thứ k trong cell j sẽ truyền đi một tín hiệu ngẫu nhiên $s_{jk} \sim N_{\mathbb{C}}(0, p_{jk})$ với $j=1, \dots, L$ và $k=1, \dots, K_j$. Phương sai p_{jk} là công suất truyền đi. Tín hiệu thu UL $y_j \in \mathbb{C}^{M_j}$ tại BS j được mô hình hóa như sau [3]:

$$\begin{aligned} y_j &= \sum_{l=1}^{K_j} \sum_{k=1}^{K_l} \hat{h}_{lk}^H s_{lk} + n_j \\ &= \underbrace{\sum_{k=1}^{K_j} \hat{h}_{jk}^H s_{jk}}_{\text{Desired signal}} + \underbrace{\sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^{K_l} \hat{h}_{lk}^H s_{lk}}_{\text{Inter-cell interference}} + \underbrace{n_j}_{\text{Noise}} \end{aligned} \quad (4)$$

Trong đó là thành phần nhiễu công độc lập ở máy thu được giả thiết trung bình 0 và phương sai σ_{UL}^2 . $n_j \sim N_{\mathbb{C}}(0, \sigma_{UL}^2 I_{M_j})$. Trạm thu BS j sẽ chọn véc-tơ kết hợp $v_{jk} \in \mathbb{C}^{M_j}$ cho UE thứ k như một bản của ước lượng kênh truyền \hat{h}_{jk}^H dựa trên việc truyền pilot. BS j sẽ dùng véc-tơ kết hợp phía thu v_{jk} để tách tín hiệu thu mong muốn của UE thứ k như sau:

$$\begin{aligned} v_{jk}^H y_j &= \underbrace{v_{jk}^H \hat{h}_{jk}^H s_{jk}}_{\text{Desired signal over estimated channel}} + \underbrace{v_{jk}^H \tilde{h}_{jk}^H s_{jk}}_{\text{Desired signal over unknown channel}} \\ &+ \underbrace{\sum_{l=1}^{K_j} \sum_{k=1}^{K_l} v_{jk}^H \hat{h}_{lk}^H s_{lk}}_{\text{Intra-cell interference}} + \underbrace{\sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^{K_l} v_{jk}^H \hat{h}_{lk}^H s_{lk}}_{\text{Inter-cell interference}} + \underbrace{v_{jk}^H n_j}_{\text{Noise}} \end{aligned} \quad (5)$$

trong đó \hat{h}_{jk}^H là thành phần kênh truyền ước lượng được (đã biết) và \tilde{h}_{jk}^H là thành phần sai số kênh truyền (không biết). $(\cdot)^H$ là ký hiệu toán tử Hermitian (chuyển vị liên hợp).

Với cấu hình vị trí các BS, UE cố định trong mạng, mô hình kênh NLoS giữa một thiết bị UE và trạm BS sử dụng mảng anten ULA được mô hình hóa thông qua ma trận tương quan không gian (spatial

corelation matrix) $R_{jk}^H \in \mathbb{C}^{M_j \times M_j}$ giữa UE k trong cell l và BS j [3,5,6]. R là dạng ma trận Toeplitz. Khi số lượng anten M_j đủ lớn thì $R_{jk}^H = E\{\hat{h}_{jk}^H (\hat{h}_{jk}^H)^H\}$ [6]. Ma trận R_{jk}^H được sử dụng để đánh giá sai số ước lượng kênh truyền $\tilde{h}_{jk}^H = \hat{h}_{jk}^H - \tilde{h}_{jk}^H$.

Dựa theo định lý giới hạn Shannon, công suất kênh đường lên của UE k bất kỳ trong cell j luôn bị giới hạn tiệm cận bởi hiệu suất phổ SE_{jk}^{UL} [bit/s/Hz] [2]:

$$SE_{jk}^{UL} = \frac{\tau_{UL}}{\tau_c} E\left\{\log_2(1 + SIRN_{jk}^{UL})\right\} \quad (6)$$

trong đó $SIRN_{jk}^{UL}$ (Signal-to-interference-plus-noise ratio) được định nghĩa là tỷ số tức thời (trong từng khoảng thời gian kết hợp) giữa Công suất tín hiệu nhận được (received signal power) và Tổng công suất can nhiễu và nhiễu (interference plus noise power). $SIRN_{jk}^{UL}$ tức thời (trong khoảng thời gian kết hợp đang xét) được xác định trong [2, Lemma 1 & Lemma 2]:

$$SIRN_{jk}^{UL} = \frac{p_{jk} |v_{jk}^H \hat{h}_{jk}^H|^2}{\sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^{K_l} p_{lk} |v_{jk}^H \hat{h}_{lk}^H|^2 + v_{jk}^H \left(\sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^{K_l} p_{lk} C_k^H + \sigma_{UL}^2 I_{M_j} \right) v_{jk}} \quad (7)$$

trong đó $C_k^H = E\{\tilde{h}_{lk}^H (\tilde{h}_{lk}^H)^H\}$ với $\tilde{h}_{lk}^H = \hat{h}_{lk}^H - \tilde{h}_{lk}^H$ là sai số khi ước lượng kênh truyền \hat{h}_{lk}^H bằng tập pilot.

Các véc-tơ kết hợp cho tất cả UE trong BS j theo các phương pháp MMSE (Minimum Mean-Squared Error) [3], ZF (Zero-Forcing) và MR (Maximum Ratio)[2], lần lượt được xác định như sau:

$$\begin{aligned} V_j^{MMSE} &= [v_{j1} \dots v_{jK_j}] \\ &= \left(\sum_{l=1}^L \hat{H}_l^H P_l (\hat{H}_l)^H + \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^{K_l} p_{lk} C_k^H + \sigma_{UL}^2 I_{M_j} \right)^{-1} \hat{H}_j^H P_j \end{aligned} \quad (8)$$

trong đó $P_l = \text{diag}(p_{l1}, \dots, p_{lK_l})$ là ma trận đường chéo gồm công suất UE trong cell l . \hat{H}_j là ma trận ước lượng kênh của tất cả UE trong cell l đến cell j [3].

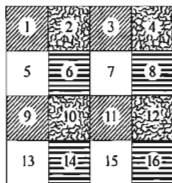
$$V_j^{ZF} = \widehat{H}_j' \left(\left(\widehat{H}_j' \right)^H \widehat{H}_j' \right)^{-1} \quad (9)$$

$$V_j^{ZF} = \widehat{H}_j' \quad (10)$$

3. Kịch bản mô phỏng

Trong kịch bản mô phỏng, chúng tôi xây dựng một mạng di động tế bào có vùng phủ sóng $1,2\text{km} \times 1,2\text{km}$ gồm $L = 16$ cell, được sắp xếp dạng ô lưới như hình 2 [3]. Kích thước mỗi cell là $0,3\text{km} \times 0,3\text{km}$. Hệ số tái sử dụng pilot $f = 4$. Tập pilot được chia làm 4 tập con pilot. Các cell thuộc cùng một nhóm (ví dụ cell 1, 3, 9 và 11) sẽ sử dụng chung một tập con pilot. Các cell liền kề nhau không sử dụng tập con pilot giống nhau.

Trạm BS ở mỗi cell được đặt ở chính giữa cell, sử dụng mảng ULA hàng ngang (Horizontal-Uniform Linear Array) gồm M anten đẳng hướng (dipole) khoảng cách $d_H = 0,5\lambda$ phục vụ cho K thiết bị người dùng UE.



Hình 2. Mạng tế bào 4×4 cell với hệ số tái sử dụng pilot $f = 4$

Trạm BS ở mỗi cell được đặt ở chính giữa cell, sử dụng mảng ULA hàng ngang (Horizontal-Uniform Linear Array) gồm M anten đẳng hướng (dipole) khoảng cách $d_H = 0,5\lambda$ phục vụ cho K thiết bị người dùng UE.

Các tham số truyền sóng được sử dụng như trong mô hình NLoS (None Line of Sight) marcocell 3GPP ở tần số 2GHz [7]. Hệ số suy hao đường truyền fading tầm rộng β_k' (dB) giữa UE k trong cell l và BS trong cell j được mô hình hóa như sau:

$$\beta_k' = \gamma + 10\alpha \log_{10} \left(\frac{d_{lk}'}{1 \text{ km}} \right) + F_k' \quad (11)$$

$$= 128,1 + 37,6 \log_{10} \left(\frac{d_{lk}'}{1 \text{ km}} \right) + F_k'$$

Trong đó d_{lk}' (km) là khoảng cách giữa máy thu BS và máy phát UE, $\alpha = 3,76$ là hệ số (mũ) suy hao

đường truyền. $\gamma = -128,1\text{dB}$ là suy hao kênh truyền tại khoảng cách tham chiếu 1 km. $F_k' \sim N(0, \sigma_f^2)$ là thay đổi tín hiệu do hiện tượng bóng râm (shadow fading). Độ lệch σ_f xác định mức độ biến thiên của biểu ứng bóng râm, giá trị σ_f trong các môi trường truyền sóng thường thay đổi trong khoảng từ 6 đến 12 dB.

Công suất nhiều máy thu BS (bao gồm tập âm nhiệt và hệ số tập âm BS là NF , B là băng thông kênh truyền) được xác định:

$$\text{Noise} = -174\text{dBm} + 10\log_{10} B(\text{Hz}) + NF \quad (8)$$

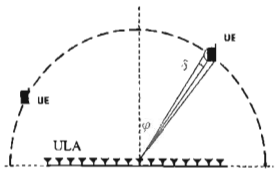
Mỗi khối tài nguyên gồm τ_c mẫu. Giá trị $\tau_c = 400$ được chọn phù hợp với môi trường outdoor ở tần số 2 GHz có tốc độ di động và phân tán kênh cao[2].

Để mô hình hóa kênh truyền m-MIMO, ta sử dụng khái niệm góc danh định (nominal angle) φ_k^j giữa BS j và UE k trong cell l , độ lệch chuẩn góc (ASD-Angular Standard Deviation) δ là độ biến thiên góc xung quanh φ_k^j thể hiện sự dịch chuyển UE trong khoảng thời gian kết hợp [3,8]. Trong mô phỏng, giá trị ASD được chọn là 10° được xem là thích hợp với mô hình mạng tế bào trong đô thị [9]. Với cấu hình vị trí các BS, UE có định trong mạng, các tham số φ, δ, d_H được sử dụng để xác định ma trận tương quan không gian R_k^j giữa UE k trong cell l và BS j .

Các tham số mô phỏng của hệ thống mạng di động đã tế bào được trình bày trong Bảng 1

Bảng 1. Tham số mô phỏng

Tham số	Giá trị
Số lượng cell (L)	$L=16$
Kích thước cell	$300\text{m} \times 300\text{m}$
Số lượng anten	M
Số lượng UE trong cell	K
Tần số	2 GHz
Băng thông	$B=10 \text{ MHz}$
Hệ số tập âm BS	$NF = 7\text{ dB}$
Hiệu ứng bóng râm	$\sigma_f = 10\text{ dB}$
Công suất UE	100mW
Số mẫu trong khối tài nguyên	$\tau_c = 400$
Hệ số tái sử dụng pilot	$f = 4$
Số lượng UL pilot	$\tau_p = fK$
ASD	10°



Hình 3. Minh họa góc danh định giữa BS và UE và độ lệch chuẩn góc ASD

Kịch bản mô phỏng cho M-MIMO được xây dựng trên các bước sau [3]:

Bước 1: Xây dựng cấu hình mạng

- Đặt các UE vào các vị trí ngẫu nhiên trong cell.
- Tính khoảng cách d_k^j và góc danh định φ_k^j .
- Xây dựng mô hình kênh thông qua ma trận tương quan không gian R_k^j .

Bước 2: Tạo tham số kênh truyền

- Tạo ngẫu nhiên các hệ số fading bóng râm F_k^j
- Tính toán hệ số suy hao kênh β_k^j

Bước 3: Ước lượng kênh truyền

- Ước lượng kênh truyền \hat{h}_k^j được ước lượng thông qua việc sử dụng chuỗi pilot

Bước 4: Tính toán hiệu suất phổ

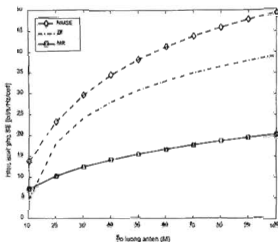
- Tính $SIRN_{jk}^{UL}$ tức thời theo công thức (7).
- Xác định hiệu suất phổ tức thời $SE_{jk}^{UL,inst}$ theo công thức (6).
- Tính hiệu suất phổ bình quân SE_{jk}^{UL} của các UE trong tất cả các lần mô phỏng.

4. Kết quả mô phỏng

Trong mô phỏng, số UE trong các cell luôn được cố định $K=10$. Do đó số lượng pilot sử dụng trong mô phỏng sẽ là $\tau_p = JK = 40$. Trong đánh giá đường lên UL, ta chọn giá trị $\tau_u = \tau_c - \tau_p = 360$. Số lượng anten M của trạm BS được thay đổi dùng để đánh giá hiệu suất phổ của các phương pháp.

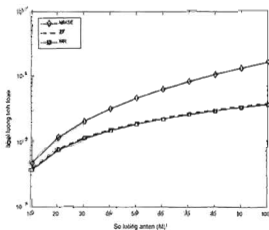
Trong quá trình mô phỏng, chúng tôi thiết lập 100 cấu hình vị trí ngẫu nhiên giữa các UE và BS trong toàn mạng. Với mỗi cấu hình vị trí, việc ước lượng kênh truyền và đánh giá hiệu suất phổ mỗi UE trong mạng sẽ được thực hiện 100 lần với các tham số

kênh truyền sóng thay đổi. Hiệu suất phổ bình quân của các thuật toán được đánh giá trên tất cả các UE trong các lần mô phỏng.



Hình 4. Hiệu suất phổ của các thuật toán ước lượng khi $K=10$ và M thay đổi

Hình 4 là kết quả đánh giá hiệu suất phổ bằng các phương pháp MMSE, ZF và MR. Qua mô phỏng ta có thể thấy hiệu suất phổ của MMSE cao nhất và MR thấp nhất.



Hình 5. Khối lượng tính toán của các thuật toán ước lượng khi $K=10$ và M thay đổi

Ngoài hiệu suất phổ, khối lượng tính toán của các phương pháp cũng được đánh giá dựa trên việc tính toán tín hiệu thu v_{jk}^y của từng UE trong cell cũng như tính toán véc-tơ kết hợp V_j trong từng khoảng thời gian kết hợp. Khối lượng tính toán được dựa trên tổng số các phép nhân (hoặc chia) số phức trong tính toán và bỏ qua các phép cộng(hoặc trừ) số phức. Hình 5 chỉ ra trong trường hợp này, MMSE có khối lượng tính toán lớn hơn trong khi ZF và MR có khối lượng tính toán gần như tương đồng.

5. Kết luận

Bài báo đã khảo sát đánh giá một số phương pháp ước lượng kênh truyền sử dụng pilot trong hệ thống MIMO TDD cỡ lớn. Các kết quả mô phỏng trong bài báo đã đánh giá được các thuật toán về hiệu suất phổ (bit/s/Hz/cell) cũng như độ phức tạp trong tính toán. Hướng nghiên cứu tiếp theo của các tác giả là thực hiện đánh giá các thuật toán ước lượng kênh truyền trong môi trường truyền ở dải sóng milimét.

Lời cảm ơn

Các tác giả bài báo xin chân thành cảm ơn sự hỗ trợ kinh phí nghiên cứu khoa học của Trường Đại học Bách Khoa Hà Nội thông qua đề tài cấp Trường mã số T2017-PC-117.

Tài liệu tham khảo

- [1]. Trinh Van Chien, Emil Björnson, Massive MIMO Communications, Book Chapter, Part of 5G Mobile Communication, Springer 2017, pp.77-116, ISBN. 978-3-319-34206-1.
- [2]. Emil Björnson, Erik G. Larsson, Mérouane Debbab Massive MIMO for Maximal Spectral Efficiency: How Many Users and Pilots Should Be Allocated?, IEEE Transaction on Wireless Communication, Volume 15, issue 2, February 2016, page 1293-1308.
- [3]. Emil Björnson, Jakob Hoydis, Luca Sanguinetti, Massive MIMO networks: Spectral, Energy, and Hardware Efficiency, Publisher Inc., 2018.
- [4]. Biguesh, M. And A.Gershman, Downlink Channel Estimation in Cellular Systems with Antenna Arrays at Base Stations Using Channel Probing with Feedback, EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, Volume 2004, pp.1330-1309.
- [5]. A.Forenza, D.J.Love, R.W Heath, Simplified Spatial Correlation Models for Clustered MIMO Channels With Different Array Configurations, IEEE Transactions on Vehicular Technology 56(4):1924 - 1934, August 2007.
- [6]. Haitan Yin, David Gesbert, Miltiades Filippou, Yingzhuang Liu, A Coordinated Approach to Channel Estimation in Large-scale Multiple-antenna Systems, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 31(12): 264-273, 2012.
- [7]. Futher advancement for E-UTRA physical layer aspects (Release 9). 2010. 3GPP TS 36.814.
- [8]. Andrea P. Guevara, Cheng-Ming Chen and Sofie Pollin, Pilot Contamination in Massive MIMO: Virtual Angular Information aided Channel Estimation, Poster presented for EuCNC 2018, June 2018 Ljubljana.
- [9]. K I. Pedersen, P E Mogense, B.H. Fleury, Power Azimuth Spectrum in Outdoor Environments, IEEE Electronic Letters, vol. 33, no. 18, pp. 1583-1584, August 1997.