

KỸ THUẬT ĐA ANTEN VÀ MẠNG ĐA CẤP: ĐỀ XUẤT CHO MẠNG THÔNG TIN VÔ TUYẾN TỐC ĐỘ CAO

MASSIVE MIMO TECHNOLOGY AND HETEROGENOUS NETWORK: PROMISING PROPOSALS FOR HIGH DATA RATE WIRELESS COMMUNICATIONS

Dương Hiền Thuận
Trường Đại học Sài Gòn, Việt Nam

Ngày toà soạn nhận bài 9/4/2018, ngày phản biện đánh giá 21/4/2018, ngày chấp nhận đăng 01/6/2018.

TÓM TẮT

Công nghệ thông tin liên lạc bằng vô tuyến là công nghệ được yêu thích nhất trong những năm gần đây, và nhu cầu truyền dữ liệu tốc độ ngày càng lớn, dự kiến năm 2020 tốc độ dữ liệu tải xuống của mạng 5G là 10Gbps. Kỹ thuật đa anten được xác định là kỹ thuật cho phép tăng tốc độ truyền dữ liệu (tăng hiệu quả sử dụng phổ) theo số anten được dùng. Mạng đa cấp hoặc mạng mật độ cao được xem là ứng cử viên cho việc tăng hiệu quả sử dụng năng lượng tùy theo mật độ các trạm phát sóng. Trong đó kiến trúc Cell nhỏ và mềm được nhiều sự quan tâm của nhà nghiên cứu vì khả năng cải thiện tốc độ hướng lên đáng kể. Trong bài báo này chúng tôi đánh giá ưu điểm của hai đề xuất này và sự kết hợp chúng lại với nhau thông qua công cụ tối ưu bằng Matlab CVX.

Từ khóa: Đa Anten; Mạng đa cấp; Mạng mật độ cao; Mạng 5G; Hiệu quả sử dụng phổ; Hiệu quả sử dụng năng lượng;

ABSTRACT

Wireless communication is one of the most popular technologies in recent years and the demand for high data rate transmission is growing, and it is expected that in 2020 the download speed of the 5G network is 10Gbps. Massive MIMO has been identified as a key technology to handle orders of more data traffic (increasing spectral efficiency) by the number of antennas used. Heterogeneous networks (HetNETs) or dense networks are considered candidates for increased energy efficiency depending on the density of the stations. In which, the small cell architecture and soft cell approach are concerned much by a lot of researchers due to their significantly improving the uplink capacity. In this paper, we evaluate the advantages of these two proposals and combine them together through the optimization tool Matlab CVX.

Keywords: Massive MIMO; Heterogenous networks (HetNETs); Dense Networks, 5G Networks; Spectral efficiency; Energy efficiency.

1. GIỚI THIỆU

Truyền thông không dây ngày càng phổ biến do các ưu điểm của truyền dẫn bằng sóng vô tuyến điện từ. Bên cạnh đó nhu cầu truyền thông dữ liệu tốc độ cao ngày một lớn do các ứng dụng về hình ảnh, video, dịch vụ đa phương tiện,..., phát triển không ngừng. Dự kiến thế hệ thông tin di động thứ 5 (5G) sẽ được phát triển và xuất hiện vào năm 2020 [1, 2]. Hệ thống thông tin vô tuyến 5G này sẽ

cho phép các dịch vụ dữ liệu với tốc độ tải xuống lên đến 10Gbps do đó hệ thống sẽ áp dụng nhiều công nghệ kỹ thuật tiên tiến để đáp ứng nhu cầu nhằm cải thiện hiệu quả sử dụng nguồn tài nguyên hữu hạn của hệ thống như phổ tần hiệu và năng lượng cung cấp cho hệ thống.

Tháng 12 năm 2012 tổ chức METIS (Mobile and wireless communications Enablers for Twenty - twenty (2020)

Information Society) [1, 2] gồm 29 thành viên như Ericsson (Thụy điển), Alcatel Lucent (Đức), Deutsche Telekom (Đức), DOCOMO Euro-Labs (Đức), France Telecom SA (Pháp) và nhiều tổ chức viễn thông của Châu Âu lần đầu tiên được đề xuất về mạng 5G. Hệ thống được dự kiến sẽ xuất hiện trong năm 2020.

Năm 2010, Tiến sỹ Thomas L. Marzetta làm việc tại Bell Lab lần đầu tiên đề xuất giải pháp sử dụng đa anten (Massive MIMO) cho các trạm thu phát gốc BS (Base Transceiver Stations) trong mạng thông tin di động [3] nhằm tăng khả năng sử dụng không gian (spatial reuse), tối ưu hiệu quả sử dụng phổ và giảm nhiễu. Trong [4-7], kỹ thuật đa anten còn được dùng để tăng hiệu quả sử dụng năng lượng bằng cách chỉ cung cấp năng lượng cho các thiết bị di động mong muốn và giảm nhiễu lẫn nhau.

Năm 2011, kiến trúc mạng đa cấp HetNETs gồm nhiều kiến trúc cell khác nhau trong đó sử dụng cell nhỏ SC (Small Cell) được đề xuất trong [8, 9]. Với kiến trúc này các điểm truy cập cell nhỏ SC sẽ chia tải với trạm thu phát gốc BS thông qua điều khiển và kết hợp còn được gọi là giải pháp Cell mềm (Soft Cell Approaches). Với giải pháp này khoảng cách truyền của thiết bị di động MS (Mobile Station) hay người dùng đến các trạm thu phát sẽ giảm đồng nghĩa với giảm năng lượng tiêu thụ. Tuy nhiên giải pháp này làm tăng nhiễu giữa các Cell với nhau.

Trong bài báo này, mục 2 sẽ giới thiệu vấn đề về công cụ tối ưu bằng Matlab CVX được dùng để đánh giá một số mô hình hệ thống đề xuất. Mục 3, chúng tôi sẽ đánh giá ưu điểm của kỹ thuật đa anten về hiệu quả sử dụng phổ tần hiệu theo số anten phát của trạm BS. Hiệu quả sử dụng năng lượng theo mật độ trạm thu phát được mô phỏng trong mục 4. Kết hợp ưu điểm của hai kỹ thuật đa anten và mạng HetNETs được mô phỏng trong mục 5. Ở đây chúng tôi quan tâm đến vấn đề tối ưu hiệu quả sử dụng năng lượng thông qua bài toán tối ưu vẫn đảm bảo chất lượng dịch vụ đặt ra tại mỗi người dùng cũng như giới hạn công suất phát tại BS và SCs với giả

thiết thông tin kênh được biết hoàn toàn tại máy thu và máy phát đồng thời nhiều được kết hợp xử lý. Và cuối cùng là kết luận trong mục 6.

2. CÔNG CỤ TỐI ƯU CVX (CONVEX OPTIMIZATION CVX TOOLS)

Công cụ tối ưu bằng Matlab CVX sẽ được dùng trong các phần sau của bài báo, chúng tôi sẽ tóm lược một số ưu điểm và đặc tính của công cụ này trong mục này. Đây là một công cụ tối ưu được viết bằng phần mềm Matlab. Công cụ này được thiết kế để giải các bài toán tối ưu lồi/lồi cơ bản DCPs (Disciplined Convex Programs) như bài toán tuyến tính (linear), bậc hai (quadratic), bài toán hình chóp (second-order cone programs) và SDP (semidefinite programs) cũng như các bài toán phức tạp như tối ưu dựa trên tối thiểu norm (constrained norm minimization) hoặc cực đại entropy (entropy maximization), cực đại định thức (determinant maximization)[11,12].

Một số ưu điểm của công cụ tối ưu CVX:

+ CVX được viết bằng ngôn ngữ Matlab đơn giản và khả năng tính toán phức tạp cao.

+ Hỗ trợ nhiều hệ điều hành (Window, MAC OSX, Linux 32 bits, 64 bits).

+ Miễn phí cho các nhà nghiên cứu và sinh viên.

+ Hỗ trợ nhiều công cụ giải như SeDuMi, SDPT3,...(cho bản miễn phí) và Gurobi, MOSEK (cho bản thương mại).

+ Tài liệu hướng dẫn chi tiết dễ sử dụng.

+ Các mô tả bài toán tối ưu đơn giản như mô tả trong toán học ví dụ như tìm biến $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$ sao cho tối ưu $\min(\|\mathbf{Ax} - \mathbf{b}\|_2)$ với $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{m \times n}$, $m \geq n$, $\text{rank}(\mathbf{A}) = n$ ta có mô tả đơn giản như sau:

$m = 16; n = 8;$

$\mathbf{A} = \text{randn}(m,n);$

$\mathbf{b} = \text{randn}(m,1);$

cvx_begin

variable $x(n)$

minimize(norm($A*x-b$))

cvx_end

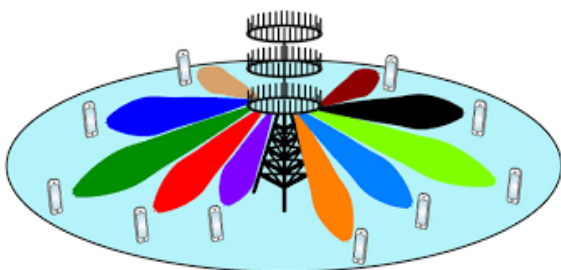
3. KỸ THUẬT ĐA ANTEN – HIỆU QUẢ SỬ DỤNG PHỔ

Kỹ thuật MIMO đã trở thành kỹ thuật không thể thiếu trong các hệ thống truyền thông vô tuyến dữ liệu tốc độ cao ví dụ như hệ thống LTE các trạm BS dùng số lượng anten lên đến 8 [10]. Về cơ bản khi số lượng anten ở máy phát và máy thu tăng lên thì hệ thống sẽ tạo ra độ phân tập cao hơn (degree of freedom) hay nói cách khác là hệ thống sẽ hoạt động với độ tin cậy cao hơn vì BER của hệ thống được ước lượng là

$$BER \sim \frac{1}{SNR^d} \rightarrow d_{\max} = n_T n_R$$

bên cạnh đó tốc độ dữ liệu của kênh truyền MIMO cũng được cải thiện với tốc độ được ước lượng là $R \sim r \log_2(SNR) \rightarrow r_{\max} = \min\{n_T, n_R\}$.

Trong đó n_T, n_R là số anten phát và số anten thu. Bên cạnh tính ưu việt của kỹ thuật MIMO thì độ phức tạp về phần cứng, năng lượng tiêu thụ cũng như quá trình xử lý tín hiệu của hệ thống cũng tăng theo số lượng anten, trong bài báo này chúng tôi bỏ qua việc đánh giá tính phức tạp này. Ngày nay số lượng anten được dùng tại trạm BS được đề xuất tăng lên con số lớn hàng trăm hàng ngàn anten và được gọi là kỹ thuật đa anten [3,6], kỹ thuật này đang được nghiên cứu rộng khắp.



Hình 1. Mô hình đa anten cho trạm thu phát gốc trong thông tin di động

Trong phần này, chúng tôi sẽ đánh giá hiệu quả sử dụng phổ của hệ thống đa anten theo số lượng anten. Xét trạm BS với số anten N_{BS} (là một số lớn đến vài trăm

anten). Trong trạm BS có K người dùng (hay thiết bị di động) đơn anten. Giả thiết kênh truyền vô tuyến là kênh fading Rayleigh. Để đánh giá hiệu quả sử dụng phổ theo số lượng anten anten phát của trạm BS, chúng tôi giả thiết kỹ thuật phân bố công suất được áp dụng sao cho tỷ số tín hiệu trên nhiễu SNR tại các người dùng luôn đảm bảo là -5dB. Dung lượng kênh Ergodic của hệ thống là:

$$C = \mathbb{E} \left\{ \log_2 \det \left(\mathbf{I}_1 + \frac{1}{N_{BS}} \mathbf{H} \mathbf{P} \mathbf{H}^H \right) \right\} \quad (1)$$

Trong đó \mathbf{H} là ma trận kênh, \mathbf{P} là ma trận đường chéo, các phần tử trên đường chéo là hệ số phân bố công suất sao cho đảm bảo tỷ số SNR theo yêu cầu tại các người dùng. Khi dùng kỹ thuật ZF (Zero Focusing) và kỹ thuật thu kết hợp cực đại tỷ số MRC (maximum ratio combining) và xét đến ảnh hưởng của nhiễu thì tổng tốc độ hay dung lượng kênh của hệ thống sẽ là:

$$C_{ZF \text{ or } MRC} = \mathbb{E} \{ \log_2 \det(\mathbf{I}_1 + SINR) \} \quad (2)$$

Trong đó SINR

$$SINR = \frac{|\mathbf{w}^H \mathbf{h}_D|^2 \mathbb{E} \{ |x_D|^2 \}}{\mathbb{E} \left\{ \left| \mathbf{w}^H \left(\sum_{k=1}^{N_I} \mathbf{h}_{I,k} x_{I,k} + \mathbf{n} \right) \right|^2 \right\}}$$

là tỷ số

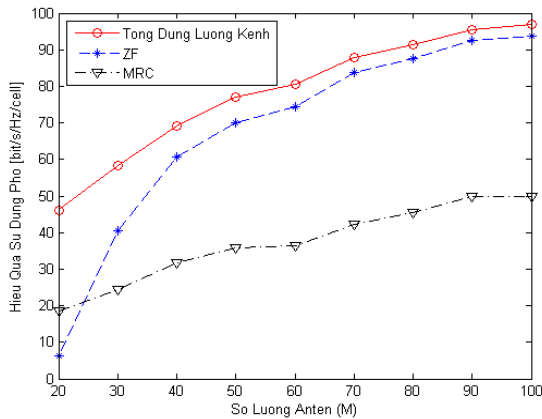
tín hiệu trên nhiễu cộng nhiễu, \mathbf{h}_D là véc tơ kênh truyền tín hiệu mong muốn, $\mathbf{h}_{I,k}$ là véc tơ kênh truyền tín hiệu nhiễu thứ k^{th} , x_D là tín hiệu mong muốn, $x_{I,k}$ là tín hiệu nhiễu thứ k^{th} , \mathbf{n} là véc tơ nhiễu trắng Gauss cộng, \mathbf{w} là véc tơ trọng số hay bộ mã trước (precoding matrix) tại bộ thu. Khi sử dụng kỹ

thuật ZF thì $\mathbf{w}_{ZF} = \frac{\mathbf{h}_D^H}{\|\mathbf{h}_D\|^2}$ và với kỹ thuật

MRC thì véc tơ này là $\mathbf{w}_{MRC} = c \mathbf{h}_D$ trong đó c là hằng số.

Hình 2 mô phỏng tổng hiệu quả sử dụng phổ [bit/Hz/cell] theo số lượng anten tại trạm BS với số lượng người dùng là $K = 20$, số lượng anten tại trạm BS từ 20-100 và công

suất được điều khiển sao cho tỷ số SNR tại các người dùng luôn luôn đảm bảo là -5dB . Khi số lượng anten càng tăng thì hiệu quả sử dụng phổ tần hiệu tổng cũng tăng theo. Tuy nhiên kết quả theo lý thuyết và phương pháp lý tưởng (ZF) khi biết kênh truyền hoàn hảo cho kết quả khá cách biệt so với kỹ thuật thu MRC thường dùng. Qua đó chúng tôi thấy rằng sử dụng kỹ thuật đa anten sẽ cho phép cải thiện hiệu quả sử dụng phổ đáng kể khi tăng số lượng anten, tuy nhiên việc nghiên cứu phương pháp thu thích hợp tiệm cận kết quả lý tưởng vẫn là một vấn đề cần được quan tâm.

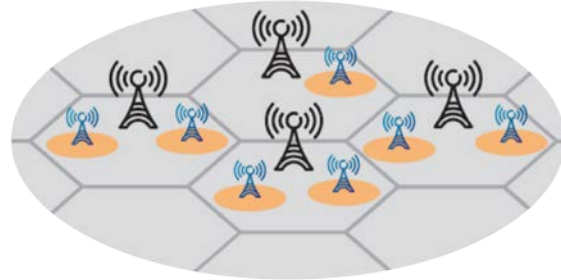


Hình 2. Hiệu quả sử dụng phổ theo số anten phát tại trạm BS

4. MẠNG ĐA CẤP, MẠNG MẬT ĐỘ CAO – HIỆU QUẢ SỬ DỤNG NĂNG LƯỢNG

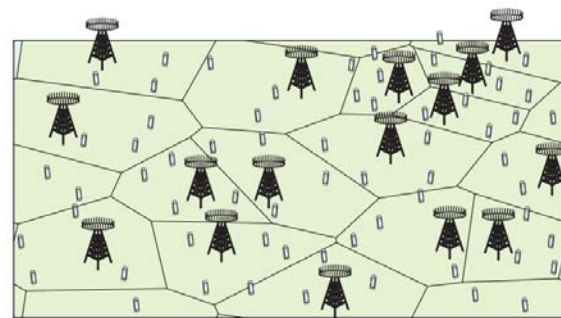
Cùng với nhiều kỹ thuật công nghệ mới xuất hiện để đáp ứng nhu cầu truyền dữ liệu tốc độ cao, giải pháp kiến trúc mạng đa cấp HetNETs (Heterogeneous Networks) gồm nhiều cấu trúc cell như hình 3 cũng được đề xuất. Trong đó tiếp cận cell nhỏ SC và mềm (Soft-cell approach) nhận được nhiều quan tâm của nhà nghiên cứu vì có khả năng cải thiện tốc độ hướng lên (người dùng phát lên các trạm SC với tổn hao bé do cự ly ngắn); dung lượng hướng xuống cải thiện (tận dụng việc sử dụng lại tài nguyên của hệ thống cho các SC) và cải thiện vùng phục vụ [8]. Với một số ưu điểm của kiến trúc SC một số tiếp cận như: tiếp cận dựa vào phân chia tài nguyên hệ thống (resource partitioning) như tần số và thời gian trong đó các SC được xem

như một SC độc lập với trạm BS; một tiếp cận khác là cell mềm, các SC được xem như một thành phần của BS khi không dùng đến thì các SC này ở trạng thái thụ động (passive) khi cần tham gia vào truyền nhận dữ liệu thì SC sẽ chuyển sang chế độ tích cực (active) để thực hiện nhiệm vụ.



Hình 3. Kiến trúc mạng HetNETs (trạm BS và các trạm SC)

Việc phân tích đánh giá tổng thể mạng thông tin HetNETs vô cùng phức tạp ví dụ như phân tích số lượng trạm BS, số lượng trạm SC cũng như vùng phủ bao nhiêu là tối ưu, phân chia tài nguyên hệ thống sao cho hợp lý,... Do đó trong phần này chúng tôi chỉ xem xét đánh giá hiệu quả sử dụng năng lượng theo mật độ các trạm trong mạng và chỉ xét một loại trạm và người dùng đơn anten như hình 4. Giả thiết các trạm BS được bố trí trong không gian 2 chiều có dạng phân bố Poisson điểm PPP (Poisson Point Process) với mật độ λ , với vùng có diện tích là A thì số trạm trung bình là λA . Mỗi trạm BS được trang bị M anten và phục vụ K người dùng đơn anten. Các người dùng sẽ được phục vụ với các trạm BS gần nhất. Giả thiết kênh truyền fading Rayleigh.



Hình 4. Mô hình mạng mật độ cao

Với mô hình này chúng tôi định nghĩa hệ số hiệu quả sử dụng năng lượng $HQSDNL$ là

$$HQSDNL = \frac{HQSDPV \text{ [bit/symbol/km}^2\text{]}}{CSTTV \text{ [J/symbol/km}^2\text{]}} \quad (3)$$

Trong đó $HQSDPV$ là hiệu quả sử dụng phổ trên một vùng và được tính là:

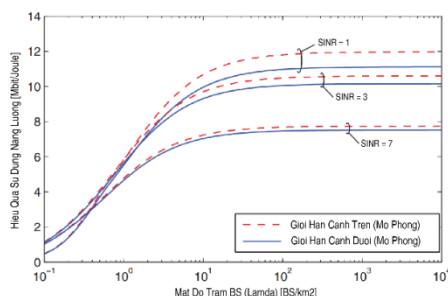
$$HQSDPV = \lambda K \left(1 - \frac{\beta K}{L}\right) \log_2(1 + SINR_{U/L}) \quad (4)$$

Trong đó β là hệ số sử dụng tín hiệu dẫn đường Pilot (tính hiệu chuẩn dung cho ước lượng kênh), L là chiều dài của khối, $SINR_{U/L}$ là tỷ số tín hiệu trên nhiễu cộng nhiễu. $SINR_U$ là giới hạn trên khi thông tin kênh truyền vô tuyến được khôi phục hoàn toàn và không có can nhiễu giữa các tín hiệu dẫn đường Pilot và $SINR_L$ là giới hạn dưới khi kênh thông tin truyền không hoàn hảo và can nhiễu lẫn nhau giữa tín hiệu dẫn đường Pilot (contamination) [13,14]. $CSTTV$ là công suất tiêu thụ vùng được tính theo [15] là:

$$CSTTV = \lambda \left(\left(1 - \frac{\beta K - 1}{L}\right) C_1 \frac{\Gamma(\alpha/2 + 1)}{(\pi \lambda)^{\alpha/2}} K + C_2 \right) + C_3 HQSDPV \quad (5)$$

Với C_1 là hệ số phụ thuộc hiệu suất bộ khuếch đại tín hiệu và điều khiển công suất; $\alpha > 2$ là hệ số suy hao kênh truyền; C_2 là hệ số phụ thuộc vào công suất tiêu thụ tĩnh (thụ động), công suất cho quá trình xử lý tín hiệu dải nền, ...; C_3 là hệ số tỷ lệ cho việc mã và giải mã tín hiệu.

Để đánh giá hiệu quả sử dụng năng lượng theo mật độ trạm, chúng tôi giả thiết tỷ số $SINR$ tại người dùng được duy trì sao cho tốc độ dữ liệu là 1, 2, 3 [bit/Hz] tương ứng với tỷ số $SINR$ là 1, 3, 7 dB.



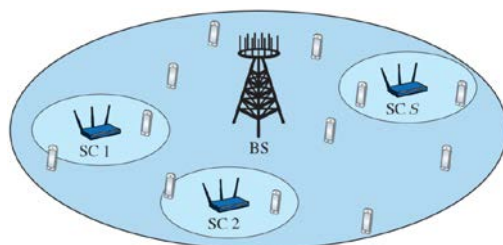
Hình 5. Hiệu quả sử dụng năng lượng theo mật độ trạm BS

Kết quả mô phỏng $HQSDNL$ theo mật độ trạm BS được thể hiện trong hình 5. Kết quả này cho thấy hiệu quả sử dụng năng lượng cao khi duy trì tốc độ truyền dữ liệu thấp và càng tăng mật độ trạm λ thì hiệu quả sử dụng năng lượng cũng tăng theo điều này có nghĩa khi dùng kiến trúc Cell nhỏ sẽ cải thiện hiệu quả sử dụng năng lượng. Tuy nhiên khi mật độ trạm tăng cao đến một giới hạn ($\lambda > 10$) thì hiệu quả sử dụng năng lượng không còn cải thiện đáng kể dù vẫn tăng mật độ trạm.

5. MÔ HÌNH KẾT HỢP KIẾN TRÚC CELL NHỎ VÀ KỸ THUẬT ĐA ANTEN

Trong mục này, mô hình tối ưu năng lượng tổng sao cho vẫn thỏa mãn chất lượng dịch vụ QoS (Quality of Services) đặt ra trước với kiến trúc trạm thu phát gốc BS dùng đa anten kết hợp với kiến trúc SC được kiến tạo chồng lấp lên nhau (overlay) cùng với giả thiết thông tin kênh truyền được biết hoàn toàn tại máy thu và máy phát và chỉ xét các trạm SC trong một trạm BS.

Giả thiết số lượng anten được dùng cho trạm BS là N_{BS} (là một số lớn giả thiết từ 8 đến vài trăm anten) sẽ cung cấp vùng phục vụ cho $K \ll N_{BS}$ người dùng (hay thiết bị di động) đơn anten thêm vào đó trong vùng phủ của trạm gốc BS sẽ có nhiều cấu trúc SC ($S \geq 0$) được bố trí ngẫu nhiên với mỗi SC được trang bị N_{SC} anten (giả thiết $1 \leq N_{SC} \leq 4$ để đơn giản bài toán) và bị giới hạn công suất phát (giới hạn vùng phủ sóng) giống hình 6 bên dưới.



Hình 6. Mô hình phân tích BS dùng kỹ thuật đa anten và các trạm SC

Kênh từ trạm BS, SC thứ j đến các người dùng thứ k được mô hình là fading phẳng khối và được biểu diễn là $\mathbf{h}_{k,0}^H \in \mathbb{C}^{1 \times N_{BS}}$ và

$\mathbf{h}_{k,j}^H \in \mathbb{C}^{1 \times N_{sc}}$ do đó tín hiệu nhận được tại người dùng thứ k là:

$$y_k = \mathbf{h}_{k,0}^H \mathbf{x}_{k,0} + \sum_{j=1}^S \mathbf{h}_{k,j}^H \mathbf{x}_{k,j} + n_k \quad (6)$$

Trong đó \mathbf{x}_0 và \mathbf{x}_j là tín hiệu phát từ BS và SC thứ j^{th} đến người dùng thứ k^{th} , $n_k \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_k^2)$ là nhiễu Gauss trắng cộng. Giả thiết trạm gốc BS và các trạm SC kết nối vào đường trục (Backhaul) và cho phép kết hợp phân phối tài nguyên cấu trúc cell mềm (soft-cell). Mỗi người dùng được phục vụ bởi trạm BS và nhiều trạm SC tuy nhiên thông tin được mã và phát độc lập với nhau và được gọi truyền dẫn đa dòng phân tập không gian SMT (Spatial Multiflow Transmission). Bản tin từ trạm BS và các SC thứ j đến người dùng thứ k được ký hiệu $x_{k,0}$ và $x_{k,j}$ với $x_{k,j} \sim \mathcal{CN}(0,1)$, $j=0, \dots, S$. Bản tin này được nhân với vectơ lái (beamforming vector) để tạo tín hiệu phát đi

$$\mathbf{x}_j = \sum_{k=1}^K \mathbf{w}_{k,j} x_{k,j}, \quad (7)$$

$$j=0, \dots, S, \quad \mathbf{w}_{k,0} \in \mathbb{C}^{N_{BS} \times 1}, \quad \mathbf{w}_{k,j} \in \mathbb{C}^{N_{SC} \times 1}$$

Trong bài báo này chúng tôi sẽ quan tâm việc tối ưu vectơ lái \mathbf{w} này sao cho tổng công suất phát bao gồm công suất phát tĩnh (static power - công suất phát phụ thuộc vào phần cứng thiết bị thu phát) và công suất phát động (dynamic power - công suất phụ thuộc vào tỷ lệ công suất được phát) [16, 17, 18] sao cho vẫn đảm bảo chất lượng dịch vụ QoS của từng người dùng. QoS chúng tôi quan tâm là tốc độ thông tin [Bit/s/Hz] với giả thiết các người dùng phát thông tin song song với nhau. Chúng tôi định nghĩa chất lượng QoS của người dùng thứ k^{th} là $\log_2(1 + SNIR_k) \geq \gamma_k$ với γ_k là thông số ngưỡng quyết định chất lượng QoS trong đó

$$SNIR_k = \frac{|\mathbf{h}_{k,0}^H \mathbf{w}_{k,0}|^2 + \sum_{j=1}^S |\mathbf{h}_{k,j}^H \mathbf{w}_{k,j}|^2}{\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^K \left(|\mathbf{h}_{k,0}^H \mathbf{w}_{i,0}|^2 + \sum_{j=1}^S |\mathbf{h}_{k,j}^H \mathbf{w}_{i,j}|^2 \right) + \sigma_k^2} \quad (8)$$

Theo [16-18] ta có công suất phát tĩnh và công suất động như sau:

$$P_{dyn} = \rho_0 \sum_{k=1}^K \|\mathbf{w}_{k,0}\|^2 + \sum_{j=1}^S \rho_j \sum_{k=1}^K \|\mathbf{w}_{k,j}\|^2 \quad (9)$$

$$P_{sta} = \frac{\eta_0}{C} N_{BS} + \sum_{j=1}^S \frac{\eta_j}{C} N_{SC} \quad (10)$$

Trong đó $\rho_j \geq 1$ là hệ số đặc trưng cho hiệu suất của bộ khuếch đại do hoạt động vùng tuyến tính giảm từ 6-12 dB so với điểm bão hòa dẫn đến hiệu suất giảm (theo [17] trạm BS hiệu suất bộ khuếch đại là 38.8% hay $\rho_0 = 1/0.388$, trạm SC hiệu suất bộ khuếch đại là 5.2% hay $\rho_j = 1/0.052$), $\eta_j \geq 0$ thể hiện phần công suất suy hao trên mạch (bộ lọc, bộ trộn, bộ chuyển đổi, quá trình xử lý tín hiệu giải nền, đồng bộ, ước lượng kênh, bộ cân bằng...) trên một anten (đối với trạm BS thì chọn $\eta_0 = 189mW$, trạm SC thì chọn $\eta_j = 5.6mW$), $C \geq 1$ là tổng số sóng mang thành phần ($C = 600$ được chọn gần với hệ thống LTE).

Mỗi trạm BS và trạm SC có công suất giới hạn tùy theo khoảng cách vùng phủ.

$$\sum_{k=1}^K \mathbf{w}_{k,j}^H \mathbf{Q}_{j,l} \mathbf{w}_{k,j} \leq q_{j,l}, \quad l=1, \dots, L_j \quad (11)$$

Trong đó ma trận trọng số $\mathbf{Q}_{0,l} \in \mathbb{C}^{N_{BS} \times N_{BS}}$, $\mathbf{Q}_{j,l} \in \mathbb{C}^{N_{SC} \times N_{SC}}$, với $j=1, \dots, S$ là các ma trận định nghĩa dương. Ma trận này sẽ là ma trận đường chéo, các phần tử chính là công suất phát trên từng anten. $q_{j,l} \geq 0$ là giới hạn công suất theo vùng phủ của từng trạm thông thường $q_{0,l} \gg q_{j,l}$ với $1 \leq j \leq S$. Chúng tôi chọn công suất giới hạn trạm BS $q_{0,l} = 66mW$ tương ứng vùng phủ khoảng 1km và công suất giới hạn trạm SC $q_{0,l} = 0.08mW$ tương ứng vùng phủ khoảng 50m.

Ta có mô hình tối ưu năng lượng theo kỹ thuật đa anten và SC được biểu diễn như sau:

$$\begin{aligned} & \underset{\mathbf{w}_{k,j} \forall k,j}{\text{minimize}} && P_{dyn} + P_{sta} \\ & \text{subject to} && \log_2(1 + SNIR_k) \geq \gamma_k \quad \forall k, \\ & && \sum_{k=1}^K \mathbf{w}_{k,j}^H \mathbf{Q}_{j,l} \mathbf{w}_{k,j} \leq q_{j,l}, \quad \forall j, l \end{aligned} \quad (12)$$

Ta đặt $\mathbf{W}_{k,j} = \mathbf{w}_{k,j} \mathbf{w}_{k,j}^H$, $\forall k, j$, ma trận $\mathbf{W}_{k,j}$ này là ma trận định nghĩa dương $\mathbf{W}_{k,j} \succ 0$ và có $\text{rank}(\mathbf{W}_{k,j}) \leq 1$, $\tilde{\gamma}_k = 2^{\gamma_k} - 1 \quad \forall k$, Theo [12] ta có biểu thức tối ưu (12) được viết thành biểu thức tối ưu (13) đây là bài toán tối ưu SDR (Semi-Definite Relation) và có thể dùng công cụ tối ưu CVX để giải.

$$\begin{aligned} & \underset{\mathbf{W}_{k,j} \succ 0 \quad \forall k,j}{\text{minimize}} \quad \sum_{j=0}^S \rho_j \sum_{k=1}^K \text{tr}(\mathbf{W}_{k,j}) + P_{sta} \\ & \text{subject to} \quad \text{rank}(\mathbf{W}_{k,j}) \leq 1 \quad \forall k, j, \\ & \quad \sum_{j=0}^S \mathbf{h}_{k,j}^H \left(\left(1 + \frac{1}{\tilde{\gamma}_k} \right) \mathbf{W}_{k,j} - \sum_{i=1}^K \mathbf{W}_{i,j} \right) \mathbf{h}_{k,j} \geq \sigma_k^2 \quad \forall k \\ & \quad \sum_{k=1}^K \text{tr}(\mathbf{Q}_{j,l} \mathbf{W}_{k,j}) \leq q_{j,l}, \quad \forall j, l \end{aligned} \quad (13)$$

Trong đó σ_k^2 là công suất nhiễu trắng Gauss. Theo [19] ta có biểu thức (13) luôn tồn tại kết quả tối ưu cho ma trận $\mathbf{W}_{k,j}$ thỏa $\text{rank}(\mathbf{W}_{k,j}) \leq 1 \quad \forall k, j$. Để tối ưu ma trận $\mathbf{W}_{k,j}$ ta có một số trường hợp sau:

- Người dùng thứ k^{th} chỉ được phục vụ bởi duy nhất trạm BS tức là $\mathbf{W}_{k,j}^* = 0, \quad 1 \leq j \leq S$
- Người dùng thứ k^{th} chỉ được phục vụ bởi trạm SC thứ j tức là $\mathbf{W}_{k,0}^* = 0, \quad \text{and} \quad \mathbf{W}_{k,i}^* = 0 \quad i \neq j$
- Người dùng thứ k^{th} được phục vụ bởi trạm BS kết hợp với các trạm SC trong đó phải có tối thiểu một trạm SC có công suất tích cực bằng công suất giới hạn ($\sum_{k=1}^K \text{tr}(\mathbf{Q}_{j,l} \mathbf{W}_{k,j}^*) = q_{j,l}$)

Việc tối ưu theo công thức (12), (13) sẽ được thực hiện khá phức tạp và tốn nhiều thời gian nếu số lượng anten và số lượng cell nhỏ SC tăng cao và khó thực hiện trong thực tế, do đó có thể dùng kỹ thuật MRZF (Multiflow Regularized Zero Forcing) được dùng trong [6] để chuyển đổi bài toán tối ưu (12) thành bài tối ưu phân bố công suất phát như sau:

(1) với mỗi trạm phát $j = 0, \dots, S$, K là tổng số người dùng quan tâm. Tính thông số

$$\mathbf{u}_{k,j} = \frac{\left(\sum_{i=1}^K \frac{1}{\sigma_i^2} \mathbf{h}_{i,j} \mathbf{h}_{i,j}^H + \frac{K}{\tilde{\gamma}_k} \mathbf{I} \right)^{-1} \mathbf{h}_{k,j}}{\left\| \left(\sum_{i=1}^K \frac{1}{\sigma_i^2} \mathbf{h}_{i,j} \mathbf{h}_{i,j}^H + \frac{K}{\tilde{\gamma}_k} \mathbf{I} \right)^{-1} \mathbf{h}_{k,j} \right\|}, \quad \forall k,$$

$$g_{i,k,j} = \left| \mathbf{h}_{i,j}^H \mathbf{u}_{k,j} \right|^2 \quad \forall i, k, \quad \mathbf{Q}_{j,k,l} = \mathbf{u}_{k,j}^H \mathbf{Q}_{j,l} \mathbf{u}_{k,j} \quad \forall k, l$$

(2) Trạm SC thứ j^{th} gửi thông số $g_{i,k,j}$, $\mathbf{Q}_{j,k,l}$, $\forall k, i, l$ cho trạm BS, Trạm BS giải bài toán tối ưu phân bố công suất.

$$\begin{aligned} & \underset{p_{k,j} \geq 0 \quad \forall k,j}{\text{minimize}} \quad \sum_{j=0}^S \rho_j \sum_{k=1}^K p_{k,j} + P_{sta} \\ & \text{subject to} \quad \sum_{k=1}^K \mathbf{Q}_{j,k,l} p_{k,j} \leq q_{j,l} \quad \forall j, l, \\ & \quad \sum_{j=0}^S p_{k,j} g_{k,k,j} \left(1 + \frac{1}{\tilde{\gamma}_k} \right) - \sum_{i=1}^K p_{i,j} g_{k,i,j} \geq \sigma_k^2 \quad \forall k \end{aligned} \quad (14)$$

(3) Trạm BS gửi phân bố công suất tối ưu $p_{k,j}^* \quad \forall k$ giải từ (9) cho SC j^{th} . và

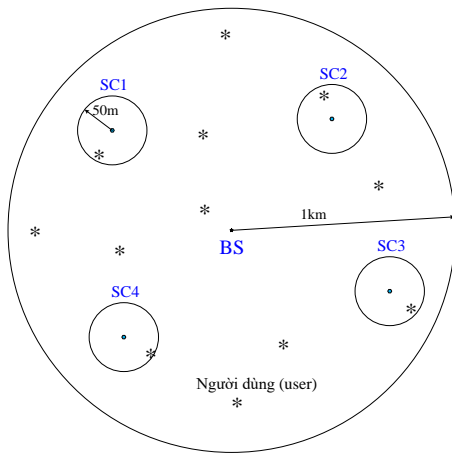
$$\mathbf{w}_{k,j} = \sqrt{p_{k,j}^*} \mathbf{u}_{k,j} \quad \forall k$$

Trong phần mô phỏng ta thực hiện với 1 trạm BS có bán kính 1 km, có 4 SC phân bố đều trong vùng phủ của BS và có bán kính 50m, số lượng người dùng trong BS là 12 (4 trong vùng phủ của 4 SC và 8 trong vùng còn lại) các người dùng được phân bố đều (uniform) như hình 7. Hệ thống được mô phỏng với các thông số gần giống hệ thống LTE và được mô tả trong [17,20] với bảng thông số mô phỏng như bảng 1 sau:

Bảng 1. Thông số mô phỏng

Thông Số	Giá trị
Hiệu suất bộ KĐ CS	$\gamma_{\rho_0} = 0.388, \gamma_{\rho_j} = 0.052 \forall j$
Max CS Phát /Anten	$q_{0,l} = 66, q_{j,l} = 0.08 \text{mW}, \forall j, l$
CS Tiêu hao trên mạch thụ động /Anten	$\eta_0 = 189 \text{mW}, \eta_j = 5.6 \text{mW}, \forall j$
Bán kính giới hạn trạm BS	1 km
Bán kính giới hạn trạm SC	50m
Tần số sóng mang	F = 2GHz

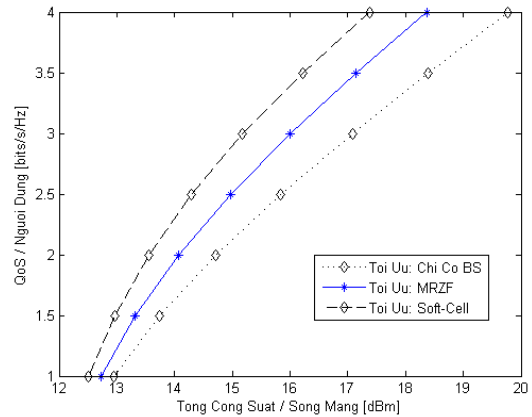
Số sóng mang	$C = 600$
Tổng băng thông	10 MHz
Dải thông sóng mang	15 kHz
Phân bố small-fading	$\mathbf{h}_{k,j} \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \mathbf{R}_{k,j})$
Độ lệch chuẩn Fading bóng mờ (shadow)	7 dB
Tổn hao đường truyền với khoảng cách d	$148.1 + 37.6 \log_{10} d$ dB
Công suất nhiễu trắng Gauss σ_k^2 với Noise Figure 5dB	127 dBm



Hình 7. Mô hình mô phỏng

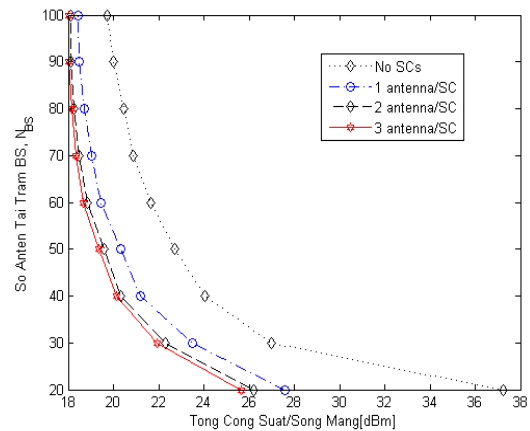
Hình 8 thể hiện kết quả mô phỏng công suất tiêu thụ trung bình trên sóng mang tùy theo chất lượng hệ thống QoS tính theo dung lượng trên từng người dùng với số lượng anten phát trên BS được chọn là $N_{BS} = 50$ và số anten trên SC được chọn là $N_{SC} = 2$. Quá trình này được tối ưu trong trường hợp: Tối ưu theo (12) khi không có Cell nhỏ SC nào cũng như khi có 4 Cell nhỏ và tối ưu theo (14) khi có 4 SC trong BS. Kết quả này cho thấy rằng chất lượng QoS tại người dùng yêu cầu càng cao thì năng lượng yêu cầu càng nhiều và khi tồn tại SC thì năng lượng trung bình trên sóng mang được cải thiện đáng kể, tuy nhiên khi dùng tối ưu theo (12) tỷ lệ cải thiện đáng kể nhưng quá trình thực hiện triển khai sẽ rất phức tạp khi số lượng anten lớn, trong khi đó theo thuật toán (14) MRZF thì hiệu quả sử dụng năng lượng có cải tiến ít hơn nhưng việc thực hiện sẽ nhanh hơn (chưa phân tích chi tiết được chỉ dựa vào thời gian mô phỏng) và có thể áp dụng vào thực tiễn.

Trong hình 9 kết quả mô phỏng tổng công suất trung bình trên sóng mang theo sự thay đổi số anten trên trạm BS và trạm SC.



Hình 8. Tổng công suất trung bình trên sóng mang theo chất lượng dịch vụ QoS của từng người dùng

Hình 9 cho thấy khi tăng số lượng anten thì công suất tổng trung bình trên sóng mang cải thiện đáng kể (tiết kiệm năng lượng cung cấp) mặc dù theo lý thuyết thì khi tăng số lượng anten thì công suất phát tĩnh sẽ tăng lên nhưng trong trường hợp này thì thành phần công suất phát động sẽ giảm nhiều hơn so với tăng công suất phát tĩnh. Điều này có thể lý giải do khi dùng trạm SC thì công suất tiêu hao do đường truyền giảm xuống. Bên cạnh đó, kết quả mô phỏng còn cho thấy khi số lượng anten tại trạm BS lớn thì việc tăng thêm anten (trên trạm BS cũng như trên SC) không cải thiện hiệu quả năng lượng đáng kể.



Hình 9. Tổng công suất trung bình trên sóng mang theo số lượng anten trên trạm BS và SC với chất lượng dịch vụ của từng người dùng là 2 bit/s/Hz

6. KẾT LUẬN

Kỹ thuật đa anten cho phép cải thiện hiệu quả sử dụng phổ khi số lượng anten tăng lên. Mạng mật độ cao cho phép tăng hiệu quả sử dụng năng lượng khi tăng mật độ trạm đến một giới hạn nhất định với giả thiết các trạm được phân bố trong không gian hai chiều theo quy luật Poisson. Khi kết hợp hai kỹ thuật đa anten và kiến trúc cell có kích thước nhỏ được bố trí chồng lấp (overlay) trong trạm BS cho phép tối ưu hiệu quả sử dụng

năng lượng thông qua giải pháp kết hợp khi vẫn thỏa mãn một chất lượng dịch vụ đặt ra trước. Tuy nhiên giới hạn của bài toán kết hợp này vẫn còn đang xét trong phạm vi một trạm BS chưa phát triển mở rộng cho mạng lớn. Với nhu cầu dữ liệu của mạng truyền thông vô tuyến cũng như đòi hỏi về tiết kiệm năng lượng thì việc kết hợp hai giải pháp kỹ thuật này với nhau là một giải pháp sẽ được sử dụng trong tương lai gần.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] www.metis2020.com
- [2] <https://metis-ii.5g-ppp.eu/>
- [3] Thomas L. Marzetta, "Noncooperative Cellular Wireless with Unlimited Numbers of Base Station Antennas", IEEE Trans. on Wireless Commun., Vol. 9, No. 11, pp. 3590–3600, 2010
- [4] F. Rusek, D. Persson, B. Lau, E. Larsson, T. Marzetta, O. Edfors, and F. Tufvesson, "Scaling up MIMO: Opportunities and challenges with very large arrays," IEEE Signal Process. Mag., vol. 30, no. 1, pp. 40–60, 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, pp. 1436–1449, Apr. 2013.
- [6] 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, 2013.
- [7] Erik G. Larsson, Ove Edfors, Fredrik Tufvesson, Thomas L. Marzetta, "Massive MIMO for Next Generation Wireless Systems", <http://arxiv.org/abs/1304.6690v3>, 2014
- [8] S. Parkvall, E. Dahlman, G. J'ongren, S. Landstr'om, and L. Lindbom, "Heterogeneous network deployments in LTE – the soft-cell approach," Ericsson Review, no. 2, 2011.
- [9] J. Hoydis, M. Kobayashi, and M. Debbah, "Green small-cell networks," IEEE Veh. Technol. Mag., vol. 6, no. 1, pp. 37–43, 2011.
- [10] E. Dahlman, S. Parkvall, J. Sk'old, and P. Beming, "3G Evolution HSPA and LTE for Mobile Broadband," Academic Press, 2008
- [11] M. Grant and S. Boyd, "CVX: Matlab Software for Disciplined Convex Programming (Web Page and Software)," Jun. 2009 [Online]. Available: <http://stanford.edu/~boyd/cvx>
- [12] Michael C. Grant, Stephen P. Boyd "The CVX Users' Guide" <http://cvxr.com/cvx/> December 26, 2017, CVX Research, Inc.
- [13] J. Jose, A. Ashikhmin, T. L. Marzetta, and S. Vishwanath, "Pilot contamination and precoding in multi-cell TDD systems," IEEE Trans. Commun., vol. 10, no. 8, pp. 2640–2651, 2011.
- [14] M. Medard, "The effect upon channel capacity in wireless communications of perfect and imperfect knowledge of the channel," IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 46, no. 3, pp. 933–946, 2000.
- [15] 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, 2015.

- [16] S. Cui, A. Goldsmith, and A. Bahai, “Energy-constrained modulation optimization,” IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 4, no. 5, pp. 2349–2360, 2005.
- [17] G. Auer and et al., “D2.3: Energy efficiency analysis of the reference systems, areas of improvements and target breakdown.” INFSO-ICT-247733 EARTH, ver. 2.0, 2012.
- [18] D. Ng, E. Lo, and R. Schober, “Energy-efficient resource allocation in OFDMA systems with large numbers of base station antennas,” IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 11, no. 9, pp. 3292–3304, 2012.
- [19] E. Bjornson, N. Jaldén, M. Bengtsson, and B. Ottersten, “Optimality properties, distributed strategies, and measurement-based evaluation of coordinated multicell OFDMA transmission,” IEEE Trans. Signal Process., vol. 59, no. 12, pp. 6086–6101, 2011.
- [20] “Further advancements for E-UTRA physical layer aspects (Release 9).” 3GPP TS 36.814, Mar. 2010.

Tác giả chịu trách nhiệm bài viết:

Dương Hiền Thuận

Trường Đại học Sài Gòn

Email: dhthuan@gmail.com; thuan.duong@sgu.edu.vn