

TỐI THIỂU TỔNG CÔNG SUẤT PHÁT TRONG MẠNG TRUYỀN DẪN VÔ TUYẾN ĐA ĂNG TEN CÓ CHUYỂN TIẾP ỨNG DỤNG KỸ THUẬT TỐI ƯU SPECTRAL

MINIMAL TOTAL TRANSMIT POWER IN RELAY WIRELESS TRANSMISSION NETWORK USING SPECTRAL OPTIMIZATION TECHNIQUE

Trần Đình Thông^{1,*},
Dư Đình Viên¹, Trần Xuân Phương¹

TÓM TẮT

Hệ thống truyền dẫn vô tuyến chuyển tiếp đa ăng-ten với giao thức xử lý AF nhận được nhiều sự quan tâm nghiên cứu trong việc tối ưu hóa công suất phát. Việc sử dụng kỹ thuật SDR trong các đề xuất trước đây thông qua việc véc-tơ hóa ma trận tiền giải mã đã tạo ra một ma trận biến trung gian làm gia tăng độ phức tạp cho bài toán. Khi đó, để giải quyết vấn đề này đối với những bài toán có kích thước lớn thì cần sử dụng số lượng biến phụ để đưa ra được một bài toán tối ưu có độ phức tạp bé hơn so với kỹ thuật SDR được đề xuất trước đây. Bài báo đề xuất kỹ thuật tối ưu Spectral để xử lý trực tiếp đối với ma trận biến cần tối ưu thông qua việc phân tích trị riêng và véc-tơ riêng. Các kết quả mô phỏng minh chứng việc sử dụng kỹ thuật tối ưu SPO đã cho kết quả tiệm cận với kỹ thuật SDR ở các mức ngưỡng SINR khác nhau.

Từ khóa: Tổng công suất phát, kỹ thuật tối ưu Spectral, truyền dẫn vô tuyến đa ăng-ten.

ABSTRACT

The multi-antenna relay wireless transmission system with AF processing protocol has received a lot of research attention on the power generation optimization problems. The SDR technique was used in previous proposals by vectorizing the pre-decoding matrix and then producing a matrix of secondary variables that increased the computational complexity. To solve this problem with large size problems, the number of additional variables needs to be shortened. Finally, an optimal problem with a smaller complexity than the proposed SDR technique is proposed. The paper proposes a Spectral optimization technique to deal directly with the variable matrix to be optimized through eigenvalue analysis and eigenvectors. The simulation results demonstrate that the use of SPO optimization technique has brought asymptotic results to SDR technology at different SINR threshold levels.

Keywords: Total transmit power, spectral optimization technique, multi antenna wireless transmission.

¹Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

*Email: thong77.hau@gmail.com

Ngày nhận bài: 25/01/2021

Ngày chấp nhận đăng: 15/6/2021

Ngày chấp nhận đăng: 25/10/2021

CHỮ VIẾT TẮT

AF	Amplifier Forward (khuếch đại và chuyển tiếp)
SDR	Semidefinite Relaxation (bài toán bán bất định giảm lược)
SDP	Semidefinite Program (bài toán bán bất định)
SINR	Signal to interference plus noise ratio (tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu cộng)
SPO	Spectral optimization technique (kỹ thuật tối ưu Spectral)

1. GIỚI THIỆU

Hệ thống truyền dẫn vô tuyến chuyển tiếp đa ăng-ten với giao thức xử lý AF đã nhận được nhiều sự quan tâm nghiên cứu trước đây kể từ khi hệ thống này có thể nâng cao hiệu năng về tốc độ truyền dữ liệu và cải thiện được vùng phủ sóng trong mạng truyền dẫn vô tuyến. Đối với phương thức chuyển tiếp MIMO sử dụng AF, tại các nút chuyển tiếp tín hiệu thu được nhân với một ma trận trọng số và sau đó được truyền tới các user bên thu. Vấn đề cần tìm ra ma trận trọng số tối ưu tại chuyển tiếp nhằm tối thiểu được tổng công suất phát trong khi vẫn đảm bảo được chất lượng dịch vụ QoS bên thu.

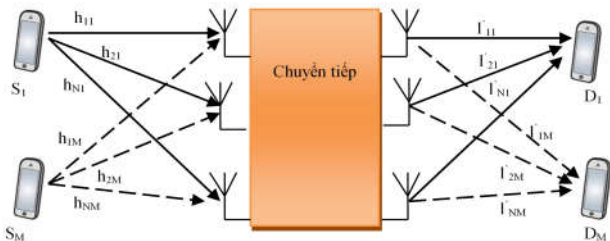
Các bài toán liên quan đến tối thiểu công suất có các điều kiện ràng buộc SINR không lỗi đã gây ra sự khó khăn khi giải bài toán tối ưu công suất về mặt toán học. Nhiều kỹ thuật tối ưu được sử dụng cho bài toán điều khiển công suất phát trong đó kỹ thuật tối ưu SDR với ý tưởng thực hiện giảm hạng ma trận đối với các điều kiện ràng buộc để đưa về dạng bài toán dạng SDP. Tuy nhiên, kỹ thuật SDR thực hiện véc-tơ hóa ma trận tiền giải mã \mathbf{X} và sau đó đưa ra một ma trận biến phụ đã làm gia tăng độ phức tạp tính toán và rất khó giải. Để giải quyết vấn đề này với những bài toán có kích thước lớn thì số lượng biến thêm vào cần phải được rút gọn để đưa ra được một bài toán tối ưu với hàm mục tiêu mới có độ phức tạp bé hơn so với phương pháp SDR được đề cập ở trên.

Thay vì véc tơ hóa ma trận tiên giải mã của kỹ thuật SDR để xác định giá trị tối ưu, bài báo đề xuất kỹ thuật tối ưu Spectral thông qua các biến đổi véc-tơ riêng và sử dụng thuật toán lập để xác định giá trị tối ưu. Hơn nữa, các bước lập tối thiểu thực hiện tìm được giá trị tối ưu đảm bảo tăng tốc độ hội tụ. Kết quả số liệu mô phỏng đã xác định được giá trị tối thiểu tổng công suất phát của kỹ thuật tối ưu để xuất cũng như thời gian tính toán trung bình khi so sánh với kỹ thuật SDR trong một số trường hợp.

2. MÔ HÌNH TRUYỀN DẪN VÔ TUYẾN CHUYỂN TIẾP ĐA ẪNG-TEN VỚI GIAO THỨC XỬ LÝ AF

2.1. Mô hình truyền dẫn vô tuyến chuyển tiếp đa ăng-ten

Xét mô hình truyền dẫn vô tuyến chuyển tiếp đa ăng-ten như hình 1. Mô hình nghiên cứu có M user nguồn phát truyền tín hiệu tới phía thu có M user thông qua một chuyển tiếp được trang bị N ăng-ten thu và N ăng-ten phát. Khi sử dụng giao thức chuyển tiếp đa ăng-ten sẽ gia tăng được vùng phủ truyền dẫn với giả thiết không thực hiện thiết lập kết nối truyền thông tin trực tiếp từ nguồn tới đích. Chuyển tiếp đa ăng-ten hai chặng được hoạt động trong chế độ có phương thức khuếch đại và chuyển tiếp. Bài báo xem xét mô hình truyền dẫn vô tuyến chuyển tiếp đa ăng-ten với mục tiêu tối thiểu tổng công suất phát nhưng đảm bảo điều kiện SINR lớn hơn một ngưỡng cho phép tại từng user phía thu. Phạm vi công suất tiêu thụ tại trạm phát chỉ tính đến công suất thực hiện xử lý tín hiệu từ các ma trận trọng số tối ưu để thực hiện tạo búp cho mỗi ăng-ten.



Hình 1. Mô hình chuyển tiếp vô tuyến MU-MIMO phương thức xử lý AF

Véc-tơ tín hiệu $s = [s_1, s_2, \dots, s_M]^T \in \mathbb{C}^M$ được gửi từ M user bên phát được giả thiết là độc lập với trị trung bình bằng không và phương sai $\sigma_s^2 = E[|s_i|^2]$. Giả thiết $h_i = [h_{i1}, h_{i2}, \dots, h_{iN}]^T \in \mathbb{C}^N, i = 1, 2, \dots, M$ là véc tơ kênh truyền dẫn hướng lên giữa nguồn phát thứ i với chuyển tiếp. Trong khi đó, $l_j = [l_{j1}, l_{j2}, \dots, l_{jN}]^T \in \mathbb{C}^N, j = 1, 2, \dots, M$ là véc tơ kênh truyền dẫn hướng xuống giữa nút chuyển tiếp và các user thu thứ j bên phía thu. Giai đoạn truyền dẫn thứ nhất, tất cả các user bên phát truyền tín hiệu đồng thời tới nút chuyển tiếp. Khi đó tín hiệu thu được tại nút chuyển tiếp được xác định:

$$y_{up} = Hs + n_r \tag{1}$$

Trong đó, H là ma trận kênh hướng lên có các cột là các véc-tơ kênh. Giả thiết $n_r = [n_{r1}, n_{r2}, \dots, n_{rN}]^T \in \mathbb{C}^N, i = 1, 2, \dots, N$ là nhiễu trắng cộng Gau-xơ có giá trị trung bình bằng 0 với

phương sai $\sigma_r^2 = E[|n_m|^2]$. Khi đó, X là ma trận trọng số tối ưu cần tìm được nhân với tín hiệu thu tại chuyển tiếp. Chặng thứ 2 chuyển tiếp sẽ phát tín hiệu sau khi xử lý tới các user tại phía thu.

Tín hiệu thu được tại chuyển tiếp được xác định:

$$y_{relay} = Xy_{up} = XHs + Xn_r \tag{2}$$

Tổng công suất chuyển tiếp được xác định:

$$P_T(X) = E\{\|y_{relay}\|^2\} = \text{trace}((\sigma_s^2 H H^H + \sigma_r^2 I_N) X^H X) \tag{3}$$

Tín hiệu thu được tại user phía thu:

$$y_d = LXHs + LXn_r + n_d \tag{4}$$

với n_d là nhiễu trắng cộng phân bố Gau-xơ tại phía thu với phương sai σ_d^2 và L là ma trận kênh hướng xuống.

Tín hiệu thu được tại user thu thứ i có thể được xác định:

$$y_{di} = l_i^T X H s_i + \sum_{j \neq i} l_i^T X H s_j + l_i^T X n_r + n_{di} \tag{5}$$

Tỷ số tín hiệu trên nhiễu giao thoa và tạp âm SINR tại user thu thứ i:

$$SINR_i(X) = \frac{\sigma_s^2 \text{trace}(l_i l_i^H X H h_i h_i^H X^H)}{\sigma_s^2 \sum_{j \neq i} \text{trace}(l_i l_i^H X H h_j h_j^H X^H) + \sigma_r^2 \text{trace}(l_i l_i^H X X^H) + \sigma_d^2} \tag{6}$$

với $l_i = (l_i)^*$ là liên hợp phức của thông tin kênh hướng xuống đối với user thứ i ở phía thu.

Trong truyền dẫn vô tuyến có chuyển tiếp, mục tiêu chính của chuyển tiếp thực hiện truyền dẫn tín hiệu giữa phía phát và phía thu nhằm tối thiểu hóa tổng công suất nhưng vẫn thỏa mãn điều kiện SINR.

Bài toán tối thiểu hóa tổng công suất dưới điều kiện ràng buộc SINR được xác định như (7):

$$\min_{X \in \mathbb{C}^{N \times N}} \text{trace}((\sigma_s^2 H H^H + \sigma_r^2 I_N) X^H X) \tag{7}$$

thỏa mãn điều kiện:

$$SINR_i(X) \geq \alpha_i, i = 1, 2, \dots, M. \tag{8}$$

2.2. Xây dựng bài toán tối thiểu công suất phát sử dụng kỹ thuật SDR

Trước khi trình bày kỹ thuật tối ưu Spectral để xuất, phần này xây dựng bài toán dạng SDR để giải quyết về vấn đề về điều kiện ràng buộc rank-1 cho bài toán tối ưu. Ý tưởng của kỹ thuật SDR biến đổi đưa về bài toán tối ưu ma trận rank-1 thông qua việc sử dụng một ma trận biến phụ. Do đó, bài toán mới yêu cầu một lượng phép tính toán lớn để đạt được giá trị tối ưu. Trong trường hợp đặc biệt, tổng công suất $P_T(X)$ trong (7) được viết lại:

$$P_T(X) = \text{trace}(X^H X [(\sigma_s^2 H H^H + \sigma_r^2 I_N)^T \otimes I_N]) \tag{9}$$

Khi đó, tỷ số SINR tại phía đích thứ i được biểu diễn như sau:

$$SINR_i(X) = \frac{\sigma_s^2 \text{trace}(X^H X [(h_i h_i^H)^T \otimes (l_i l_i^H)])}{\text{trace}(X^H X A \otimes (l_i l_i^H)) + \sigma_d^2}, \tag{10}$$

với $\mathbf{A} = (\sigma_s^2 \sum_{i=1}^M \mathbf{h}_i \mathbf{h}_i^H + \sigma_r^2 \mathbf{I}_N)^T$. Bằng việc thay thế thành

phần phi tuyến $\mathbf{X}^H \mathbf{X} \in \mathbb{C}^{N^2 \times N^2}$ bằng ma trận Hermitian $0 \leq \tilde{\mathbf{X}} \in \mathbb{C}^{N^2 \times N^2}$, khi đó bài toán tối ưu không lồi (7) được biểu diễn:

$$\min_{0 \leq \tilde{\mathbf{X}} \in \mathbb{C}^{N^2 \times N^2}} P_T(\tilde{\mathbf{X}}) \tag{11}$$

với điều kiện ràng buộc:

$$\text{SINR}_i(\tilde{\mathbf{X}}) \geq \alpha_i, i = 1, 2, \dots, M \tag{12}$$

Bài toán tối ưu lồi đã được biến đổi luôn luôn giải được giá trị tối ưu đạt rank-1. Bài toán đó có thể đưa ra một giá trị tối ưu chính xác cho bài toán tối ưu không lồi (9). Bài toán toàn phương không lồi với biến ma trận $\mathbf{X} \in \mathbb{C}^{N \times N}$ với số lượng các điều kiện ràng buộc không lớn hơn N thì có thể giải được một cách chính xác bằng kỹ thuật SDP tương đương. Tuy nhiên, từ góc độ về mức độ tính toán thì điều bất lợi chính của phương pháp SDR là đưa ra một ma trận biến $\tilde{\mathbf{X}}$ trong (11) có kích thước lớn. Độ phức tạp tính toán giải theo phương pháp SDP là $O((N^2(N^2+1)/2)^{2.5})$, điều đó dẫn tới kỹ thuật SDP chỉ áp dụng cho mô hình truyền dẫn chuyển tiếp MIMO có số lượng anten thu phát nhỏ.

2.3. Thiết lập bài toán tối thiểu công suất phát sử dụng kỹ thuật tối ưu Spectral

Trong [5] điều kiện ràng buộc SINR không lồi đã gây ra sự khó khăn trong việc thực hiện bài toán tối ưu công suất về mặt toán học. Để giải quyết vấn đề này cần thực hiện các biến đổi toán học nhằm giảm các phép toán thực hiện. Thông qua việc đưa ra một ma trận \mathbf{Y} mà các phần tử $\mathbf{Y}(i,i)$ nằm trên đường chéo có tính chất phi tuyến $\text{trace}(\mathbf{I}_i^H \mathbf{X} \mathbf{h}_i \mathbf{h}_i^H \mathbf{X}^H)$, $i = 1, 2, \dots, M$, điều kiện ràng buộc trong bài toán (7) điều kiện SINR trở thành hàm lồi.

$$q_i [\sigma_s^2 \sum_{j=1}^M \text{trace}(\mathbf{I}_i^H \mathbf{X} \mathbf{h}_j \mathbf{h}_j^H \mathbf{X}^H) + \sigma_r^2 \text{trace}(\mathbf{I}_i^H \mathbf{X} \mathbf{X}^H) + \sigma_d^2] - \sigma_s^2 \mathbf{Y}(i,i) \leq 0, \tag{13}$$

$i = 1, 2, \dots, M$

Định nghĩa một ánh xạ tuyến tính $\Gamma(\mathbf{X}) : \mathbb{C}^{N \times N} \rightarrow \mathbb{C}^M$ với $\Gamma(\mathbf{X}) = [\mathbf{I}_1^H \mathbf{X} \mathbf{h}_1, \mathbf{I}_2^H \mathbf{X} \mathbf{h}_2, \dots, \mathbf{I}_M^H \mathbf{X} \mathbf{h}_M]^T$. Khi đó điều kiện ràng buộc trong bài toán (7) đối với biến \mathbf{X} tương đương với điều kiện của (13) đối với (\mathbf{X}, \mathbf{Y}) , do đó, khi và chỉ khi (\mathbf{X}, \mathbf{Y}) thỏa mãn:

$$\bar{\mathbf{Y}} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y} & \Gamma(\mathbf{X}) \\ \Gamma^H(\mathbf{X}) & 1 \end{bmatrix} \geq 0 \tag{14}$$

$$\text{rank}(\bar{\mathbf{Y}}) = 1. \tag{15}$$

Thông thường (14), (15) tương đương với $\mathbf{Y}(i,i) = \text{trace}(\mathbf{I}_i^H \mathbf{X} \mathbf{h}_i \mathbf{h}_i^H \mathbf{X}^H)$, khi đó bài toán tối ưu (7) tương đương với:

$$\min_{\mathbf{X} \in \mathbb{C}^{N \times N}, \mathbf{Y} \in \mathbb{C}^{M \times M}} P_T(\mathbf{X}) \tag{16}$$

với điều kiện:

$$q_i [\sigma_s^2 \sum_{j=1}^M \text{trace}(\mathbf{I}_i^H \mathbf{X} \mathbf{h}_j \mathbf{h}_j^H \mathbf{X}^H) + \sigma_r^2 \text{trace}(\mathbf{I}_i^H \mathbf{X} \mathbf{X}^H) + \sigma_d^2] - \sigma_s^2 \mathbf{Y}(i,i) \leq 0, \tag{17}$$

$i = 1, 2, \dots, M$

$$\bar{\mathbf{Y}} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y} & \Gamma(\mathbf{X}) \\ \Gamma^H(\mathbf{X}) & 1 \end{bmatrix} \geq 0 \tag{18}$$

$$\text{rank}(\bar{\mathbf{Y}}) = 1. \tag{19}$$

Dựa trên kỹ thuật tối ưu Spectral sử dụng thuật toán lặp để giảm hạng cho ma trận $\bar{\mathbf{Y}}$ cũng như giá trị hàm mục tiêu. Đầu tiên, có thể thấy rằng tồn tại giá trị $0 < \mu < \infty$ thì khi $\mu > \mu_0$, (17) tương đương với:

$$\min_{\mathbf{X}, \mathbf{Y}} P_T(\mathbf{X}) + \mu [\text{trace}(\bar{\mathbf{Y}}) - \lambda_{\max}(\bar{\mathbf{Y}})] \tag{20}$$

với điều kiện ràng buộc:

$$q_i [\sigma_s^2 \sum_{j=1}^M \text{trace}(\mathbf{I}_i^H \mathbf{X} \mathbf{h}_j \mathbf{h}_j^H \mathbf{X}^H) + \sigma_r^2 \text{trace}(\mathbf{I}_i^H \mathbf{X} \mathbf{X}^H) + \sigma_d^2] - \sigma_s^2 \mathbf{Y}(i,i) \leq 0, \tag{20a}$$

$i = 1, 2, \dots, M.$

$$\bar{\mathbf{Y}} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y} & \Gamma(\mathbf{X}) \\ \Gamma^H(\mathbf{X}) & 1 \end{bmatrix} \geq 0 \tag{20b}$$

với $\bar{\mathbf{Y}}$ được xác định theo $\lambda_{\max}(\bar{\mathbf{Y}})$ là một hàm của \mathbf{X} và \mathbf{Y} với giả thiết:

$$\lambda_{\max}(\bar{\mathbf{Y}}) = f(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$$

Khi đó đối với bất kỳ ma trận \mathbf{M} tùy ý thì đều có:

$$\lambda_{\max}(\mathbf{M} + \Delta \mathbf{M}) - \lambda_{\max}(\mathbf{M}) \geq \mathbf{x}_{\max}^H \Delta \mathbf{M} \mathbf{x}_{\max} \tag{21}$$

trong đó λ_{\max} và \mathbf{x}_{\max} là trị riêng lớn nhất và chuẩn véc-tơ riêng tương ứng của \mathbf{M} , khi đó ta có:

$$\lambda_{\max}(\bar{\mathbf{Y}} + \Delta \bar{\mathbf{Y}}) - \lambda_{\max}(\bar{\mathbf{Y}}) \geq \mathbf{x}_{\max}^H \Delta \bar{\mathbf{Y}} \mathbf{x}_{\max} \tag{22}$$

Khi đó:

$$\left(\begin{array}{l} \lambda_{\max} \left[\begin{array}{cc} \mathbf{Y} + \Delta \mathbf{Y} & \Gamma(\mathbf{X} + \Delta \mathbf{X}) \\ \Gamma^H(\mathbf{X} + \Delta \mathbf{X}) & 1 \end{array} \right] \\ -\lambda_{\max} \left[\begin{array}{cc} \mathbf{Y} & \Gamma(\mathbf{X}) \\ \Gamma^H(\mathbf{X}) & 1 \end{array} \right] \end{array} \right) \geq \text{trace}(\mathbf{x}_{\max} \mathbf{x}_{\max}^H \left[\begin{array}{cc} \Delta \mathbf{Y} & \Gamma(\Delta \mathbf{X}) \\ \Gamma^H(\Delta \mathbf{X}) & 0 \end{array} \right]) \tag{23}$$

Bằng việc giả thiết $\mathbf{x}_{\max} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{\max}^M \\ \mathbf{x}_{\max}^1 \end{bmatrix}$ với \mathbf{x}_{\max}^M gồm M phần

tử đầu tiên của \mathbf{x}_{\max} và \mathbf{x}_{\max}^1 là phần tử cuối cùng và sau đó về trái của (23) viết lại:

$$\text{trace} \left(\begin{bmatrix} \mathbf{x}_{\max}^M \\ \mathbf{x}_{\max}^1 \end{bmatrix} \left[(\mathbf{x}_{\max}^H)^H \quad (\mathbf{x}_{\max}^1)^H \right] \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{Y} & \Gamma(\Delta \mathbf{X}) \\ \Gamma^H(\Delta \mathbf{X}) & 0 \end{bmatrix} \right) \tag{24}$$

$$= \text{trace}(\mathbf{x}_{\max}^M (\mathbf{x}_{\max}^M)^H \Delta \mathbf{Y}) + 2 \text{trace}(\mathbf{x}_{\max}^M (\mathbf{x}_{\max}^1)^H \Gamma^H(\Delta \mathbf{X}))$$

Bắt đầu bằng giá trị $\mathbf{Y}^{(k)}$ và $\mathbf{X}^{(k)}$, một biểu thức đối với $\lambda_{\max}(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$ có thể được biểu diễn như sau:

$$f(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = f(\mathbf{X}^{(k)} + (\mathbf{X} - \mathbf{X}^{(k)}), \mathbf{Y}^{(k)} + (\mathbf{Y} - \mathbf{Y}^{(k)})) \geq \lambda_{\max}(\mathbf{X}^{(k)}, \mathbf{Y}^{(k)}) + \text{trace}(\mathbf{x}_{\max}^M (\mathbf{x}_{\max}^M)^H (\mathbf{Y} - \mathbf{Y}^{(k)})) + 2 \text{trace}(\mathbf{x}_{\max}^M (\mathbf{x}_{\max}^1)^H \Gamma^H(\mathbf{X} - \mathbf{X}^{(k)}))$$

Vi vậy, bài toán tối ưu (17) trở thành:

$$\min_{\mathbf{X}, \mathbf{Y}} P_T(\mathbf{X}) + \mu [\text{trace}(\bar{\mathbf{Y}}) - \lambda_{\max}(\bar{\mathbf{Y}}) - \text{trace}(\mathbf{x}_{\max}^M (\mathbf{x}_{\max}^M)^H (\mathbf{Y} - \mathbf{Y}^{(k)})) - 2 \text{trace}(\mathbf{x}_{\max}^M (\mathbf{x}_{\max}^1)^H \Gamma^H(\mathbf{X} - \mathbf{X}^{(k)}))] \tag{25}$$

với điều kiện:

$$\alpha_i(\sigma_s^2 \sum_{j=1}^M \text{trace}(\mathbf{I}_i^H \mathbf{X} \mathbf{h}_i \mathbf{h}_i^H \mathbf{X}^H) + \sigma_r^2 \text{trace}(\mathbf{I}_i^H \mathbf{X} \mathbf{X}^H) + \sigma_d^2) - \sigma_s^2 \mathbf{Y}(i, i) \leq 0,$$

$$i = 1, 2, \dots, M$$

$$\bar{\mathbf{Y}} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y} & \mathbf{\Gamma}(\mathbf{X}) \\ \mathbf{\Gamma}^H(\mathbf{X}) & 1 \end{bmatrix} \geq 0$$

Các bước thực hiện tìm kiếm giá trị tối ưu chia thành hai giai đoạn. Giai đoạn thứ nhất xác định tham số μ như bài (25) để đưa ra được giá trị rank-1 cho ma trận $\bar{\mathbf{Y}}$. Hệ số μ có thể được lựa chọn từ một giá trị đủ nhỏ chẳng hạn $\mu = 0,5$. Nếu giá trị này nhỏ nhưng chưa xác định được ma trận $\bar{\mathbf{Y}}$ có rank-1 thì thay đổi giá trị μ bằng 2μ . Giai đoạn thứ hai khi giá trị μ đã được lựa chọn ở bước thứ nhất sẽ được giữ nguyên không đổi trong khi đó thực hiện thiết lập các giá trị $(\mathbf{X}^{(k)}, \mathbf{Y}^{(k)})$ sau mỗi bước lặp. Quá trình tối ưu dừng khi sự chênh lệch giữa các giá trị hàm mục tiêu trong hai bước lặp liên tiếp bé hơn 10^{-2} . Kết quả số liệu [4] đã chứng minh cho thấy kỹ thuật tối ưu Spectral có thể xác định được giá trị tối ưu mà không phụ thuộc nhiều vào việc lựa chọn giá trị khởi tạo $(\mathbf{X}^{(k)}, \mathbf{Y}^{(k)})$. Để hệ thống hóa thuật toán thực hiện mô phỏng cho kỹ thuật tối ưu Spectral theo các bước như sau:

Các bước thực hiện thuật toán sử dụng kỹ thuật tối ưu Spectral

- Xác định giá trị $(\mathbf{X}^{(0)}, \mathbf{Y}^{(0)})$
- Bước lặp thứ k: Giải bài toán (25) và xác định giá trị tối ưu $(\mathbf{X}^{(k+1)}, \mathbf{Y}^{(k+1)})$. Đưa ra mức sai số ϵ , thuật toán dừng và đưa ra giá trị tối ưu $(\mathbf{X}^{(k)}, \mathbf{Y}^{(k)})$.
- + Nếu:

$$P_r(\mathbf{X}^{(k)}) - P_r(\mathbf{X}^{(k+1)}) + \mu(\text{trace}(\mathbf{Y}^{(k)} - \mathbf{Y}^{(k+1)})) - f(\mathbf{X}^{(k)}, \mathbf{Y}^{(k)}) + f(\mathbf{X}^{(k+1)}, \mathbf{Y}^{(k+1)}) \leq \epsilon$$
- + Nếu không thỏa mãn chuyển sang bước lặp tiếp theo.
- Đưa ra giá trị tối ưu cuối cùng.

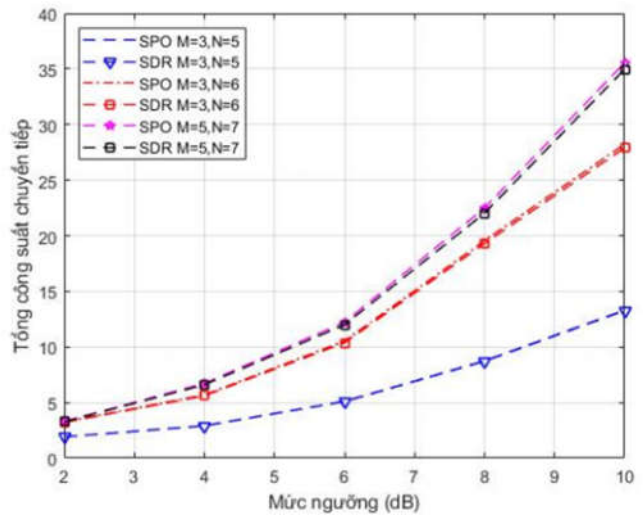
3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ ĐÁNH GIÁ

Để thực hiện đánh giá được hiệu quả của kỹ thuật tối ưu Spectral để xuất áp dụng cho mô hình khảo sát. Quá trình thực hiện mô phỏng sử dụng cấu hình máy tính PC có bộ xử lý core i7 4770, tốc độ chip 3.4GHz socket 1150 và phần mềm Matlab 2018b kết hợp với gói công cụ Sedumi, SDPT3, Yalmp[2]. Giả thiết thông tin trạng thái kênh được ước lượng và tất cả các phần tử kênh phân bố Gau-xơ độc lập. Công suất tín hiệu, chuyển tiếp và công suất nhiễu ở phía thu đặt giá trị cố định tương ứng tại các mức 0dB, -20dB và 0dB. Với mỗi mức ngưỡng SINR thay đổi từ 2dB đến 10dB được thực hiện mô phỏng Monte-Carlo với 1000 phép thử đối với một lần của giá trị SINR.

Kịch bản mô phỏng 1:

Trước hết đánh giá so sánh kỹ thuật tối ưu SDR và kỹ thuật Spectral cho mô hình đề xuất trong đó với mỗi mức

ngưỡng SINR có số lượng user nguồn, đích và anten thu phát tại chuyển tiếp trong ba trường hợp: $(M, N) = (3, 5), (3, 6), (5, 7)$. Kết quả mô phỏng ở đồ thị hình 2 cho thấy với các trường hợp khác nhau thì kỹ thuật SDR và kỹ thuật Spectral đã xác định được tổng công suất phát tối thiểu chuyển tiếp. Với trường hợp $(M, N) = (3, 5)$, kỹ thuật SDR và SPO cho kết quả công suất tối thiểu như nhau. Tuy nhiên, đối với hai trường hợp còn lại đã cho thấy kỹ thuật tối ưu SPO đưa ra giá trị tối ưu tiệm cận với kỹ thuật SDR.



Hình 2. So sánh tổng công suất tối thiểu chuyển tiếp giữa kỹ thuật SDR và SPO

Kịch bản mô phỏng 2:

Trường hợp này thực hiện đối với bài toán với trường hợp số ăng-ten thu phát nút chuyển tiếp $N = 5$ và số user bên phát và bên thu $M = 4$. Ngoài việc so sánh giá trị công suất tối thiểu còn thực hiện so sánh thời gian tính toán trung bình giữa hai kỹ thuật SDR và SPO. Theo kết quả mô phỏng dữ liệu thu được từ bảng 1, giá trị tổng công suất tối thiểu của kỹ thuật SPO tiệm cận với kỹ thuật SDR với các mức ngưỡng SINR thay đổi từ mức 2dB đến 10dB. Đặc biệt, kết quả dữ liệu bảng 2 cho thấy thời gian tính toán trung bình của kỹ thuật SPO nhỏ hơn rất nhiều so với kỹ thuật SDR nghĩa là tốc độ hội tụ bài toán đã được cải thiện.

Bảng 1. So sánh tổng công suất tối ưu chuyển tiếp giữa kỹ thuật SDR và SPO

$(M, N) = (4, 5)$	2dB	4dB	6dB	8dB	10dB
SDR	3,218	5,612	10,37	19,31	27,29
SPO	3,253	5,674	10,53	19,57	28,23

Bảng 2. So sánh thời gian tính toán trung bình giữa kỹ thuật SDR và SPO

Đơn vị: giây

$(M, N) = (4, 5)$	2dB	4dB	6dB	8dB	10dB
SDR	3,22	3,18	3,35	3,54	4,48
SPO	1,69	1,76	2,15	2,55	3,65

4. KẾT LUẬN

Với mô hình nghiên cứu chuyển tiếp MIMO có nhiều ứng dụng trong các mạng truyền dẫn vô tuyến như mạng

thông tin di động, mạng cảm biến, mạng truyền dẫn thủy âm SONAR. Đồng thời kết quả mô phỏng của bài báo đã chỉ ra việc ứng dụng kỹ thuật SPO xác định được giá trị tổng công suất tối thiểu khi so sánh với kỹ thuật SDR. Bên cạnh đó, kỹ thuật SPO còn có thể thực hiện tăng tốc độ hội tụ bài toán trong một số trường hợp. Với việc sử dụng kỹ thuật tối ưu để xuất có ý nghĩa về mặt khoa học khi áp dụng các mô hình có hàm mục tiêu với độ phức tạp lớn phù hợp với các mạng truyền dẫn vô tuyến trong tương lai.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. S. Boyd, L. Vandenberghe, 2004. *Convex Optimization*. Cambridge.
- [2]. J.F. Sturm, 1999. *Using SeDuMi 1.02, a Matlab toolbox for optimization over symmetric cones*. Optim. Methods Soft, Vol. 11-12, pp. 625–653.
- [3]. Lyudmila Polyakova, Vladimir Karelin, 2014. *Exact penalty methods for nonsmooth optimization*. 20th International Workshop on Beam Dynamics and Optimization.
- [4]. A.H. Phan, H.D. Tuan, H.H. Kha, H.H. Nguyen, 2013. *Iterative D.C. optimization of precoding in wireless mimo relaying*. IEEE Transactions on Wireless Communication.
- [5]. A.H. Phan, H. D.Tuan, H. H. Kha, 2012. *Nonsmooth Optimization for Efficient Beamforming in Cognitive Radio Multicast Transmission*. IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 60, No. 6.
- [6]. Y. Li, M. Sheng, X. Wang, Y. Zhang, J. Wen, 2015. *Max-min energy efficient power allocation in interference-limited wireless networks*. IEEE Trans. Veh. Technol, Vol. 64, No. 9, pp. 4321–4326.
- [7]. Hanna Pihkola, Mikko Hongisto, Olli Apilo, Mika Lasanen, Saija Vatanen, 2018. *Energy consumption of mobile data transfer Increasing or decreasing*. 5th International Conference on Information and Communication Technology for Sustainability.
- [8]. Chi Feng, 2016. *Interference analysis of massive MIMO downlink with precoding and applications in performance analysis*. Master of Science in Communications.

AUTHORS INFORMATION

Tran Dinh Thong, Du Dinh Vien, Tran Xuan Phuong

Hanoi University of Industry