

ỨNG DỤNG KỸ THUẬT TỐI ƯU HÓA CHO BÀI TOÁN BEAMFORMING TRONG TRUYỀN DẪN VÔ TUYẾN VỚI BỐI CẢNH ĐẢM BẢO AN NINH LỚP VẬT LÝ

APPLICATION OF OPTIMIZING TECHNIQUES FOR BEAMFORMING PROBLEMS IN WIRELESS TRANSMISSION WITH PHYSICAL SECURITY BACKGROUND

Trần Hoàng Linh^{1*}, Nguyễn Huy Hoàng²,
Phan Huy Anh³, Trần Đình Thông⁴

TÓM TẮT

Các bài toán tối ưu beamforming (BF) trong truyền dẫn vô tuyến thường là những bài toán toàn phương không lồi với phương pháp điển hình để giải là sử dụng kỹ thuật SDR cùng với kỹ thuật ngẫu nhiên. Tuy nhiên, trong nhiều trường hợp, các giải pháp này không mang lại kết quả tối ưu đặc biệt khi hạng ma trận biến tối ưu lớn hơn 1. Trong bài báo này, bài toán beamforming được đặt trong bối cảnh đảm bảo an ninh lớp vật lý khi có đối tượng xâm nhập nghe lén với yêu cầu vừa chế áp được đối tượng xâm nhập đồng thời phải đảm bảo chất lượng tín hiệu của máy thu cũng như tối thiểu hóa được công suất phát. Những kết quả mô phỏng với các trường hợp khác nhau cho thấy tính hiệu quả của phương pháp đề xuất đã vượt trội so với giải pháp thông thường.

Từ khóa: Tối ưu beamforming, phương pháp SDP, phương pháp SDR, hàm phạt chính xác.

ABSTRACT

Beamforming optimization problems (BF) in wireless transmission are often formulated using unidentified (non-convex) quadratic optimization equations with the typical method of solving is using SDR technology along with random technique. However, in many cases, these solutions yield results far below the optimal value especially when the matrix rank of optimization variables is greater than 1. In our paper, the beamforming problem is set in the context of physical layer security when an intruder is eavesdropping with the requirement to suppress the intruding object while ensuring the signal quality of official receivers together with minimizing the transmit power. Since then, a more efficient iterative algorithm is proposed; simulation results show that our proposed method yields near optimal results and is superior to the conventional approach.

Keyword: Beamforming optimization, SDP method, SDR method, exact penalty function.

¹Viện Khoa học và Công nghệ, Bộ Công an

²Khoa Vô tuyến Điện tử, Học viện Kỹ thuật Quân sự

³Viện Điện tử, Viện Khoa học và Công nghệ Quân sự

⁴Khoa Điện tử, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

*Email: thlinh.mta@gmail.com

Ngày nhận bài: 10/8/2020

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 15/9/2020

Ngày chấp nhận đăng: 21/10/2020

1. GIỚI THIỆU

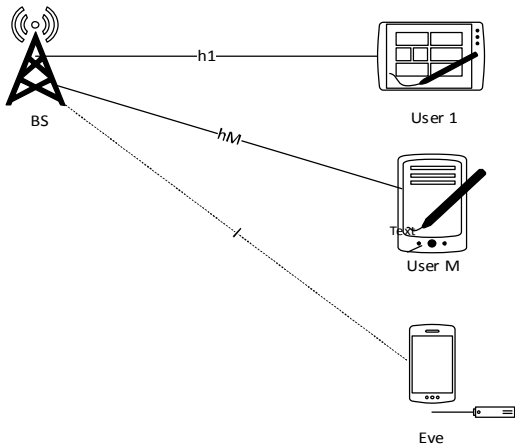
Mạng truyền dẫn vô tuyến đã trở thành một phần không thể thiếu trong cuộc sống hàng ngày của chúng ta và được ứng dụng rộng rãi trong dân sự cũng như quân sự. Vấn đề bảo mật trở thành yếu tố quan trọng khi sử dụng vô tuyến để truyền tải các thông tin quan trọng và riêng tư. Do đó, yêu cầu đảm bảo truyền dẫn tin cậy trước sự xuất hiện của các thiết bị xâm nhập trái phép là yếu tố được đặt lên hàng đầu trong bối cảnh các đối tượng xâm nhập có rất nhiều kịch bản để sở hữu quyền truy cập trái phép, sửa đổi thông tin hoặc thay đổi các luồng thông tin [1]. Hầu hết các phương thức bảo mật được sử dụng phổ biến đều dựa trên những kỹ thuật mã hóa thực hiện ở các lớp trên của mạng không dây; tuy nhiên thay vì sử dụng một kênh truyền bổ sung dẫn đến việc tốn phổ tần, các phương thức lớp vật lý có thể được dùng ở đây để phân phối các khóa bí mật, để cung cấp các vị trí riêng tư cũng như bổ sung các thuật toán bảo mật lớp trên khiến kẻ xâm nhập khó giải mã thông tin truyền đi hơn. Nghiên cứu [2] đã chỉ ra rằng có thể đạt được tính bảo mật hoàn hảo bằng cách sử dụng các kỹ thuật lớp vật lý với điều kiện đối tượng xâm nhập trái phép không biết về kênh truyền hoặc chúng chỉ thu được tín hiệu nhỏ hơn một ngưỡng được tính toán nào đó. Như vậy, mặc dù các kỹ thuật mã hóa truyền thống phụ thuộc rất nhiều vào các hoạt động của lớp trên, thì việc tích hợp các bảo mật lớp vật lý sẽ mang lại các thiết kế tối ưu về mặt an toàn thông tin.

Trong bài báo này, chúng tôi xem xét bài toán phát quảng bá cơ bản với bối cảnh phải đảm bảo an ninh lớp vật lý. Trong đó, một trạm gốc được trang bị nhiều ăng-ten phát đi cùng một tín hiệu mang thông tin đến một số máy thu người dùng chính thức, mỗi máy thu có một ăng-ten. Giả thiết đặt ra là có một máy thu xâm nhập trái phép và nghe lén Eve có cấu hình phần cứng tương tự như một máy thu người dùng chính thức đồng thời có khả năng giải mã tín hiệu được phát từ trạm gốc. Vấn đề cần xử lý là giải quyết bài toán tạo búp (beamforming) tại trạm gốc đa ăng-ten để vừa chế áp đối tượng nghe lén, vừa đảm bảo chất

lượng tín hiệu tại các máy thu chính thống. Mục đích của beamforming là tìm ra một vec-tơ trọng số tối ưu nhằm tối thiểu hóa tổng công suất phát với các ràng buộc chặn dưới về tỷ số SNR ở mỗi máy thu người dùng và chặn trên cho chất lượng tín hiệu ở máy nghe lén Eve. Các bài toán tối ưu beamforming được biểu diễn là hàm bậc hai không lồi [9, 10]. Các giải pháp thông thường để giải quyết những bài toán tối ưu hóa trong các đề xuất trước đây đã sử dụng kỹ thuật quy hoạch bán xác định và kỹ thuật ngẫu nhiên hóa. Nghiên cứu trong bài báo đã chỉ ra rằng kỹ thuật ngẫu nhiên hóa có thể đưa ra kết quả khác xa với kết quả tối ưu thật của bài toán. Đồng thời từ đó đã đề xuất một giải thuật lặp dựa trên quy hoạch bán xác định và kỹ thuật hàm phạt để có được kết quả tối ưu tốt hơn.

Giả thiết: Ma trận và vec-tơ cột được ký hiệu tương ứng bằng chữ hoa in đậm và chữ thường. Trong đó ký hiệu (\mathbf{A}, \mathbf{B}) là tích vô hướng giữa ma trận \mathbf{A} và ma trận \mathbf{B} được xác định là vết của $\mathbf{A}^H \mathbf{B}$. Khi $\mathbf{A} \geq 0$ nghĩa là ma trận \mathbf{A} trở thành một ma trận PSD (positive semi-definite).

2. MÔ HÌNH HỆ THỐNG



Hình 1. Một mô hình hệ thống beamforming có đối tượng xâm nhập nghe lén

Hình 1 minh họa một hệ thống truyền dẫn vô tuyến phát quảng bá gồm 1 trạm gốc sử dụng N ăng-ten truyền tín hiệu (s) mang thông tin giống nhau đến M máy thu chính thống, mỗi máy thu được trang bị một ăng-ten. Hệ thống thu phát này hoạt động đồng thời với một máy nghe lén Eve có cấu hình phần cứng tương tự máy thu chính để có thể bắt được tín hiệu (s) phát ra từ trạm gốc. Bằng cách yêu cầu phản hồi tín hiệu dẫn đường để xác định thông tin trạng thái kênh truyền phục vụ cho bài toán tạo búp (beamforming), trạm gốc biết được sự xuất hiện của Eve nhưng không biết được vị trí vật lý của Eve. Do đó, nhiệm vụ của trạm gốc là sử dụng công cụ thuật toán beamforming để chế áp Eve bằng cách thiết lập một ngưỡng tín hiệu thu SNR trên Eve ở mức thấp (0dB) hoặc bằng 0 tuyệt đối, nhưng vẫn đảm bảo SNR của người dùng chính lớn hơn ở một mức phù hợp, đồng thời thỏa mãn hàm mục tiêu là tối thiểu công suất phát.

Xét $h_i = [h_{i1}, h_{i2}, \dots, h_{iN}]^T, i = 1, 2, \dots, M$ là vec-tơ hệ số kênh truyền giữa trạm gốc và người dùng chính (user) thứ i,

trong khi $\mathbf{l} = [l_1, l_2, \dots, l_N]^T$ là vec-tơ hệ số kênh truyền giữa trạm gốc và máy nghe trộm Eve. Bằng cách sử dụng cơ chế pilot, thông tin kênh truyền được coi là đã biết trước tại trạm gốc. Giả thiết tín hiệu phát (s) có trung bình bằng không, dạng tạp trắng với phương sai bằng 1, nhiễu thu được n_i tại máy thu cũng thuộc dạng AWGN với phương sai σ_i^2 . Tương tự, phương sai nhiễu tại Eve là σ_{eve}^2 . Do đó, tín hiệu nhận được ở user thứ i là:

$$d_i = \langle \mathbf{x}, \mathbf{h}_i \rangle s + n_i, i = 1, 2, \dots, M$$

và tín hiệu tại máy nghe trộm Eve là:

$$d_{eve} = \langle \mathbf{x}, \mathbf{l} \rangle s + n_{eve}$$

SNR tại máy thu thứ cấp thứ i được xác định bởi:

$$SNR_i = \frac{\text{trace}(\mathbf{x} \mathbf{x}^H, \mathbf{h}_i \mathbf{h}_i^H)}{\sigma_i^2}, i = 1, 2, \dots, M$$

Tín hiệu truyền dẫn thứ cấp trên Eve là:

$$SNR_{eve} = \frac{\text{trace}(\mathbf{x} \mathbf{x}^H, \mathbf{l} \mathbf{l}^H)}{\sigma_{eve}^2}$$

Bài toán tối thiểu hóa công suất beamforming dưới mức tín hiệu hạn chế trên người dùng nghe trộm Eve và các tỷ số SNR thứ cấp có công thức:

$$\min_{\mathbf{x} \in \mathbb{C}^N} \mathbf{x} \mathbf{x}^H \tag{1a}$$

$$\text{Thỏa mãn: } \frac{\langle \mathbf{x} \mathbf{x}^H, \mathbf{h}_i \mathbf{h}_i^H \rangle}{\sigma_i^2} \geq \alpha_i, i = 1, 2, \dots, M \tag{1b}$$

$$\frac{\langle \mathbf{x} \mathbf{x}^H, \mathbf{l} \mathbf{l}^H \rangle}{\sigma_{eve}^2} \leq \beta \tag{1c}$$

Ở đây, hàm mục tiêu là tổng công suất beamforming tại trạm gốc, ràng buộc bất đẳng thức (1b) có nghĩa là SNR ở máy thu thứ cấp phải vượt quá ngưỡng α_i và ràng buộc (1c) đồng nghĩa SNR trên máy nghe trộm Eve phải thấp hơn ngưỡng β (để đảm bảo người dùng nghe trộm không thu được một lượng nhất định thông tin). Bằng cách chia lại tỷ lệ

$$h_i \rightarrow \frac{\sqrt{\alpha}}{\sigma_i \sqrt{\alpha_i}} h_i$$

Trong đó: $\alpha = \min_{i=1,2,\dots,M} \alpha_i$ và đưa ra biến ma trận bổ sung $\mathbf{X} = \mathbf{x} \mathbf{x}^H$. Đồng thời, không mất tính tổng quát, giả thiết σ_i^2 và σ_{eve}^2 đều có giá trị bằng 1. Bài toán tối ưu hóa (1) sẽ tương đương với bài toán quy hoạch bán xác định SDP (Semidefinite Programming) như sau:

$$\min_{\mathbf{X} \in \mathbb{C}^N, \mathbf{X} \in \mathbb{C}^{N \times N}} \langle \mathbf{X} \rangle \tag{2a}$$

$$\text{Thỏa mãn: } \langle \mathbf{X}, \mathbf{H}_i \rangle \geq \alpha, i = 1, 2, \dots, M \tag{2b}$$

$$\langle \mathbf{X}, \mathbf{L} \rangle \leq \beta \tag{2c}$$

$$\mathbf{X} = \mathbf{x} \mathbf{x}^H \tag{2d}$$

với: $\mathbf{H}_i = \mathbf{h}_i \mathbf{h}_i^H$ và $\mathbf{L} = \mathbf{l} \mathbf{l}^H$.

Bài toán (2) là bài toán quy hoạch bán xác định SDP điển hình với hàm mục tiêu và các ràng buộc (2b), (2c) đều có

dạng tuyến tính. Tuy nhiên ràng buộc (2d) lại có dạng không liên tục và không lồi (non-convex) khiến cho bài toán này không thể giải được như một bài toán SDP thông thường. Ở phần tiếp theo, bài báo sẽ trình bày phương pháp tiếp cận truyền thống để giải bài toán đó là kỹ thuật giảm lược bài toán SDP kết hợp kỹ thuật ngẫu nhiên hóa hay còn gọi là kỹ thuật SDR.

3. GIẢI PHÁP GIẢM LƯỢC VÀ NGẪU NHIÊN HÓA SDR

Mục này trước tiên trình bày kỹ thuật SDR để giải quyết bài toán tối ưu hóa (2) cùng với việc phân tích một số nhược điểm chính. Phần tiếp theo sẽ đề xuất một thuật toán lặp hiệu quả để giải quyết bài toán tối ưu hóa này một cách triệt để. Cách tiếp cận thông thường là biểu diễn ràng buộc có hàm không liên tục không lồi (2d) bằng ràng buộc bậc một không liên tục. Như vậy, phương trình ràng buộc bậc một tương đương (2) là:

$$\min_{0 \leq X \in \mathbb{C}^{N \times N}} \langle X \rangle \tag{3a}$$

$$\text{thỏa mãn điều kiện: } (2b), (2c), \text{rank}(X) = 1 \tag{3b}$$

Bằng cách loại bỏ (relaxation) ràng buộc rank(X) = 1, bài toán (3) sẽ trở thành bài toán SDP điển hình có thể giải được như sau:

$$\min_{0 \leq X \in \mathbb{C}^{N \times N}} \langle X \rangle \tag{4}$$

$$\text{Thỏa mãn điều kiện: } (2b), (2c)$$

Đương nhiên, chỉ khi nghiệm tối ưu X_{opt} của (4) là bậc một, ví dụ $X_{opt} = x_{opt} x_{opt}^H$ thì x_{opt} cũng là nghiệm tối ưu của (2). Ngược lại thì giá trị tối ưu của (4) chỉ là giới hạn dưới so với giá trị tối ưu của (2). Kỹ thuật ngẫu nhiên hóa sau được sử dụng trong [5, 9] để tạo ra các nghiệm khả thi của (2). Giả sử rank(X_{opt}) = k, thì ma trận này có thể được phân rã giá trị suy biến (SVD) như sau:

$$X_{opt} = U \Sigma U^H \tag{5}$$

trong đó, ma trận đơn vị $U = (u_1, u_2, \dots, u_N)$ và ma trận Σ là ma trận đường chéo có các đường chéo được sắp xếp theo thứ tự giảm dần (vì vậy $\Sigma(i, i) = 0$ cho $i > k$). Sau đó, nghiệm của (2) có thể được tạo ra theo công thức sau:

$$x = U \Sigma^{1/2} v = \sum_{i=1}^k \Sigma^{1/2}(i, i) v(i) u_i \tag{6}$$

Ở đây, giả định rằng các phần tử $v(i), i = 1, \dots, N$ của $v = [v(1), \dots, v(N)]^T$ là các biến ngẫu nhiên độc lập phân bố đồng đều trên vòng tròn đơn vị trong mặt phẳng phức hoặc v là vec-tơ của các biến ngẫu nhiên Gauss không tương quan, đối xứng phức với kỳ vọng bằng 0 và phương sai bằng 1. Như vậy, bằng một số lớn phép thử ngẫu nhiên, nghiệm "tối ưu" có thể được tìm ra. Đây là nguyên lý cơ bản của kỹ thuật SDR, tuy nhiên việc tìm nghiệm tối ưu cho (2) theo thực tế bị thu hẹp thành không gian con k-chiều được tạo bởi k vec-tơ riêng $\{u_1, \dots, u_k\}$ khiến cho kỹ thuật ngẫu nhiên sẽ không hiệu quả, do không thể tìm được nghiệm trên toàn bộ không gian. Tóm lại, kỹ thuật ngẫu nhiên có xu hướng xấp xỉ nghiệm bằng cách thử vận may với một số không gian tìm kiếm ngẫu nhiên. Phương pháp này sẽ kém hiệu quả hơn khi số lượng người dùng thứ cấp tăng khiến

cho hạng của ma trận X_{opt} cũng tăng theo. Ngoài ra, nếu các ngưỡng của máy thu tăng (ví dụ: đến hàng chục dB) thì nghiệm từ ngẫu nhiên hóa có thể nằm rất xa nghiệm tối ưu.

4. GIẢI PHÁP TỐI ƯU HÓA ĐỀ XUẤT

Sự không hiệu quả của kỹ thuật ngẫu nhiên khi tăng quy mô của bài toán khiến cho hạng của ma trận SDP khác một đã được phân tích ở phần trên. Thực tế, lý thuyết đã chỉ ra trong [7] rằng trong hầu hết các trường hợp, nghiệm tối ưu của (4) là bậc hai và do đó, việc ngẫu nhiên hóa trên có thể không mang lại kết quả mong muốn vì không gian tìm kiếm quá hẹp. Ngược lại với việc loại bỏ ràng buộc bậc một, ràng buộc (2d) có thể được biểu diễn như sau:

$$\langle X \rangle - \lambda_{\max}(X) \leq 0 \tag{7}$$

ở đó, $\lambda_{\max}(X)$ là trị riêng lớn nhất của $X \geq 0$. Vậy (2) tương đương với bài toán:

$$\min_{0 \leq X \in \mathbb{C}^{N \times N}} \langle X \rangle \tag{8}$$

thỏa mãn các điều kiện (2b), (2c), (7).

Mục đích ở đây là tìm ra được $\langle X \rangle - \lambda_{\max}(X)$ đủ nhỏ để:

$$X \approx \lambda_{\max}(X) x_{\max} x_{\max}^T$$

Sử dụng kỹ thuật hàm phạt, bài toán (8) có thể viết lại như sau:

$$\min_{0 \leq X \in \mathbb{C}^{N \times N}} \langle X \rangle + \mu [\langle X \rangle - \lambda_{\max}(X)] \tag{9}$$

Thỏa mãn các điều kiện: (2b), (2c).

trong đó $\mu > 0$ đủ lớn để đạt được giá trị $\langle X \rangle - \lambda_{\max}(X)$ nhỏ. Hàm mục tiêu của (9) rõ ràng không trơn (không vi phân được) cũng như hàm $\lambda_{\max}(X)$ không trơn. Một vi phân phụ $\partial \lambda_{\max}(X)$ của hàm $\lambda_{\max}(X)$ được xác định để dùng [11]

$$\partial \lambda_{\max}(X) = x_{\max} x_{\max}^T$$

Có thể thấy rằng

$$\lambda_{\max}(Y) - \lambda_{\max}(X) \geq \langle x_{\max} x_{\max}^H, Y - X \rangle, \forall Y \geq 0 \tag{10}$$

Do đó, dựa trên $X^{(k)}$ có tính khả lập với trị riêng lớn nhất $\lambda_{\max}(X^{(k)})$ và vec-tơ riêng chuẩn hóa $x^{(k)}$, việc giải bài toán sau đây sẽ đưa ra một nghiệm tốt hơn cho (9):

$$\min_{0 \leq X \in \mathbb{C}^{N \times N}} [\langle X \rangle + \mu (\langle X \rangle - \lambda_{\max}(X^{(k)}))] - \langle x^{(k)} x^{(k)H}, X - X^{(k)} \rangle \tag{11}$$

Thỏa mãn các điều kiện (2b), (2c)

Thuật toán 1 được thực hiện 2 giai đoạn: giai đoạn khởi tạo sẽ tìm ra giá trị của $X^{(k)}$ và μ sao cho (11) tạo ra ma trận có hạng bằng 1; giai đoạn tối ưu hóa tiếp sau sẽ cố định μ và lặp lại cho đến khi $X^{(k+1)}$ và $X^{(k)}$ bằng nhau, tức là đã hội tụ về giá trị tối ưu. Thuật giải lặp cho (11) có thể được trình bày như sau:

THUẬT TOÁN 1

Giai đoạn khởi tạo

- **Bước 0:** Khởi tạo với μ đủ lớn và $X^{(0)}$ thỏa mãn (2b), (2c). Đặt $k = 0$;

- **Bước $\kappa+1$:** Giải (11); Nếu nghiệm $X^{(\kappa+1)}$ thỏa mãn điều kiện hạng bằng 1 thì reset $X^{(\kappa+1)} \rightarrow X^{(0)}$ và kết thúc. Nếu không thì reset $\kappa+1 \rightarrow \kappa, X^{(\kappa+1)} \rightarrow X^{(\kappa)}$ cho bước lặp tiếp theo.

Giai đoạn tối ưu hóa

- **Bước 1:** Cố định giá trị của μ và $X^{(0)}$; giải (11).

- **Bước $\kappa+1$:** Giữ nguyên giá trị của μ và giải (11), so sánh hàm mục tiêu tương ứng với $X^{(k+1)}$ và $X^{(k)}$; nếu bằng nhau thì dừng giải thuật; nếu không, tiếp tục cho đến khi giải thuật hội tụ.

5. CÁC KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Phần này trình bày một số kết quả bằng mô phỏng để chứng minh hiệu quả của kỹ thuật chúng tôi đề xuất. Bài toán SDP rút gọn cũng được giải để sử dụng làm cận dưới tham khảo cho các kết quả được so sánh. Kỹ thuật nào cho kết quả càng gần cận dưới hơn thì cho khả năng tối ưu hóa công suất tốt hơn. Các kết quả mô phỏng được trình bày theo hai kịch bản: SNR của Eve khác "0" (0dB) và bằng "0" (giá trị không tuyệt đối). Trong mỗi kịch bản, hai cấu hình hệ thống được sử dụng: $(M, N, L) = (16, 8, 1)$ và $(M, N, L) = (32, 8, 1)$; trong đó, M là số lượng người dùng chính, N là số ăng-ten ở trạm gốc và L là số lượng đối tượng nghe lén. Bằng phương pháp mô phỏng Monte-Carlo, để giải bài toán SDR trên Matlab, bộ công cụ giải thuật tối ưu hóa Yalmip và SeDuMi được sử dụng trong bài báo. Tại mỗi giá trị ngưỡng SNR của người dùng chính thì mỗi giá trị công suất tương ứng với mỗi phương pháp đều được lấy trung bình sau 1000 phép thử. Kênh truyền ở đây được giả thiết là Rayleigh phẳng và được chuẩn hóa. Giá trị kênh truyền được tạo ra bằng hàm ngẫu nhiên randn() của Matlab. Với phương pháp ngẫu nhiên hóa SDR, bài báo sử dụng 1000 giá trị ngẫu nhiên để tìm ra kết quả tốt nhất có thể.

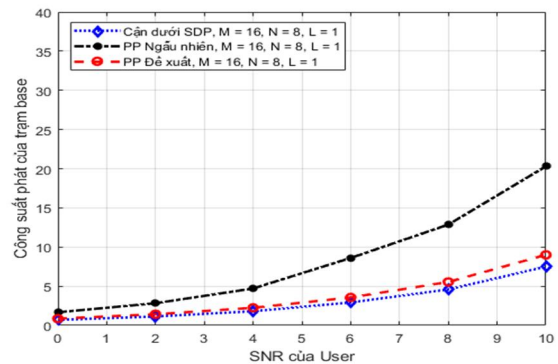
*** Kịch bản 1 - SNR của Eve khác không:**

Theo kịch bản này, giá trị SNR của đối tượng xâm nhập nghe lén Eve được cố định tại 0dB trong mọi tình huống. Sau đó, tiến hành mô phỏng với các giá trị ngưỡng dưới SNR của các người dùng chính lần lượt từ 0 dB đến 10 dB với bước nhảy bằng 2dB. Ví dụ này mô phỏng trường hợp tín hiệu tại Eve = 0dB. Về mặt thực tế, có thể hiểu trường hợp này, bài toán tạo búp (beamforming) giúp chế áp đối tượng nghe lén Eve ở một công suất thấp khiến cho tỷ lệ lỗi bit BER cao hơn so với người dùng chính, gây ảnh hưởng đến chất lượng nghe lén của Eve. Đó là $\beta = 0dB$ và bài toán tối thiểu hóa (1) có thể được viết lại như sau:

$$\min_{x \in \mathbb{C}^N} \langle x, x \rangle \text{ s.t. } (1b), \langle xx^H, I \rangle \leq 0dB \tag{12}$$

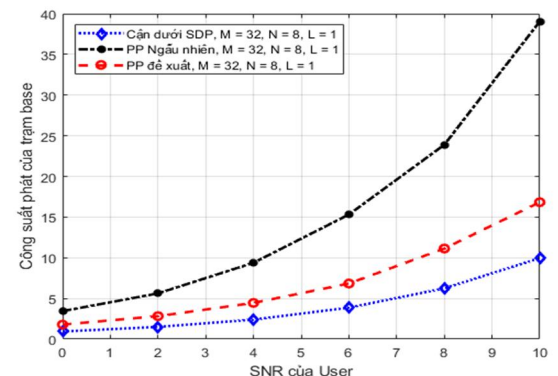
Hình 2 chỉ ra tổng công suất beamforming cho các giá trị ngưỡng SNR của người dùng tương ứng từ 0dB đến 10dB trong trường hợp công suất tín hiệu tại Eve bằng 0dB. Rõ ràng, kỹ thuật đề xuất cho kết quả tối ưu tốt hơn nhiều so với kỹ thuật ngẫu nhiên SDR, đặc biệt ở vùng SNR cao. Tại vùng SNR thấp, giá trị tối ưu của cả kỹ thuật đề xuất và kỹ thuật SDR đều nằm khá gần cận dưới SDP do tại vùng này bản thân bài toán tìm cận dưới SDP đều cho đa số giá

trị có hạng bằng một. Như vậy, cả kỹ thuật ngẫu nhiên SDR và kỹ thuật đề xuất đều không được sử dụng nhiều lần trong cả 1000 phép thử cho mỗi giá trị ngưỡng SNR. Tuy nhiên khi giá trị ngưỡng SNR tăng lên thì sự khác biệt giữa hai kỹ thuật đã trở nên rõ ràng hơn: kỹ thuật đề xuất luôn cho kết quả tối thiểu hóa công suất bằng dưới 1/2 so với kỹ thuật ngẫu nhiên SDR. Ví dụ, tại SNR = 10dB thì SDR cho giá trị công suất bằng 21 và kỹ thuật đề xuất cho giá trị xấp xỉ 9 và luôn luôn nằm sát cận dưới SDP.



Hình 2. Công suất phát của trạm gốc theo ngưỡng SNR của người dùng khi công suất tín hiệu thu tại Eve khác không (0dB), $M = 16$

Hình 3 cho thấy kết quả mô phỏng khi cấu hình hệ thống được thay đổi với số lượng người dùng tăng gấp đôi lên $M = 32$. Tương tự như cấu hình ban đầu khi $M = 16$, kỹ thuật đề xuất cũng vượt trội kỹ thuật ngẫu nhiên, đặc biệt ở điểm SNR = 10dB thì kỹ thuật đề xuất cho giá trị công suất bằng 10, trong khi SDR cho giá trị lên tới 39. Do số lượng người dùng tăng lên gấp đôi nên công suất tiêu hao để phục vụ toàn bộ hệ thống cũng tăng lên khá đáng kể với tỷ lệ tương đương.



Hình 3. Công suất phát của trạm gốc theo ngưỡng SNR khi tăng số lượng người dùng M lên 32

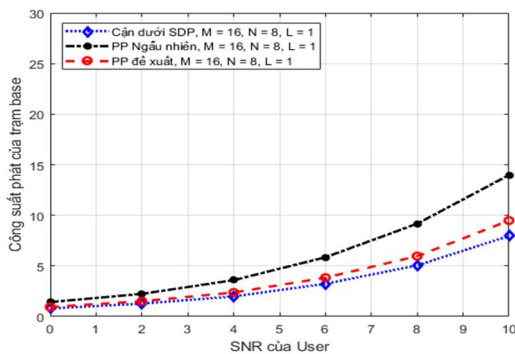
Kịch bản 2 sau đây cho thấy hệ thống vẫn hoạt động tốt với kỹ thuật đề xuất khi vừa đảm bảo mức SNR cho user vừa chế áp tuyệt đối máy thu Eve ở mức độ SNR = 0.

*** Kịch bản 2 - SNR của Eve bằng 0 tuyệt đối:**

Theo kịch bản này, giá trị SNR của đối tượng xâm nhập nghe lén Eve được cố định tại giá trị 0 trong mọi tình huống. Nghĩa là, về mặt thực tế, Eve sẽ không thu được thông tin phát đi từ trạm gốc. Sau đó, tiến hành mô phỏng

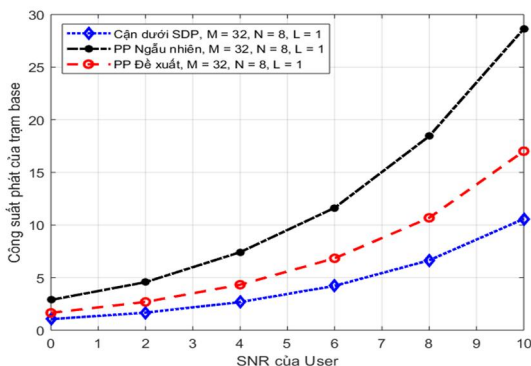
với các giá trị ngưỡng dưới SNR của các người dùng chính lần lượt từ 0dB đến 10dB với bước nhảy bằng 2dB.

Hình 4 chỉ ra tổng công suất beamforming cho các giá trị ngưỡng SNR của người dùng tương ứng từ 0dB đến 10dB trong trường hợp công suất tín hiệu tại Eve bằng 0. Tương tự như kịch bản 1, kỹ thuật đề xuất vẫn cho kết quả tối ưu hóa tốt hơn so với kỹ thuật ngẫu nhiên SDR. Tuy nhiên, so với kịch bản 1 thì tỉ lệ chênh lệch giữa hai kỹ thuật không đến mức gấp đôi. Điều này có thể lý giải do không gian tìm kiếm nghiệm tối ưu đã được giới hạn trong không gian không (zero space) của ràng buộc lên SNR của Eve, do đó, kỹ thuật ngẫu nhiên SDR cũng cho kết quả khá tốt.



Hình 4. Công suất phát của trạm gốc theo ngưỡng SNR của người dùng khi công suất tín hiệu thu tại Eve bằng không, $M = 16$

Tương tự như trên, khi $M = 32$ user thì công suất tiêu thụ để vừa chế áp Eve nhưng vẫn đảm bảo ngưỡng SNR trên các máy thu người dùng chính thống phải tăng lên. Theo cấu hình này, kỹ thuật đề xuất vẫn tỏ ra vượt trội so với kỹ thuật ngẫu nhiên SDR. Tuy nhiên, trong trường hợp này, kết quả tối ưu của kỹ thuật đề xuất không nằm sát cận dưới như trong các trường hợp trên do số lượng kết quả có hạng lớn hơn một nhiều hơn. Điều này đã được ghi nhận trong quá trình tiến hành mô phỏng cho kịch bản và cấu hình này (hình 5).



Hình 5. Công suất phát của trạm gốc theo ngưỡng SNR của người dùng khi công suất tín hiệu thu tại Eve bằng không, M tăng lên 32

6. KẾT LUẬN

Với yêu cầu tối ưu hóa bài toán beamforming cho một mô hình truyền dẫn vô tuyến cơ bản trong bối cảnh phải đảm bảo an ninh lớp vật lý, bài báo này đã chỉ ra kỹ thuật SDR thông thường không thể đưa ra kết quả tốt cho các

trường hợp được xét. Từ đó, bài báo đã đề xuất một thuật toán lập hiệu quả giúp đạt được các kết quả tối ưu hơn thỏa mãn việc chế áp triệt để đối tượng nghe lén nhưng vẫn đảm bảo chất lượng tín hiệu cho các máy thu đồng thời tối thiểu hóa được công suất phát. Các kết quả mô phỏng cho thấy kỹ thuật được đề xuất của bài báo vượt trội so với phương pháp truyền thống dựa trên kỹ thuật ngẫu nhiên hóa.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Z. Xiao, 2013. *Suboptimal Spatial Diversity Scheme for 60 Ghz Millimeter-Wave WLAN*. IEEE Commun. Lett., vol. 17, no. 9, pp. 1790-1793.
- [2]. Z. Xiao, C. Zhang, D. Jin, N. Ge, 2013. *GLRT Approach for Robust Burst Packet Acquisition in Wireless Communications*. IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 12, no. 3, pp. 1127-1137.
- [3]. P. Apkarian, D. Noll, A. Rondepierre, 2008. *Mixed H_2/H_∞ control via nonsmooth optimization*. SIAM J. Control Optimiz., vol. 47, no. 3, pp. 1516-1546.
- [4]. P. Apkarian, H.D. Tuan, "Concave programming in control theory", *J. of Global Optimization* 15(1999), 243-270.
- [5]. E. Karipidis, T. N. Davidson, Z.-Q. Luo, 2006. *Transmit beamforming for physical-layer multicasting*. IEEE Trans. Signal Processing, vol. 54, no. 6, pp. 2239-2251.
- [6]. E. Karipidis, N. D. Sidiropoulos, Z.-Q. Luo, 2008. *Quality of service and max-min fair transmit beamforming to multiple cochannel multicast groups*. IEEE Trans. Signal Processing, vol. 56, no. 3, pp. 1268-1279.
- [7]. H. H. Kha, H. D. Tuan, T. Q. Nguyen, 2009. *Efficient design of cosine-modulated filter banks via convex optimization*. IEEE Trans. Signal Processing, vol. 57, no. 3, pp. 966-976.
- [8]. A.H. Phan, H.D. Tuan, H.H. Kha, 2010. *New optimized solution method for beamforming in cognitive multicast transmission*. Submitted to Vehicular Technology Conference (VTC Fall).
- [9]. T. Phan, A. Vorobyov, N. D. Sidiropoulos, C. Tellambura, 2009. *Spec-trum sharing in wireless networks via qos-aware secondary multicast beamforming*. IEEE Trans. Signal Processing, vol. 57, no. 6, pp. 2323 - 2335.
- [10]. N.D. Sidiropoulos, T.N. Davidson, Z.-Q. Luo, 2006. *Transmit beamforming for physical-layer multicasting*. IEEE Trans. Signal Processing, vol. 54, no. 6, pp. 2239-2251.
- [11]. H.D. Tuan, P. Apkarian, S. Hosoe, H. Tuy, 2000. *D.C. optimization approach to robust controls: the feasibility problems*. International Journal of Control 73, 89-104.
- [12]. H. Tuy, 2000. *Convex Analysis and Global Optimization*. Kluwer Academic.
- [13]. L. Dong, Z. Han, A. Petropulu, H. V. Poor, 2008. *Secure wireless communications via cooperation*. in Proc. 46th Annu. Allerton Conf. Commun., Control, Comput., pp. 1132-1138.
- [14]. Y. Yang, Q. Li, W. K. Ma, J. Ge, P. C. Ching, 2013. *Cooperative Secure Beamforming for AF Relay Networks With Multiple Eavesdroppers*. IEEE Signal Process. Lett, vol. 20, no. 1, pp. 35-38.

AUTHORS INFORMATION

Tran Hoang Linh¹, Nguyen Huy Hoang², Phan Huy Anh³, Tran Dinh Thong⁴

¹Institute of Science and Technology, Ministry of Public Security of Socialist Republic of Vietnam

²Faculty of Radio-Electronics Engineering, Military Technical Academy

³Institute of Electronics, Military Institute of Technology and Science

⁴Faculty of Electronics Engineering Technology, Hanoi University of Industry