

GIẢI PHÁP TRIỆT NHIỄU CHO HỆ ANTEN TIÊN TIẾN DỰA TRÊN KỸ THUẬT XỬ LÝ RÀNG BUỘC (CHT) VÀ THUẬT TOÁN TỐI ƯU ĐA VŨ TRỤ (MVO)

AN INTERFERENCE SUPPRESSION SCHEME FOR ADVANCED ANTENNA SYSTEMS
USING CONSTRAINED HANDLING TECHNIQUES AND MULTI-VERSE OPTIMIZATION

Lê Thị Trang^{1,2}, Trần Minh Đức¹,
Hoàng Thị Phương Thảo², Tống Văn Luyện^{1,*}

DOI: <https://doi.org/10.57001/huih5804.2025.315>

TÓM TẮT

Bài báo này đề xuất một phương pháp triệt nhiễu hiệu quả cho mảng Anten lưỡng cực nửa bước sóng (HDULA) bằng cách kết hợp kỹ thuật xử lý ràng buộc (CHT) với thuật toán tối ưu đa vũ trụ (MVO). Phương pháp được áp dụng để tối ưu hóa trọng số phức của các phần tử Anten trong bốn kịch bản khác nhau: đặc tính hội tụ, null đơn, null đa và null rộng. CHT được sử dụng để xây dựng hàm mục tiêu có ràng buộc, trong khi MVO đảm nhận vai trò tìm kiếm nghiệm tối ưu. Phương pháp đề xuất cho thấy khả năng cải thiện hiệu suất triệt nhiễu đáng kể, đồng thời duy trì được búp sóng chính trong hệ thống HDULA. Kết quả mô phỏng xác nhận hiệu quả của phương pháp CHT-MVO, mở ra hướng nghiên cứu tiềm năng trong việc ứng dụng kết hợp giữa kỹ thuật xử lý ràng buộc và các thuật toán tối ưu hóa vào thiết kế và vận hành hệ Anten tiên tiến.

Từ khóa: Kỹ thuật xử lý ràng buộc, thuật toán tối ưu đa vũ trụ, mảng Anten lưỡng cực nửa bước sóng, triệt nhiễu, kỹ thuật hàm phạt thích nghi, kỹ thuật hàm phạt tĩnh.

ABSTRACT

This paper proposes an effective interference suppression method for a half-wavelength dipole uniform linear array (HDULA) by combining a constraint-handling technique (CHT) with the multi-verse optimization (MVO) algorithm. The proposed method is applied to optimize the complex weights of array elements under four different scenarios: convergence characteristics, single-null, multi-null, and wide null placement. CHT is employed to construct the constrained objective function, while MVO is used to efficiently search for the optimal solution. The proposed approach demonstrates significant improvement in interference suppression performance while maintaining the main beam of the HDULA system. Simulation results validate the effectiveness of the CHT-MVO scheme and highlight its potential for integration of constraint-handling techniques with metaheuristic optimization algorithms in the design and operation of advanced antenna systems.

Keywords: Constrained handling technique, multi-verse optimization algorithm, half-wavelength dipole uniform linear array, interference suppression, adaptive penalty technique, static penalty technique.

¹Trường Điện - Điện tử, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

²Khoa Điện tử viễn thông, Trường Đại học Điện Lực

*Email: luyentv@hau.edu.vn

Ngày nhận bài: 11/4/2025

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 15/6/2025

Ngày chấp nhận đăng: 28/9/2025

1. GIỚI THIỆU

Trong lĩnh vực viễn thông và xử lý tín hiệu, các hệ thống Anten tiên tiến đóng vai trò quan trọng trong việc

nâng cao hiệu suất truyền thông không dây. Một trong những kỹ thuật quan trọng được sử dụng là kỹ thuật định dạng búp sóng, giúp điều khiển hướng bức xạ của sóng

điện từ để tăng cường tín hiệu mong muốn và triệt tiêu nhiễu. Đối với các hệ thống anten mảng tuyến tính đồng nhất với phần tử là anten lưỡng cực nửa bước sóng (HDULA - Half-wavelength dipole uniform linear array), kỹ thuật định dạng búp sóng đặc biệt quan trọng trong việc cải thiện chất lượng tín hiệu và khả năng chống nhiễu trong môi trường có nhiễu không xác định [1].

Một cách tiếp cận hiệu quả để giải bài toán định dạng búp sóng là sử dụng kỹ thuật đặt null (kỹ thuật đặt điểm "không") dựa trên điều khiển trọng số phức, trong đó các phần tử anten được điều chỉnh cả biên độ và pha để đảm bảo triệt nhiễu tại các hướng không mong muốn [2]. Khi đó, bài toán định dạng búp sóng có thể được mô hình hóa thành một bài toán tối ưu có ràng buộc, trong đó các trọng số phức cần được xác định sao cho giảm độ bức xạ đáp ứng các tiêu chí mong muốn. Để xử lý các ràng buộc trong bài toán tối ưu này, nghiên cứu áp dụng kỹ thuật xử lý ràng buộc nhằm chuyển đổi bài toán tối ưu có ràng buộc thành bài toán tối ưu không ràng buộc. Cụ thể, chúng tôi khảo sát hai kỹ thuật xử lý ràng buộc [3]:

- Hàm phạt tĩnh (SPT - Static penalty technique): Áp dụng giá trị phạt cố định khi vi phạm ràng buộc.
- Hàm phạt thích nghi (APT - Adaptive penalty technique): Điều chỉnh giá trị phạt theo quá trình tối ưu để cải thiện khả năng hội tụ [4].

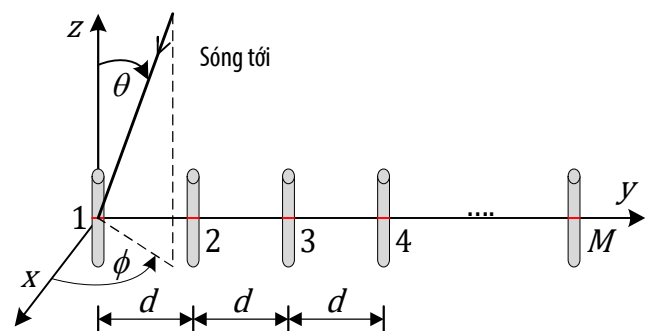
Sau khi xây dựng hàm mục tiêu bằng kỹ thuật hàm phạt, thuật toán tối ưu MVO được áp dụng để tìm nghiệm tối ưu, xác định các giá trị pha phù hợp cho các phần tử anten trong HDULA. MVO là một thuật toán mô phỏng sự giãn nở của vũ trụ và các cơ chế vật lý như hố trắng (white hole), hố đen (black hole) và hiệu ứng giãn nở (wormhole) để tìm kiếm nghiệm tối ưu trong không gian tìm kiếm. MVO hoạt động dựa vào việc lấy cảm hứng từ mô hình đa vũ trụ trong vũ trụ học, trong đó mỗi vũ trụ tượng trưng cho một nghiệm tiềm năng của bài toán tối ưu hóa. Các vũ trụ có mật độ năng lượng cao sẽ có nhiều ảnh hưởng hơn trong quá trình tìm kiếm nghiệm tốt nhất [5].

Trong những năm gần đây, kỹ thuật xử lý ràng buộc (CHT) đã được nghiên cứu rộng rãi để giải quyết các bài toán tối ưu hóa trong lĩnh vực anten. Một số nghiên cứu đã đề xuất các phương pháp kết hợp CHT với các thuật toán tối ưu metaheuristic nhằm cải thiện hiệu suất triệt nhiễu và duy trì búp sóng chính. Ví dụ, nghiên cứu [6-8] đã áp dụng SPT để tối ưu hóa trọng số của phần tử anten, trong khi nghiên cứu [9] sử dụng APT để tăng cường khả năng triệt nhiễu. Những nghiên cứu này cho thấy tiềm năng của CHT trong việc tối ưu hóa hệ thống anten. Dựa trên những nền tảng này, bài báo này đề xuất một

phương pháp triệt nhiễu hiệu quả cho mảng anten lưỡng cực nửa bước sóng (HDULA) bằng cách kết hợp SPT và APT với MVO thông qua các mô phỏng hiệu quả đặt null thích nghi trong các kịch bản nhiễu khác nhau. Kết quả đạt được cung cấp cái nhìn trực quan về vai trò của các kỹ thuật xử lý ràng buộc kết hợp với MVO trong tối ưu hóa định dạng búp sóng cho các hệ thống anten HDULA.

2. MÔ HÌNH BÀI TOÁN

Bài báo này nghiên cứu hệ thống HDULA, có cấu hình mảng bao gồm M phần tử được sắp xếp dọc theo trục y được minh họa trong hình 1. Trong bài báo này, góc phương vị φ sẽ luôn được giả định là 90° .



Hình 1. Mảng anten lưỡng cực gồm M phần tử

Mô hình bức xạ của mảng ở góc θ có thể được biểu diễn như sau:

$$P(\theta) = EP(\theta) \cdot AF(\theta) = EP(\theta) \sum_{m=1}^M w_m e^{j(m-1)\psi} \quad (1)$$

Trong đó:

$$EP(\theta, \phi) = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos(\theta)\right)}{\sin(\theta)}$$

Giảm độ bức xạ phần tử của

anten lưỡng cực nửa bước sóng; AF biểu thị hệ số mảng theo hướng θ .

$$\psi = k d \sin(\theta); k = \frac{2\pi}{\lambda}; \text{ Hệ số sóng; } d = \frac{\lambda}{2}; \text{ Khoảng}$$

cách giữa các phần tử; λ : Bước sóng.

• $w_m = a_m e^{j\delta_m}$: Trọng số phức tại phần tử thứ m với a_m và δ_m lần lượt là biên độ và pha của trọng số.

• M: Tổng số anten trong mảng.

Giản đồ bức xạ của mảng HDULA có thể được biểu diễn dưới dạng một vector như sau:

$$P(\theta) = EP(\theta) \mathbf{s}(\theta) \mathbf{w} \quad (2)$$

Trong đó:

• **s**: Vector lái

$$\mathbf{s}(\theta) = \left[e^{j(n_0\psi_y)}, \dots, e^{j(n_{N-1}\psi_y)} \right] \quad (3)$$

• **w**: Vector trọng số phức

$$\mathbf{w} = [w_1, \dots, w_N]^T \quad (4)$$

Để đạt được giản đồ bức xạ mong muốn với K null tại các hướng (θ_k) , bài toán đối với **w** có thể được biểu diễn như sau:

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{w}} \quad & P(\theta_0) \\ \text{s.t.} \quad & P(\theta_k) \leq P_{\text{thr}} \quad \forall k = 1, \dots, K \end{aligned} \quad (5)$$

Trong đó: P_{thr} là ngưỡng cho mức độ sâu null mong muốn. Số lượng anten cho mảng HDULA là N.

3. KỸ THUẬT XỬ LÝ RÀNG BUỘC

Các bài toán tối ưu đóng vai trò quan trọng trong nhiều lĩnh vực khoa học ứng dụng và kỹ thuật. Trong thực tế, hầu hết các bài toán này đều yêu cầu ràng buộc các biến vật lý thông qua các điều kiện đẳng thức và bất đẳng thức. Để xử lý các ràng buộc này, nhiều phương pháp đã được đề xuất [10], trong đó hai cách tiếp cận phổ biến là sử dụng hàm phạt và tách biệt hàm mục tiêu khỏi các ràng buộc. Về mặt toán học, một bài toán tối ưu có ràng buộc có thể được mô tả như trong [11]:

$$\begin{aligned} \text{Tối ưu hoá } f(\mathbf{x}) \\ g_j(\mathbf{x}) \leq 0, j = 1, 2, \dots, J \\ \text{Với các ràng buộc: } h_k(\mathbf{x}) = 0, k = 1, 2, \dots, K \\ x_i^l \leq x_i \leq x_i^u, i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (6)$$

Trong đó:

- $f(\mathbf{x})$: Hàm mục tiêu liên quan đến biến vectơ \mathbf{x} .
- $g_j(\mathbf{x})$: Các ràng buộc bất đẳng thức.
- $h_k(\mathbf{x})$: Các ràng buộc đẳng thức.
- x_i^l, x_i^u : Đại diện cho giá trị giới hạn dưới và giới hạn trên tương ứng của thành phần x_i trong \mathbf{x} .

Để giải bài toán tối ưu này, bài báo đã áp dụng kỹ thuật hàm phạt thích nghi (APT) và kỹ thuật hàm phạt tĩnh (SPT) [12]. Khi đó, bài toán tối ưu có ràng buộc (6) được chuyển thành bài toán tối ưu không ràng buộc [13].

3.1. Kỹ thuật hàm phạt tĩnh (SPT)

Trong bài báo này, kỹ thuật hàm phạt tĩnh (SPT) được áp dụng [14], sau đó bài toán tối ưu có ràng buộc (6) được chuyển thành bài toán tối ưu không ràng buộc (7).

Trong phương pháp phạt tĩnh được đề xuất trong [15], hệ số phạt tăng dần theo mức độ vi phạm, như đã đề cập

trong [16]. Mặc dù cấu trúc của các hàm phạt không thay đổi, [17] đã giới thiệu một cách tiếp cận trong đó tham số phạt tĩnh được điều chỉnh dựa trên mức độ vi phạm. Theo [18], bài toán có ràng buộc được định nghĩa trong (1) có thể được chuyển đổi thành bài toán không ràng buộc bằng phương pháp phạt tĩnh như sau:

$$\text{Tối ưu hoá: } \{f(\mathbf{x}) + \xi v(\mathbf{x})\} \quad (7)$$

Trong đó, $\xi v(\mathbf{x})$: Tham số phạt.

Lấy cảm hứng từ bài toán tối ưu trong (7), hàm thích nghi của bài toán tối ưu trong nghiên cứu này được xác định như sau:

$$F(\mathbf{x}, \xi) = f(\mathbf{x}) + \xi v(\mathbf{x}) \quad (8)$$

Trong bối cảnh này, mỗi ràng buộc không được thỏa mãn sẽ tác động đến \mathbf{x} bằng cách áp đặt một giá trị phạt tương ứng. Các giá trị phạt này được tổng hợp và nhân với tham số phạt ξ , sau đó được cân bằng với $f(\mathbf{x})$. Do đó, nếu độ lớn của tham số phạt ξ nhỏ so với $f(\mathbf{x})$, thì việc tối thiểu hóa $F(\mathbf{x}, \xi)$ có khả năng cao sẽ không tạo ra một nghiệm \mathbf{x} khả thi cho bài toán ban đầu. Ngược lại, nếu ξ đủ lớn, mức phạt cho bất kỳ vi phạm ràng buộc nào sẽ đủ lớn để đảm bảo rằng việc tối thiểu hóa hàm thích nghi sẽ dẫn đến một nghiệm khả thi.

3.2. Kỹ thuật hàm phạt thích nghi (APT).

APT chuyển đổi bài toán tối ưu có ràng buộc thành bài toán không ràng buộc bằng cách thêm một tham số phạt vào hàm thích nghi. Tham số phạt này phụ thuộc vào mức độ vi phạm ràng buộc và các hệ số phạt, có thể thay đổi trong quá trình tối ưu hóa. Dạng tổng quát sau đây có thể được sử dụng để xây dựng hàm mục tiêu đã được điều chỉnh [3]:

$$F(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x}) \pm \left[\sum_{j=1}^J r_j \cdot g_j(\mathbf{x}) + \sum_{k=1}^K c_k \cdot h_k(\mathbf{x}) \right] \quad (9)$$

Với $F(\mathbf{x})$ đại diện cho hàm mục tiêu có phạt, còn được gọi là hàm thích nghi, r_j và c_k là các hệ số trọng số dương, được gọi là các hệ số phạt.

Bằng cách chuyển các ràng buộc đẳng thức thành các ràng buộc bất đẳng thức, đặc biệt trong các kỹ thuật định dạng búp sóng, phương trình (9) có thể được điều chỉnh thành [3]:

$$F(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x}) \pm \sum_{j=1}^m r_j \cdot g_j(\mathbf{x}) \quad (10)$$

Năm 2019, Kawachi và cộng sự [19] đã giới thiệu một phương pháp thích nghi để xác định hệ số phạt (PF) một cách động trong suốt quá trình tối ưu, nhằm giải quyết vấn đề phạt quá mức hoặc không đủ, có thể khiến quá

trình tìm kiếm lệch khỏi nghiệm tối ưu. Cụ thể, họ đã xây dựng một hàm mục tiêu:

$$F(x) = f(x) \pm PF \cdot \bar{v}(x) \tag{11}$$

Với $\bar{v}(x)$ biểu thị độ vi phạm ràng buộc trung bình và PF là hệ số phạt, sau đó ba bước được thực hiện như sau:

Bước 1: Bằng cách so sánh hai cá thể sau, các ứng viên cho hệ số phạt PF được xác định:

$$PF = -\frac{f(x_k) - f(x_l)}{\bar{v}(x_k) - \bar{v}(x_l)} \tag{12}$$

Trong đó, k và l biểu thị hai cá thể khác nhau; PF được xác định cho tất cả các tổ hợp khả thi trong một quần thể nhất định.

- Bước 2: Hệ số phạt được thiết lập như sau: nếu tỷ lệ PF âm vượt quá 50%, thì PF giữ nguyên giá trị từ thế hệ trước; ngược lại, PF được tính bằng trung bình của các PF dương.

- Bước 3: Hệ số phạt PF được điều chỉnh. Nếu tỷ lệ cá thể khả thi r_f trong quần thể vượt quá p_{feas} , thì hệ số phạt cho thế hệ tiếp theo được xác định như sau [3, 14]:

$$PF_{G+1} = p_{rate} \cdot PF_G \tag{13}$$

Trong đó, $p_{rate} \in [0, 1]$ và các tham số được xác định bởi người dùng, p_{feas} .

4. BỘ ĐỊNH DẠNG BÚP SÓNG ĐỂ XUẤT DỰA TRÊN APT, SPT VÀ MVO

Để triệt nhiễu hiệu quả, bộ định dạng búp sóng cần duy trì hướng và độ rộng của búp chính, đồng thời kiểm soát mức búp phụ trong giới hạn cho phép. Việc đặt null quá sâu có thể gây sai lệch búp chính và làm tăng mức búp phụ. Do đó, nghiên cứu này sử dụng kỹ thuật điều khiển trọng số phức để điều chỉnh đáp ứng bức xạ của mảng anten, nhằm đạt được mẫu bức xạ tối ưu. Công thức xác định vectơ trọng số phức tối ưu cho bài toán (2) được biểu diễn như sau:

$$\mathbf{w}_o = \mathbf{w}_{ref} - \mathbf{\Delta} \tag{14}$$

Trong đó:

- \mathbf{w}_{ref} : Vectơ trọng số tham chiếu, được tạo ra bằng các phương pháp như kỹ thuật Chebyshev.

- \mathbf{w}_o : Vectơ trọng số tối ưu.

- $\mathbf{\Delta}$: Sự nhiễu loạn của vectơ trọng số.

Mô hình bức xạ được tối ưu hóa, với các điểm null được áp đặt, búp sóng chính được bảo toàn và các búp sóng phụ được triệt tiêu, được mô tả như sau:

$$P_o(\theta) = EP(\theta)\mathbf{s}(\theta)\mathbf{w}_o = EP(\theta)\mathbf{s}(\theta)(\mathbf{w}_{ref} - \mathbf{\Delta}) \tag{15}$$

$$\Leftrightarrow P_o(\theta) = EP(\theta)\mathbf{s}(\theta)\mathbf{w}_{ref} - EP(\theta)\mathbf{s}(\theta)\mathbf{\Delta} \tag{16}$$

$$\Leftrightarrow P_o(\theta) = EP(\theta)A_{ref}(\theta) - EP(\theta)\mathbf{s}(\theta)\mathbf{\Delta} \tag{17}$$

Để áp đặt K điểm null theo hướng nhiễu với $k = 1, \dots, K$, trong đó độ sâu điểm null (NDL) phải nhỏ hơn hoặc bằng S_{dB} so với đỉnh của búp sóng chính, các phương trình thu được được thiết lập như sau:

$$\|\mathbf{S}\mathbf{\Delta} - \mathbf{v}_{ref}\| \leq Thr \tag{18}$$

Trong đó:

$$Thr = 10^{\frac{-S_{dB} + 20\log_{10}(P_{ref}(\theta_o, \phi_o))}{20}} \tag{19}$$

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \mathbf{s}(\theta_1)_1 & \dots & \mathbf{s}(\theta_1)_M \\ \mathbf{s}(\theta_2)_1 & \dots & \mathbf{s}(\theta_2)_M \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{s}(\theta_k)_1 & \dots & \mathbf{s}(\theta_k)_M \end{bmatrix} \tag{20}$$

$$\mathbf{\Delta} = [\Delta_1, \dots, \Delta_M]^T \tag{21}$$

$$\mathbf{v}_{ref} = [A_{ref}(\theta_1), \dots, A_{ref}(\theta_k)]^T \tag{22}$$

Do đó, bài toán tối ưu có thể được biểu diễn như sau:

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{\Delta}} \quad & \|\mathbf{\Delta}\|_2 \\ \text{s.t.} \quad & \max(|\mathbf{S}\mathbf{\Delta} - \mathbf{v}_{ref}|) - Thr \leq 0 \end{aligned} \tag{23}$$

Bài toán này có thể được giải quyết bằng CHT và MVO để thu được trọng số tối ưu cho mẫu bức xạ mong muốn.

Đối với bài báo này:

$$\begin{aligned} f(x) &= \|\mathbf{\Delta}\|_2 \\ v(x) &= \max(|\mathbf{S}\mathbf{\Delta} - \mathbf{v}_{ref}|) \leq Thr \end{aligned} \tag{24}$$

Để triệt nhiễu hiệu quả, bộ định dạng búp sóng được thiết kế nhằm duy trì hướng và độ rộng búp chính, đồng thời kiểm soát búp phụ trong ngưỡng cho phép. Bài toán này được biểu diễn dưới dạng tối ưu có ràng buộc và được chuyển thành bài toán không ràng buộc bằng hai kỹ thuật xử lý ràng buộc APT và SPT, với hàm thích nghi xác định như sau:

$$F = \begin{cases} \|\mathbf{\Delta}\|_2 & \text{if } v \leq 0 \\ \|\mathbf{\Delta}\|_2 + PF \max(|\mathbf{S}\mathbf{\Delta} - \mathbf{v}_{ref}|) - Thr & \text{if } v > 0 \end{cases} \tag{25}$$

Hàm thích nghi của bài toán được viết lại bằng cách áp dụng SPT như sau:

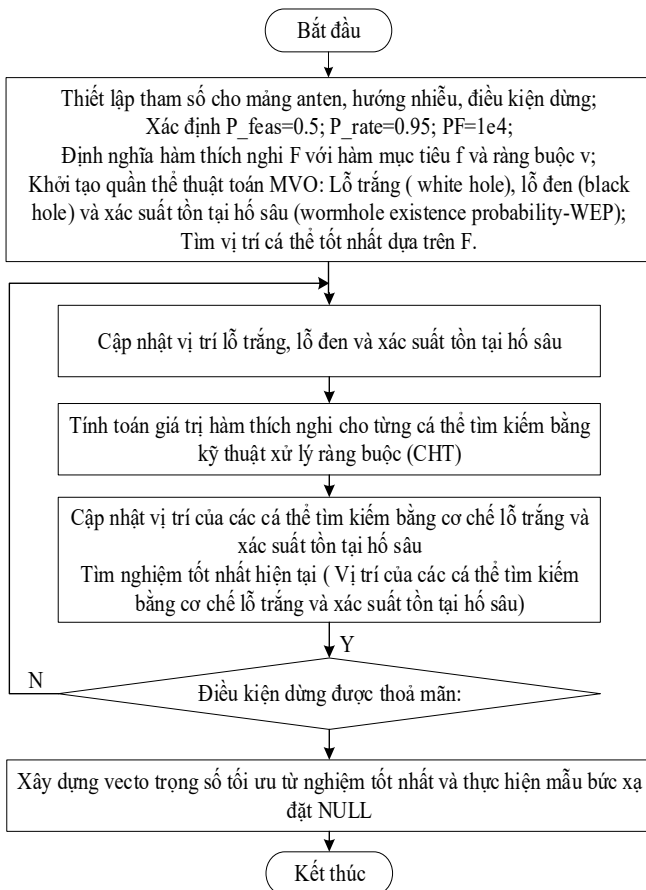
$$F = \|\mathbf{\Delta}\|_2 + PF \cdot \max(0, (|\mathbf{S}\mathbf{\Delta} - \mathbf{v}_{ref}|) - Thr) \tag{26}$$

Trong đó: f_{max} là giá trị lớn nhất trong số các giá trị mục tiêu f được tìm thấy.

5. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ PHÂN TÍCH

Bài báo sẽ xem xét bốn kịch bản để đánh giá các kỹ thuật xử lý ràng buộc (CHTs) dựa trên khả năng triệt nhiễu của bộ định dạng búp sóng. Quá trình này bao gồm việc xử lý các trọng số phức của tín hiệu kích thích tại từng phần tử trong mảng anten bằng thuật toán MVO [8]. Phương pháp đề xuất sẽ được áp dụng và đánh giá trên cả phía thu và phía phát.

Tất cả các mô phỏng trong các kịch bản sẽ tuân theo các tham số xác định trước, bao gồm việc sử dụng mảng anten lưỡng cực nửa bước sóng với 20 phần tử, thuật toán MVO với kích thước quần thể là 200, 50 lần mô phỏng Monte Carlo và số vòng lặp tối đa là 450. Mẫu tham chiếu được tạo ra bằng cách sử dụng trọng số từ phương pháp Chebyshev với mức búp sóng phụ (SLL) là -30dB. Kết quả của tất cả các kịch bản sẽ được lấy trung bình từ 50 lần mô phỏng thực hiện trên phần mềm MATLAB 2023b, chạy trên bộ vi xử lý Intel (R) Core (TM) i5-12400F CPU @ 2.5GHz.



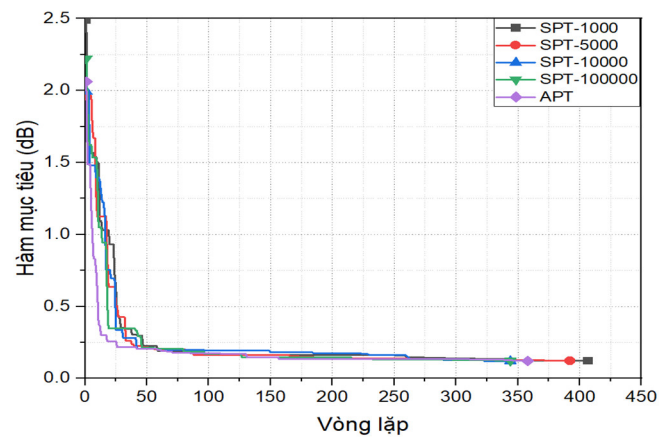
Hình 2. Lưu đồ của giải pháp dựa trên MVO và CHTs

Trong các mảng anten có khoảng cách phần tử đồng đều, phân bố trọng số đặc trưng của mảng Chebyshev tạo ra một mẫu bức xạ tối ưu, giúp cân bằng mức búp

sóng phụ và cung cấp độ rộng búp sóng phù hợp, đặc biệt tại điểm null đầu tiên của búp sóng chính [20]. Do đó, trong bài báo này, hàm mảng Chebyshev được chọn làm mẫu tham chiếu để kiểm soát SLL và độ rộng của búp sóng chính. Trong phương trình (1), bước nhảy được cố định ở một giá trị $\theta = 1^\circ$.

Hình 2 minh họa lưu đồ của giải pháp đề xuất. Kịch bản 1, có tiêu đề "đặc tính hội tụ", được sử dụng để đánh giá thời gian hội tụ của hàm mục tiêu khi áp dụng các kỹ thuật APT và SPT. Tiếp theo, các kịch bản 2-4 được sử dụng để đánh giá khả năng điều hướng null của bộ tạo dạng sóng, khi sử dụng APT hoặc SPT. Kết quả mô phỏng cho tất cả các kịch bản được trình bày trong các hình 3 ÷ 6.

5.1. Đặc tính hội tụ



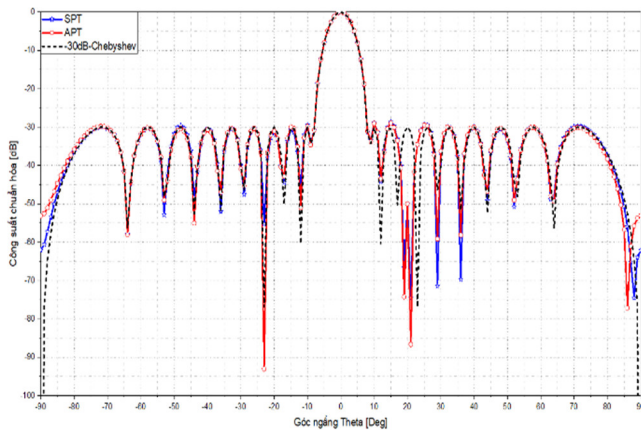
Hình 3. Giá trị hàm mục tiêu của APT và SPT sử dụng các giá trị tham số phạt khác nhau

Hình 3 minh họa quá trình hội tụ của APT và SPT với các tham số phạt 100000, 10000, 5000 và 1000 theo số vòng lặp. Tất cả phương pháp đều hội tụ nhanh trong 50 vòng lặp đầu, với giá trị hàm mục tiêu giảm đáng kể. APT và SPT với tham số phạt 100000 cho thấy tốc độ hội tụ nhanh nhất. Sau 100 vòng lặp, các phương pháp dần bão hòa với giá trị tiệm cận gần 0. SPT ổn định sớm hơn APT nhưng không đáng kể, trong khi APT hội tụ vượt hơn, phù hợp với bài toán có điều kiện thay đổi. SPT với tham số phạt cao (100000, 10000) tối ưu nhanh hơn so với 5000 và 1000. Dựa trên kết quả, bài báo chọn tham số phạt 10000 để cân bằng giữa bảo toàn búp sóng chính, kiểm soát búp sóng phụ và đặt null hiệu quả.

5.2. Giảm độ bức xạ tối ưu khi xuất hiện nhiễu

Trong kịch bản này, khả năng đặt null trên giản đồ bức xạ của APT và SPT sẽ được so sánh và đánh giá. Đầu tiên, giản đồ bức xạ tối ưu với một điểm null, nó có thể được đặt tại bất kỳ hướng nào. Hình 4 minh họa giản đồ bức xạ

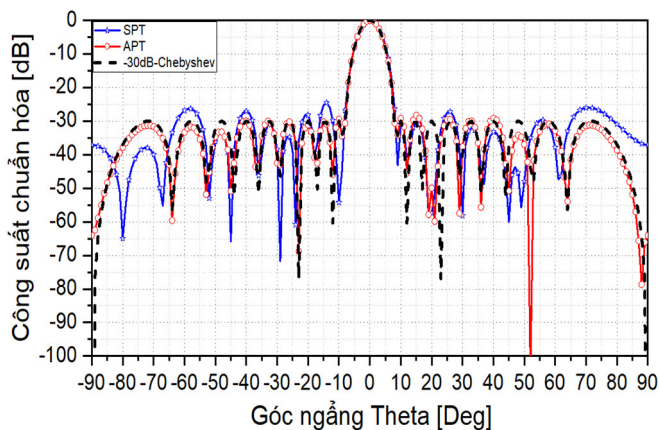
tối ưu 2D với một null (được đặt hướng $\theta = 20^\circ$) thu được bởi APT và SPT.



Hình 4. Giảm đồ bức xạ tối ưu với một điểm null ở 20°

Có thể thấy rằng giảm đồ bức xạ tối ưu bởi cả hai kỹ thuật APT và SPT đều đạt được mục tiêu đặt null tại 20° với mức ngưỡng độ sâu điểm null đạt -50dB. Điều này cho thấy tính hiệu quả của kỹ thuật CHT trong việc triệt tiêu nhiễu không mong muốn. So với mẫu Chebyshev, hai kỹ thuật APT và SPT làm thay đổi một phần cấu trúc bức xạ phụ, nhưng vẫn đảm bảo bức xạ chính không bị mở rộng đáng kể.

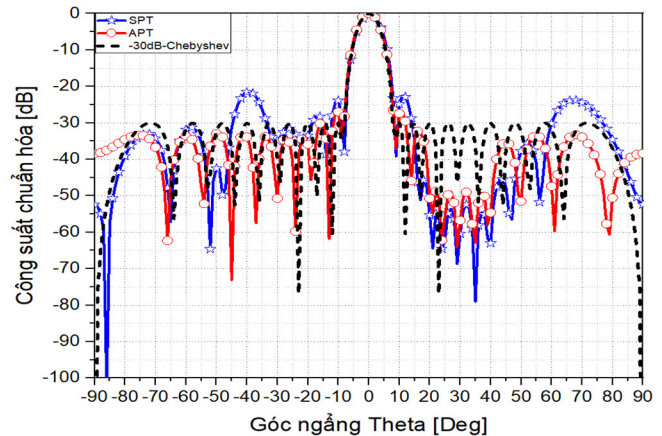
Trong bài toán triệt nhiễu với ngưỡng null -50dB, nếu yêu cầu về SLL không quá khắt khe, thì phương pháp APT có thể là lựa chọn tốt hơn so với SPT do khả năng thích ứng linh hoạt hơn.



Hình 5. Giảm đồ bức xạ tối ưu với nhiều điểm null ở $-45^\circ, 20^\circ, 45^\circ$

Hình 5 minh họa việc sử dụng APT và SPT để đặt null tại $-45^\circ, 20^\circ, 45^\circ$, tương ứng với các đỉnh bức xạ phụ của giảm đồ bức xạ Chebyshev. Cả hai phương pháp đều đạt độ sâu -50 dB, chứng tỏ khả năng triệt nhiễu hiệu quả. APT duy trì null chính xác hơn với độ sâu lần lượt là -50,88dB; -49,96dB; -50,81dB, trong khi SPT đạt -65,84dB; -57,38dB; -60,02dB và gây ảnh hưởng đến bức xạ chính

và làm tăng bức xạ phụ. Do đó, APT là lựa chọn tối ưu hơn khi cần triệt nhiễu đồng thời với độ sâu -50dB.



Hình 6. Giảm đồ bức xạ tối ưu với một dải null rộng từ 20° đến 40°

Tương tự như vậy, trong trường hợp nhiễu xuất hiện hay thay đổi trong một khoảng góc rộng $[20^\circ; 40^\circ]$, khả năng tổng hợp giảm đồ bức xạ của APT vẫn hoàn toàn ưu việt hơn khả năng của SPT, kết quả được minh họa trong hình 6. Kết quả chi tiết cho thấy dải null từ $20^\circ - 40^\circ$ đạt độ suy hao khoảng -50dB, đáp ứng yêu cầu triệt nhiễu (Độ sâu điểm null của SPT góc 35° là -78,99dB và của APT ở góc 29° là -64,02dB). APT hoạt động hiệu quả hơn, đảm bảo null có độ sâu đồng đều và ít làm méo bức xạ chính. So với giảm đồ bức xạ Chebyshev, hai kỹ thuật CHT cho hiệu suất triệt nhiễu cao, nhưng có sự đánh đổi về dạng bức xạ phụ. Như vậy APT là phương pháp tối ưu hơn khi cần tạo dải null rộng mà vẫn duy trì hiệu suất của bức xạ chính.

6. KẾT LUẬN

Bài báo này đã đề xuất một phương pháp triệt nhiễu biết trước hướng cho mảng anten lưỡng cực nửa bước sóng (HDULA), dựa trên sự kết hợp giữa kỹ thuật hàm phạt thích nghi (APT), kỹ thuật hàm phạt tĩnh (SPT) và giải thuật tối ưu đa vũ trụ (MVO). Phương pháp đề xuất hướng đến mục tiêu triệt nhiễu biết trước hướng hiệu quả, đồng thời bảo toàn độ rộng bức xạ chính và mức bức xạ phụ, nhằm tối ưu hóa hiệu năng của hệ thống anten tiên tiến.

Hiệu quả của phương pháp được đánh giá thông qua bốn kịch bản chính: Đặc tính hội tụ, khả năng đặt null đơn, khả năng đặt nhiều điểm null và khả năng đặt dải null rộng. Kết quả mô phỏng cho thấy cả hai kỹ thuật APT và SPT đều đạt hiệu suất cao trong triệt nhiễu. Đặc biệt, APT cho thấy khả năng vượt trội hơn SPT về tất cả các chỉ tiêu đánh giá, bao gồm tốc độ hội tụ, độ sâu điểm null, khả năng duy trì độ rộng bức xạ chính và mức bức xạ phụ ổn định.

Những kết quả đạt được đã khẳng định tính hiệu quả của APT và SPT trong bài toán triệt nhiễu cho HDULA, đồng thời nhấn mạnh vai trò quan trọng của các kỹ thuật xử lý ràng buộc trong việc tối ưu hóa bài toán triệt nhiễu. Trong tương lai, chúng tôi dự định mở rộng nghiên cứu bằng cách tích hợp các kỹ thuật xử lý ràng buộc khác như kỹ thuật tìm kiếm khả thi và kỹ thuật xếp hạng ngẫu nhiên, nhằm nâng cao khả năng thích ứng với các nguồn nhiễu không xác định, qua đó cải thiện hiệu năng của các hệ thống anten tiên tiến trong môi trường có nhiễu động phức tạp.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. H. L. Van Trees, *Optimum Array Processing: Part IV of Detection, Estimation, and Modulation Theory*. New York, NY, USA: Wiley, 1-12, 2002.
- [2]. R. L. Haupt, *Antenna Arrays: A Computational Approach*. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 156-176; 484-515, 2010
- [3]. Lagaros N.D., Kournoutos M., Kallioras N.A., et al, "Constraint handling techniques for metaheuristics: a state-of-the-art review and new variants," *Optim Eng*, 24, 2251-2298, 2023. doi: 10.1007/s11081-022-09782-9.
- [4]. Rahimi I., Gandomi A.H., Chen F., et al., "A Review on Constraint Handling Techniques for Population-based Algorithms: from single-objective to multi-objective optimization," *Arch Computat Methods Eng*, 30, 2181-2209, 2023. doi: 10.1007/s11831-022-09859-9.
- [5]. Mirjalili S., Mirjalili S.M., Hatamlou A., "Multi-Verse optimizer: a nature-inspired algorithm for global optimization," *Neural Comput. Appl.*, 27(2), 495-513, 2016. doi: 10.1007/s00521-015-1870-7.
- [6]. Luyen Tong, Cuong Nguyen, "An effective beamformer for interference suppression without knowing the direction," *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 13, 1, 601~610, 2023. doi: 10.11591/ijece.v13i1.pp601-610.
- [7]. VL Tong, Manh Kha Hoang, TH Duong, TQT Pham, VT Nguyen, VBG Truong, *An approach of utilizing binary bat algorithm for pattern nulling*. Springer Singapore, 2020. doi: 10.1007/978-981-15-2780-7_101.
- [8]. L.T. Trang, N.V. Cuong, T.V. Luyen, "Interference suppression approaches utilizing phase-only control and metaheuristic algorithms: A comparative study," in *Ad Hoc Networks. Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*, 558, 65-85, 2024. doi: 10.1007/978-3-031-55993-8_6.
- [9]. Trang L. T., N. V. Cuong, T. V. Luyen. "Efficient Constraint Handling Technique-Based Beamformer for Advanced Antenna Systems," *Journal of Communications*, 19.11 2024. doi: 10.12720/jcm.19.11.506-515.
- [10]. Mezura-Montes E, Coello CAC, "Constraint-handling in nature-inspired numerical optimization: Past, present and future," *Swarm Evol Comput*, 1(4): 173-194, 2011. doi: 10.1016/j.swevo.2011.10.001.
- [11]. Deb K., "An efficient constraint handling method for genetic algorithms," *Comput Methods Appl Mech Eng*, 186(2 -4):311-338, 2000. doi: 10.1016/S0045-7825(99)00389-8.
- [12]. Lagaros N.D., Kournoutos M., Kallioras N.A., et al, "Constraint handling techniques for metaheuristics: a state-of-the-art review and new variants," *Optim Eng*, 24, 2251-2298, 2023. doi: 10.1007/s11081-022-09782-9.
- [13]. Yang Xin-She, "Nature-inspired optimization algorithms: Challenges and open problems." *Journal of Computational Science* 46 (2020): 101104. doi: 10.1016/j.jocs.2020.101104.
- [14]. Deb Kalyanmoy, Rituparna Datta, "A fast and accurate solution of constrained optimization problems using a hybrid bi-objective and penalty function approach," *IEEE congress on evolutionary computation*, 2010. doi: 10.1109/CEC.2010.5586543.
- [15]. R. Fletcher, "An Ideal Penalty Function for Constrained Optimization," *IMA Journal of Applied Mathematics*, 15, 3, 319-342, 1975. doi: 10.1093/imamat/15.3.319.
- [16]. Rahimi I., Gandomi A.H., Chen F., et al., "A Review on Constraint Handling Techniques for Population-based Algorithms: from single-objective to multi-objective optimization," *Arch Computat Methods Eng*, 30, 2181-2209, 2023. doi: 10.1007/s11831-022-09859-9.
- [17]. Jordehi A.R., "A review on constraint handling strategies in particle swarm optimisation," *Neural Comput & Applic*, 26, 1265-1275, 2015. doi: 10.1007/s00158-017-1784-3.
- [18]. Yeniay Ö., "Penalty function methods for constrained optimization with genetic algorithms," *Math Comput Appl.*, 10(1):45-56, 2005. doi: 10.3390/mca10010045.
- [19]. Kawachi T, Kushida J-I, Hara A, Takahama T., "Efficient constraint handling based on the adaptive penalty method withbalancing the objective function value and the constraint violation," in *2019 IEEE 11th international workshop on computational intelligence and applications, IWCI 2019 proceedings*, 8955094, 121-128, 2019. doi:10.1109/IWCI47330.2019.8955094.
- [20]. C. L. Dolph, "A current distribution for broadside arrays which optimizes the relationship between beam width and side-lobe level," *Proc. IRE*, 34, 6, 335-348, 1946.

AUTHORS INFORMATION

Le Thi Trang^{1,2}, Tran Minh Duc¹, Hoang Thi Phuong Thao², Tong Van Luyen¹

¹School of Electrical and Electronic Engineering, Hanoi University of Industry, Vietnam

²Faculty of Electronics and Telecommunications, Electric Power University, Vietnam