

NGHIÊN CỨU KỸ THUẬT ĐỊNH DẠNG VÀ ĐIỀU KHIỂN BÚP SÓNG SỬ DỤNG MẢNG ANTEN PHẪNG

Lê Thành Long; Nguyễn Tiến Hùng; Hoàng Văn Đạo
Khoa Điện tử, Trường Đại học Công Nghiệp, Hà Nội
Email: lethanhlong04012000@gmail.com

Số điện thoại: 0376240869

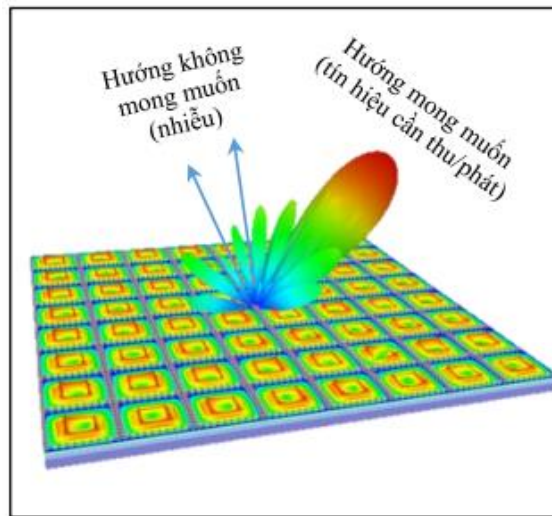
TÓM TẮT

Đề tài nghiên cứu khoa học trình bày về cách thiết kế và thực thi bộ định dạng búp sóng sử dụng mảng anten phẳng. Giải pháp tối ưu trọng số tập trung hướng búp sóng chính đến hướng mong muốn và đặt các điểm không tại tín hiệu nhiễu nhằm tiết kiệm năng lượng, tối ưu hiệu suất phổ. Để thực hiện đề tài, tập trung tìm hiểu về tổng quan về mảng anten, các thông số cơ bản của mảng anten phẳng, kỹ thuật định dạng và điều khiển búp sóng cho mảng anten phẳng. Giải pháp được thực thi ở mảng anten hình chữ nhật và mảng anten tròn để tập trung năng lượng bức xạ đến tín hiệu mong muốn và đồng thời triệt nhiễu. Kết quả của thuật toán LMS khi hướng búp sóng chính đến hướng mong muốn và triệt nhiễu đem lại độ chính xác cao hơn so với sử dụng trọng số Chebyshev đồng thời độ rộng búp sóng chính của LMS nhỏ hơn của trọng số Chebyshev. Các kết quả đã được kiểm chứng qua các kịch bản cụ thể. Hơn thế nữa, sau khi trải qua các kịch bản kiểm chứng và thực thi, một ứng dụng đã được xây dựng để mô tả lại quá trình tổng hợp các giản đồ bức xạ. Bên cạnh đó, ứng dụng sẽ giúp người dùng dễ tiếp cận hơn với lĩnh vực anten thông minh.

1. GIỚI THIỆU (INTRODUCTION)

Định dạng và điều khiển búp sóng (BF: Beamforming) là một kỹ thuật được sử dụng để cải thiện tín hiệu trên nhiễu của tín hiệu nhận được, mục đích là loại bỏ nguồn gây nhiễu không mong muốn và tập trung tín hiệu được truyền đi đến vị trí cụ thể. Kỹ thuật định dạng và điều khiển búp sóng là cốt lõi của hệ thống mảng cảm biến, bao gồm hệ thống truyền không dây MIMO như 5G, LTE và WLAN. Định dạng chùm sóng MIMO trong các ứng dụng không dây cũng có thể được sử dụng để tăng dung lượng luồng dữ liệu giữa trạm gốc và người dùng. Các kỹ thuật định dạng và điều khiển búp sóng dựa vào việc tối ưu hóa đang trở nên phổ biến hơn trong các hệ thống truyền thông không dây hiện đại. Điều này bao gồm búp sóng lai, trong các kỹ thuật tối ưu hóa được sử dụng để phân vùng hiệu quả kiến trúc hệ thống giữa băng tần cơ sở và hệ thống tần số vô tuyến (RF: Radio Frequency) để giảm chi phí. Trên thực tế, nó sử dụng cho sóng

vô tuyến hoặc sóng âm thanh. Ví dụ Hình 2.1 minh họa búp sóng được lái trong không gian với búp sóng chính hướng tới tín hiệu mong muốn và đặt điểm “không” (NULL) tại hướng không mong muốn.



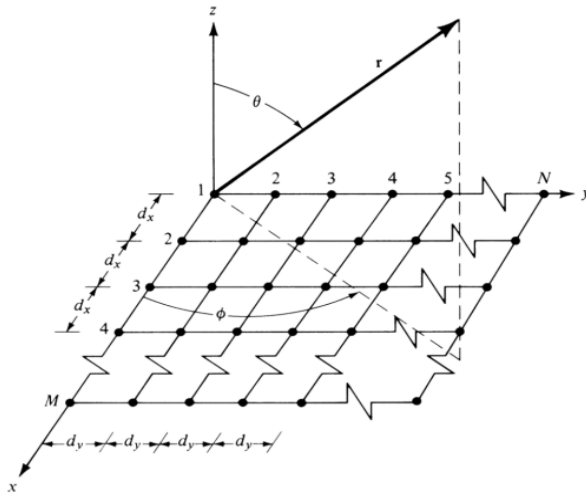
Hình 1: Định dạng và điều khiển búp sóng

Trong kỹ thuật định dạng và điều khiển búp sóng, tín hiệu của các phần tử anten sẽ được điều khiển hay nói cách khác là lái búp sóng theo một nguyên tắc xác định. Hoạt động điều khiển này nhằm mục đích là định dạng và điều khiển búp sóng của mảng anten gồm có: tạo và lái búp sóng chính theo một hướng xác định, thay đổi mức búp phụ và thay đổi các búp không (null). Các búp sóng của mảng anten được định dạng và điều khiển tùy theo yêu cầu ứng dụng của mảng anten trong các hệ thống thông tin cụ thể nào đó. Trong một số trường hợp, biên độ hoặc pha hay là cả biên độ và pha của các tín hiệu từ các phần tử anten đều được điều chỉnh và thay đổi. Điều khiển kết hợp cả biên độ và pha của tín hiệu tốt hơn so với điều khiển chỉ có pha hay chỉ có biên độ. Kết hợp biên độ và pha của từng phần tử người ta gọi đó là “trọng số phức”. Bộ định dạng và điều khiển búp sóng phía phát sử dụng trọng số phức này để tác động điều khiển tín hiệu phát đến hướng xác định (đặt biên độ và dịch pha). Cho từng phần tử anten. Còn bộ định dạng búp sóng bên phía thu áp dụng trọng số này cho tín hiệu thu của từng phần tử, sau đó tổng hợp tất cả các tín hiệu này thành một tín hiệu thu mong muốn.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT/PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU (THEORETICAL FRAMEWORD/METHODS)

- *Mảng anten phẳng hình chữ nhật*

Xét mảng anten phẳng như Hình 2, với θ là góc nâng, ϕ là góc phương vị, d_x và β_x lần lượt là khoảng giữa các phần tử anten và độ dịch pha dọc theo trục x , d_y và β_y là khoảng giữa các phần tử anten và độ dịch pha dọc theo trục y



Hình 2: Mảng anten phẳng hình chữ nhật cách đều.

Với I_{m1} và I_{n1} là hệ số kích thích biên độ của mỗi phần tử cho toàn bộ mảng gồm $M \times N$ anten, ta có hệ số mảng:

$$AF = \sum_{n=1}^N I_{1n} \left[\sum_{m=1}^M I_{m1} e^{j(m-1)(kd_x \sin \theta \cos \phi + \beta_x)} \right] e^{j(n-1)(kd_y \sin \theta \sin \phi + \beta_y)} \quad (1)$$

Trong đó:

m, n: là số lượng phần tử dọc nằm trên trục x , y .

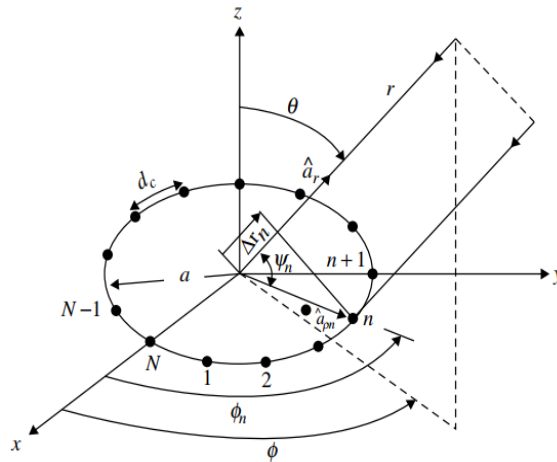
w_{m,n}: trọng số kích thích tại mỗi phần tử.

d_x, d_y : khoảng cách giữa các phần tử dọc theo trục x , y .

θ: góc nâng.

φ: góc phương vị.

- **Mảng Anten tròn**



Hình 3: Mảng anten tròn đồng nhất (UCA) gồm N phần tử

$$AF(\theta, \phi) = \sum_{n=1}^N a_n e^{jkr \sin \theta \cos(\phi_0 - \phi_n)} \quad (2)$$

Trong đó:

n: số phần tử trong mảng.

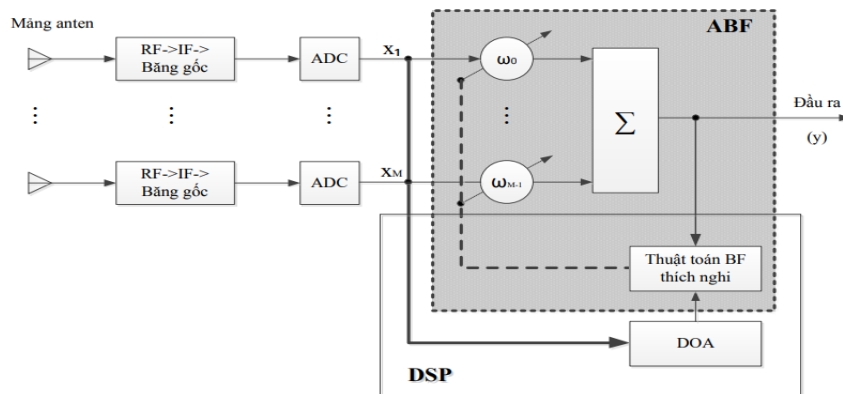
r: bán kính của mảng anten tròn.

a_n, ϕ_0 : là trọng số kích thích và góc phương vị tại phần tử thứ n.

$k = \frac{2\pi}{\lambda}$: hệ số sóng.

- **Sơ đồ khối chức năng hệ anten thông minh phía thu:**

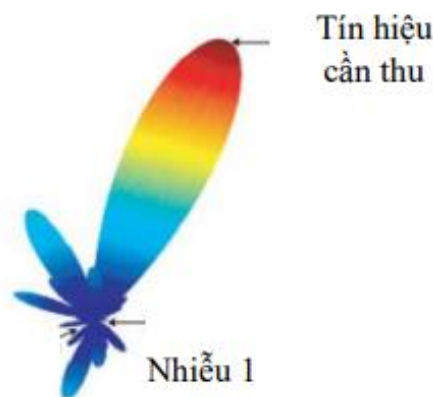
Anten thông minh (smart anten) hay hệ anten có thể xử lý tín hiệu là một hệ thống gồm mảng anten kết hợp với bộ xử lý số tín hiệu DSP. Hình 1 minh họa sơ đồ khối chức năng của anten thông minh.



Hình 4: Sơ đồ khối chức năng hệ anten thông minh phía thu.

Anten thông minh phía thu có các tín hiệu cao tần thu được từ mảng anten được chuyển đổi xuống tín hiệu băng gốc nhờ khối RF->IF->Băng gốc. Sau đó, các tín hiệu này được số hóa bởi khối ADC (ADC: Analog-to-Digital Converter) và được bộ DSP và bộ định dạng và điều khiển búp sóng thích nghi (ABF: Adaptive Beamforming) xử lý trước khi đưa ra tín hiệu đầu ra như mong muốn. Hệ thống thông xử lý theo nguyên lý: khối DOA xác định hướng sóng đến của tín hiệu cần thu bằng cách sử dụng các thuật toán xác định hướng sóng đến. Khối ABF đảm bảo cho mảng anten có đặc tính luôn hướng búp sóng chính bám theo hướng sóng đến của tín hiệu cần thu (SOI) (thu tín hiệu mong muốn tốt hơn) và đặt các điểm null theo các hướng nhiễu (SNOI) (triệt nhiễu) trong suốt quá trình hoạt động dựa trên các thuật toán ABF thích nghi như LMS, Chebychev, ...

Các tín hiệu thu được từ các phần tử anten trong mảng sau khi được xử lý sẽ được tổng hợp lại và cho ra kết quả đầu ra như mong muốn (y). Hệ anten thông minh này sẽ thu nhận tín hiệu cần thu với chất lượng cao và loại bỏ được nhiễu nhờ khả năng thay đổi đặc tính cao tần của mảng anten một cách linh hoạt và thích nghi trong suốt quá trình hoạt động.



Hình 5: Đặc tính bức xạ của hệ anten thông minh.

- **Thuật toán bình phương trung bình nhỏ nhất**

Kỹ thuật tối ưu lỗi bình phương trung bình cực tiểu (MMSE)

Thuật toán LMS được xác định nhanh chóng và dễ dàng bằng cách lập công thức tối ưu hệ số như ước lượng dựa trên việc tối thiểu hóa lỗi bình phương trung bình. Một trong những phép đo hiệu suất được sử dụng được sử dụng rộng rãi nhất trong việc tính toán trọng số tối ưu là giảm thiểu hàm chi phí MSE. Giải pháp của chức năng này dẫn đến một loại bộ lọc tối ưu đặc biệt được gọi là bộ lọc Wiener.

$$\varepsilon_k = d_k - \mathbf{w}^H \mathbf{A} \mathbf{R}_k \quad (3)$$

Trong đó:

\mathbf{AR}_k : véc tơ đáp ứng của mảng.

$\boldsymbol{\varepsilon}_k$: Lỗi.

d_k : Hướng tín hiệu đến.

\mathbf{w}^H : trọng số kích thích của mảng.

Vì vậy hàm mất mát MSE có thể được viết lại như sau:

$$J_{MSE}(E[\varepsilon_k^2]) = E[(d_k - \mathbf{w}^H \mathbf{x}_k)^2] \quad (4)$$

Để tối thiểu hóa hàm mất mát (tức là, để tối thiểu MSE) theo trọng số \mathbf{w} , người ta phải tính toán Gradient bằng cách lấy đạo hàm theo đối với \mathbf{w} và đặt nó bằng 0 nên:

$$\min_{\mathbf{w}} \{J_{MSE}(E[\varepsilon_k^2])\} \Rightarrow \frac{\partial}{\partial \mathbf{w}} \{J_{MSE}(E[\varepsilon_k^2])\} = 0 \quad (5)$$

Phương trình được gọi là giải pháp Wiener, trong đó \mathbf{w} chính là vectơ trọng số tối ưu của mảng anten theo tiêu chuẩn MMSE.

Thuật toán bình phương trung bình nhỏ nhất (LMS)

Thuật toán bình phương trung bình nhỏ nhất sử dụng một kỹ thuật được gọi là "phương pháp xuống dốc nhất" và liên tục ước tính kết quả bằng cách cập nhật trọng số bộ lọc. Thông qua nguyên tắc hội tụ thuật toán, thuật toán bình phương trung bình nhỏ nhất cung cấp các đường cong học cụ thể hữu ích trong lý thuyết và triển khai. Kết hợp đầu vào với đầu ra, làm cho quá trình tối ưu và kiểm tra hiệu quả hơn và nói chung theo đuổi "hội tụ" trong đó quá trình học lặp đi lặp lại giải quyết thành kết quả cuối cùng nhất quán thay vì đi chệch hướng. Thuật toán LMS là một thuật toán có độ phức tạp thấp, không yêu cầu nghịch đảo ma trận trực tiếp và không cần bộ nhớ. Hơn nữa, nó là một phương pháp gần đúng của độ dốc lớn nhất sử dụng bộ ước lượng của gradient thay vì giá trị thực của gradient, vì việc tính toán giá trị thực của gradient là không thể bởi vì nó đòi hỏi kiến thức về các tín hiệu đến là tiên nghiệm. Do đó, tại mỗi lần lặp lại trong quá trình thích nghi, ước lượng của gradient có dạng:

$$\nabla_{\mathbf{w}} [J(\mathbf{w})]_k = \begin{bmatrix} \frac{\partial J(\mathbf{w})}{\partial w_0} \\ \vdots \\ \frac{\partial J(\mathbf{w})}{\partial w_{M-1}} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Trong đó: $J(\mathbf{w})$ là hàm mất mát được tối thiểu hóa. Do đó, theo phương pháp dốc lớn nhất, phương pháp lặp cập nhật trọng số ở mỗi lần lặp là:

$$w_{k+1} = w_k - \mu \nabla_w [J(w)]_k \quad (7)$$

Trong đó: μ là kích thước bước liên quan đến tốc độ hội tụ. Điều này đơn giản hóa đáng kể các tính toán được thực hiện và cho phép các thuật toán, như thuật toán LMS, được sử dụng trong các ứng dụng thời gian thực.

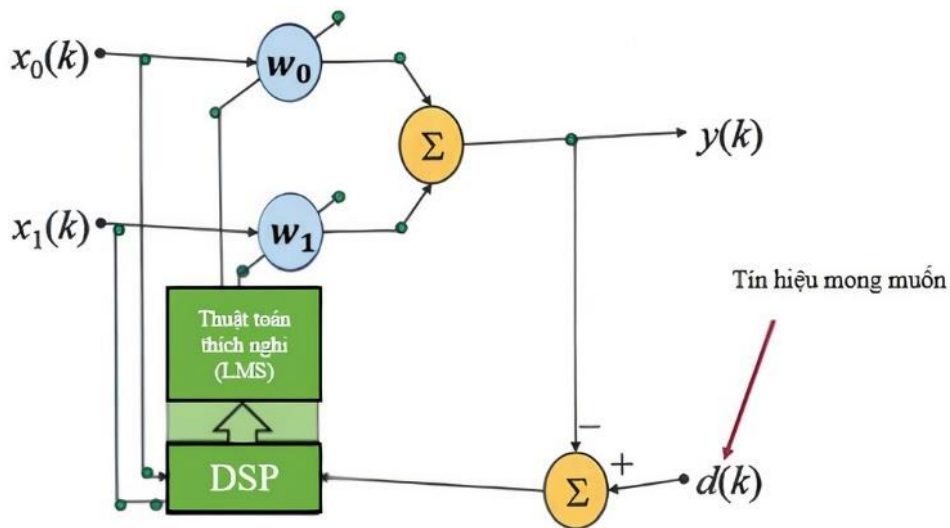
Tóm lại, thuật toán LMS tối thiểu hóa hàm mất mát MSE và nó giải phương trình Wiener–Hopf, lặp đi lặp lại mà không cần đảo ngược ma trận. Do đó, thuật toán LMS tính toán các trọng số lặp đi lặp lại như sau:

$$w_{k+1} = w_k - 2\mu \mathbf{AR}_k \cdot \varepsilon_k$$

$$w_{k+1} = w_k - 2\mu \mathbf{AR}_k (d_k - \mathbf{AR}_k^T \mathbf{w}_k) \quad (8)$$

Để đảm bảo sự hội tụ của các trọng số \mathbf{w}_k , kích thước bước μ được giới hạn bởi:

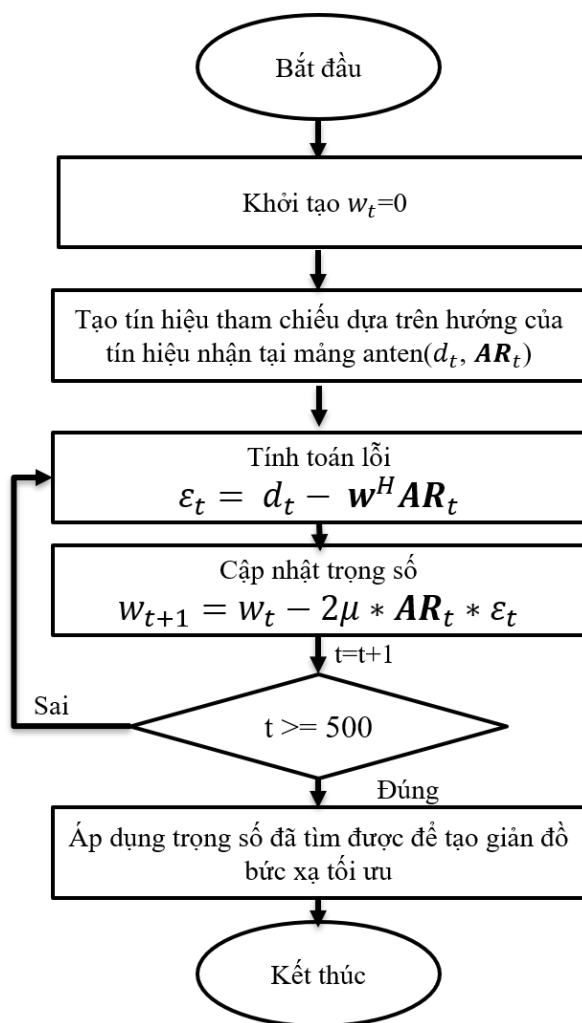
$$0 < \mu < \frac{1}{\lambda_{max}} \quad (9)$$



Hình 6: Thực hiện thuật toán LMS.

Trong đó λ_{max} là giá trị riêng lớn nhất của ma trận hiệp phương sai. Nhược điểm chính của thuật toán LMS là nó có xu hướng hội tụ chậm, đặc biệt là trong môi trường nhiễu lớn. Sơ đồ khối về việc triển khai thuật toán (LMS) này được thể hiện trong Hình 2.6 trong đó $d(k)$ là tín hiệu tham chiếu / mong muốn.

- Lưu đồ thuật toán



Hình 7: Lưu đồ thuật toán tối ưu giải pháp BF.

Bước 1: Bộ định dạng búp sóng được trang bị một bộ hướng sóng đến từ đó tạo tín hiệu tham chiếu dựa trên hướng của tín hiệu nhận của mảng anten (d_t, AR_t) .

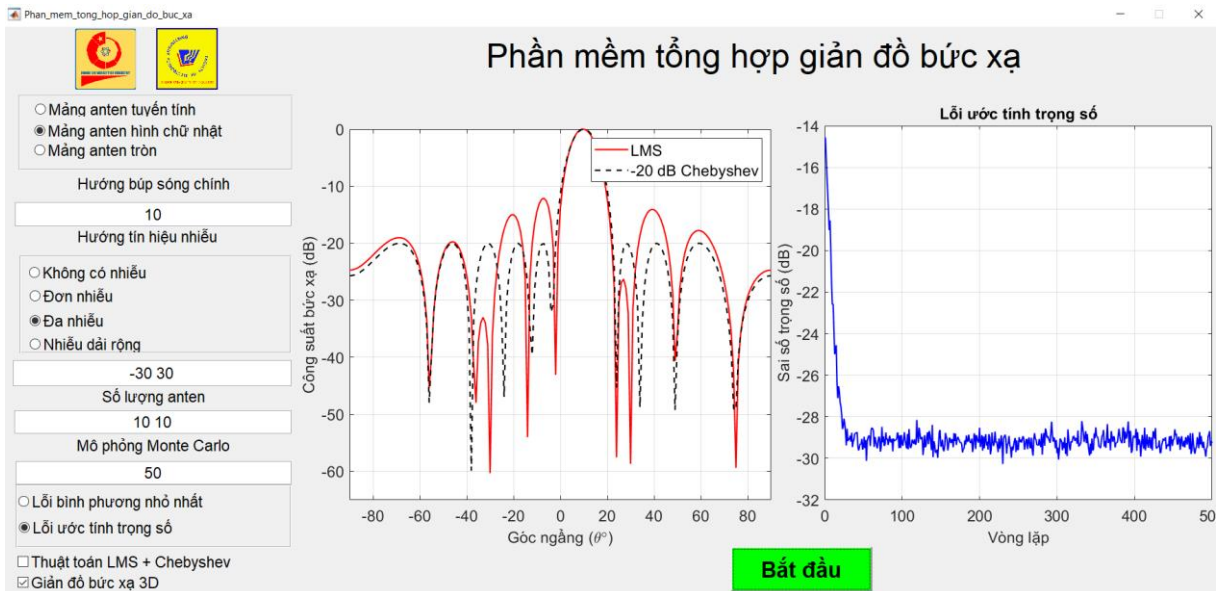
Bước 2: Thực hiện tính toán lỗi và cập nhật trọng số qua các vòng lặp sau 500 vòng lặp quá trình cập nhật trọng số sẽ dừng lại.

Bước 3: Áp dụng trọng số đã tìm được để tạo giản đồ bức xạ tối ưu.

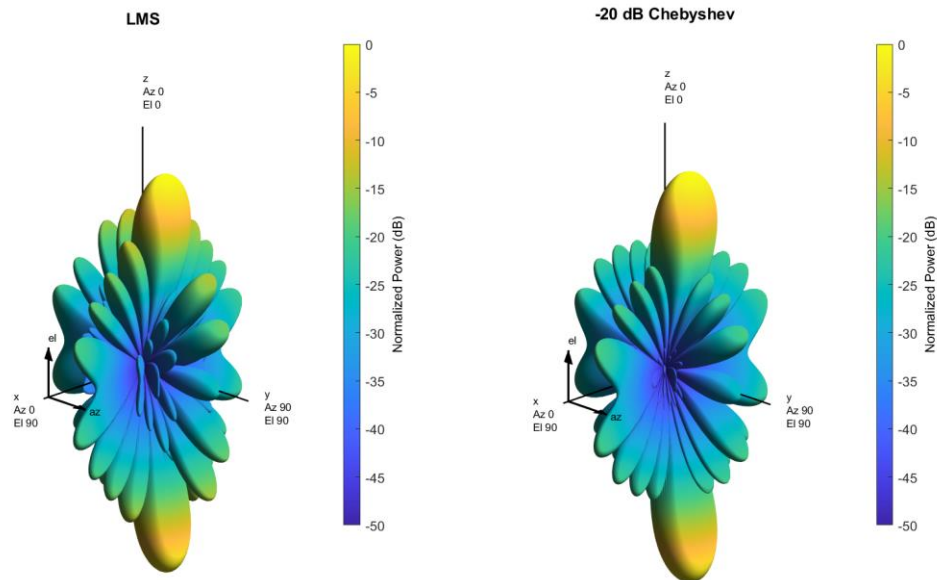
3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU/TÍNH TOÁN/MÔ PHỎNG VÀ THẢO LUẬN (RESULTS AND DISCUSSION).

Kết quả mô phỏng mảng anten phẳng hình chữ nhật:

Bộ ABF còn có khả năng đặt một hay nhiều null cùng một lúc trong trường hợp hướng nhiễu khác nhau ngoài búp sóng chính. Hình 7 và Hình 8 sẽ mô phỏng một trường hợp triệt nhiễu ở hướng -30° và 30° đồng thời lái búp sóng chính đến hướng 10° với 100 phần tử anten, mô phỏng Monte Carlo 50 lần, 500 vòng lặp.



Hình 8: Giản đồ tổng hợp bức xạ mảng Anten phẳng hình chữ nhật.

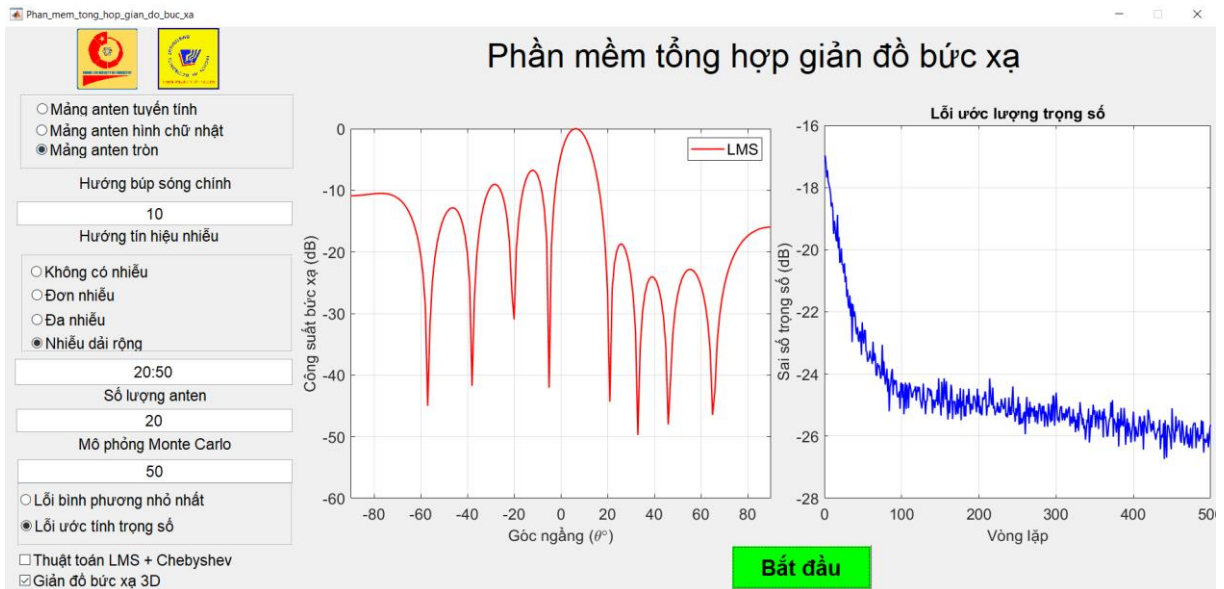


Hình 9: Giản đồ bức xạ 3D mảng Anten phẳng hình chữ nhật.

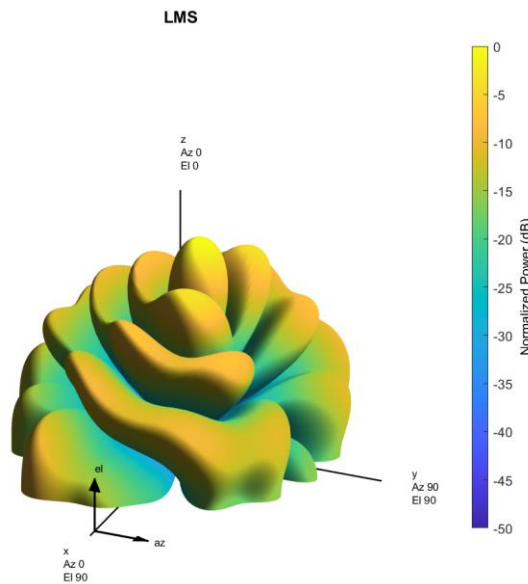
Hình 7 và Hình 8 có thể thấy rõ sự khác nhau giữa hai phương pháp. Ở thuật toán LMS có thể vừa lái búp sóng chính và đặt điểm không ở hướng không mong muốn rất chính xác còn ở trọng số Chebyshev thì chỉ có thể nén búp sóng phụ xuống một mức nhất định và không có khả năng đặt điểm không ở hướng nhiều. Lỗi ước tính trọng số sẽ hội tụ sau khoảng 30 vòng lặp ngoài khoảng đó sẽ không có sự cải thiện.

Kết quả mô phỏng mảng Anten tròn:

Hình 9 và Hình 10 tiếp tục mô phỏng kịch bản đó là vừa lái búp sóng chính và vừa triệt nhiễu. Trường hợp này, sẽ triệt nhiễu ở góc dải rộng (20° , 50°) và đồng thời lái búp sóng chính đến hướng quan tâm là 10° .



Hình 10: Giản đồ bức xạ 2D mảng tròn khi có nhiều dải rộng và lái búp sóng chính.



Hình 11: Giản đồ bức xạ 3D mảng tròn khi có nhiều dải rộng và lái búp sóng chính.

Tương tự như ở mảng anten phẳng hình chữ nhật ở mảng anten tròn thì thuật toán LMS vẫn có thể vừa đặt điểm không và vừa lái búp sóng chính hướng cụ thể. Lỗi ước tính trọng số sẽ hội tụ trong khoảng 100 vòng lặp.

4. KẾT LUẬN (CONCLUSIONS)

Như vậy, đề tài nghiên cứu khoa học cũng đã trình bày khái quát về định dạng búp sóng và trình bày một số giải pháp điều khiển tối ưu. Bên cạnh đó, bộ định dạng búp sóng sử dụng thuật toán LMS và phương pháp trọng số Chebyshev đã được thực thi và so sánh chi tiết qua các kịch bản cụ thể. Cuối cùng là làm giao diện phần mềm, giúp cho người đọc dễ hình dung và tiếp cận được lĩnh vực anten thông minh.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] J. . S. R. J. C. Liberti, Smart Antennas for Wireless Communications: IS-95 and Third Generation CDMA Applications, 1999.
- [2] T. Q. Trường, Thiết kế bộ định dạng và điều khiển búp sóng cho mảng anten tuyến tính sử dụng mạng nơ-ron nhân tạo, 2021.
- [3] N. V. Cường, Nghiên cứu giải pháp tối ưu cho Beamforming, Hà Nội, 2021.
- [4] T. T. V. Luyên, Nghiên cứu và phát triển phương pháp định dạng và điều khiển búp sóng cho mảng anten, 2017.
- [5] J. w. & sons, C. A. Balanis, Antenna theory: analysis and design, Fourth Edition., 2016.
- [6] J. W. & Sons, C. A. Balanis Antenna Theory: Analysis and Design, 2005.
- [7] S. Haykin, Adaptive Filter Theory. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, 2016.
- [8] V. Z. A. O. E.-R. N. H. A. T. E. T. A. Nurul H. Noordin, Uniform Circular Arrays for Phased Array Antenna, 2011.