PHƯƠNG PHÁP DUY TRÌ ĐỘ RỘNG BÚP SÓNG KHI MỞ RỘNG VÙNG QUAN SÁT PHƯƠNG VỊ TRONG RA ĐA BIỂN TẦM XA SÓNG BỀ MẶT DẢI TẦN SỐ CAO

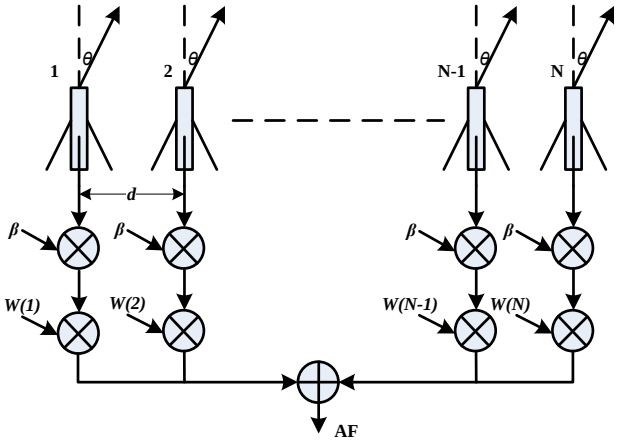
Hà Huy Dũng[1]*, Lê Duy Hiệu[1], Đoàn Văn Tùng[1], Bùi Ngọc Mỹ[2]

Tóm tắt: *Ra đa biển tầm xa sóng bề mặt dải tần số cao có hệ thống ăng ten thu đồng dạng tuyến tính với kích thước lớn và được lắp đặt cố định trên bờ biển. Vùng quan sát theo phương vị tiêu chuẩn của các ra đa biển tầm xa sóng bề mặt dải tần số cao thường giới hạn trong miền phương vị $\pm 60^0$ do độ rộng búp sóng bị mở rộng vượt quá các chỉ tiêu phân biệt và phát hiện của ra đa. Bài báo nghiên cứu, đề xuất phương pháp duy trì độ rộng búp sóng khi góc quan sát của ra đa biển tầm xa sóng bề mặt dải tần số cao lớn hơn $\pm 60^0$ bằng cách hiệu chỉnh các hệ số kích thích các phần tử ăng ten. Phương pháp được thực hiện trên cơ sở xác định giới hạn vùng góc được mở rộng. Trong vùng này, độ rộng búp sóng tại các góc mở rộng sẽ được duy trì tương tự như tại $\pm 60^0$ với mức năng lượng búp bên nằm trong giới hạn cho phép.*

Từ khóa: HFSWR; Độ rộng búp sóng; Vùng góc mở rộng.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Ra đa biển tầm xa sóng bề mặt dải tần số cao sử dụng nguyên lý lan truyền trên bề mặt dẫn điện của sóng phân cực đứng dải tần số từ 3÷30 MHz để quản lý, giám sát các mục tiêu tàu biển trong vùng giới hạn 400 km [1] được viết tắt là HFSWR [2] (High Frequency Surface Wave Radar). HFSWR sử dụng cấu trúc ăng ten với tín hiệu phát được phát xạ bởi mảng ăng ten mặt phẳng phân cực đứng lưỡng cực logarit LDPA (Log-Periodic Dipole Array). Tại phía thu, các ăng ten mạng pha đồng dạng tuyến tính (Uniform Linear Array-ULA) dựa trên các bộ thu đa kênh kết hợp với bộ xử lý số theo từng phần tử ăng ten để tạo ra giản đồ hướng. Việc tạo ra các giản đồ hướng hay còn gọi là định dạng búp sóng tại các góc quan sát khác nhau trong mảng ăng ten thu được điều khiển bởi các trọng số kích thích tới từng phần tử ăng ten như mô tả tại hình 1. Phương pháp định dạng này được gọi là phương pháp định dạng búp sóng số (Digital BeamForming-DBF).



Hình 1. *Phương pháp định dạng búp sóng hệ thống ăng ten mạng pha.*

Trên hình 1, θ là góc hướng phương vị quan sát; d là khoảng cách giữa các phần tử ăng ten; β là độ lệch pha giữa các phần tử ăng ten liền kề; $\boldsymbol{W} = [W(1)\ W(2)\ldots W(N)]$ là cửa sổ trọng số điều khiển tham số giản đồ hướng. Giản đồ hướng mảng ăng ten N phần tử được thể hiện qua hệ số mảng ăng ten AF (Antenna Factor) được tính theo công thức (1) [3]:

$$AF = \sum_{n=0}^{N-1} \mathrm{W}^{T}(n).e^{jn(kd\sin\theta-\beta)} \quad (1)$$

Trong đó, $[.]^T$ là phép chuyển vị ma trận.

Bằng phương pháp DBF, góc phương vị quan sát được trong HFSWR có thể đạt tới $\pm 90^0$. Tuy nhiên, do sự suy giảm chất lượng giản đồ hướng theo góc quan sát (Theo khảo sát tại Mục 2) giá trị tiêu chuẩn về góc quan sát của HFSWR thường giới hạn trong $\pm 60^0$ [4]. Đối với các quốc gia có đường bờ biển dài, sự giới hạn góc quan sát sẽ đòi hỏi sự gia tăng về số lượng các trạm HFSWR cần để quản lý vùng biển. Vì vậy, nhu cầu mở rộng giới hạn quan sát vượt qua giá trị giới hạn tiêu chuẩn có ý nghĩa thực tiễn lớn trong giảm thiểu chi phí, điều khiển đồng bộ một hệ thống các trạm HFSWR. Sự mở rộng các vùng quan sát còn có vai trò quan trọng trong việc phát triển các vùng chống lấn giữa các trạm ra đa nhằm nâng cao khả năng phát hiện mục tiêu và phát hiện nguồn gây nhiễu.

Bài báo sẽ thực hiện một giải pháp duy trì chất lượng giản đồ hướng trong HFSWR khi góc quan sát vượt qua giới hạn $\pm 60^0$. Các nội dung chính gồm có: Đề xuất và đánh giá những tham số giản đồ hướng cần được duy trì tại mục 2. Nghiên cứu thực hiện giải pháp duy trì chất lượng giản đồ hướng và đánh giá kết quả thực hiện trên phần mềm mô phỏng tại mục 3. Cuối cùng, những kết quả đạt được và những hướng nghiên cứu phát triển liên quan được trình bày tại phần kết luận.

2. THAM SỐ GIẢN ĐỒ HƯỚNG MẠNG ĂNG TEN ĐỒNG DẠNG TUYẾN TÍNH

Giản đồ hướng của mạng ăng ten thu thực hiện chức năng thu chọn lọc các tín hiệu từ hướng mong muốn, đồng thời nén nhiễu và các tín hiệu can nhiễu từ các hướng khác. Nhiệm vụ này được đảm bảo qua những tham số chất lượng của giản đồ hướng, gồm có:

+ Độ rộng búp sóng:

Độ rộng búp sóng là độ lớn góc mở tại vị trí mức -3 dB (Half Power Beam Width - HPBW) hoặc Null các điểm 0 thứ nhất (First Null Beam Width-FNBW) của búp sóng chính. Trong bài báo HPBW được sử dụng để xác định độ rộng búp sóng. HPBW của búp sóng chính được tính bằng cách đặt hệ số mảng $AF = 1/\sqrt{2}$. Với mảng ăng ten ULA, HPBW được tính gần đúng theo cấu trúc ăng ten như công thức (2) [5].

$$HPBW_{ULA} \approx \frac{0.886\lambda}{Nd\cos\theta_0} \quad (2)$$

+ Mức búp bên (Side Lobe Level-SLL):

Búp bên là những búp sóng nằm xung quanh búp sóng chính trong giản đồ hướng của mạng ăng ten. Mức búp bên được định nghĩa là búp sóng có biên độ lớn nhất trong các búp bên so với mức đỉnh búp sóng chính. Trong ăng ten ULA (có $d = \lambda/2$) quan hệ biên độ giữa búp sóng chính và mức búp bên được xác định gần đúng như công thức (3) [5]:

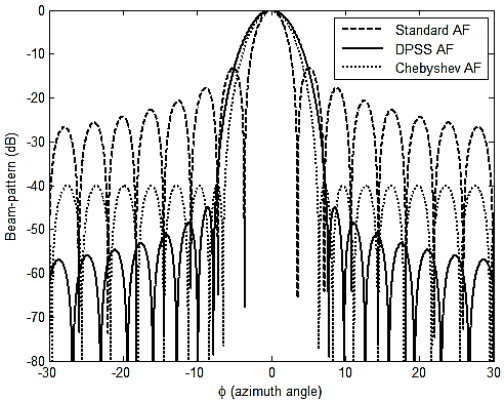
$$SLL_{ULA} = 20\log\left(\frac{1}{N\sin(3\pi/2N)}\right) \text{ dB} \quad (3)$$

+ Búp lặp:

Là hiện tượng có nhiều búp sóng chính trong giản đồ hướng. Để loại bỏ hiện tượng này cần đảm bảo quan hệ giữa vùng phương vị quan sát $\Delta\phi$, tỉ số giữa bước sóng làm việc và khoảng cách giữa các phần tử ăng ten tuân thủ theo (4) [6]:

$$-1 \le \frac{\Delta\phi}{2\pi}\frac{\lambda}{d} \le +1 \quad (4)$$

Bài báo thực hiện các nghiên cứu trên hệ thống HFSWR hoạt động tại tần số f_0 = 6MHz (bước sóng làm việc λ_0 = 50m), mạng ăng ten thu dạng ULA, có số phần tử ăng ten N = 32; $d = \lambda_0 / 2$ = 25 m. Đối với mạng ăng ten này SLL_{ULA} = *-13.43 dB,* HPBW = 3,172^0 khi không sử dụng cửa sổ trọng số *W*. Giá trị tham số SLL của ăng ten ULA khi không sử dụng cửa sổ trọng số thường thấp và gây khó khăn cho các chức năng phát hiện bám sát mục tiêu. Để nâng cao SLL, phương pháp cửa sổ trọng số được sử dụng. Có nhiều hàm cửa sổ [6] như chữ nhật cải biên (Modified Rectangular), chuỗi cầu rời rạc mở rộng (Discrete Prolate Spheroidal Sequences (DPSS)), Kaiser, Chebyshev. Trên hình 2 minh họa giản đồ hướng ăng ten ULA khi không sử dụng, sử dụng cửa sổ Chebyshev, cửa sổ DPSS.



Hình 2. *Minh họa một số giản đồ hướng với các phương pháp kích thích trọng số khác nhau.*

Như minh họa trên hình 2, việc nén năng lượng búp bên để có được SLL lớn sẽ làm gia tăng HPBW của giản đồ hướng. Do đó, việc lựa chọn các tham số giản đồ hướng cần dung hòa chất lượng giữa các tham số có quan hệ tỉ lệ nghịch. Theo [6], trong ra đa nói chung, việc biết trước hệ số nén các búp bên và sự đồng đều của hệ số nén này có vai trò quan trọng đối với chất lượng xử lý-phát hiện mục tiêu. Vì vậy, phương pháp sử dụng trong ra đa hay HFSWR thường là cửa sổ Chebyshev. Các tham số giản đồ hướng ăng ten ULA, với các trọng số kích thích phần tử theo phương pháp cửa sổ Chebyshev được xác định như sau:

+ Với khoảng cách giữa các phần tử ăng ten bằng $d=\lambda/2$, vùng quan sát không có hiện tượng búp lặp nằm trong khoảng ±90^0.

+ Hệ số SLL r được xác định từ các hệ số hàm Chebyshev như công thức (5) theo [7]:

$$w_m = \frac{1}{N}\left[1+\frac{2}{r}\sum_{n=1}^{N/2} T_m\left(\cosh\left(\frac{\cosh^{-1}(r)}{N-1}\right)\cos\left(\frac{n\pi}{N}\right)\right)\cos\left(\frac{2\pi nm}{N}\right)\right] \quad (5)$$

Trong đó: $1 \le m \le N$, $r = 10^{\alpha}$ là tỉ số SLL tính theo dB; $T_m(x)$ là đa thức Chebyshev và được tính theo công thức (6):

$$T_m(x) = \begin{cases} \cos(m\cos^{-1}(x)) & |x| \le 1 \\ \cosh(m\cosh^{-1}(x)) & |x| > 1 \end{cases} \quad (6)$$

+ Độ rộng búp sóng:

Trong giải pháp cửa sổ Chebyshev [7] chỉ cung cấp phương trình tính HPBW tại góc 0^0 như mô tả tại (7):

$$HPBW = \theta_0 = \pi - 2\cos^{-1}\left(\frac{\Psi_h \lambda}{2\pi d_0}\right) \quad (7)$$

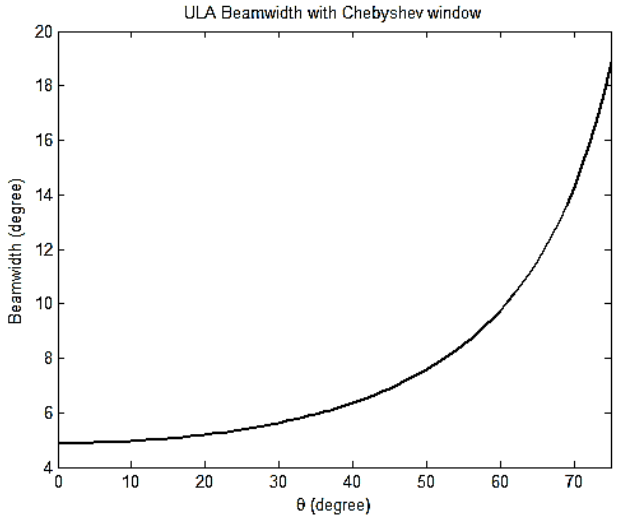
Với biểu thức suy giảm:

$$\Psi_h = 2\cos^{-1}\left[\frac{1}{\beta}\cosh\left(\frac{1}{N-1}\cosh^{-1}\left(\frac{10^{\alpha}}{\sqrt{2}}\right)\right)\right] \quad (8)$$

Trong quá trình nghiên cứu, nhóm tác giả bằng các khảo sát mô phỏng AF của giản đồ hướng tại các góc hướng khác nhau, tổng hợp các giá trị HPBW khi sử dụng cửa sổ Chebyshev như trên hình 3. Các giá trị HPBW khi sử dụng cửa sổ Chebyshev có thể tính gần đúng theo công thức (9):

$$HPBW_{Cheb\alpha}(\theta) = \frac{HPBW_{Cheb\alpha(0^0)}}{HPBW_{ULA(0^0)}} HPBW_{ULA}(\theta) = \frac{\pi - 2\cos^{-1}\left(\frac{\Psi_h \lambda}{2\pi d_0}\right)}{\cos\theta} \quad (9)$$

Trong đó: $HPBW_{ULA(0^0)}$ là độ rộng búp sóng ăng ten tại góc hướng 0^0 khi không sử dụng cửa sổ; $HPBW_{ULA}(\theta)$ là độ rộng búp sóng của ULA khi không sử dụng cửa sổ tính theo (2).



Hình 3. *Độ rộng búp sóng theo góc hướng quan sát của ăng ten ULA (N=32;d=λ/2) sử dụng phương pháp cửa sổ Chebyshev với SLL = -50dB.*

Hình 3 thể hiện HPBW bị mở rộng nhanh chóng sau vùng góc quan sát $\pm 60^0$. Sự mở rộng HPBW là nguyên nhân chính dẫn tới suy giảm độ phân biệt, suy giảm xác suất phát hiện mục tiêu, Xác xuất phát hiện có thể giảm từ 90% xuống 10% ứng với dải thay đổi của HPBW [8]. Vì vậy, đối với nhu cầu mở rộng vùng quan sát, việc duy trì chất lượng các tham số giản đồ hướng nói chung và HPBW nói riêng đóng vai trò quyết định. Phần tiếp theo của bài báo sẽ đề xuất một giải pháp tính toán hệ số cửa sổ kích thích các phần tử ăng ten nhằm duy trì chất lượng giản đồ hướng đối với vùng quan sát lớn hơn $\pm 60^0$.

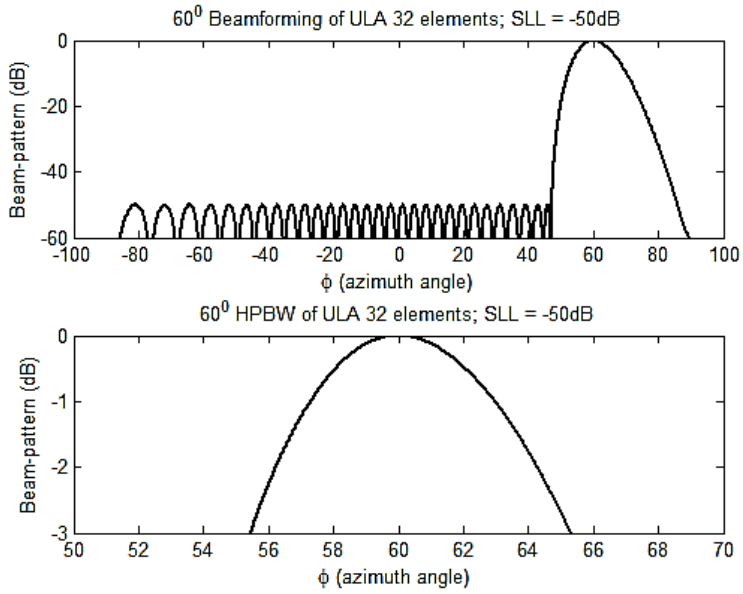
3. PHƯƠNG PHÁP DUY TRÌ CHẤT LƯỢNG GIẢN ĐỒ HƯỚNG TẠI CÁC VÙNG PHƯƠNG VỊ MỞ RỘNG

Từ ý nghĩa thực tiễn của việc mở rộng vùng phương vị quan sát trong HFSWR, để duy trì chất lượng giản đồ hướng đối với vùng quan sát lớn hơn $\pm 60^0$ các nhà thiết kế thường đề xuất sử dụng ăng ten hình cung [4] hoặc gia tăng số lượng phần tử ăng ten để giảm HPBW như quan hệ các tham số tại công thức (2). Mặc dù theo lý thuyết đây là một phương án giải quyết khả thi, tuy nhiên, để có thể triển khai một mảng ăng ten hình cung hoặc tăng số phần tử ăng ten trên địa hình bờ biển thực tế là rất khó thực hiện. Phương pháp được trình bày trong bài báo là thực hiện

thay đổi các hệ số cửa sổ trọng số trên cơ sở đảm bảo các tham số khác của giản đồ hướng nằm trong phạm vi cho phép và mô tả phương án thực hiện khả thi trong thực tế.

Theo các công thức (8) và (9), việc giảm HPBW luôn đồng nghĩa với tăng SLL. Do đó, để có thể duy trì HPBW tại các vùng mở rộng với mức búp bên đảm bảo không nhỏ hơn một giá trị SLL_{min} thì tại vùng quan sát tiêu chuẩn mức búp bên cần được thiết lập tại SLL_{max}. Giá trị SLL_{max} được lựa chọn sao cho HPBW đảm bảo chất lượng phân biệt về phương vị, giá trị SLL_{min} cần đảm bảo khả năng phát hiện mục tiêu tại búp, chính vì thế, SLL_{min}, SLL_{max} là những giá trị được giới hạn khi thiết kế hệ thống HFSWR.

Xét phương pháp xây dựng bộ trọng số theo cửa sổ Chebyshev cho hệ thống HFSWR như mô tả tại mục 2. Các giá trị mức búp bên SLL_{min} = *-30dB*, SLL_{max} = *-50dB*. Từ công thức (5), các trọng số lần lượt cho 32 phần tử ăng ten với SLL_{max} = *-50dB* là $\boldsymbol{W}_0$.



Hình 4. *Giản đồ hướng và độ rộng búp sóng chính tại 60^0 mạng ăng ten xây dựng theo hệ số cửa sổ Chebyshev với SLL = -50 dB.*

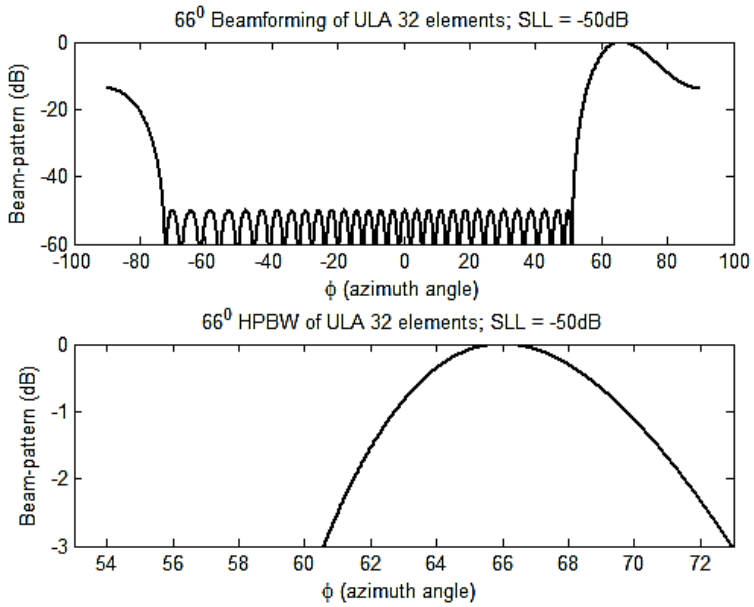
$\mathbf{W}_0$ = [0.0507; 0,0661; 0,1050; 0,1548; 0,2157; 0,2870; 0,3675; 0,4551; 0,5468; 0,6393; 0,7288; 0,8112; 0,8827; 0,9398; 0,9796; 1,000; 1,000; 0,9796; 0,9398; 0,8827; 0,8112; 0,7288; 0,6393; 0,5468; 0,4551; 0,3675; 0,2870; 0,2157; 0,2157; 0,1548; 0,1050; 0,0661; 0.0507].

Khoảng HPBW của giản đồ hướng trong giới hạn tiêu chuẩn $\pm 60^0$ là $4{,}87^0$ đến $9{,}75^0$. Giản đồ hướng và HPBW tại góc 60^0 của hệ thống HFSWR được mô tả tại hình 4. Trong vùng mức búp bên đã lựa chọn, vùng mở rộng góc quan sát cũng là hữu hạn. Để tính được giới hạn góc mở rộng, từ công thức (9), góc quan sát lớn nhất có thể được tính như (10):

$$\theta_{\max} = \cos^{-1}\left[\frac{1}{HPBW_{\pm 60^0}}\left(\pi - 2\cos^{-1}\left(\frac{\psi_{h\alpha\min}\lambda}{2\pi d_0}\right)\right)\right] \tag{10}$$

Thay hệ số suy giảm $\alpha_{\min}$ để tính ra $\psi_{h\alpha\min}$, $HPBW_{\pm 60^0}$ = $9{,}75^0$ thu được $\theta_{\max}$ = 66^0. Như vậy, với giải pháp duy trì chất lượng giản đồ hướng bằng hiệu chỉnh hệ số cửa sổ, một hệ thống HFSWR có thể nâng cấp vùng quan sát so với vùng danh định lên thêm 6^0 về hai phía.

Từ giản đồ hướng với bộ trọng số W_0 tại 66^0 được mô tả tại hình 5, có thể thấy HPBW bị mở rộng tới 14^0 và xuất hiện búp đối xứng như vậy giản đồ hướng với bộ trọng số W_0 là không thể sử dụng.

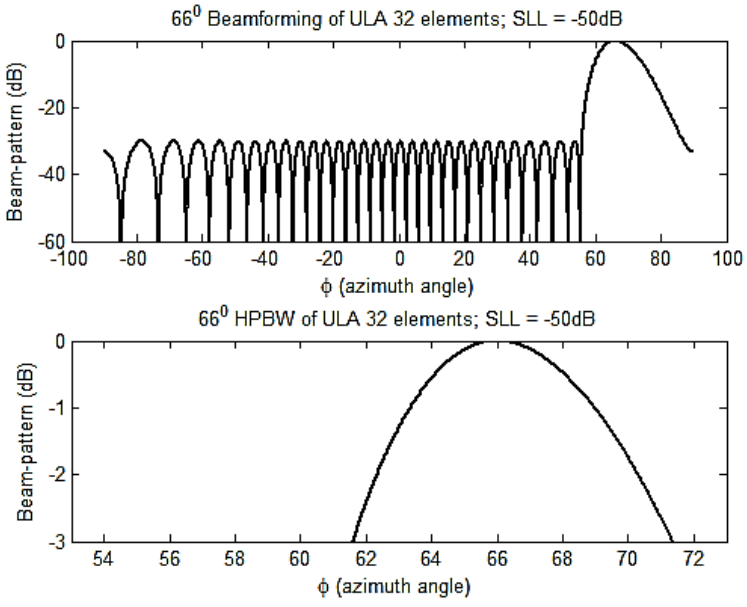


Hình 5. *Giản đồ hướng và độ rộng búp sóng chính tại 66^0 mạng ăng ten xây dựng theo hệ số cửa sổ Chebyshev với SLL = -50 dB.*

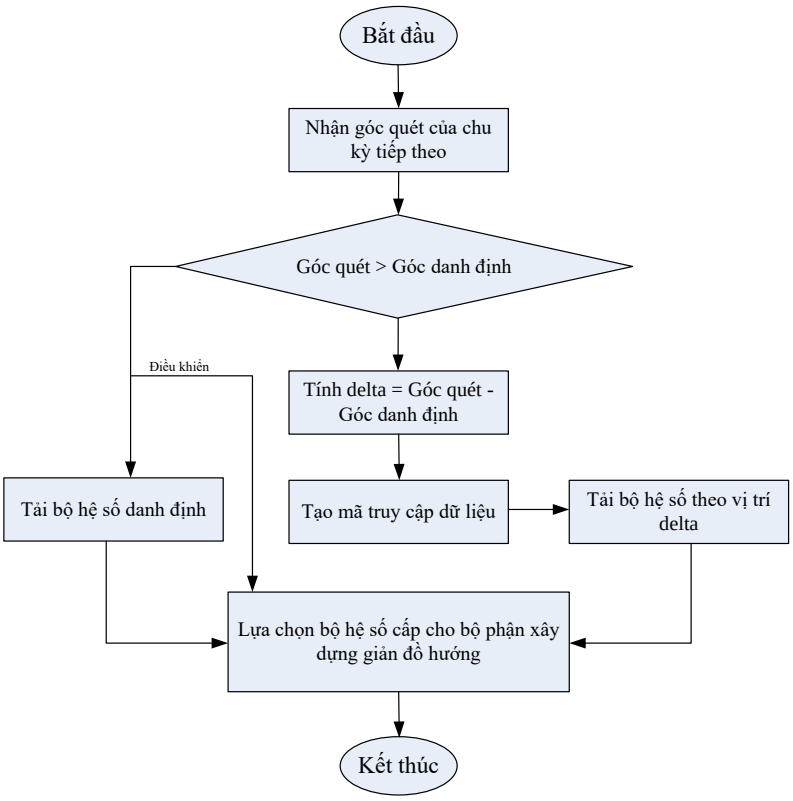
Sử dụng SLL_{min} = *-30 dB* thay vào công thức (5) thu được bộ tham số W_1 :

W_1 = [0.4439; 0.2433;0.3035; 0.3684;0.4367; 0.5072;0.5785; 0.6490; 0.7170; 0.7809; 0.8392; 0.8904; 0.9330 ;0.9660; 0.9886; 1.0000; 1.0000; 0.9886; 0.9660; 0.9330; 0.8904; 0.8392; 0.7809; 0.7170; 0.6490; 0.5785; 0.5072; 0.4367; 0.3684; 0.3035; 0.2433; 0.4439].

Kết quả mô phỏng giản đồ hướng với bộ tham số W_1 được thể hiện tại hình 6. Kết quả thu được cho thấy, chất lượng giản đồ hướng theo HPBW vẫn đảm bảo $9,75^0$ và mức nén búp bên đạt -30 dB.



Hình 6. *Giản đồ hướng và độ rộng búp sóng chính tại 66^0 mạng ăng ten xây dựng theo hệ số cửa sổ Chebyshev với SLL = -30 dB.*



Hình 7. *Lưu đồ thay đổi hệ số cửa sổ đáp ứng thời gian thực.*

Để các hiệu chỉnh thích nghi trọng số đáp ứng được sự ổn định về giản đồ hướng tại các vùng mở rộng giống như tại vị trí biên $\pm 60^0$ đòi hỏi các giá trị trọng số kích thích được thay đổi liên tục. Trong hoạt động thực tế, để loại bỏ thời gian tính toán lại các tham số cửa sổ cần thực hiện tính toán trước và nạp sẵn các bộ tham số theo vị trí góc mở rộng. Lưu đồ thuật toán thay đổi bộ tham số được mô tả tại hình 7.

4. KẾT LUẬN

Nội dung trong bài báo đã xây dựng đầy đủ và kiểm chứng qua mô phỏng một phương pháp duy trì chất lượng giản đồ hướng ăng ten đối với hệ thống HFSWR có các ăng ten được lắp đặt cố định trên bờ biển khi thực hiện mở rộng vùng quan sát. Kết quả đạt được cho thấy, thực hiện mở rộng vùng quan sát lên thêm 10% là hoàn toàn khả thi và không làm gia tăng độ phức tạp và kinh phí thực hiện. Giải pháp được đề xuất có tính hiệu quả cao đối với các quốc gia có đường bờ biển dài và cần một số lượng lớn các trạm HFSWR để quản lý toàn bộ vùng đặc quyền kinh tế.

Theo hướng nghiên cứu của bài báo, những hướng phát triển tiếp theo đó là tính toán khả năng duy trì chất lượng giản đồ hướng kết hợp giữa khả năng thay đổi tần số làm việc và các trọng số thích nghi nhằm thay đổi quan hệ vật lý giữa phần tử ăng ten và khoảng cách giữa các phần tử ăng ten.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. H. H. Dũng, L. D. Hiệu, B. N. Mỹ, N. X. Thái, P. K. Cương (2018), "*Giải pháp xây dựng hệ thống ra đa cảnh giới biển vượt đường chân trời tại Việt Nam*", Tạp chí Nghiên cứu KH&CN quân sự, tr. 1-5.

[2]. Nikolic D., Stojkovic N.,(2019) "*The high frequency surface wave radar solution for vessel tracking beyond the horizon*", Electronics and Energetics Vol. 33, No 1, tr. 37-59.

[3]. Balanis C.A. (2016), "*Antenna Theory Analysis and Design*," 4th Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, tr. 285-310.

[4]. Tham số WERA-HFSWR (2018), *"Over-the-Horizon-Radar Ship Detection & Tracking"*, BTL Hải quân.
[5]. Delos P., Bronghton B., Kraft J., (2020), *"Phased Array Antenna Patterns—Part 1: Linear Array Beam Characteristics and Array Factor"*, Analog Devices.
[6]. Delos P., Bronghton B., Kraft J., (2020), *"Phased Array Antenna Patterns—Part 2: Grating Lobes and Beam Squint"*, Analog Devices.
[7]. Lynch P., (1997), *"The Dolph-Chebyshev window: A Simple Optimal Filter",* Monthly Weather Review, American Meteorological Society.
[8]. H. H. Dũng, L. D. Hiệu, B. N. Mỹ (2021), *"Phương pháp đánh giá ảnh hưởng của độ rộng búp sóng chính tới chất lượng phát hiện mục tiêu trong ra đa biển tầm xa sóng bề mặt qua quy luật biến đổi tín hiệu*", Tạp chí Nghiên cứu KH&CN quân sự số 64.

ABSTRACT

METHOD OF MAINTAINING BEAMWIDTH WHEN EXPANDING COVERAGE AREA IN HIGH-FREQUENCY SURFACE WAVE RADARS

High-frequency, long-range surface wave radars employed uniform linear arrays are often large in size and deployed at a fixed position. The standard coverage area for HFSWRs is limited to the area of $\pm 60^0$ because expanding the beamwidth degrades the detection and resolution significantly. The paper presents a new method to maintain the antenna beamwidth when expanding the coverage area beyond the $\pm 60^0$ region. by adjusting the exciting weights for each antenna element. This method is based on determining the expanding area. In this area, the beamwidth at each azimuth is maintained at the same level as at $\pm 60^0$ with the side lobe level acceptable limits.

Keywords: HFSWR; Beamwidth; Expanding coverage.

Nhận bài ngày 30 tháng 6 năm 2021
Hoàn thiện ngày 30 tháng 7 năm 2021
Chấp nhận đăng ngày 02 tháng 8 năm 2021

Địa chỉ: [1]Viện Ra đa, Viện Khoa học và Công Nghệ quân sự, Bộ Quốc phòng;
[2]Phòng Đào tạo, Viện Khoa học và Công Nghệ quân sự, Bộ Quốc phòng.
*Email: dungsystemdesigner@gmail.com.