NÂNG CAO KHẢ NĂNG PHÁT HIỆN MỤC TIÊU RAĐA KHI NHIỄU TRONG CỬA SỔ PHÁT HIỆN KHÔNG ĐỒNG NHẤT

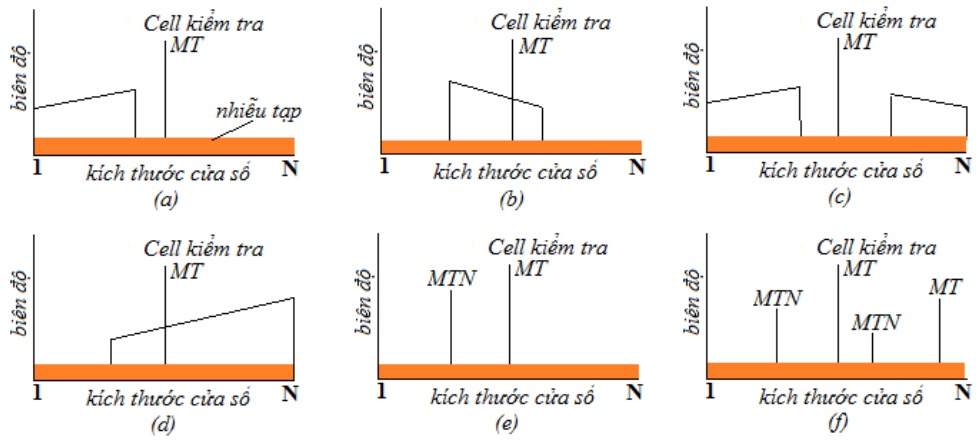
Vũ Chí Thanh[1*], Vũ Tuấn Anh[1], Bùi Chí Thanh[2], Phùng Ngọc Anh[2], Nguyễn Huy Tùng[2]

Tóm tắt: *Do tính chất phức tạp của nhiễu trong cửa sổ phát hiện nên vấn đề ổn định xác suất báo động lầm (XSBĐL) và nâng cao xác suất phát hiện (XSPH) mục tiêu ra đa khi nhiễu trong cửa sổ phát hiện không đồng nhất vẫn còn là bài toán mở và đa nhiệm. Trong bài báo, nhóm tác giả đề xuất thuật toán phát hiện "trung bình tạp có trọng số" nhằm hạn chế sự gia tăng của XSBĐL, đồng thời cho phép nâng cao khả năng phát hiện mục tiêu ra đa. Thuật toán được đề xuất dựa trên nguyên lý của bộ phát hiện trung bình tạp ổn định XSBĐL (CA-CFAR) kết hợp với thủ tục kiểm duyệt nhiễu. Nó cho phép giảm thiểu yêu cầu tính toán và độ trễ thời gian phát hiện mục tiêu. Kết quả khảo sát XSPH và XSBĐL cho thấy lợi ích của thuật toán này khi có sự chuyển đổi công suất và thay đổi tính chất phân bố của nhiễu trong cửa sổ phát hiện. Phương pháp khảo sát được thực hiện theo phương pháp thống kê Monte Carlo.*

Từ khóa: Xác suất phát hiện; Hằng số báo động lầm; Môi trường không đồng nhất; Trung bình tạp; Thống kê có trật tự.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong một số năm trở lại đây, có hàng loạt công bố khoa học về phương pháp ổn định XSBĐL và nâng cao khả năng phát hiện mục tiêu ra đa khi cửa sổ phát hiện không đồng nhất (xuất hiện sự chuyển đổi công suất nhiễu và thay đổi tính chất phân bố nhiễu trong cửa sổ phát hiện). Để tránh sự quá tải thông tin giả (mục tiêu giả) cho các hệ thống xử lý thông tin tiếp theo, các bộ phát hiện CFAR được sử dụng, đặc biệt trong nhiều tình huống nhiễu phức tạp, XSBĐL dễ tăng quá mức, XSPH giảm nghiêm trọng. Những nguyên nhân có thể kể đến bao gồm [5, 6]: Sự thay đổi tính chất phân bố và công suất nhiễu trong cửa sổ phát hiện; Sự xuất hiện nhiễu xung hoặc nhóm xung tín hiệu có ích (nằm trong các cell tham chiếu) trong cửa sổ phát hiện, thành phần nhiễu còn dư do sự hạn chế của hệ thống lọc nhiễu. Trong những trường hợp như vậy của sổ phát hiện được xem là "không đồng nhất". Trên hình 1 là 6 trường hợp điển hình của cửa sổ phát hiện không đồng nhất: (a) tương ứng cell kiểm tra là sạch (không nằm trong nhiễu), biến thiên công suất nhiễu xảy ra ở bên trái cửa sổ phát hiện; (b) – cell kiểm tra nằm trong nhiễu; (c) – cell kiểm tra sạch, biến thiên công suất nhiễu xảy ra cả ở bên phải và trái cửa sổ phát hiện; (d) – cell kiểm tra nằm trong nhiễu và biến thiên công suất nhiễu xảy ra cả ở bên trái cửa sổ phát hiện; (e) – có sự xuất hiện của mục tiêu nhiễu (MTN) ở vị trí các cell tham chiếu; (f) - có sự xuất hiện của mục tiêu (MT) và cả một số MTN trong các cell tham chiếu.



Hình 1. *Mô hình vật lý của cửa sổ phát hiện không đồng nhất.*

Để nâng cao khả năng phát hiện mà vẫn ổn định được XSBĐL khi cửa sổ không đồng nhất do sự thay đổi đột ngột công suất nhiễu và tính chất phân bố của nhiễu trong cửa sổ phát hiện, các bộ phát hiện CA/OS-CFAR "cải biên" được sử dụng với lôgic chọn cực đại (CAGO/OSGO-CFAR) hoặc cực tiểu (CASO/OSSO-CFAR) mức trung bình hay theo thống kê trật tự biên độ tạp của nửa cửa sổ bên trái hoặc bên phải bộ phát hiện [1-12] được đề xuất. Tuy nhiên, các phương pháp được đề xuất không đạt được hiệu quả cho cả 6 trường hợp cửa sổ không đồng nhất được mô tả trên hình 1, đồng thời yêu cầu cao tốc độ tính toán, đặc biệt khi sử dụng phương pháp thống kê trật tự theo biên độ tạp. Do đó, bài báo đề xuất phương pháp "trung bình tạp có trọng số" tạo ngưỡng thích nghi nhằm nâng cao khả năng phát hiện và hạn chế sự gia tăng của XSBĐL mục tiêu ra đa, đồng thời giảm bớt được yêu cầu tính toán của thiết bị thực so với phương pháp thống kê trật tự biên độ tạp ước lượng ngưỡng phát hiện. Bố cục bài báo gồm 4 phần: Phần 2 mô tả thuật toán phát hiện "trung bình tạp có trọng số" tạo ngưỡng thích nghi, phần 3 trình bày phương pháp khảo sát chỉ tiêu chất lượng phát hiện của thuật toán phát hiện "trung bình tạp có trọng số" để tạo ngưỡng thích nghi và phần 4 là kết quả khảo sát.

2. THUẬT TOÁN PHÁT HIỆN TRUNG BÌNH TẠP CÓ TRỌNG SỐ

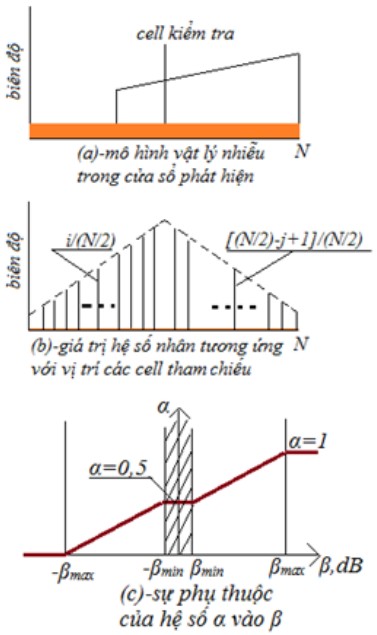
Thuật toán phát hiện "trung bình tạp có trọng số" tạo ngưỡng thích nghi được thể hiện trên hình 3. Cửa sổ phát hiện gồm N cell tham chiếu, trong đó cell kiểm tra giả định nằm giữa cửa sổ phát hiện. Thủ tục thiết lập ngưỡng phát hiện gồm hai bước:

Bước 1: Tính trung bình tạp có trọng số mức nhiễu của N/2 cell bên trái và bên phải của cửa sổ phát hiện. Mức nhiễu của mỗi cell bên trái được nhân với các hệ số "i/(N/2)", mỗi cell bên phải được nhân với các hệ số "((N/2)-j+1)/(N/2)", i, j là thứ tự vị trí của các cell tham chiếu trong nửa cửa sổ bên trái và phải của cửa sổ phát hiện. Giá trị các hệ số được thể hiện trên hình 2.b. Các cell sau khi đã nhân với các trọng số được đưa đến bộ tính mức tạp cho mỗi nửa cửa sổ theo công thức sau:

$$U=\sum_{i=1}^{N/2}\frac{ix_i}{N/2}, V=\sum_{j=1}^{N/2}\frac{(N/2-j+1)x_j}{N/2}, \quad (1)$$

Sau đó, mức tạp U và V được đưa tới mô đun ước lượng hệ số "α". Như vậy, mức nhiễu của các cell tham chiếu có vị trí càng gần với cell kiểm tra có ảnh hưởng càng lớn đến mức nhiễu trung bình U, V của cửa sổ bên trái và phải bộ phát hiện. Đó chính là ưu điểm nổi bật của thuật toán được đề xuất và được cho là hiệu quả đối với 4 trường hợp cửa sổ không đồng nhất đã được mô tả trên hình 1.a, b, c, d.

Bước 2: Mô đun ước lượng hệ số "α" so sánh tỷ số mức nhiễu giữa cửa sổ bên trái và bên phải bộ phát hiện $\beta=U/V[dB]$ với các giá trị $\pm\beta_{\min},\pm\beta_{\max}$ để xác lập giá trị "α". Giá trị $\beta_{\min}$ được xác định dựa trên việc tính trung bình tỷ số U/V với phép lặp đủ lớn khi cửa sổ tham chiếu đồng nhất. Như vậy, $\beta_{\min}$ sẽ phụ thuộc vào dạng phân bố của nhiễu và kích thước cửa sổ tham chiếu, khi N có giá trị rất lớn thì $\beta_{\min}$ sẽ tiến tới 1 (0 dB). Trong phần khảo sát chỉ tiêu chất lượng phát hiện của thuật toán được đề xuất, nhóm tác giả lựa chọn $\beta_{\min}=1,\beta_{\max}=20$.

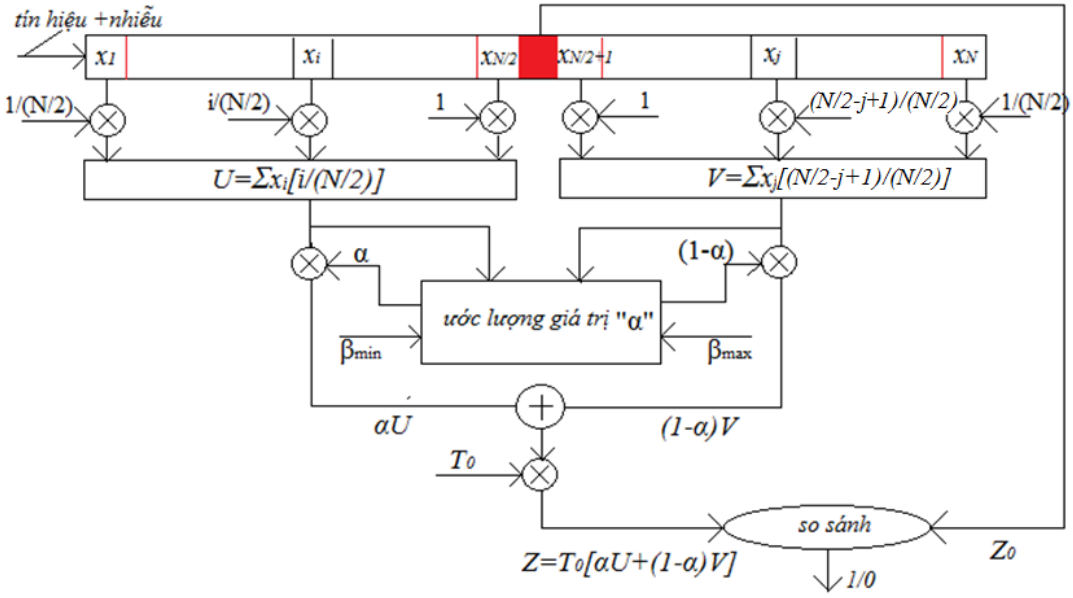


Hình 2. *Sự phụ thuộc các hệ số α, β vào đặc tính nhiễu trong cửa sổ phát hiện.*

Nếu $-\beta_{min} \le \beta \le \beta_{min}$ cửa sổ phát hiện được xem là đồng nhất và $\alpha = 0,5$, $\beta_{min} < \beta < \beta_{max}$ mức nhiễu cửa sổ bên trái lớn hơn cửa sổ bên phải và $\alpha = [0,5 \div 1]$, $\beta \ge \beta_{max}$ thì $\alpha = 1$, $-\beta_{max} < \beta < -\beta_{min}$ mức nhiễu cửa sổ bên trái nhỏ hơn cửa sổ bên phải và $\alpha = [0 \div 0,5]$, $\beta \le -\beta_{max}$ thì $\alpha = 0$. Sự phụ thuộc của giá trị α vào β có thể là tuyến tính hoặc phi tuyến. Trên hình 2.c mô tả sự phụ thuộc giá trị của α vào β là tuyến tính khi đơn vị thứ nguyên của β là dB, các giá trị $\pm\beta_{min}, \pm\beta_{max}$ là các giá trị tới hạn, còn khi $\beta < -\beta_{max}[dB]$ hoặc $\beta > \beta_{max}[dB]$, α nhận giá trị 0 hoặc 1 và việc ước lượng nhiễu giống như lôlic lựa chọn MIN (SO-CFAR) hoặc MAX (GO-CFAR), còn khi $-\beta_{min} < \beta < \beta_{min}$ thì hệ số α=0,5 và nhiễu được ước lượng giống như bộ phát hiện CA-CFAR. Ngưỡng của bộ phát hiện "Z" được thiết lập theo biểu thức:

$$Z = T_0[\alpha U + (1-\alpha)V] \quad (2)$$

Với T_0 là hằng số tỷ lệ tương ứng với XSBĐL cho trước của bộ phát hiện trong trường hợp cửa sổ tham chiếu đồng nhất. Bộ so sánh đưa ra quyết định có mục tiêu hay không "1/0", giá trị "1" - có mục tiêu tương ứng khi mức tín hiệu trong cell kiểm tra vượt ngưỡng phát hiện Z, giá trị "0" - không có mục tiêu khi mức tín hiệu trong cell kiểm tra nhỏ hơn ngưỡng phát hiện Z.



Hình 3. *Thuật toán phát hiện trung bình tạp có trọng số tạo ngưỡng thích nghi.*

3. PHƯƠNG PHÁP KHẢO SÁT CHỈ TIÊU CHẤT LƯỢNG PHÁT HIỆN CỦA THUẬT TOÁN PHÁT HIỆN TRUNG BÌNH TẠP CÓ TRỌNG SỐ

Mục tiêu khảo sát: So sánh XSPH và mức tăng của XSBĐL của thuật toán phát hiện được đề xuất với bộ phát hiện CA-CFAR trong 2 trường hợp cell kiểm tra trong nhiễu hoặc chỉ có nhiễu tạp (nhiễu tạp trắng cường độ nhỏ). Qua đó, đánh giá hiệu quả của thuật toán phát hiện được đề xuất.

Phương pháp khảo sát: Đối với bộ phát hiện CA-CFAR, sử dụng các công thức tính XSPH và XSBĐL được công bố trong [1] để khảo sát sự phụ thuộc của chúng vào tỷ số tín/tạp (S), số cell của cửa sổ phát hiện trong nhiễu (m), cường độ nhiễu (C). Với thuật toán đề xuất, sử dụng phương pháp thống kê Monte-Carlo theo trình tự các bước của thuật toán mô tả trên hình 3.

Trường hợp cell kiểm tra chỉ có tạp có trung bình biên độ μ_0=0, phương sai σ_0=0,5: Nếu m

cell của cửa sổ phát hiện trong nhiễu, XSPH và XSBĐL của bộ phát hiện CA-CFAR được tính theo biểu thức 3 và 4 [1]:

$$P_D = (1+C)^{-m}\left(\frac{1}{1+C}+\frac{T}{1+S}\right)^{-m}\left(1+\frac{T}{1+S}\right)^{m-N} \quad (3)$$

$$P_F = \left[1+(1+C)T\right]^{-m}(1+T)^{m-N} \quad (4)$$

Trường hợp cell kiểm tra và có m cell tham chiếu của cửa sổ phát hiện trong nhiễu có trung bình biên độ μ_N=0, phương sai σ_N=1, biểu thức cho XSPH và XSBĐL của bộ phát hiện CA-CFAR được xác định như sau [1]:

$$P_D = (1+C)^{-m}\left(\frac{1}{1+C}+\frac{T}{1+C+S}\right)^{-m}\left(1+\frac{T}{1+C+S}\right)^{m-N} \quad (5)$$

$$P_F = (1+T)^{-m}\left(1+\frac{T}{1+C}\right)^{m-N} \quad (6)$$

S là tỷ số tín/tạp, C là tỷ số nhiễu/tạp, T là hệ số tỷ lệ tương ứng với XSBĐL cho trước, P_D là XSPH, P_F là XSBĐL của bộ phát hiện CA-CFAR.

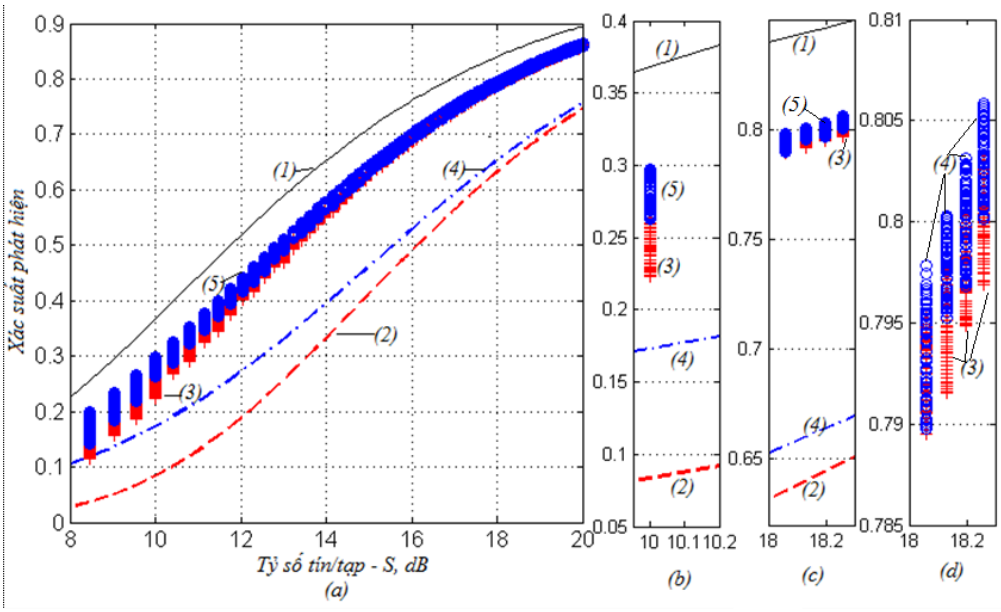
4. KẾT QUẢ KHẢO SÁT

Bảng 1. *Điều kiện khảo sát XSPH.*

Đường cong (XSPH)	**Phương pháp phát hiện**	**Cell kiểm tra**	**Số cell tham chiếu trong nhiễu tạp**	**Tham số phân bố của nhiễu tạp**	**Số cell tham chiếu trong nhiễu**	**Tham số phân bố của nhiễu**	**Tỷ số tín/tạp S, dB**
(1)	*CA-CFAR*	*Nằm trong nhiễu tạp*	*24*	*μ_0=0; σ_0=0,5*	*0*	*-*	*8÷20*
(2)	*CA-CFAR*	*Nằm trong nhiễu tạp*	*16*		*8*	*μ_N=0; σ_N=1*	*8÷20*
(3)	*Được đề xuất*	*Nằm trong nhiễu tạp*	*16*		*8*		*8÷20*
(4)	*CA-CFAR*	*Nằm trong nhiễu*	*16*		*8*		*8÷20*
(5)	*Được đề xuất*	*Nằm trong nhiễu*	*16*		*8*		*8÷20*

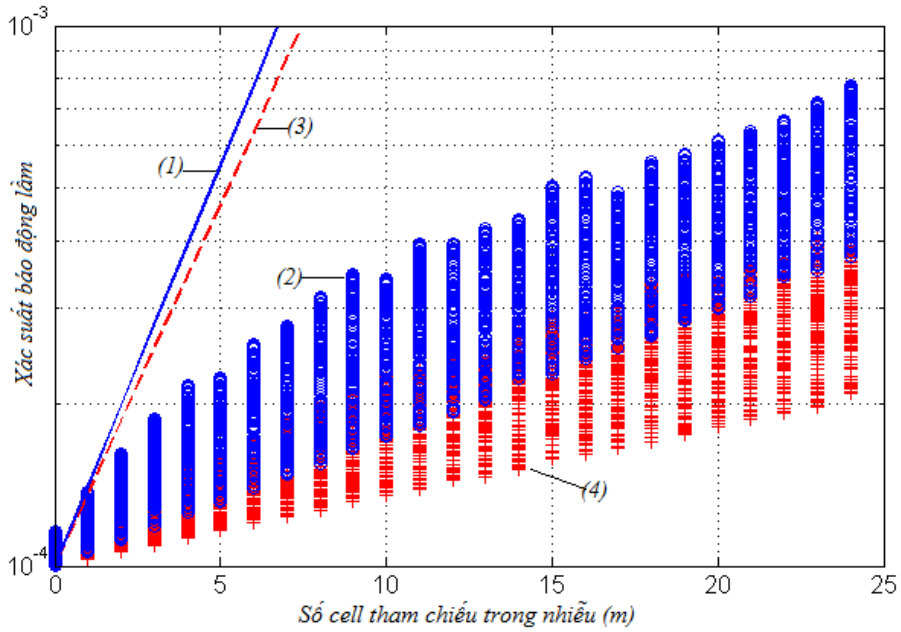
Trên hình 4 là kết quả khảo sát XSPH của bộ phát hiện CA-CFAR và thuật toán được đề xuất tương ứng với số cell tham chiếu trong nhiễu là m = 8 cell, C = 7 dB, hình 4.a tương ứng S thay đổi từ 8÷20 dB, hình 4.b – S = 9,8÷10,2 dB, hình 4.c và 4.d – S = 18÷18,3 dB (hình 4.b.c.d là các hình mở rộng tỷ lệ quan sát), $P_F = 10^{-4}$, N = 24 cell. Điều kiện khảo sát cho hình 4 được chú giải ở bảng 1; "đường cong 1" được biểu thị bởi dấu "-", "đường cong 2" – "--", "đường cong 3" – "+", "đường cong 4" – ".-.", "đường cong 5" – "o".

Từ kết quả khảo sát trên hình 4 thấy rằng, thuật toán phát hiện được đề xuất cho phép nâng cao khả năng phát hiện mục tiêu trong điều kiện cửa sổ không đồng nhất do có sự chuyển đổi công suất nhiễu trong các cell. Ví dụ, ứng với tỷ số tín/tạp S = 10 dB và cell kiểm tra chỉ có tạp thì XSPH của thuật toán "trung bình tạp có trọng số" lớn hơn thuật toán CA-CFAR là 0,17, trong trường hợp cell kiểm tra nằm trong nhiễu thì XSPH của thuật toán "trung bình tạp có trọng số" lớn hơn thuật toán CA-CFAR là 0,11.



Hình 4. *XSPH của bộ phát hiện CA-CFAR và thuật toán trung bình tạp có trọng số.*

Kết quả khảo sát sự gia tăng XSBĐL của bộ phát hiện CA-CFAR và thuật toán "trung bình tạp có trọng số" tương ứng với số cell tham chiếu chứa nhiễu m = 0÷24 cell, tỷ số nhiễu/tạp C = 7 dB và 10 dB, N = 24 cell được thể hiện trên hình 5. Bảng 2 chú thích điều kiện khảo sát; "đường cong 1" được biểu thị bởi dấu "-", "đường cong 2" – "o", "đường cong 3" – "--", "đường cong 4" – "+".



Hình 5. *Sự gia tăng XSBĐL của bộ phát hiện CA-CFAR và thuật toán trung bình tạp có trọng số.*

Từ kết quả khảo sát hình 5 chỉ ra rằng, khi cửa sổ tham chiếu không đồng nhất tương ứng với mô hình vật lý thể hiện trên hình 1.a,b,c,d với số cell tham chiếu chứa nhiễu tăng từ 1 đến 7 thì XSBĐL của bộ phát hiện CA-CFRR tăng từ 10^{-4} đến 10^{-3} (tăng 10 lần), còn XSBĐL của thuật toán được đề xuất tăng không lớn (từ 3 đến 5 lần) khi số cell tham chiếu chứa nhiễu tăng từ 1 đến 24.

Bảng 2. *Điều kiện khảo sát XSBĐL.*

Đường cong (XSBĐL)	Phương pháp phát hiện	Tham số phân bố của tạp	Tham số phân bố của nhiễu	Tỷ số nhiễu/tạp C, dB
(1)	*CA-CFAR*	$\mu_0=0;\ \sigma_0=0,5$	$\mu_N=0;\ \sigma_N=1$	*10*
(2)	*Được đề xuất*			*10*
(3)	*CA-CFAR*			*7*
(4)	*Được đề xuất*			*7*

5. KẾT LUẬN

Nội dung bài báo đã trình bày phương pháp "trung bình tạp có trọng số" để ước lượng ngưỡng phát hiện thích nghi dựa trên nguyên lý của bộ phát hiện CA-CFAR. Để kiểm duyệt nhiễu trong cửa sổ phát hiện, phương pháp đánh giá tỷ số mức nhiễu của nửa cửa sổ bên trái và bên phải được thực hiện. So sánh với bộ phát hiện CA-CFAR (khi cửa sổ phát hiện chỉ chứa tạp), XSPH của thuật toán được đề xuất giảm từ 5÷22% khi tỷ số tín/tạp thay đổi trong dải 20÷10 dB và số cell tham chiếu trong nhiễu là 8. Trong cùng điều kiện khảo sát, XSPH của bộ phát hiện CA-CFAR giảm từ 16÷75%, còn mức tăng của XSBĐL tăng lớn gấp 3,5 đến 4 lần so với thuật toán được đề xuất. Như vậy, XSPH của thuật toán phát hiện được đề xuất tăng đáng kể, còn sự gia tăng của XSBĐL trong điều kiện cửa sổ phát hiện xuất hiện sự chuyển đổi công suất nhiễu và tính chất phân bố của nó nhỏ hơn nhiều so với bộ phát hiện CA-CFAR. Ngoài ra, ưu điểm của thuật toán phát hiện "trung bình tạp có trọng số" được đề xuất trong bài báo yêu cầu không cao về mặt tính toán và độ trễ về thời gian phát hiện mục tiêu so với bộ phát hiện OS-CFAR và các dạng cải biên của nó.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Hogskolan Skovde, *"Constant False Alarm Rate Detection of Radar Signals with Artificial Neural Networks"* (1996).

[2]. Loizos Anastasiou Prastitis, *"On Adaptive Censored CFAR Detection"* (1993).

[3]. Irina Antipov and John Baldwinson, *"Estimation of a Constant False Alarm Rate Processing Loss for a High-Resolution Maritime Radar System"* (2008).

[4]. Kabakchiev Chr, L. Doukovska and I. Garvanov, *"Comparative Analysis of Losses of CA CFAR Processors in Pulse Jamming*", IIT/ WP-110B (2000).

[5]. G. M Hatema, J. W Abdul Sadahb, T. R. Saeedc, *"Comparative Study of Various CFAR Algorithms for Non-Homogeneous Environments",* Materials Science and Engineering (2018) N. 433.

[6]. B. Magaz, A. Belouchrani, and M. Hamadouche, *"A new adaptive linear combined CFAR detector in presence of interfering targets",* Progress In Electromagnetics Research B (2011), **Vol. 34**.

[7]. Sung Won Hong and Dong Seog Han, *"Performance Analysis of an Environmental Adaptive CFAR Detecto*r", Mathematical Problems in Engineering (2014), Article ID 615704.

[8]. Xu Liu, Shuwen Xu and Shiyang Tang, *"CFAR Strategy Formulation and Evaluation Based on Fox's H-function in Positive Alpha-Stable Sea Clutter",* Remote Sens (2020), **Vol. 12**, Article ID 1273.

[9]. Jiafei Zhao, Rongkun Jiang, Xuetian Wang and Hongmin Gao, *"Robust CFAR Detection for Multiple Targets in K-Distributed Sea Clutter Based on Machine Learning",* Symmetry (2019).

[10]. M. Shbat, V. Tuzlukov, *"Evaluation of detection performance under employment of the generalized in radar sensor systems",* radioengineering (2014), **vol. 23**, NO. 1.

[11]. Reda Bekhakhecha, Mourad Barkat, *"Simple PN Synchronization using the OS-CFAR Algorithm",* International Workshop on Advanced Control, IWAC2014, November, 3rd-4th 2014, Guelma, Algeria.

[12]. Fukun BI, Xuecong REN, Hongquan QU, and Ruiqing JIANG, *"A Two-Level Detection Algorithm for Optical Fiber Vibration"*, Photonic sensors (2015), Vol. 5, No. 3, pp. 284–288.

ABSTRACT

IMPROVEMENT OF THE RADAR TARGET DETECTION PROBABILITY FOR NON-HOMOGENEOUS ENVIRONMENTS IN THE DETECTION WINDOW

Because of the complex nature of the noise in the detection window, limiting the increase of constant false alarm rate (CFAR) and improving the radar target detection probability for non-homogeneous environments is still not finished and the problem of many solutions. In the article, the authors propose a detection algorithm "Cell-coefficient-Averaging" to limit the increase of the target false alarm constant, and improve radar target detection. The proposed algorithm is based on the principle Cell-Averaging CFAR (CA-CFAR) detector combined with the noise censorship procedure. The advantage of this algorithm is to reduce the computational requirement and target detection time delay. The survey results of detection probability and false alarm target probability demonstrate the benefits of the proposed algorithm in terms of power level conversion and noise distribution changes in the detection window. The survey method was carried out according to the Monte Carlo statistical method.

Keywords: Detection probability; Constant false alarm rate; Non-homogeneous environments; Cell-averaging; Ordered statistics.

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 KH-CNQS;
[2]Học viện PK-KQ.
*Email: thanhvch@gmail.com.