

# KHẢO SÁT ĐẶC TRƯNG CHẤT LƯỢNG PHÁT HIỆN CỦA HỆ THỐNG RADAR NHIỀU VỊ TRÍ VỚI CẤU TRÚC PHỤ THUỘC SỬ DỤNG LÝ THUYẾT COPULA

Phạm Văn Hùng\*, Nguyễn Đức Minh<sup>+</sup>

\* Học viện Kỹ thuật Quân sự

<sup>+</sup> Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông

**Tóm tắt**—Bài báo đề xuất một phương pháp đánh giá chất lượng phát hiện của hệ thống mạng Radar nhiều vị trí xử lý phân tán (NVTXLPT) khi các quyết định từ những đài radar thành phần không độc lập thống kê do hệ thống chịu ảnh hưởng của các loại nhiễu không Gauss bằng cách sử dụng công cụ toán học thống kê Copula. Bài toán phát hiện trong mạng radar NVTXLPT được giải quyết với công cụ toán học thống kê Copula bằng cách sử dụng một lớp các Copula Eliptics, đặc biệt là Copula Gauss. Mô hình mục tiêu thăng giáng Swerling được khảo sát cho thấy sự phù hợp của phương pháp này. Nội dung bài báo cũng đề cập đến việc khảo sát và đánh giá các quy luật hợp nhất dữ liệu (AND, OR và Majority) tại trung tâm hợp nhất cũng như chất lượng phát hiện của hệ thống mạng radar NVTXLPT trong một số trường hợp cụ thể. Kết quả cho thấy chất lượng phát hiện của hệ thống bị ảnh hưởng nhiều bởi mối tương quan giữa các quyết định từ các đài radar thành phần. Chất lượng phát hiện của hệ thống giảm đi khi hệ số tương quan giữa các đài radar dương và tăng lên khi hệ số tương quan giữa các đài radar âm.

**Từ khóa**— Copula, mô hình phụ thuộc, nhiễu không Gauss, radar nhiều vị trí, phát hiện phân tán.

## I. GIỚI THIỆU CHUNG

Hệ thống radar nhiều vị trí xử lý phân tán (RNVT-XLPT) và hệ thống radar nhiều vị trí xử lý tập trung (RNVT-XLTT) là hai lớp trong phân loại hệ thống radar nhiều vị trí (RNVT). Hệ thống RNVT-XLTT luôn cho một kết quả phát hiện tối ưu nhất do không có sự mất mát thông tin. Tuy nhiên, hệ thống RNVT-XLTT có cấu trúc phức tạp tại trung tâm hợp nhất và yêu cầu về băng thông lớn khi khối lượng tính toán khổng lồ và tăng lên nhanh chóng theo số lượng các đài radar thành phần trong mạng. Để khắc phục vấn đề này, hệ thống RDNVT-XLPT với các quyết định thành phần phân tán và một trung tâm hợp nhất dữ liệu cho thấy hiệu quả cả về tính đơn giản trong cấu trúc, băng thông hẹp mà chất lượng phát hiện suy giảm không đáng kể [6]. Do đó, hệ thống RNVT-XLPT với một máy

phát và nhiều máy thu đặt ở các vị trí phân tán trong không gian được nhiều nhà khoa học quan tâm [6, 7, 9, 18, 19, 21, 22]. Nghiên cứu trong [6] tập trung vào việc tổng hợp các bộ phát hiện tối ưu và tựa tối ưu trong điều kiện tạp Gauss cộng tính và thăng giáng Rayleigh trong tín hiệu phân xạ, tuy nhiên việc xây dựng bài toán luôn đi kèm giả thiết về tính độc lập thống kê cho thuộc tính của cả tạp và mục tiêu. Về mặt cấu trúc, phát hiện tựa tối ưu được xem xét giống với hệ thống RNVT-XLPT [7, 21].

Lý thuyết phát hiện RNVT-XLPT lần đầu tiên được đưa ra bởi [18]. Ngưỡng phát hiện tối ưu theo tiêu chuẩn Neyman-Pearson và chất lượng phát hiện của hệ thống đã được đánh giá với mục tiêu pha định Rayleigh cho trường hợp mạng bao gồm 2 và 3 đài radar thành phần có các quyết định độc lập thống kê. Các quy luật hợp nhất ở trung tâm được sử dụng là AND, OR và Majority Logic. Sau đó, lý thuyết phát hiện này tiếp tục được phát triển cho các quy luật hợp nhất khác nhau với các mô hình mục tiêu Swerling [22] và quy luật đếm [20].

Nhìn chung, trong các nghiên cứu đã công bố [6, 7, 9, 18, 19, 21, 22], việc xây dựng bài toán đều dựa trên các giả thiết về sự độc lập thống kê của tạp và tín hiệu thu phân tán. Tuy nhiên, khi tạp trong các đài radar thành phần không độc lập thống kê thì mức độ phức tạp trong tính toán được nâng lên và bước đầu đã được xem xét trong một số nghiên cứu [1, 3, 9]. Aalo [1], với giả thiết sự tương quan đều trong tạp Gauss và Laplace, đã đưa ra được công thức xác định ngưỡng và xác suất phát hiện phụ thuộc vào hệ số tương quan giữa các quyết định thành phần. Trong khi đó, các tác giả trong [3, 9] quan tâm đến bài toán phát hiện trong mạng cảm biến khi các quyết định có sự tương quan lẫn nhau.

Tác giả Minh [13, 14] đã nghiên cứu bài toán phát hiện trong hệ thống RNVT-XLPT, với sự tương quan đều trong các quyết định thành phần. Bài toán đã được giải quyết chỉ với một số trường hợp của nhiễu có phân bố Eliptic do sự hạn chế trong việc xây dựng mô hình toán học các phân bố nhiều chiều và gánh nặng tính toán. Một số kết quả quan trọng trong đánh giá chất lượng phát hiện đã được đưa ra

Tác giả liên lạc: Nguyễn Đức Minh,

Email: minhhd@ptit.edu.vn

Đến toàn soạn: 9/2020, chỉnh sửa: 10/2020, chấp nhận đăng: 10/2020

và cho thấy ưu điểm của hệ thống RNVT-XLPT trong một số trường hợp và quy luật hợp nhất.

Lý thuyết Copula, cho phép xây dựng một phân bố nhiều biến từ mô hình phụ thuộc và các phân bố biên, đang rất được quan tâm trong rất nhiều lĩnh vực [4, 10, 15]. Tác giả [5] đã ứng dụng Copula trong việc mô hình hóa sự phụ thuộc của các quyết định thống kê trong hệ thống radar. Thử nghiệm với những tính toán số học cụ thể cũng được đưa ra với hệ thống gồm 1 trạm phát và 2 trạm thu ứng dụng các họ Copula 2 biến khác nhau. Kết quả cho thấy chất lượng phát hiện của phương pháp này khi quan tâm đến yếu tố không độc lập thống kê vượt trội hơn so với mô hình độc lập thống kê.

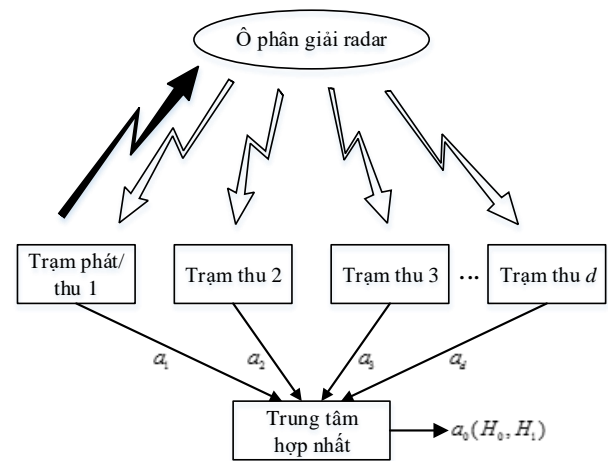
Các tác giả trên hoặc là đã giả thiết các quyết định thành phần độc lập [1, 20] để dễ tính toán, giới hạn số lượng đài thành phần để có thể mô hình hóa sự phụ thuộc [5], hoặc giới hạn tính toán cho một số trường hợp phân bố nhiều cụ thể [13, 14]. Đặc biệt, yếu tố phụ thuộc liên quan đến trường hợp nhiễu không Gauss vẫn chưa được nghiên cứu. Do đó, để mô hình hóa sự phụ thuộc của các quyết định thành phần trong nhiễu không Gauss, nội dung bài báo này đề xuất phương pháp mô hình hóa sự phụ thuộc dựa vào công cụ toán học Copula, từ đó khảo sát chất lượng phát hiện của mạng RNVT-XLPT trong một số trường hợp cụ thể. Phần còn lại của bài báo được tổ chức như sau: Phần 2 trình bày một số cơ sở về lý thuyết phát hiện trong mạng radar phân tán, phát hiện mục tiêu trong nhiễu phân bố K và lý thuyết Copula. Phần 3 là bài toán phát hiện mục tiêu trong hệ thống RNVT-XLPT, bao gồm phương pháp mô hình hóa sự phụ thuộc dựa vào Copula cùng với các quy luật hợp nhất dữ liệu. Các kết quả về đánh giá chất lượng phát hiện của hệ thống theo các tiêu chí cụ thể và thảo luận được đưa ra trong phần 4. Phần 5 là một số nhận xét và kết luận.

**II. CƠ SỞ LÝ THUYẾT**

**A. Bài toán phát hiện trong mạng radar phân tán**

Xem xét một hệ thống RNVT-XLPT trên Hình 1. Hệ thống bao gồm một trạm phát và nhiều trạm thu được bố trí phân tán, cùng với đó là một trung tâm hợp nhất dữ liệu. Các đài radar thành phần thu nhận dữ liệu từ trạm phát và đưa ra quyết định của riêng mình về việc có hoặc không có mục tiêu. Các quyết định này được truyền về trung tâm hợp nhất, tại đây với một quy luật hợp nhất cụ thể trung tâm sẽ đưa ra quyết định cuối cùng về việc có hoặc không có mục tiêu.

Bài toán kiểm định giả thuyết thống kê radar gồm: giả thuyết  $H_1$  (giả thuyết về có mục tiêu) và  $H_0$  (giả thuyết về không có mục tiêu). Giả thuyết  $H_0$  có thể là trường hợp chỉ có tạp, nhiễu hoặc cả tạp + nhiễu.



**Hình 1.** Cấu trúc hệ thống RNVT-XLPT

Tín hiệu đầu vào máy thu được ký hiệu là  $Z_i$  ( $i = 1, \dots, d$ ), với

$$Z_i = \begin{cases} w_i, & \text{giả thuyết } H_0 \\ w_i + s_i, & \text{giả thuyết } H_1 \end{cases} \quad (1)$$

với  $w_i$  là thành phần nhiễu ở đầu vào mỗi máy thu và được giả thiết là phụ thuộc lẫn nhau;  $s_i$  là thành phần tín hiệu phản xạ ở đầu vào máy thu thứ  $i$ .

Kiểm định tỉ số hợp lý tại mỗi trạm được thực hiện và đưa ra các quyết định nhị phân:

$$a_i = \begin{cases} 0, & \text{không có mục tiêu} \\ 1, & \text{có mục tiêu} \end{cases} \quad (2)$$

Sau đó, trung tâm tiến hành hợp nhất dữ liệu các dữ liệu  $a_i$  từ các trạm thành phần bằng việc kiểm định một tỉ số hợp lý khác và đưa ra quyết định cuối cùng:

$$\Lambda(\mathbf{a}) = \frac{P(\mathbf{a} | H_1)}{P(\mathbf{a} | H_0)} = \frac{P(a_1, a_2, \dots, a_d | H_1)}{P(a_1, a_2, \dots, a_d | H_0)} \quad (3)$$

$$= \frac{\int_{a_1} \dots \int_{a_d} f_{Z_1 \dots Z_d}(Z_1, \dots, Z_d | H_1) dZ_1 \dots dZ_d}{\int_{a_1} \dots \int_{a_d} f_{Z_1 \dots Z_d}(Z_1, \dots, Z_d | H_0) dZ_1 \dots dZ_d} \underset{H_0}{\overset{H_1}{\geq}} \lambda$$

Ở đây,  $P(\mathbf{a} | H_i)$  với  $i = \{0, 1\}$  là xác suất nhận vector quyết định  $\mathbf{a}$  trong điều kiện giả thuyết  $H_i$ ,  $f_z(\mathbf{Z} | H_{0,1})$  là hàm mật độ xác suất liên kết của các tín hiệu đầu vào máy thu  $Z_i$  với giả thuyết tương ứng,  $\lambda$  là mức ngưỡng ở trung tâm phụ thuộc vào xác suất báo động lầm yêu cầu của hệ thống. Rõ ràng, nếu coi tất cả các quyết định thành phần là độc lập thống kê và thiết lập một mức ngưỡng chung cho tất cả các đài thì (3) là đối xứng với tất cả các quyết định. Khi đó, bài toán trở về giống với trường hợp trong [1, 20], nghĩa là hàm mật độ và hàm phân bố xác suất liên kết đơn giản là tích của các hàm mật độ và hàm phân bố xác suất thành phần.

Bài báo này sẽ xem xét giả thiết các quyết định thành phần là phụ thuộc thống kê (trường hợp tổng quát) để khảo sát chất lượng phát hiện của hệ thống RNVT-XLPT trong nhiễu không Gauss, cụ thể là nhiễu phân bố K.

**B. Phát hiện mục tiêu trong nhiễu phân bố K**

Khi độ phân giải của radar tăng lên và với điều kiện môi trường nhất định thì thuộc tính thống kê của nhiễu không còn mang tính Gauss [2, 11, 24]. Một số mô hình thống kê

nhiều không Gauss đã được đưa ra trong các nghiên cứu [24]. Ở đây, chúng tôi quan tâm đến mô hình thống kê nhiều là phân bố K phức hợp, thăng giáng trong tín hiệu phân xạ tuân theo mô hình mục tiêu Swerling [23].

Xác suất phát hiện mục tiêu thăng giáng trên nền nhiễu được xác định bởi [16, 17].

$$P_D(N_t, X_t, Y, K) = \int_0^\infty p(t | X_t, K) \int_Y p(s | N_t, t) dv dt \quad (4)$$

Trong đó,  $N_t$  - số lượng xung tích lũy không tương can,  $K$  - tham số thăng giáng mục tiêu,  $Y$  - ngưỡng phát hiện chuẩn hóa qua công suất tạp,  $s$  và  $X_t$  được cho bởi,

$$s = \sum_{n=1}^{N_t} \frac{y_n}{P_c} \quad \text{and} \quad X_t = \sum_{n=1}^{N_t} \frac{E_n}{P_c} \quad (5)$$

tương ứng là tổng của  $N_t$  đầu ra máy thu và kỳ vọng  $E_n$  của chúng được trung bình qua công suất nhiễu  $p_c$ . Hàm mật độ xác suất của  $s$  được cho bởi phân bố Rice [12],

$$p(s | N_t, X_t) = \left( \frac{s}{X_t} \right)^{(N_t-1)/2} e^{-(s+X_t)} I_{N_t-1}(2\sqrt{sX_t}), \quad (6)$$

$(s \geq 0).$

Nhiều phân bố K là sự kết hợp của nhiều phân bố Gauss với công suất trung bình bị điều chế bởi quy luật Gamma [24]. Do đó, để có được xác suất phát hiện cuối cùng, ta cần tích phân (4) qua hàm mật độ Gamma:

$$P_D(Y, N_t, X_t, K, \nu, p_c) = \int_0^\infty P_D(N_t, X_t, Y, K | p_c) \times \left( \frac{\nu}{p_c} \right)^\nu \frac{x^{\nu-1}}{\Gamma(\nu)} e^{-\frac{\nu x}{p_c}} dx \quad (7)$$

ở đây,  $\nu$  là tham số hình dạng của phân bố Gamma, thay đổi khi góc chiếu xạ mục tiêu thay đổi [11, 24]. Khi chỉ có nhiễu, (7) có phân bố K dạng tường minh. Nói chung, (4) được tính qua phép xấp xỉ trong [16, 25], sau đó sử dụng phép tích phân số bằng phương pháp Gauss-Laguerre trong [8] để có được (7). Từ đó, hàm phân bố tích lũy được xác định theo (8).

$$F(Y) = 1 - P_D(Y, N_t, X_t, K, \nu, p_c) \quad (8)$$

### C. Lý thuyết Copula

Định lý Sklar [15] là kết quả quan trọng nhất khi nghiên cứu về Copula. Phát biểu chính của định lý này được cho trong [10, 15], như sau:

Cho  $F$  là một hàm phân bố  $d$ -chiều cùng với các phân bố biên  $F_1, \dots, F_d$ . Với mọi  $x$  trong trong tập xác định của  $F$ , tồn tại một Copula  $C$  có  $d$ -chiều sao cho

$$F(x_1, \dots, x_d) = C\{F_1(x_1), \dots, F_d(x_d)\} \quad (9)$$

Nếu các hàm  $F_1, \dots, F_d$  liên tục thì  $C$  là duy nhất. Với các trường hợp còn lại,  $C$  được xác định là duy nhất trên  $\text{Ran}F_1 \times \dots \times \text{Ran}F_d$ . Ở đây,  $\text{Ran}H$  là hạng của  $H$ . Ngược lại, nếu  $C$  là một Copula  $d$ -chiều và  $F_1, \dots, F_d$  là các hàm phân bố thì hàm  $F$  được định nghĩa bởi (9) là một hàm phân bố  $d$ -chiều với các phân bố biên  $F_1, \dots, F_d$ .

Định lý Sklar bảo đảm rằng một phân bố đa biến liên tục có thể được tách thành hai thành phần: các phân bố biên đơn biến và sự phụ thuộc đa biến, với cấu trúc phụ thuộc được biểu diễn bởi một Copula. Vì thế, cấu trúc phụ thuộc

của một phân bố đa biến có thể được phân tích tách biệt khỏi các phân bố biên của nó. Do vậy, để nghiên cứu cấu trúc phụ thuộc của một phân bố đa biến người ta tập trung vào Copula của nó.

Cũng theo lý thuyết này, hàm mật độ xác suất (PDF) của hàm phân bố tích lũy (CDF) của  $F$  trong (9) có thể được tìm thấy từ PDF của  $C$  và  $F_1, \dots, F_d$ . PDF  $c$  của Copula  $C$  trong (9) là:

$$c(u_1, \dots, u_d) = \frac{\partial^d C(u_1, \dots, u_d)}{\partial u_1 \dots \partial u_d} \quad (10)$$

Khi hàm mật độ Copula  $c$  biết trước được thì hàm mật độ  $f$  của phân bố đa biến  $F$  trong (9) được cho bởi:

$$f(x_1, \dots, x_d) = c\{F_1(x_1), \dots, F_d(x_d)\} \prod_{i=1}^d f_i(x_i) \quad (11)$$

với  $f_i$  là hàm mật độ của phân bố  $F_i$ . Công thức (11) được gọi là sự biểu diễn chính tắc của một PDF đa biến.

Chi tiết về lý thuyết Sklar và một số họ Copula phổ biến cùng với các ứng dụng của nó có thể được tìm thấy trong [4, 10, 15]. Các trình bày dưới đây tập trung vào họ Copula Gauss, một họ Copula elliptic phổ biến, bởi chúng có thể được áp dụng một cách trực tiếp để mô hình hóa sự phụ thuộc đa biến từ các phân bố biên.

## III. MÔ HÌNH BÀI TOÁN PHÁT HIỆN MỤC TIÊU TRONG HỆ THỐNG RNV-T-XLPT VỚI CẤU TRÚC PHỤ THUỘC COPULA

### A. Mô hình phụ thuộc Copula Gauss

Hàm Copula Gauss được cho bởi [15],

$$C_p^G(u_1, \dots, u_d) = \Phi_p(\Phi^{-1}(u_1), \dots, \Phi^{-1}(u_d)) \quad (12)$$

Ở đây,  $\Phi_p$  là hàm phân bố Gauss đa biến với ma trận tương quan  $P$  xác định dương;  $\Phi$  và  $\Phi^{-1}$  tương ứng là hàm phân bố và phân bố nghịch đảo Gauss đơn biến.

Từ (9) và Copula Gauss (12), có thể thấy rằng: với  $(x_1, \dots, x_d) \in \square^d$  là các biến ngẫu nhiên có hàm phân bố biên  $F_1, \dots, F_d$ , ta có thể xác định hàm phân bố liên kết đa biến với cấu trúc phụ thuộc theo Copula Gauss như sau:

$$F_p^G(x_1, \dots, x_d) = \Phi_p(\Phi^{-1}(F_1(x_1)), \dots, \Phi^{-1}(F_d(x_d))) \quad (13)$$

Các hàm  $F_i$  và  $\Phi^{-1}$  là các hàm đơn điệu tăng nên sự tương quan của các biến  $x_1, \dots, x_d$  và sự tương quan của  $F_1(x_1), \dots, F_d(x_d)$  có xu hướng giống nhau. Do đó, với cách mô hình hóa này thì ma trận tương quan  $P$  trong cấu trúc Copula sẽ phản ánh cấu trúc phụ thuộc giữa các biến  $x_1, \dots, x_d$ . Ma trận  $P$  có dạng sau:

$$P = \begin{pmatrix} 1 & \rho_{12} & \dots & \rho_{1d} \\ \rho_{21} & 1 & \dots & \rho_{2d} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \rho_{d1} & \rho_{d2} & \dots & 1 \end{pmatrix} \quad (14)$$

ở đây, các hệ số tương quan  $\rho_{ij}$  ( $i, j = \overline{1, d}$ ) phải thỏa mãn điều kiện xác định dương của ma trận tương quan  $P$ .

Một lưu ý quan trọng là hàm Copula Gauss được xác định hoàn toàn bởi ma trận tương quan  $P$ . Tham số này

được yêu cầu như là đầu vào cho trước của mô hình liên quan đến sự phụ thuộc của các phân bố biên.

### B. Một số giả thiết

Trong phần này, sẽ xem xét bài toán phát hiện trong hệ thống RNVT-XLPT khi các quyết định thành phần phụ thuộc thống kê theo Copula Gauss được đề xuất ở 3.1, trong điều kiện nhiễu phân bố K. Trước khi tổng hợp các quy luật hợp nhất, một số giả thiết được đưa ra như sau:

i). Kiểm định tỉ số hợp lý theo tiêu chuẩn Neyman-Pearson ở trung tâm hợp nhất;

ii). Mức ngưỡng được xác định chung cho tất cả các đài thành phần;

iii). Các quyết định thành phần phụ thuộc theo Copula Gauss với ma trận tương quan  $P$ , thỏa mãn điều kiện ma trận xác định dương.

Giả thiết đầu tiên cho thấy, để đánh giá chất lượng phát hiện phân tán thì ta cần cho trước một xác suất báo động làm tổng thể ở trung tâm  $P_{FA}$ . Dựa vào giả thiết thứ hai, chúng ta có thể tính toán được mức ngưỡng tối ưu duy nhất  $t_0$  ứng với từng quy luật hợp nhất, và nó được sử dụng chung cho tất cả các đài thành phần. Mặc dù, về mặt thực tế, mức ngưỡng các đài thành phần có thể khác nhau, nhưng để đơn giản bài toán xác định ngưỡng tối ưu chúng tôi đã giả thiết là mức ngưỡng đồng nhất cho các đài. Mức ngưỡng tối ưu riêng cho từng đài sẽ được tiếp tục phát triển trong các nghiên cứu sau. Giả thiết cuối cùng là điều kiện để cho phép mô hình hóa sự phụ thuộc thông qua Gauss Copula. Sau đó, xác suất phát hiện  $P_D$  được tính cho từng quy luật hợp nhất.

Bản chất của phân bố đa biến trong (13) chính là phép tính tích phân xác suất của hàm mật độ xác suất liên kết đa biến phân bố Gauss. Bài toán trở nên khó khăn nếu số đài tăng lên, ngay cả khi số đài chỉ từ 3. Ngoài các quy luật hợp nhất được chỉ ra dưới đây, các quy luật hợp nhất còn lại là sự tổng hợp của các hoán vị của các cận lấy tích phân trong hàm phân bố nhiều chiều (13). Do vậy, ở đây đưa ra 3 quy luật hợp nhất AND, OR và MAJORITY như là một ví dụ cho việc hợp nhất dữ liệu từ 3 đài thành phần khi các quyết định phụ thuộc theo Copula Gauss.

### C. Các quy luật hợp nhất dữ liệu

#### Quy luật OR

Với quy luật này, trung tâm hợp nhất sẽ đưa ra quyết định có mục tiêu khi có ít nhất một quyết định thành phần là có mục tiêu. Ngưỡng  $t_0$  có thể tính được khi cho trước xác suất báo động làm tổng thể là  $P_{FA}$  theo (14),

$$\begin{aligned} P_{FA} &= 1 - P(a_1 = 0, a_2 = 0, a_3 = 0 | H_0) \\ &= 1 - \int_0^{t_0} \int_0^{t_0} \int_0^{t_0} f_Z(\mathbf{Z} | H_0) d\mathbf{Z} \\ &= 1 - F_P^G(t_0, t_0, t_0 | H_0) \end{aligned} \quad (15)$$

Xác suất phát hiện tương ứng là:

$$P_D = 1 - F_P^G(t_0, t_0, t_0 | H_1) \quad (16)$$

#### Quy luật AND

Quyết định có mục tiêu được đưa ra với quy luật này chỉ khi tất cả các quyết định thành phần đều quyết định có mục tiêu. Các công thức xác suất báo động làm và phát hiện

tương ứng là:

$$\begin{aligned} P_{FA} &= P(a_1 = 1, a_2 = 1, a_3 = 1 | H_0) \\ &= \int_{t_0}^{\infty} \int_{t_0}^{\infty} \int_{t_0}^{\infty} f_Z(\mathbf{Z} | H_0) d\mathbf{Z} \\ &= F_P^G(\bar{t}_0, \bar{t}_0, \bar{t}_0 | H_0) \\ P_D &= F_P^G(\bar{t}_0, \bar{t}_0, \bar{t}_0 | H_1) \end{aligned} \quad (17)$$

ở đây,  $\bar{t}_0$  trong hàm  $F_P^G(\cdot)$  là kí hiệu cho biết cận lấy tích phân xác suất trong (1.16) là  $[t_0, +\infty)$ .

#### Quy luật MAJORITY

Quy luật này phát biểu rằng trung tâm hợp nhất dữ liệu ra quyết định có mục tiêu khi có từ đa số các quyết định thành phần là có mục tiêu. Với trường hợp 3 đài đang xét, thì quyết định có mục tiêu khi có từ 2 quyết định thành phần trở lên là có mục tiêu. Xác suất báo động làm tổng thể được tổng hợp theo:

$$\begin{aligned} P_{FA} &= \int_{t_0}^{\infty} \int_{t_0}^{\infty} \int_{t_0}^{\infty} f_Z(\mathbf{Z} | H_0) d\mathbf{Z} + \int_{t_0}^{\infty} \int_{t_0}^{\infty} \int_0^{t_0} f_Z(\mathbf{Z} | H_0) d\mathbf{Z} \\ &+ \int_{t_0}^{\infty} \int_0^{t_0} \int_{t_0}^{\infty} f_Z(\mathbf{Z} | H_0) d\mathbf{Z} + \int_0^{t_0} \int_{t_0}^{\infty} \int_{t_0}^{\infty} f_Z(\mathbf{Z} | H_0) d\mathbf{Z} \\ &= F_P^G(\bar{t}_0, \bar{t}_0, \bar{t}_0 | H_0) + F_P^G(\bar{t}_0, \bar{t}_0, t_0 | H_0) \\ &+ F_P^G(\bar{t}_0, t_0, \bar{t}_0 | H_0) + F_P^G(t_0, \bar{t}_0, \bar{t}_0 | H_0) \end{aligned} \quad (19)$$

Xác suất phát hiện cũng được tổng hợp theo cách tương tự khi thay giả thuyết  $H_0$  bằng giả thuyết  $H_1$  trong (18).

$$\begin{aligned} P_D &= F_P^G(\bar{t}_0, \bar{t}_0, \bar{t}_0 | H_1) + F_P^G(\bar{t}_0, \bar{t}_0, t_0 | H_1) \\ &+ F_P^G(\bar{t}_0, t_0, \bar{t}_0 | H_1) + F_P^G(t_0, \bar{t}_0, \bar{t}_0 | H_1) \end{aligned} \quad (20)$$

Các công thức (18) và (19) có thể được rút gọn thành (20) và (21) nếu các tham số phân bố biên là giống nhau và ma trận tương quan  $P$  đồng nhất.

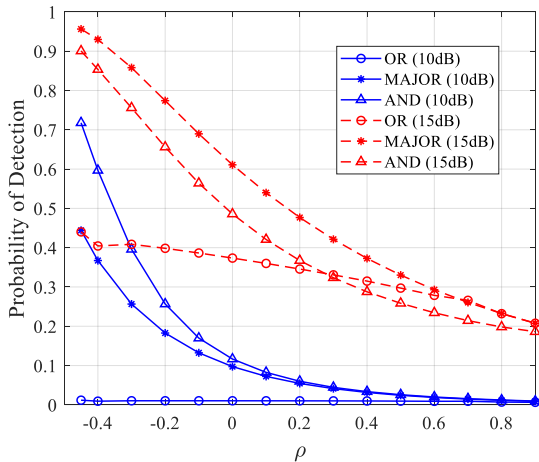
$$P_{FA} = F_P^G(\bar{t}_0, \bar{t}_0, \bar{t}_0 | H_0) + 3F_P^G(\bar{t}_0, \bar{t}_0, t_0 | H_0) \quad (21)$$

$$P_D = F_P^G(\bar{t}_0, \bar{t}_0, \bar{t}_0 | H_1) + 3F_P^G(\bar{t}_0, \bar{t}_0, t_0 | H_1) \quad (22)$$

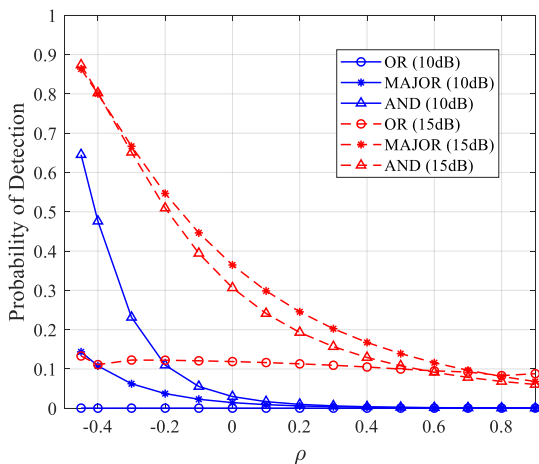
## IV. ĐÁNH GIÁ CHẤT LƯỢNG PHÁT HIỆN

Trong phần này, chúng tôi đưa ra một vài ví dụ để đánh giá chất lượng phát hiện của hệ thống RNVT-XLPT với mô hình sự phụ thuộc của các quyết định thành phần được đề xuất ở trên.

Trước hết, xem xét sự phụ thuộc chất lượng phát hiện của hệ thống vào sự phụ thuộc (tương quan) giữa các quyết định thành phần. Để thực hiện điều này, giả thiết các tham số thống kê của nhiễu tại 3 đài là như nhau: Tỷ số nhiễu/tạp (CNR) là 10 dB, tham số hình dạng của nhiễu phân bố K  $\nu = 1$ . Hệ số tương quan đều giữa các quyết định cũng được giả thiết với hệ số tương quan  $\rho$ . Ngoài ra, để đảm bảo điều kiện xác định dương của ma trận  $P$ , các khảo sát chất lượng phát hiện của hệ thống được tiến hành với  $\rho$  nằm trong khoảng  $(-0.5, 1]$ . Khác với các ứng dụng trong thông tin, ở đây xác suất báo động làm tổng thể tại trung tâm được khảo sát với giá trị rất nhỏ, cỡ  $10^{-6}$  và  $10^{-8}$  (thậm chí có thể nhỏ hơn). Điều này là phù hợp với trường hợp bài toán phát hiện trong radar, mạng radar.



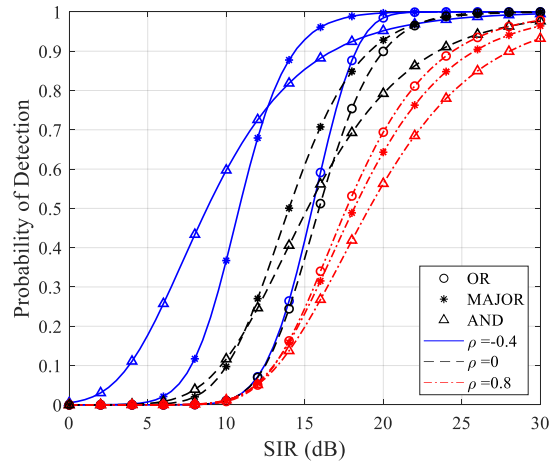
Hình 2. Xác suất phát hiện  $P_D$  theo  $\rho$  ( $P_{FA} = 10^{-6}$ )



Hình 3. Xác suất phát hiện  $P_D$  theo  $\rho$  ( $P_{FA} = 10^{-8}$ )

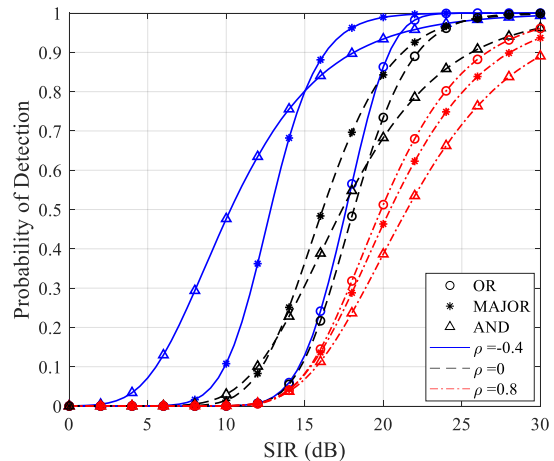
Hình 2 và Hình 3 là các đồ thị xác suất phát hiện theo hệ số tương quan đều  $\rho$  ứng với 3 quy luật hợp nhất OR, MAJORITY và AND. Trong đó, tỉ số tín/nhiều + tạp (SIR) 10 dB và 15 dB được khảo sát. Dễ dàng thấy rằng, sự tương quan âm trong số các quyết định thành phần cải thiện một cách đáng kể chất lượng phát hiện của hệ thống. Ngoài ra, quy luật hợp nhất OR cho thấy sự kém nhạy hơn với hệ số tương quan và nó cũng có chất lượng kém hơn so với các quy luật AND và MAJORITY.

Tiếp theo, Hình 4 và Hình 5 là một so sánh cụ thể hơn chất lượng phát hiện của các quy luật hợp nhất phụ thuộc vào SIR và cả hệ số tương quan  $\rho$ . Rõ ràng, chất lượng phát hiện của cả 3 quy luật đều phụ thuộc khá mạnh (trừ quy luật OR) vào hệ số tương quan.



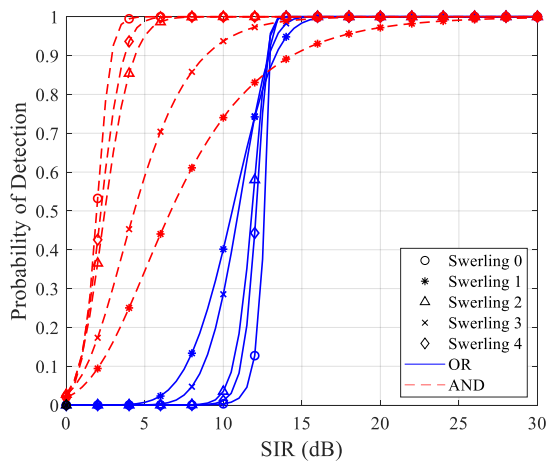
Hình 4. Xác suất phát hiện  $P_D$  theo SIR ( $P_{FA} = 10^{-6}$ )

Một điều khá đặc biệt, xu hướng thay đổi chất lượng giữa 3 quy luật là khác nhau ứng với SIR khác nhau. Ở vùng có SIR nhỏ, quy luật AND cho một chất lượng phát hiện vượt trội hơn cả, trong khi chất lượng phát hiện tốt hơn cả là quy luật OR ở vùng có SIR lớn. Điều này cũng gợi ý cho việc sử dụng hợp lý các quy luật hợp nhất ứng với các trường hợp khác nhau của SIR để có chất lượng phát hiện tốt nhất.

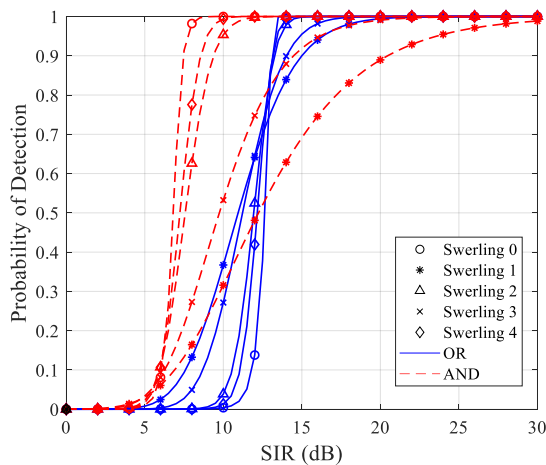


Hình 5. Xác suất phát hiện  $P_D$  của các quy luật hợp nhất khi  $\rho$  thay đổi ( $P_{FA} = 10^{-8}$ ).

Cuối cùng, ta xem xét chất lượng phát hiện của hệ thống với các mô hình mục tiêu Swerling khác nhau như là minh chứng cho tính hữu dụng của phương pháp mô hình hóa sự phụ thuộc đã đề xuất. Để có sự khác biệt giữa các mô hình mục tiêu Swerling 1-2 và mô hình 3-4, số xung tích lũy không tương can của các đài thành phần được giả thiết cùng là 10 xung. Các giả thiết khác là không thay đổi.

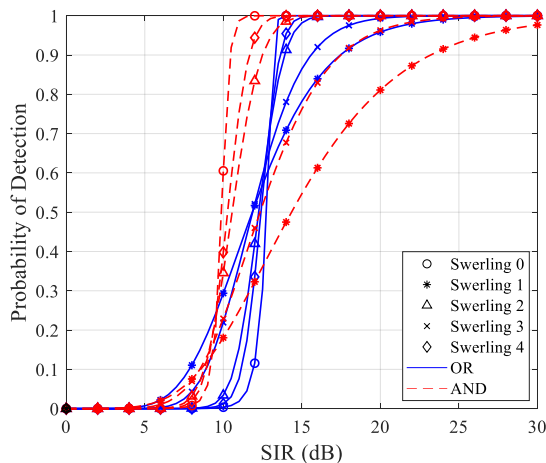


Hình 6. Xác suất phát hiện  $P_D$  ( $P_{FA} = 10^{-6}$ ,  $\rho = -0.4$ )



Hình 7. Xác suất phát hiện  $P_D$  ( $P_{FA} = 10^{-6}$ ,  $\rho = 0$ )

Dựa vào đồ thị trên Hình 6-8, các đường cong xác suất phát hiện các mục tiêu Swerling vẫn có xu hướng ngược nhau ứng với vùng SIR nhỏ và lớn, giống với xu hướng trong chất lượng phát hiện đơn đài [16, 23]. Hơn nữa, ranh giới của các vùng SIR này ngoài phụ thuộc vào xác suất báo động lầm  $P_{FA}$  thì nó còn phụ thuộc lớn vào hệ số tương quan trong các quyết định thành phần. Hình 7 là chất lượng phát hiện của hệ thống trong điều kiện các quyết định thành phần không tương quan  $\rho = 0$ . Đối với quy luật hợp nhất AND, chất lượng phát hiện trong trường hợp này bị suy giảm nhiều so với trường hợp tương quan âm nhưng lại tốt hơn so với trường hợp tương quan dương.



Hình 8. Xác suất phát hiện  $P_D$  của quy luật hợp nhất AND và OR theo các mô hình Swerling ( $P_{FA} = 10^{-6}$ ,  $\rho = +0.5$ ).

Hình 6-8 còn chứng minh thêm việc chất lượng phát hiện của hệ thống ứng với quy luật hợp nhất OR ít chịu ảnh hưởng hơn bởi sự phụ thuộc trong các quyết định thành phần. Sự thay đổi hệ số tương quan hầu như chỉ làm thay đổi ranh giới phân chia xu hướng phát hiện các mục tiêu Swerling với quy luật hợp nhất OR. Trong khi đó, chất lượng phát hiện các mục tiêu Swerling của quy luật AND bị thay đổi lớn khi thay đổi hệ số tương quan  $\rho$ .

V. KẾT LUẬN

Trong bài báo này, một phương pháp mô hình hóa sự phụ thuộc của các quyết định thành phần trong hệ thống radar nhiều vị trí xử lý phân tán dựa vào một họ Copula Elliptics đã được trình bày. Copula Gauss được lựa chọn bởi khả năng áp dụng trực tiếp của chúng. Phương pháp mô hình hóa này cho phép phân tích tách biệt yếu tố phụ thuộc với các phân bố biên của các quyết định thành phần. Do đó, bài toán phát hiện có thể được giải quyết với các phân bố nhiễu khác nhau trong radar. Ma trận tương quan  $P$  là tham số duy nhất để đánh giá sự phụ thuộc thống kê. Sau đó, mô hình bài toán phát hiện trong hệ thống của 3 đài thành phần đã được đưa ra tương ứng với các quy luật hợp nhất khác nhau. Cuối cùng, bài báo tiến hành đánh giá chất lượng phát hiện của hệ thống trong một số trường hợp cụ thể. Các kết quả chỉ ra rằng, chất lượng phát hiện tổng thể của hệ thống phụ thuộc nhiều vào mức độ tương quan trong các quyết định thành phần. Mặc dù quy luật hợp nhất OR ít chịu ảnh hưởng nhất bởi hệ số tương quan, song nó lại có chất lượng kém hơn so với các quy luật hợp nhất còn lại. Ngoài ra, chất lượng phát hiện của hệ thống với các mô hình mục tiêu Swerling cũng đã được khảo sát. Các kết quả ở đây cũng cho một gợi ý trong việc sử dụng các quy luật hợp nhất ở trung tâm để đạt được chất lượng phát hiện tốt nhất, ứng với các mô hình mục tiêu khác nhau và các mục tiêu có SIR khác nhau.

REFERENCES

- [1]. V. Aalo and R. Viswanathou: "On distributed detection with correlated sensors: two examples," IEEE Trans. on Aeros. and Elec. Systems **25** (1989) 414 (DOI: 10.1109/7.30797).
- [2]. I. Antipov: Analysis of Sea Clutter Data (DSTO Electronic and Surveillance Research Laboratory, of Australia, 1998) 45.
- [3]. R. S. Blum and S. A. Kassam: "Optimum distributed detection of weak signals in dependent sensors," IEEE Trans. on Infor. Theory **38** (1992) 1066 (DOI: 10.1109/18.135646).
- [4]. U. Cherubini, et al.: Copula Methods in Finance (Wiley, England, 2013) 308.
- [5]. S. Choi, et al.: "Copula based dependence modeling for inference in RADAR systems," (2015) 198 (DOI: 10.1109/RadarConf.2015.7411879).
- [6]. E. Conte, et al.: "Multistatic radar detection: synthesis and comparison of optimum and suboptimum receivers," IEE Proc. F - Commun. Radar and Signal Proc. **130** (1983) 484 (10.1049/ip-f-1:19830078).

- [7]. E. D'Addio, *et al.*: "Optimum and sub-optimum processors for multistatic radar systems," IEE Radar, Sonar, Nav. and Avi. **01** (1987) 117 (DOI: 10.1049/PBRA001E\_ch).
- [8]. P. J. Davis, *et al.*: Methods of Numerical Integration (Elsevier Inc, Academic Press, 1984) 612.
- [9]. E. Drakopoulos and C.-C. Lee: "Optimum multisensor fusion of correlated local decisions," IEEE Trans. on Aeros. and Elect. Systems **27** (1991) 2489 (DOI: 10.1109/7.85032).
- [10]. F. Durante and C. Sempì: Copula Theory and Its Applications (Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2009) 327.
- [11]. T. P. Leonard, *et al.*: "A comparison of radar sea clutter models," IEE International Radar Conference (2002) 429 (DOI: 10.1109/radar.2002.1174742).
- [12]. J. Marcum: "A statistical theory of target detection by pulsed radar," IRE Trans. on Infor. Theory **6** (1960) 59 (DOI: 10.1109/tit.1960.1057560).
- [13]. N. Đ. Minh, *et al.*: "Ảnh hưởng của nhiễu tương quan với phân bố Student-t tới chất lượng phát hiện của mạng radar nhiều vị trí phân tán," Tạp chí Nghiên cứu KH&CN quân sự **Số 56** (08/2018)
- [14]. N. Đ. Minh, *et al.*: "Giải bài toán phát hiện trong mạng radar nhiều vị trí xử lý phân tán khi chịu ảnh hưởng của nhiễu tương quan phân bố Lognormal," Tạp chí Nghiên cứu KH&CN quân sự **57** (10/2018)
- [15]. R. B. Nelsen: An Introduction to Copulas (Springer Science & Business Media, 2006) 269.
- [16]. D. A. Shnidman: "Radar detection probabilities and their calculation," IEEE Trans. on Aeros. and Elec. Systems **31** (1995) 928 (DOI: 10.1109/7.395246).
- [17]. D. A. Shnidman: "Update on radar detection probabilities and their calculation," IEEE Trans. on Aeros. and Elec. Systems **44** (2008) 381 (DOI: 10.1109/taes.2008.4517013).
- [18]. R. Srinivasan: "Distributed radar detection theory," IEE PROCEEDINGS **133** (1986) 55 (DOI: 10.1049/ip-f-1:19860010).
- [19]. R. Srinivasan: "A theory of distributed detection," Signal Processing **11** (1986) 319 (DOI: 10.1016/0165-1684(86)90074-5).
- [20]. R. Srinivasan and V. Aalo: "On Counting Rules in Distributed Detection," IEEE Trans. on Acoustics Speech and Signal Processing **37** (1989) 772 (DOI: 10.1109/29.17574).
- [21]. R. Srinivasan and A. Ansari: "Distributed Detection of a Signal in Generalized Gaussian Noise," IEEE Trans. on Acoustics Speech and Signal Processing **37** (1989) 775 (DOI: 10.1109/29.17575).
- [22]. R. Srinivasan, *et al.*: "Distributed detection of swerling targets," IEE Proceedings F Com. Radar and Signal Processing **133** (1986) 624 (DOI: 10.1049/ip-f-1:19860099).
- [23]. P. Swerling: "Probability of detection for fluctuating targets," IRE Trans. on Infor. Theory **6** (1960) 269 (DOI: 10.1109/tit.1960.1057561).
- [24]. K. Ward, *et al.*: Sea Clutter: Scattering, the K Distribution and Radar Performance (The Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom, 2013) 586.
- [25]. S. Watts: "Radar Detection Prediction in K-Distributed Sea Clutter and Thermal Noise," IEEE Trans. on Aeros. and Elec. Systems **AES-23** (1987) 40 (DOI: 10.1109/taes.1987.313334).

## THE DETECTION PERFORMANCE OF THE MULTISTATIC RADAR SYSTEM WITH THE COPULA-BASED DEPENDENCE STRUCTURE

**Abstract**—Multistatic radar systems distributed spatially makes it many advantages in terms of the detection, resolution improvement, target tracking... In particular, multistatic radar systems are highly resistant to interference and enhance reliability and monitoring capability. The distributed processing multistatic radar system is a class of general multistatic radar systems. These systems with distributed local decisions and a data fusion center demonstrate efficiency in both structural simplicity, narrow data bandwidth and negligible loss in quality. To evaluate the detection performance of the distributed processing multistatic radar system with local decisions dependent statistically, the article proposed the Copula-based dependence modeling. Then, data fusion rules in center were considered, and detection performance was evaluated in certain cases. The results show that the detection performance of the system is greatly influenced by dependency level between local decisions. The detection performance deteriorates with positive dependence and increases with negative dependence. In addition, the quality of detection for Swerling targets is also considered to demonstrate the special fit of this dependence modeling.

**Keywords**— Copula, dependence modeling, K-distributed clutter, multistatic radar, distributed detection.



**Phạm Văn Hùng** tốt nghiệp Đại học ngành Điện – Điện tử năm 2011 và Thạc sĩ chuyên ngành Kỹ thuật radar – dẫn đường năm 2016 tại Học viện Kỹ thuật quân sự. Hiện đang công tác tại Khoa Vô tuyến điện tử, Học viện Kỹ thuật quân sự.

**Lĩnh vực nghiên cứu:** Lý thuyết phát hiện, lý thuyết phát hiện radar nhiều vị trí, xử lý tín hiệu và dữ liệu radar, thiết kế phần cứng.



**Nguyễn Đức Minh** tốt nghiệp đại học chuyên ngành Vật lý-Vô tuyến năm 2000 tại Đại học Khoa học tự nhiên-Đại học Quốc gia Hà Nội. Tốt nghiệp Thạc sỹ ngành Công nghệ Điện tử - Viễn thông năm 2006 tại Đại học Công nghệ - Đại học Quốc gia Hà Nội. Nhận bằng tiến sỹ kỹ thuật ngành Kỹ thuật Ra đa-Dẫn đường năm 2019 tại Học viện Kỹ thuật Quân sự. Hiện đang

giảng dạy tại Học viện Công nghệ Bộ chính Viễn thông.  
**Lĩnh vực nghiên cứu:** Lý thuyết phát hiện trong radar nhiều vị trí, xử lý tín hiệu, điện tử máy tính.