

## Application Array Antenna To Improve Physical Layer Security In Noma Network

Ngoc Ha Truong<sup>\*</sup>, Van Phuc Nguyen, Phuoc Hai Trang Dang, Thi Quynh Nhu Tran  
Ho Chi Minh City University of Technology and Education, Vietnam

<sup>\*</sup>Corresponding author. Email: [hatn@hcmute.edu.vn](mailto:hatn@hcmute.edu.vn)

### ARTICLE INFO

Received: 14/08/2023  
Revised: 10/09/2023  
Accepted: 18/09/2023  
Published: 28/08/2024

### KEYWORDS

NOMA;  
Array antennas;  
Physical layer security;  
Outage probability;  
Beamforming.

### ABSTRACT

In this study, we propose a NOMA communication model combined with linear array antennas for the purpose of enhancing physical layer security. We introduce a model of 4 nodes: transmitter node S, receiver node D1, receiver node D2, eavesdropping node E. In which node S is equipped with an antenna array that can perform beamforming, 2 nodes D1 and D2 are nodes that receive data  $x_1$ ,  $x_2$  is transmitted from Node S, Node E is an eavesdropping node will try to receive signals from S sent to  $x_1$ ,  $x_2$ . To evaluate the ability to improve physical layer security, the study was based on the physical layer security outage probability parameter. Through the study, it has been concluded that, if the antenna array is combined, it will improve the physical layer security problem in NOMA technology quite well, the article concludes that depending on the location of Node E, the security bile is good or bad.

## Ứng Dụng Mảng Anten Nhằm Cải Thiện Bảo Mật Lớp Vật Lý Trong Mạng Noma

Truong Ngoc Ha<sup>\*</sup>, Nguyễn Văn Phúc, Đặng Phước Hải Trang, Trần Thị Quỳnh Như  
Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

<sup>\*</sup>Tác giả liên hệ. Email: [hatn@hcmute.edu.vn](mailto:hatn@hcmute.edu.vn)

### THÔNG TIN BÀI BÁO

Ngày nhận bài: 14/08/2023  
Ngày hoàn thiện: 10/09/2023  
Ngày chấp nhận đăng: 18/09/2023  
Ngày đăng: 28/08/2024

### TỪ KHÓA

NOMA;  
Mảng anten;  
Bảo mật lớp vật lý;  
Xác suất dừng;  
Beamforming.

### TÓM TẮT

Trong nghiên cứu này, chúng tôi đưa ra mô hình truyền thông NOMA có kết hợp với mảng anten tuyến tính có pha thay đổi được nhằm mục đích tăng cường bảo mật ở lớp vật lý. Chúng tôi giới thiệu 1 mô hình gồm 4 nút: nút phát S, nút thu D1, nút thu D2, nút nghe lén E. Trong đó nút S được trang bị một mảng anten có thể thực hiện thay đổi búp sóng (beamforming), 2 nút D1 và D2 là 2 nút thu dữ liệu  $x_1$ ,  $x_2$  được phát từ Nút S, Nút E được là nút nghe lén, sẽ cố gắng thu tín hiệu từ S gửi đến  $x_1$ ,  $x_2$ . Để đánh giá khả năng cải thiện bảo mật lớp vật lý, nghiên cứu đã dựa trên thông số xác suất dừng bảo mật lớp vật lý. Qua nghiên cứu đã đưa ra kết luận rằng, nếu kết hợp mảng anten sẽ cải thiện được khá tốt vấn đề bảo mật lớp vật lý trong kỹ thuật NOMA, Bài báo rút ra kết luận rằng tùy vào vị trí của Nút E mà việc bảo mật được tốt hoặc xấu đi.

DOI: <https://doi.org/10.54644/jte.2024.1448>

Copyright © JTE. This is an open access article distributed under the terms and conditions of the [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium for non-commercial purpose, provided the original work is properly cited.

### 1. Tổng quan

Ngày nay, trong cuộc cách mạng 4.0, tốc độ truyền dữ liệu vô tuyến giữa các thiết bị đòi hỏi ngày càng tăng. Tốc độ dữ liệu này lại tỷ lệ thuận với băng thông vô tuyến, nhưng nguồn băng thông này là có giới hạn [1], [2], [3]. Trước đây, các kỹ thuật để sử dụng hiệu quả băng thông vô tuyến như: FDMA,

OFDMA, CDMA... và gần đây là kỹ thuật NOMA [4], [5]. NOMA là kỹ thuật cho phép truyền nhiều dữ liệu trên cùng một băng tần trong cùng một thời gian, đồng thời bộ khử can nhiễu tuần tự (SIC: Sequential Interference Cancellation) được sử dụng ở phía thu để tách các tín hiệu thu được [6].

Song song với việc sử dụng hiệu quả băng thông, việc bảo mật thông tin cũng là một vấn đề rất quan trọng. Do tín hiệu được truyền trong môi trường vô tuyến nên việc bị nghe lén là vấn đề không thể tránh khỏi. Hàng loạt các kỹ thuật bảo mật áp dụng các kỹ thuật mã hóa, xác thực phức tạp: WEP, WP [7]... được sử dụng ở lớp ứng dụng. Tuy nhiên, như vậy cũng được xem là chưa đủ, các nghiên cứu về bảo mật lớp vật lý được giới thiệu. Bảo mật vật lý dựa trên nguyên lý cơ bản: kênh truyền được xem là bảo mật khi dung lượng kênh của người dùng hợp pháp lớn hơn dung lượng kênh nghe lén [8].

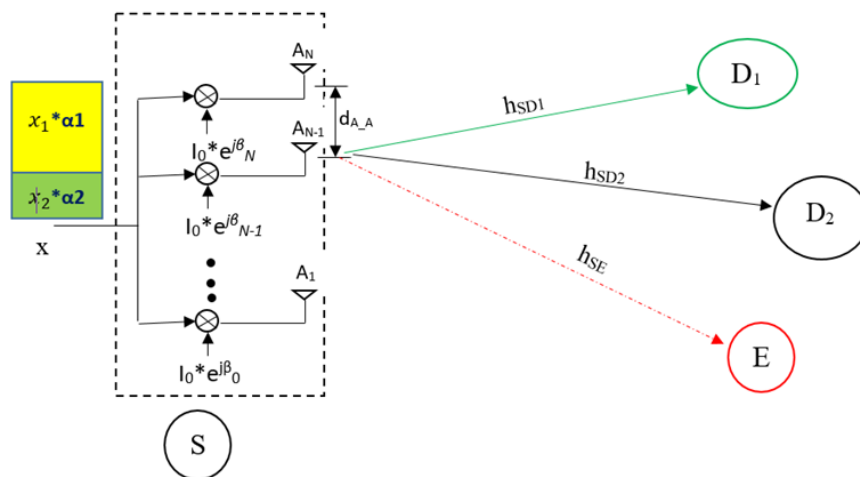
Trong các hướng nghiên cứu về bảo mật lớp vật lý thì hướng nghiên cứu về beamforming đang được quan tâm khá nhiều. Beamforming là kỹ thuật dựa trên việc thay đổi biên độ và pha của nguồn điện cấp cho từng phần tử trong mảng anten nhằm thay đổi hướng và độ rộng của chùm tín hiệu từ nguồn phát gửi đến nút đích [9], [10], [11]. Và đây cũng chính là chủ đề của nghiên cứu này: cải thiện về bảo mật lớp vật lý trong mạng NOMA bằng mảng anten.

Nghiên cứu này được trình bày theo trình tự sau: Phần đầu giới thiệu về tổng quan, phần 2 giới thiệu về mô hình nghiên cứu và các lý thuyết liên quan, phần 3 sẽ trình bày về việc chứng minh các công thức về bảo mật lớp vật lý, phần 4 là phần mô phỏng và đánh giá kết quả, phần cuối là phần kết luận và đưa ra các đóng góp chính của nghiên cứu này.

## 2. Cơ Sở Lý Thuyết Và Mô Hình Nghiên Cứu

### 2.1. Mô hình của nghiên cứu

Trong nghiên cứu này, mô hình gồm 4 nút mạng được nghiên cứu gồm: Nút nguồn S, Nút đích D<sub>1</sub>, nút đích D<sub>2</sub>, Nút nghe lén E. Trong đó, nút S ứng dụng kỹ thuật NOMA để ghép tín hiệu và truyền cho 2 nút D<sub>1</sub> và D<sub>2</sub>. Nút nghe lén E được sử dụng để giả sử rằng có 1 nguồn tấn công cố gắng để thu thập thông tin từ nguồn S gửi cho D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub>.



**Hình 1.** Thông số định dạng cho (a): văn bản nội dung; (b): tiêu đề các phần

Các giả thuyết đưa ra trong nghiên cứu:

- Nút S là mảng có N anten dipole, các nút còn lại D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub>, E, chỉ có 1 anten duy nhất.
- Nút S biết được chính xác vị trí của 2 nút D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> để có thể thay đổi búp sóng truyền tới hai nút này là tốt nhất.
- Các kênh truyền được nghiên cứu là kênh Rayleigh fading và nhiễu trong hệ thống là nhiễu trắng cộng (AWGN).

• Nút S được đặt tại gốc tọa độ, các nút D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub>, E nằm cách đều nút S trên một đường tròn bán kính tương đương 1.

## 2.2. Kỹ thuật NOMA cho tuyến hướng xuống.

Trong nghiên cứu này, nút S sẽ thực hiện ghép hai tín hiệu là  $x_1$  (mong muốn gửi đến D<sub>1</sub>) và  $x_2$  (mong muốn gửi đến D<sub>2</sub>) bằng kỹ thuật NOMA. Khi đó, tín hiệu tổng để truyền đi là: [12]:

$$x_S = \sqrt{\alpha_1 P_S} x_1 + \sqrt{\alpha_2 P_S} x_2 \quad (1)$$

Với  $\alpha_1, \alpha_2$  là các hệ số công suất tương ứng với  $x_1$  và  $x_2$ ; trong đó  $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ .

## 2.3. Mảng Anten

Mảng anten được định nghĩa là một mảng gồm nhiều anten được đặt gần nhau trong không gian nhằm tạo ra một dạng bức xạ (búp sóng) cụ thể. Có nhiều loại mảng anten khác nhau: mảng một chiều, 2 chiều, tuyến tính, không tuyến tính, tam giác, vi dải... [13]. Trong bài báo này, mảng anten có dòng cố định và pha thay đổi được sẽ được áp dụng tại nút S, nhằm tạo ra chùm tia bức xạ chính đến 2 nút D<sub>1</sub> và D<sub>2</sub>. Khi đó, trường điện tổng của mảng anten này ở vùng xa (ở vùng đặt các nút D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub>, E) thể hiện ở công thức (2) như sau [14]:

$$E_T = E_{ref} * AF \quad (2)$$

Với  $E_{ref}$ : là trường điện của từng phần tử anten (trong nghiên cứu này xem như bằng 1 ở hướng truyền), AF là hệ số ghép của mảng anten và có công thức (3):

$$AF(N) = e^{j\beta_0} + e^{j\beta_1} + \dots + e^{j\beta_N} \quad (3)$$

Với N là số anten trong mảng;  $\beta_i$  là pha của từng anten,  $0 \leq \beta_i \leq 2\pi$ .

Từ (1), (2) và (3) ta được:

$$\begin{aligned} x_S &= |E_T| \left( \sqrt{\alpha_1 P_S} x_1 + \sqrt{\alpha_2 P_S} x_2 \right) \\ &= |1 \cdot AF(N)| \left( \sqrt{\alpha_1 P_S} x_1 + \sqrt{\alpha_2 P_S} x_2 \right) \\ &= AF(N, \theta, \phi) \left( \sqrt{\alpha_1 P_S} x_1 + \sqrt{\alpha_2 P_S} x_2 \right) \end{aligned} \quad (4)$$

Với

$$AF(N, \theta, \phi) = |AF(N)|$$

## 3. Xác Suất Dừng Bảo Mật Lớp Vật Lý Trong Mô Hình Nghiên Cứu

### 3.1. Lý thuyết về xác suất dừng của bảo mật lớp vật lý

Nút S sẽ truyền tín hiệu vào môi trường vô tuyến, khi đó nút D<sub>1</sub> sẽ thu được tín hiệu có dạng theo công thức sau:

$$y_{D1} = \sqrt{\alpha_1} AF(N, \theta_{SD1}, \phi_{SD1}) \sqrt{P_S} x_1 h_{SD1} + \sqrt{\alpha_2} AF(N, \theta_{SD1}, \phi_{SD1}) \sqrt{P_S} h_{SD1} x_2 + n_{SD1} \quad (5)$$

Với  $h_{SD1}$  là hệ số của kênh truyền giữa S và D<sub>1</sub>,  $AF(N, \theta_{SD1}, \phi_{SD1})$  là hệ số mảng anten theo hướng  $(\theta_{SD1}, \phi_{SD1})$  là hướng của D<sub>1</sub> trong không gian,  $n_{SD1}$  là tín hiệu nhiễu trắng cộng AWGN,  $n_{SD1} \sim (0, N_0)$ .

Từ công thức (5), ta được tỷ số SNR đạt được tại D<sub>1</sub> với tín hiệu  $x_1$  là:

$$SNR_{D1, x_1} = \frac{AF^2(N, \theta_{SD1}, \phi_{SD1}) P_S \alpha_1 |h_{SD1}|^2}{AF^2(N, \theta_{SD1}, \phi_{SD1}) |h_{SD1}|^2 P_S \alpha_2 + N_0} = \frac{AF^2(N, \theta_{SD1}, \phi_{SD1}) |h_{SD1}|^2 \frac{P_S}{N_0} \alpha_1}{AF^2(N, \theta_{SD1}, \phi_{SD1}) |h_{SD1}|^2 \frac{P_S}{N_0} \alpha_2 + 1} \quad (6)$$

$$SNR_{D_1, x_1} = \frac{G_{SD1} g_{SD1} Q \alpha_1}{G_{SD1} g_{SD1} Q \alpha_2 + 1}$$

Với

$$g_{SD1} \triangleq |h_{SD1}|^2, G_{SD1} \triangleq AF^2(N, \theta_{SD1}, \phi_{SD1}), Q \triangleq \frac{P_s}{N_0},$$

Tương tự, tại nút  $D_2$  ta thu được tín hiệu sau:

$$y_{D2} = \sqrt{\alpha_1} AF(N, \theta_{SD2}, \phi_{SD2}) \sqrt{P_s} x_1 h_{SD2} + \sqrt{\alpha_2} AF(N, \theta_{SD2}, \phi_{SD2}) \sqrt{P_s} h_{SD2} x_2 + n_{SD2} \quad (7)$$

Với  $h_{SD2}$  là hệ số kênh S và  $D_2$ ,  $AF(N, \theta_{SD2}, \phi_{SD2})$  là hệ số mảng anten theo hướng  $(\theta_{SD2}, \phi_{SD2})$  là hướng của  $D_2$  trong không gian,  $n_{SD2}$  là hệ số nhiễu trắng cộng AWGN,  $n_{SD2} \sim (0, N_0)$ .

Theo nguyên lý giải điều chế SIC của kỹ thuật NOMA, tín hiệu  $x_2$  tại  $D_2$  được giải điều chế bằng cách trừ đi tín hiệu  $x_1$  đã được giải điều chế thành công từ nút  $D_1$  (và xem như  $x_1$  đã giải điều chế thành công lý tưởng). Do đó, tín hiệu còn lại tại  $D_2$  [14], [15] là:

$$y_{D2-x2} = \sqrt{\alpha_2} AF(N, \theta_{SD2}, \phi_{SD2}) \sqrt{P_s} h_{SD2} x_2 + n_{SD2} \quad (8)$$

Khi đó, hệ số SNR của  $x_2$  là:

$$SNR_{D2, x_2} = \frac{AF^2(N, \theta_{SD2}, \phi_{SD2}) |h_{SD2}|^2 P_s \alpha_2}{N_0} = AF^2(N, \theta_{SD2}, \phi_{SD2}) |h_{SD2}|^2 \frac{P_s}{N_0} \alpha_2 \quad (9)$$

$$= G_{SD2} g_{SD2} Q \alpha_2$$

Tương tự như phân tích trên, tại nút nghe lén E, tín hiệu thu được có dạng:

$$y_E = \sqrt{\alpha_1} AF(N, \theta_{SE}, \phi_{SE}) \sqrt{P_s} x_1 h_{SE} + \sqrt{\alpha_2} AF(N, \theta_{SE}, \phi_{SE}) \sqrt{P_s} h_{SE} x_2 + n_{SE} \quad (10)$$

Với  $h_{SE}$  là hệ số kênh truyền giữa S và E,  $AF(N, \theta_{SE}, \phi_{SE})$  là hệ số mảng anten theo hướng  $(\theta_{SE}, \phi_{SE})$  là hướng của E trong không gian,  $n_{SE}$  là tín hiệu nhiễu trắng cộng AWGN,  $n_{SE} \sim (0, N_0)$ .

Tại nút E này, tín hiệu  $x_1$  sẽ cũng được giải điều chế trước, sau đó tiếp tục đến tín hiệu  $x_2$  cũng sẽ được giải điều chế bằng bộ giải mã SIC hoàn hảo. Do đó, tín hiệu khi đã giải mã thành công  $x_1$  còn lại để giải mã  $x_2$  là:

$$y_{E-x2} = \sqrt{\alpha_2} AF(N, \theta_{SE}, \phi_{SE}) \sqrt{P_s} h_{SE} x_2 + n_{SE} \quad (11)$$

Từ công thức (10) tỷ số SNR tại E của  $x_1$  là:

$$SNR_{E, x_1} = \frac{AF^2(N, \theta_{SE}, \phi_{SE}) P_s \alpha_1 |h_{SE}|^2}{AF^2(N, \theta_{SE}, \phi_{SE}) |h_{SE}|^2 P_s \alpha_2 + N_0} = \frac{AF^2(N, \theta_{SE}, \phi_{SE}) |h_{SE}|^2 \frac{P_s}{N_0} \alpha_1}{AF^2(N, \theta_{SE}, \phi_{SE}) |h_{SE}|^2 \frac{P_s}{N_0} \alpha_2 + 1} \quad (12)$$

$$= \frac{G_{SE} g_{SE} Q \alpha_1}{G_{SE} g_{SE} Q \alpha_2 + 1}$$

Với  $g_{SE} \triangleq |h_{SE}|^2$ ,  $G_{SE} \triangleq AF^2(N, \theta_{SE}, \phi_{SE})$ ,  $Q \triangleq \frac{P_s}{N_0}$

Và từ công thức (11) SNR của tín hiệu  $x_2$  là:

$$SNR_{E, x_2} = G_{SE} g_{SE} Q \alpha_2 \quad (13)$$

Các đại lượng về độ lợi kênh truyền fading Rayleigh  $g_{SD1}$ ,  $g_{SD2}$ ,  $g_{SE}$  trong các công thức (10), (11), (12) có hàm phân phối xác suất như sau: (PDF: probability density function) [15]:

$$f_{g_i}(x) = \lambda_i e^{-\lambda_i x} \quad (14)$$

Với  $\lambda_i = d_i^\beta$ ;  $i = SD_1, SD_2, SE$ ;  $\beta$ : hệ số suy hao của kênh truyền (có giá trị từ 2 đến 5).

Và hàm tích lũy (CDF: cumulative distribution function) có dạng:

$$F_{g_i}(x) = 1 - e^{-\lambda_i x} \quad (15)$$

Dung lượng kênh truyền tại  $D_i$  [15]:

$$C_{D_i}^{x_i} = (1 + SNR_{D_i, x_i}) \quad (16)$$

Dung lượng kênh truyền của nút nghe lên là:

$$C_E^{x_i} = (1 + SNR_{E, x_i}) \quad (17)$$

Với  $i=1,2$ .

Khi đó, dung lượng bảo mật là [16]:

$$C_i = [C_{D_i}^{x_i} - C_E^{x_i}]^+ \quad (18)$$

Với  $[x]^+ = \max\{x, 0\}$ .

### 3.2. Xác suất dừng của bảo mật lớp vật lý của các tín hiệu trong mạng NOMA

Theo [16], xác suất dừng của bảo mật lớp vật lý (trong công thức 18) là xác suất khi thực hiện việc thống kê xem khi nào đại lượng  $C_i$  nhỏ hơn đại lượng ngưỡng  $C_{th}$ .

Do vậy, xác suất dừng của tín hiệu  $x_1$  được cho bởi công thức sau:

$$\begin{aligned} P_{out}^{x_1} &= Pr[C_1 < C_{th}] \\ &= Pr Pr [(C_{D_1}^{x_1} - C_E^{x_1}) < C_{th}] \end{aligned} \quad (19)$$

Thay (17), (18) vào (19) ta được:

$$\begin{aligned} P_{out}^{x_1} &= Pr Pr [(1 + SNR_{D_1, x_1}) - (1 + SNR_{E, x_1}) < C_{th}] \\ &= Pr \left[ \left( \frac{1 + SNR_{D_1, x_1}}{1 + SNR_{E, x_1}} \right) < C_{th} \right] \\ &= Pr \left[ \left( \frac{1 + SNR_{D_1, x_1}}{1 + SNR_{E, x_1}} \right) < 2^{C_{th}} \right] \end{aligned} \quad (20)$$

Đặt  $\theta = 2^{C_{th}} - 1$ , khi đó:

$$P_{out}^{x_1} = P_r \left[ \frac{G_{SD_1} Q \alpha_1 g_{SD_1}}{G_{SD_1} Q \alpha_2 g_{SD_1} + 1} < \theta + (\theta + 1) \frac{G_{SE} Q \alpha_1 g_{SE}}{G_{SE} Q \alpha_2 g_{SE} + 1} \right] \quad (21)$$

Với giả thuyết nút E có thể loại bỏ được hết ảnh hưởng can nhiễu của tín hiệu  $x_2$  khi giải mã tín hiệu  $x_1$  khi đó (21) là:

$$\begin{aligned} P_{out}^{x_1} &= P_r \left[ \frac{G_{SD_1} Q \alpha_1 g_{SD_1}}{G_{SD_1} Q \alpha_2 g_{SD_1} + 1} < \theta + (\theta + 1) \frac{G_{SE} Q \alpha_1 g_{SE}}{G_{SE} Q \alpha_2 g_{SE} + 1} \right] \\ &= P_r \left[ g_{SE} > \frac{G_{SD_1} g_{SD_1}}{(\theta + 1) G_{SE} (G_{SD_1} Q \alpha_2 g_{SD_1} + 1)} - \frac{\theta}{(\theta + 1) G_{SE} Q \alpha_1} \right] dx \\ &= \int_0^\infty f_{g_{SD_1}}(x) Pr \left[ g_{SE} > \frac{G_{SD_1} x}{(\theta + 1) G_{SE} (G_{SD_1} Q \alpha_2 g_{SD_1} + 1)} - \frac{\theta}{(\theta + 1) G_{SE} Q \alpha_1} \right] dx \\ &= \int_0^\infty f_{g_{SD_1}}(x) Pr \left[ \frac{G_{SD_1} x}{(\theta + 1) G_{SE} (G_{SD_1} Q \alpha_2 g_{SD_1} + 1)} < \frac{\theta}{(\theta + 1) G_{SE} Q \alpha_1} \right] dx \\ &\quad + \int_0^\infty f_{g_{SD_1}}(x) Pr \left[ \frac{g_{SE} > \frac{G_{SD_1} g_{SD_1}}{(\theta + 1) G_{SE} (G_{SD_1} Q \alpha_2 g_{SD_1} + 1)} - \frac{\theta}{(\theta + 1) G_{SE} Q \alpha_1}}{\frac{G_{SD_1} x}{(\theta + 1) G_{SE} (G_{SD_1} Q \alpha_2 g_{SD_1} + 1)} > \frac{\theta}{(\theta + 1) G_{SE} Q \alpha_1}} \right] dx \end{aligned} \quad (22)$$

Nếu  $\alpha_1 \leq \theta\alpha_2$  thì:

$$Pr[(\alpha_1 - \theta\alpha_2)xG_{SD}Q \leq \theta] = 1 \text{ và}$$

$$Pr \left[ \begin{aligned} &g_{SE} > \frac{G_{SD1}g_{SD1}}{(\theta+1)G_{SE}(G_{SD1}Q\alpha_2g_{SD1}+1)} \\ &\frac{\theta}{(\theta+1)G_{SE}Q\alpha_1}, \frac{G_{SD1}x}{(\theta+1)G_{SE}(G_{SD1}Q\alpha_2g_{SD1}+1)} > \frac{\theta}{(\theta+1)G_{SE}Q\alpha_1} \end{aligned} \right] = 0 \quad (23)$$

Vì:

$$P_{out}^{x_1} = \int_0^\infty f_{g_{SD1}}(x) \cdot 1 dx + \int_0^\infty f_{g_{SD1}}(x) \cdot 0 dx = 1 + 0 = 1$$

Nếu  $\alpha_1 > \theta\alpha_2$ :

$$P_{out}^{x_1} = \int_0^\infty f_{g_{SD1}}(x) Pr \left[ x < \frac{\theta}{(\theta+1)G_{SD1}Q\alpha_1} \right] dx + \int_0^\infty f_{g_{SD1}}(x) Pr \left[ g_{SE} > \frac{G_{SD1}g_{SD1}}{(\theta+1)G_{SE}(G_{SD1}Q\alpha_2g_{SD1}+1)} - \frac{\theta}{(\theta+1)G_{SE}Q\alpha_1}, x > \frac{\theta}{(\theta+1)G_{SD1}Q\alpha_1} \right] dx \quad (24)$$

$$\text{Với } m = \frac{\theta}{G_{SD1}Q(\alpha_1 - \theta\alpha_2)}$$

$$P_{out}^{x_1} = 1 - e^{-\lambda_{SD1}m} + \int_m^\infty \lambda_1 e^{-\lambda_{SD1}x} e^{-\lambda_{SE}A} dx \quad (25)$$

$$\text{Đặt } A = \frac{\alpha_1 - \theta\alpha_2}{\alpha_1\alpha_2(\theta+1)QG_{SE}} - \frac{1}{\alpha_2(\theta+1)G_{SE}Q(QG_{SD1}\alpha_2x+1)}$$

Công thức (25) chính là công thức thể hiện mối quan hệ giữa xác suất dừng bảo mật lớp vật lý của  $x_1$  tại  $D_1$  với các đại lượng liên quan.

Tương tự như cách trên, xác suất dừng bảo mật lớp vật lý của  $x_2$  tại  $D_2$  được cho bởi công thức sau:

$$P_{out}^{x_2} = Pr \left[ C_{D2}^{x_2} - C_E^{x_2} < C_{th} \right] \quad (26)$$

Từ (16), (17) và (26), ta được:

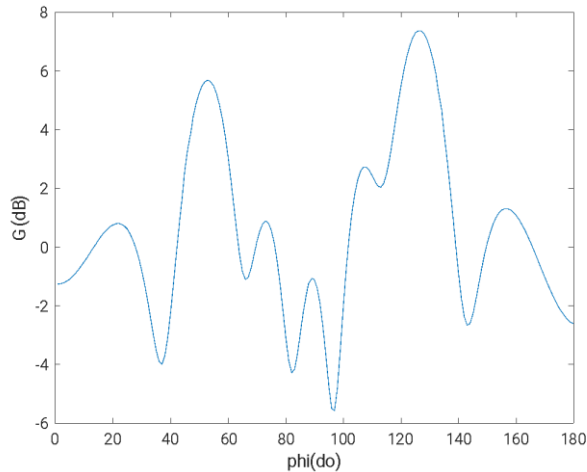
$$\begin{aligned} P_{out}^{x_2} &= Pr \left[ 1 + G_{SD2}g_{SD2}Q\alpha_2 < 2^{C_{th}} (1 + G_{SE}g_{SE}Q\alpha_2) \right] \\ &= Pr \left[ G_{SD2}g_{SD2}Q\alpha_2 < \theta + (\theta+1)G_{SE}g_{SE}Q\alpha_2 \right] \\ &= Pr \left[ g_{SE} > \frac{G_{SD2}g_{SD2}Q\alpha_2 - \theta}{(\theta+1)G_{SE}Q\alpha_2} \right] \\ &= \int_0^\infty f_{g_{SD2}}(x) Pr \left[ g_{SE} > \frac{G_{SD2}xQ\alpha_2 - \theta}{(\theta+1)G_{SE}Q\alpha_2} \right] dx \\ &= \int_0^\infty f_{g_{SD2}}(x) Pr \left[ G_{SD2}xQ\alpha_2 < \theta \right] dx + \int_0^\infty f_{g_{SD2}}(x) Pr \left[ g_{SE} > \frac{G_{SD2}xQ\alpha_2 - \theta}{(\theta+1)G_{SE}Q\alpha_2}, G_{SD2}xQ\alpha_2 > \theta \right] dx \\ &= \int_0^\infty \lambda_{SD2} e^{-\lambda_{SD2}x} Pr \left[ G_{SD2}xQ\alpha_2 < \theta \right] dx + \int_{\frac{\theta}{Q\alpha_2}}^\infty \lambda_{SD2} e^{-\lambda_{SD2}x} Pr \left[ g_{SE} > \frac{G_{SD2}xQ\alpha_2 - \theta}{(\theta+1)G_{SE}Q\alpha_2} \right] dx \\ &= \int_0^\infty \lambda_{SD2} e^{-\lambda_{SD2}x} \left[ 1 - \lambda_{SD2} e^{-\lambda_{SD2}x} \right] dx + \int_n^\infty \lambda_{SD2} e^{-\lambda_{SD2}x} e^{-\lambda_{SE} \frac{G_{SD2}xQ\alpha_2 - \theta}{(\theta+1)G_{SE}g_{SE}Q\alpha_2}} dx \\ &= 1 - e^{-\lambda_{SD2}n} + \lambda_{SD2} \frac{e^{-\lambda_{SD2}n}}{\lambda_{SD2} + \frac{G_{SD2}\lambda_{SE}}{(\theta+1)G_{SE}}} \end{aligned} \quad (27)$$

$$\text{Với } n = \frac{\theta}{Q_{GSD_2} \alpha_2}$$

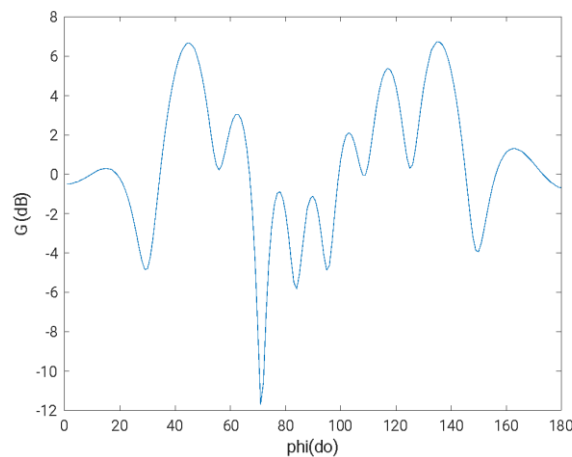
Như vậy, ta đã xác định được biểu thức xác suất dừng của  $x_2$  tại  $D_2$  công thức (27).

#### 4. Kiểm Tra Và Đánh Giá Hệ Thống

Để kiểm tra tính đúng đắn của hệ thống, chúng tôi sẽ thực hiện việc mô phỏng bằng phần mềm MATLAB với số lần lặp là  $10^5$  phép thử. Các công thức (25) và (27) được đưa vào để kiểm tra xem có phù hợp giữa lý thuyết và mô phỏng hay không. Ngoài ra, trong mô phỏng này còn dùng thư viện PhaseShift của MATLAB để hỗ trợ tạo ra các hệ số pha trong mảng Anten theo các hướng cho trước.



**Hình 2.** Đồ thị độ lợi của mảng Anten với 8 phần tử (đơn vị độ)



**Hình 3.** Đồ thị độ lợi của mảng Anten với 10 phần tử (đơn vị độ)

Hình 2 và 3 thể hiện mối quan hệ giữa biên độ AF và hệ số góc theo mặt cắt của mặt phẳng chứa  $D_1$ ,  $D_2$ , E.

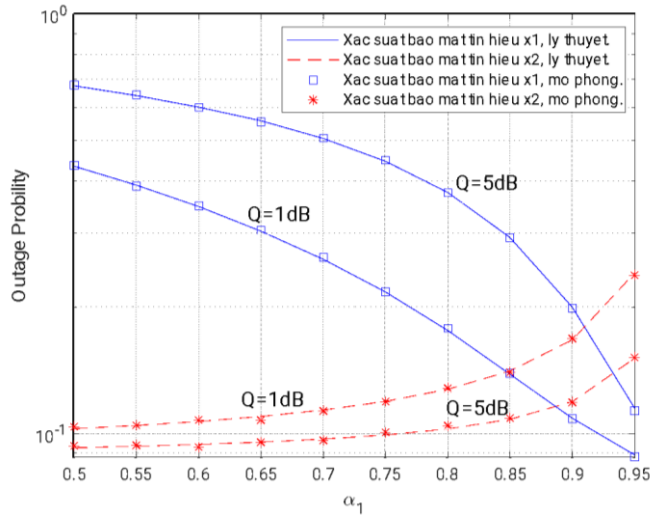
Trong hình 2:  $D_1$  và  $D_2$  ở vị trí có góc  $\phi_{SD1}=130^0$ ,  $\phi_{SD2}=45^0$ . Mảng Anten để tạo được đồ thì như hình 2 là một mảng Anten tuyến tính gồm 8 phần tử, có biên độ dòng bằng nhau và pha được tạo ra từ thư viện PhaseShift của MatLab. Như vậy, mảng Anten đã tạo ra được 2 vị trí có biên độ lớn nhất cũng chính là 2 vị trí đặt 2 thiết bị thu cần giải điều chế ra  $x_1$  và  $x_2$ .

Hình 3:  $D_1$  và  $D_2$  ở vị trí có góc  $\phi_{SD1}=130^0$ ,  $\phi_{SD2}=45^0$ . Mảng Anten để tạo được đồ thì như hình 3 là một mảng Anten tuyến tính gồm 10 phần tử.

#### 4.1. Kiểm tra và đánh giá xác suất dừng theo hệ số anpha:

Hình 4 là kết quả có được khi tiến hành mô phỏng việc thay đổi hệ số phân chia công suất của 2 tín hiệu gửi đến  $D_1$  và  $D_2$  là  $x_1$  và  $x_2$ .

Trong mô phỏng này, số anten của S là 8; độ lợi anten của  $D_1$ , E đều bằng 1; hệ số  $Q=1$  và 5dB;  $D_1$ ,  $D_2$ , E ở các góc: (0,70), (90,70), (30,70);  $R_t=0.2$ ;  $G_{SE}=0.3\text{dB}$  hay  $\phi_{SE}=63^\circ$ ;  $\lambda_{SD1}=1$ ,  $\lambda_{SD2}=1$ ,  $\lambda_{SE}=1$ .



Hình 4. Mô phỏng  $P_{out}$  của  $x_1$  và  $x_2$  theo  $\alpha_1$

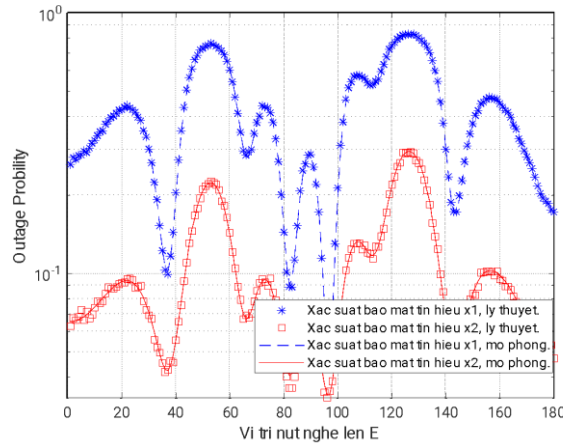
Kết quả thu được có thể thấy rằng, mô phỏng đã thể hiện đúng như lý thuyết (lý thuyết đã chứng minh ở phần trên là chính xác). Kết quả này cho thấy, hệ số  $\alpha_1$  tỷ lệ nghịch với xác suất dừng của  $x_1$  và tỷ lệ thuận với xác suất dừng của  $x_2$ .

Hình 4 còn thể hiện, với cùng một hệ số phân chia công suất, khi tỷ lệ công suất tín hiệu trên nhiều  $Q$  mà tăng lên dẫn đến giá trị xác suất dừng của  $x_1$  tăng theo việc này được giải thích như sau: khi  $Q$  tăng nhanh, đại lượng này ảnh hưởng xem như là chủ đạo đến độ lớn của tín hiệu thu được, các đại lượng còn lại như độ lợi anten và nhiễu ảnh hưởng ít đến việc giải mã ra tín hiệu  $x_1$  dẫn đến dung lượng của  $x_1$  tại  $D_1$  không tăng nhiều nhưng dung lượng của nút nghe lén E lại tăng nhanh làm cho dung lượng bảo mật lớp vật lý giảm và xác suất dừng bảo mật lớp vật lý tăng. Còn xác suất dừng của  $x_2$  giảm theo  $Q$  tăng, tức là bảo mật hiệu quả ngày càng hiệu quả đúng theo công thức (27)  $Q$  tỷ lệ nghịch với xác suất dừng của bảo mật lớp vật lý  $x_2$  tại  $D_2$ .

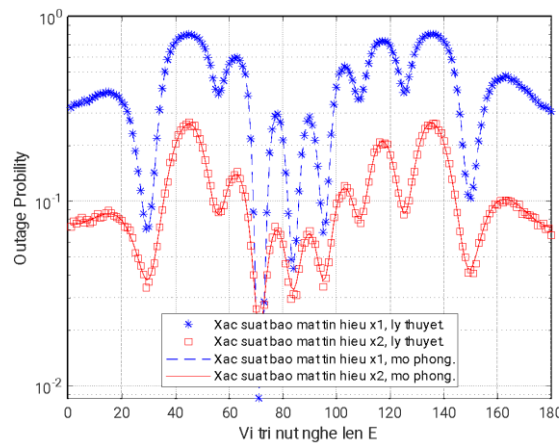
#### 4.2. Kiểm tra và đánh giá xác suất dừng khi nút E thay đổi vị trí

Để đánh giá việc thay đổi vị trí của nút nghe lén ảnh hưởng như thế nào đến xác suất dừng, chúng tôi sẽ cho nút E thay đổi trên một nửa mặt phẳng quanh điểm S (đều có mặt cả 2 nút  $D_1$  và  $D_2$ ), các thông số khác giữ nguyên như mô phỏng ban đầu. Với hình 5 là mảng có 8 anten và hình 6 là mảng có 10 anten.

Kết quả ở Hình 5 và Hình 6 cho thấy, xác suất dừng bảo mật lớp vật lý của  $x_1$  và  $x_2$  thay đổi khi nút nghe lén E di chuyển. Khi nút E gần nút  $D_1$  hoặc  $D_2$  thì xác suất dừng sẽ tăng lên đáng kể và khi nó trùng với vị trí thì xác suất dừng xem như bằng 1 (không bảo mật). Sự khác biệt giữa Hình 5 và Hình 6 còn thể hiện khi số anten tăng lên thì có nhiều vị trí xác suất dừng sẽ rất nhỏ (bảo mật tốt) nhưng nếu nút E ở trong một cự ly gần  $D_1$  hay  $D_2$  thì xác suất dừng lại lớn hơn khi so sánh với mảng 8 phần tử anten. Điều này được giải thích rằng, thư viện PhaseShift của MatLab chỉ phù hợp với việc tạo ra một hướng bức xạ cực đại còn khi có 2 hướng bức xạ cực đại thì các hệ số pha của nó tạo ra không còn được tốt đó là khuyết điểm của thư viện này.



Hình 5. Mô phỏng  $P_{out}$  theo vị trí nút nghe lên  $E$  với mảng 8 anten



Hình 6. Mô phỏng  $P_{out}$  theo vị trí nút nghe lên  $E$  với mảng 10 anten

## 5. Kết luận

Nghiên cứu này đã đạt được một số kết quả sau: Chúng tôi đã giới thiệu một mô hình truyền thông NOMA có kết hợp với mảng anten nhằm cải thiện bảo mật lớp vật lý. Từ mô hình đó, chúng tôi đã chứng minh được công thức về bảo mật lớp vật lý của hệ thống hướng xuống với hai người dùng ở hai vị trí khác nhau. Sau cùng, chúng tôi tiến hành mô phỏng để thấy sự đúng đắn của các công thức này, từ đó có thể kết luận rằng khi sử dụng mảng anten trong mạng NOMA bảo mật lớp vật lý đã được cải thiện một cách đáng kể.

## Lời cảm ơn

This work belongs to the project grant No: T2022-53 funded by Ho Chi Minh City University of Technology and Education, Vietnam.

## Xung đột lợi ích

Các tác giả tuyên bố không có xung đột lợi ích trong bài báo này.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] T. N. Ha, N. V. Phuc, D. P. H. Trang, and T. T. Q. Nhu, "Enhancing physical layer security of NOMA wireless networks by array antenna," *Journal of Science and Technology*, ISSN: 1859-1531, vol.19, no.11, 2021.
- [2] J. G. Andrews et al., "What Will 5G Be?," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 32, no. 6, pp. 1065-1082, Jun. 2014.
- [3] D. Wang, B. Bai, W. Zhao, and Z. Han, "A survey of optimization approaches for wireless physical layer security," *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 21, no. 2, pp. 1878-1911, 2019.

- [4] P. K. Hota, S. Thapar, D. Mishra, R. Saini, and A. Dubey, "Ergodic performance of downlink untrusted NOMA system with imperfect SIC," *IEEE Communications Letters*, vol. 26, no. 1, pp. 23–26, 2022.
- [5] X. W. Li, Z. Xie, Z. Chu, V. G. Menon, S. Mumtaz, and J. H. Zhang, "Exploiting benefits of IRS in wireless powered NOMA networks," *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, vol. 6, no. 1, 2022
- [6] A. Akash, R. Chaurasiya, S. Rai, and A. K. Jagannatham, "Outage probability analysis for NOMA downlink and uplink communication systems with generalized fading channels," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 220461–220482, 2020.
- [7] Y. Liu, Z. Qin, M. Elkashlan, Y. Gao, and L. Hanzo, "Enhancing the Physical Layer Security of Non-Orthogonal Multiple Access in Large-Scale Networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 16, no. 3, pp. 1656-1672, 2017.
- [8] Z. Tang, T. Hou, Y. Liu, J. Zhang, and L. Hanzo, "Physical Layer Security of Intelligent Reflective Surface Aided NOMA Networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 71, no. 7, pp. 7821-7834, 2022, doi: 10.1109/TVT.2022.3168392.
- [9] Ayaz, Z. Sheng, I. W. H. Ho, D. Tiany, and Z. Ding, "Blockchain-enabled FD-NOMA based Vehicular Network with Physical Layer Security," in *IEEE 95th Vehicular Technology Conference: (VTC2022-Spring)*, Helsinki, Finland, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/VTC2022-Spring54318.2022.9860421.
- [10] A. Mukherjee and A. L. Swindlehurst, "Robust beamforming for security in mimo wiretap channels with imperfect CSI," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 59, pp. 351–361, Jan. 2011.
- [11] Z. Sheng, H. D. Tuan, T. Q. Duong, and H. V. Poor, "Beamforming Optimization for Physical Layer Security in MISO Wireless Networks," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 66, no. 14, pp. 3710-3723, 2018.
- [12] J. Chen, L. Yang, and M. S. Alouini, "Physical Layer Security for Cooperative NOMA Systems," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 67, no. 5, pp. 4645-4649, 2018, doi: 10.1109/TVT.2017.2789223.
- [13] C. A. Balanis, *Antenna theory analysis and design*, third edition, Published by John Wiley & Sons, Inc, 2005.
- [14] B. C. Jung, S. W. Jeon, and S. H. Lee, "Successive Interference Cancellation With Feedback for Random Access Networks," *IEEE Communications Letters.*, vol. 21, no. 4, pp. 825 - 828, 2017.
- [15] N. Jaiswal, A. Pandey, S. Yadav, N. Purohit, and D. S. Gurjar, "Physical Layer Security Performance of NOMA-Aided Vehicular Communications Over Nakagami- $m$  Time-Selective Fading Channels With Channel Estimation Errors," *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*, vol. 4, pp. 72-100, 2023, doi: 10.1109/OJVT.2022.3222187.
- [16] A. Hyadi, Z. Rezki, and M. Alouini, "An Overview of Physical Layer Security in Wireless Communication Systems With CSIT Uncertainty," *IEEE Access*, vol. 4, pp. 6121-6132, 2016.



**Truong Ngoc Ha** received his B.S. degree in electrical engineering from Ho Chi Minh City University of Technology, Vietnam in 2004 and the M.E degree in electrical engineering Ho Chi Minh City University of Technology and Education, Vietnam in 2013. He is currently a lecturer at Department of Computer and Communications Engineering, Ho Chi Minh City University of Technology and Education, Vietnam. His research interests include antenna and wave propagation, wireless communication systems, and artificial intelligence.

Email: [hatn@hcmute.edu.vn](mailto:hatn@hcmute.edu.vn). ORCID:  <https://orcid.org/0009-0001-5296-8393>



**Nguyen Van Phuc** received his B.S. degree and M.S. degree from Ho Chi Minh City University of Technology and Education (HCMUTE), Vietnam in 2008 and 2011 respectively. He is currently a lecturer at Department of Computer and Communications Engineering, Ho Chi Minh City University of Technology and Education, Vietnam. His research interests include applications of communication systems, information coding and artificial intelligence. Email: [phucnv@hcmute.edu.vn](mailto:phucnv@hcmute.edu.vn).



**Dang Phuoc Hai Trang** is a lecturer at Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Ho Chi Minh City University of Technology and Education (HCMUTE), Vietnam, since 2007. He received his B.Eng and M.Eng. degrees in Electronic Engineering from HCMC University of Technology and Education in 2007 and 2011. His research focuses on Internet of things, artificial intelligence, and deep learning. Email: [trangdph@hcmute.edu.vn](mailto:trangdph@hcmute.edu.vn).



**Tran Thi Quynh Nhu** received the B.S., M.S. degrees in electronic engineering from the Ho Chi Minh City University of Technology and Education, Ho Chi Minh City, Vietnam, in 2008 and 2014 respectively. She is currently a Lecturer with the Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Ho Chi Minh City University of Technology and Education. Her current research interests include power converters for renewable energy systems, image processing, and artificial intelligence. Email: [nhuttq@hcmute.edu.vn](mailto:nhuttq@hcmute.edu.vn).