

Phân tích hiệu năng phát hiện phương tiện bay không người lái bất hợp pháp

Detection Performance Analysis of Illegitimate UAV

Võ Nhân Văn^{a,b*}, Đặng Ngọc Cường^{a,b}
Nhan Van Vo^{a,b*}, Ngọc Cuong Dang^{a,b}

^a*Viện Nghiên cứu và Phát triển Công nghệ Cao, Trường Đại học Duy Tân, Đà Nẵng, Việt Nam*

^b*Khoa Công nghệ thông tin, Trường Đại học Duy Tân, Đà Nẵng, Việt Nam*

^a*Institute of Research and Development, Duy Tan University, Da Nang, 550000, Vietnam*

^b*Faculty of Information Technology, Duy Tan University, Da Nang, 550000, Vietnam*

(Ngày nhận bài: 01/6/2020, ngày phản biện xong: 18/6/2020, ngày chấp nhận đăng: 27/8/2020)

Tóm tắt

Trong bài báo này, vấn đề hiệu năng phát hiện phương tiện bay không người lái (UAV) không hợp pháp (UI) trong kiến trúc Internet vạn vật được khảo sát. Cụ thể, phương pháp phát hiện xâm nhập được chia thành 2 bước như sau: 1) 2 UAV hợp pháp được hợp tác tạo thành một dạng của hệ thống phát hiện xâm nhập (IDS) để phát hiện sự có mặt của UI bằng cách sử dụng Fast Fourier Transform Analysis (FFT) và 2) Những UAV hợp pháp này sau đó dò các góc để xác định UI bằng cách sử dụng giải pháp angle-side-angle. Theo đó, công thức dạng tường minh của xác suất phát hiện UI được tìm ra để phân tích hiệu năng phát hiện. Mô phỏng Monte Carlo được triển khai để kiểm tra phương pháp của chúng tôi.

Từ khóa: Phương tiện bay không người lái; Xác suất phát hiện; Kênh truyền Nakagami-*m*.

Abstract

In this paper, the detection performance of illegitimate unmanned aerial vehicle (UAV) (UI) in Internet of Things (IoT) architecture is investigated. In particular, the detection approach is divided into 2 steps: 1) two legitimate UAVs are cooperated as a form of intrusion detection system (IDS) to detect the presence of UI by using Fast Fourier Transform Analysis (FFT) and 2) these UAVs then scan the angles to identify the UI by using angle-side-angle solution. Accordingly, the closed-form of detection probability of UI is derived to analyze the detection performance. The Monte Carlo simulation is employed to verify our approach.

Keywords: UAV; detection probability; Nakagami-*m*.

1. Giới thiệu

Hiện nay, Internet vạn vật (IoT) là một trong những công nghệ mới nổi, thu hút được nhiều nhà khoa học nghiên cứu [1]-[3]. IoT kết nối số lượng lớn thiết bị nhằm thu thập và gửi dữ liệu

với nhau nhằm nhiều mục đích và ứng dụng khác nhau như thành phố thông minh, nông nghiệp thông minh, và sản xuất thông minh [3]. Bên cạnh đó, thiết bị không người lái (UAV) được xem xét như là một giải pháp hứa hẹn cho

*Corresponding Author: Institute of Research and Development, Duy Tan University, Da Nang, 550000, Vietnam; Faculty of Information Technology, Duy Tan University, Da Nang, 550000, Vietnam.
Email: vonhanvan@dtu.edu.vn

các ứng dụng như giám sát trên không, kiểm soát giao thông, viễn thông, và đặc biệt là tìm kiếm cứu hộ [4].

Do đó, UAV có thể góp phần khắc phục những hạn chế của cơ sở hạ tầng trên mặt đất của hệ thống IoT, tức là IoT có thể hưởng lợi từ UAV trong các tình huống trở ngại (ví dụ: giao tiếp bị chặn bởi rừng, núi và nhà cao tầng) vì đặc tính di động của nó [5]. Ví dụ, các tác giả trong [6] đã đề xuất trường hợp sử dụng UAV như là base station có khả năng bay vào những nơi nguy hiểm để thu thập cũng như truyền thông tin.

Tuy nhiên, do đặc tính truyền thông tin quảng bá của mạng không dây, giả sử như UAV là một kẻ nghe lén có thể thu thập thông tin thì ranh giới hệ thống IoT sẽ bị vi phạm và tài nguyên dữ liệu sẽ bị xâm phạm [7]. Ví dụ, mô hình truyền thông tin trong mạng không dây với sự hiện diện của các UAV nghe lén đã được trình bày trong [8]. Các tác giả đã phân tích xác suất kết nối an toàn của các trạm mặt đất hợp pháp để đánh giá hiệu năng bảo mật của mạng.

Tuy nhiên, bài báo này đã không đề cập tới vấn đề phát hiện các UAV nghe lén bằng giả thuyết các vị trí này đã được xác định. Điều này là khó thuyết phục bởi vì các kẻ tấn công thông thường không báo trước vị trí của chúng. Do đó, hệ thống IoT cần phải có cách thức phát hiện để chống lại sự tấn công từ bên ngoài của UAV bất hợp pháp. Các tác giả trong [9] đã giới thiệu phương pháp để xác định vị trí của UAV không xác định bằng cách sử dụng hai máy trạm mặt đất như là một dạng của hệ thống phát hiện xâm nhập (IDS). Tuy nhiên, bài báo này không đề cập đến việc khảo sát hiệu năng phát hiện UAV cũng như sử dụng trạm mặt đất cố định. Do đó, bài báo này đề xuất một mô hình IDS sử dụng hai UAVs hợp pháp hợp tác tạo thành một dạng của hệ thống IDS để phát hiện sự có mặt của UAV bất hợp pháp.

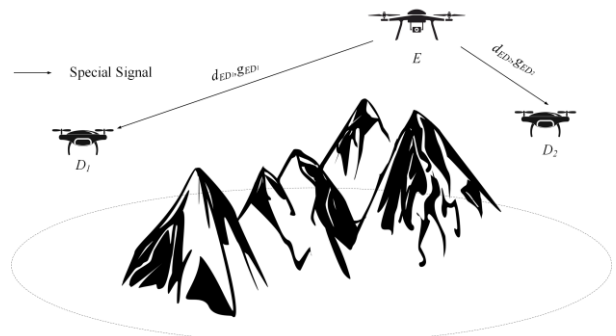
2. Hiệu năng phát hiện UI

2.1. Mô hình

Chúng tôi xem xét mô hình kiến trúc phát hiện xâm nhập như hình 1. Trong đó, một UAV không xác định (UI) E muốn tham gia vào hệ thống hợp pháp nhằm lấy cắp thông tin. Do đó, 2 UAVs hợp pháp (UD) D_1 và D_2 được sử dụng để hợp tác tạo thành một dạng của hệ thống IDS nhằm xác định UI. Mỗi UAV hợp pháp được trang bị hai antennas: một antenna đa hướng dùng để phát hiện sự có mặt của tín hiệu từ UAV và một antenna định hướng cơ học (mechanically-agile directional) dùng để xác định hướng của UAV [9]. Trong đó, d_{ED_1} và d_{ED_2} lần lượt là khoảng cách từ E tới D_1 và E tới D_2 ; và g_{ED_1} và g_{ED_2} lần lượt là hệ số kênh truyền từ E tới D_1 và E tới D_2 . Không mất tính tổng quát, giả sử các kênh truyền là độc lập với nhau và được phân bố theo mô hình Nakagami- m [10]. Do đó, hàm phân phối tích lũy (CDF) của kênh truyền $|g_{XY}|^2$ được biểu diễn như sau:

$$F_{|g_{XY}|^2}(x) = 1 - \sum_{j=0}^{m_{XY}-1} \left(\frac{m_{XY} x}{\Omega_{XY}} \right)^j \frac{1}{j!} \exp\left(-\frac{m_{XY} x}{\Omega_{XY}}\right), \quad (1)$$

trong đó $\Omega_{XY} = E[|g_{XY}|^2]$ và m_{XY} là tham số Nakagami của kênh truyền $|g_{XY}|^2$.



Hình 1. Mô hình 2 UAVs phát hiện xâm nhập

Theo [8], độ suy hao đường truyền của kênh truyền trên không (air-to-air) được biểu diễn như sau:

$$\bar{L}_a = \mu_a d_a^2, \quad (2)$$

trong đó $\mu_a = (4\pi f / c)^2$, $a \in \{ED_1, ED_2\}$, $d_a \in \{d_{ED_1}, d_{ED_2}\}$, c là tốc độ ánh sáng và f là tần số sóng mang.

2.2. Giao thức

Chúng tôi giả sử UI sẽ trao đổi thông tin với một số thiết bị khác, ví dụ như UI phản hồi thông tin với bộ điều khiển hoặc gửi các thông tin đánh cắp ra thiết bị bên ngoài. Do đó, chúng tôi đề xuất giao thức phát hiện UI gồm 2 bước như sau:

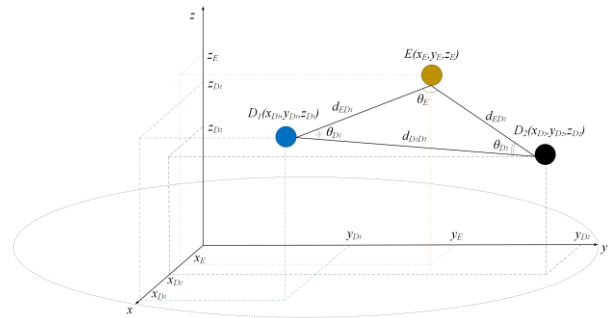
1) Hai UDs đều trang bị một Radio Frequency (RF) receiver kết nối với antenna đa hướng và được bật trạng thái lắng nghe. Khi tín hiệu RF được thu thập, Fast Fourier Transform Analysis (FFT) được sử dụng để xác định tín hiệu UI có hay là không [9]. Chúng tôi giả sử trường hợp UI được phát hiện, điều này có nghĩa là D_1 và D_2 nhận được tín hiệu từ UI là

$$y_{D_1} = \sqrt{\frac{P_E}{L_{ED_1}}} x_E g_{ED_1} + n_{D_1}, \tag{3}$$

$$y_{D_2} = \sqrt{\frac{P_E}{L_{ED_2}}} x_E g_{ED_2} + n_{D_2}, \tag{4}$$

trong đó $n_{D_1}, n_{D_2} \sim \text{CN}(0, N_0)$. Ở đây, do UI chưa được xác định, nên trạng thái kênh truyền thông tin không hoàn hảo (imperfect CSI) được xem xét, tức là $g_{ED_1} = g_{ED_1}^* + e_{ED_1}$ và $g_{ED_2} = g_{ED_2}^* + e_{ED_2}$; trong đó $g_{ED_1}^*$ và $g_{ED_2}^*$ lần lượt là hệ số kênh được ước tính bằng minimum mean square error (MMSE) cho g_{ED_1} và g_{ED_2} ; và $e_{ED_1}, e_{ED_2} \sim \text{CN}(0, \Omega_e)$ với Ω_e là tính chính xác của ước tính kênh truyền.

2) Hai UAVs hợp pháp bật sang trạng thái dò tìm ở antenna định hướng cơ học để xác định UI bằng hai quá trình như sau: đầu tiên, góc tới của E từ D_1 và D_2 được xác định một khi tín hiệu FFT được so khớp mạnh nhất. Sau đó, giải pháp angle-side-angle được áp dụng để tính vị trí của UI (hình 2) như sau: Giả sử tọa độ 3-D của hai UAVs hợp pháp được biết là $D_1(x_{D_1}, y_{D_1}, z_{D_1})$ và $D_2(x_{D_2}, y_{D_2}, z_{D_2})$. Lưu ý, D_1, D_2 , và điểm E vừa xác định dựa trên góc tới từ D_1 và D_2 sẽ tạo thành một mặt phẳng duy nhất. Do đó, UI được xác định bởi khoảng cách từ D_1 và D_2 theo công thức sau [9]:



Hình 2. Xác định UI

$$\frac{d_{ED_1}}{\sin(\theta_{D_2})} = \frac{d_{ED_2}}{\sin(\theta_{D_1})} = \frac{d_{D_1D_2}}{\sin(\theta_E)} \tag{5}$$

$$\theta_{D_1} + \theta_{D_2} + \theta_E = 180^\circ,$$

trong đó θ_{D_1} và θ_{D_2} đã được xác định từ quá trình trước; và

$$d_{D_1D_2} = \sqrt{(x_{D_1} - x_{D_2})^2 + (y_{D_1} - y_{D_2})^2 + (z_{D_1} - z_{D_2})^2}.$$

Giải công thức trên, chúng ta sẽ tìm ra được khoảng cách từ D_1 và D_2 đến E . Ngoài ra, tỷ số tín hiệu sóng trên nhiễu (SNR) để giải mã tín hiệu đặc biệt từ E tại D_1 và D_2 được biểu diễn như sau [11]:

$$\gamma_{ED_1} = \frac{P_E |g_{ED_1}^*|^2}{L_{ED_1} (P_E \Omega_E + N_0)}, \tag{6}$$

$$\gamma_{ED_2} = \frac{P_E |g_{ED_2}^*|^2}{L_{ED_2} (P_E \Omega_E + N_0)}. \tag{7}$$

2.3. Xác suất phát hiện UI

Xác suất phát hiện UAV được định nghĩa là xác suất giải mã thành công tín hiệu của UI tại D_1 hoặc D_2 , tức là

$$O = \Pr\{\max\{C_{ED_1}, C_{ED_2}\} > \gamma_{th}\}, \tag{8}$$

trong đó O là xác suất phát hiện UI; $\Pr\{\cdot\}$ là hàm xác suất; γ_{th} là ngưỡng phát hiện thành công; và C_{ED_1} và C_{ED_2} được định nghĩa là

$$C_{ED_1} = B \log_2(\gamma_{ED_1} + 1), \tag{9}$$

$$C_{ED_2} = B \log_2(\gamma_{ED_2} + 1), \tag{10}$$

trong đó B là băng thông đường truyền. Dựa theo lý thuyết xác suất, công thức (7) được biến đổi như sau:

$$O = 1 - \Pr\{\max\{C_{ED_1}, C_{ED_2}\} \leq \gamma_{th}\}. \tag{11}$$

Hơn nữa, bởi vì các biến ngẫu nhiên là độc lập nên xác suất phát hiện UI được biểu diễn là

$$O = 1 - \Pr\{\gamma_{ED_1} \leq \delta_{th}\} \times \Pr\{\gamma_{ED_2} \leq \delta_{th}\}, \quad (12)$$

trong đó $\delta_{th} = 2^{\gamma_{th}/B} - 1$. Tiếp theo, thay (6) và (7) vào (12) ta có

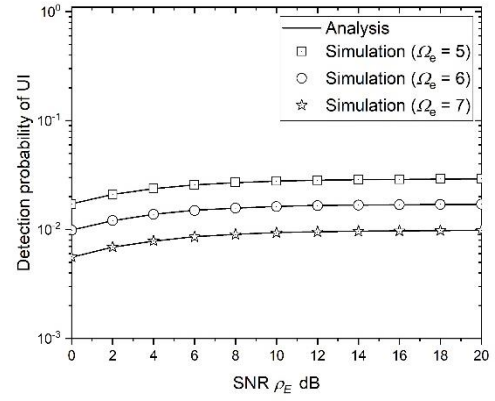
$$O = 1 - \Pr\left\{ |g_{ED_1}^*|^2 \leq \frac{\delta_{th} \bar{L}_{ED_1} (\rho_E + 1)}{\rho_E} \right\} \times \Pr\left\{ |g_{ED_2}^*|^2 \leq \frac{\delta_{th} \bar{L}_{ED_2} (\rho_E + 1)}{\rho_E} \right\}, \quad (13)$$

trong đó $\rho_E = P_E / N_0$. Cuối cùng, dựa trên định nghĩa CDF ở công thức (1) và qua một số bước tính toán, xác suất phát hiện UI của hệ thống xem xét được biểu diễn ở dạng tường minh là:

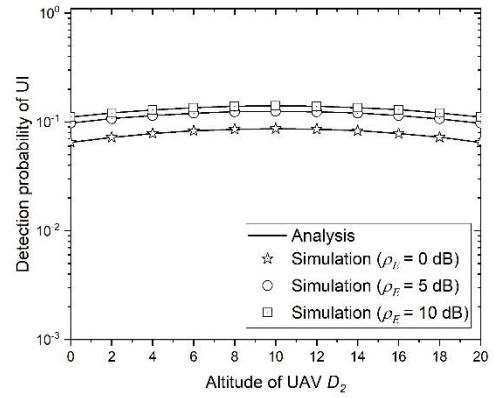
$$O = 1 - \left\{ 1 - \sum_{j=0}^{m_{ED_1}-1} \left(\frac{m_{ED_1} \delta_{th} \bar{L}_{ED_1} (\rho_E + 1)}{\Omega_{ED_1} \rho_E} \right)^j \times \frac{1}{j!} \exp\left(-\frac{m_{ED_1} \delta_{th} \bar{L}_{ED_1} (\rho_E + 1)}{\Omega_{ED_1} \rho_E}\right) \right\} \times \left\{ 1 - \sum_{j=0}^{m_{ED_2}-1} \left(\frac{m_{ED_2} \delta_{th} \bar{L}_{ED_2} (\rho_E + 1)}{\Omega_{ED_2} \rho_E} \right)^j \times \frac{1}{j!} \exp\left(-\frac{m_{ED_2} \delta_{th} \bar{L}_{ED_2} (\rho_E + 1)}{\Omega_{ED_2} \rho_E}\right) \right\}. \quad (14)$$

3. Kết quả và thảo luận

Không mất tính tổng quát, chúng tôi lựa chọn các thông số sau đây để cài đặt cho phần mô phỏng và phân tích [9], [10]: $\rho_E \in [0, 20]$, $\Omega_e \in \{5, 6, 7\}$, $B = 10^6$ Hz, $\gamma_{th} = 10^6$ bps, $m_{ED_1} = m_{ED_2} = 2$, $\theta_{D_1} = 30^\circ$, $\theta_{D_2} = 50^\circ$. Dựa trên các thông số này, chúng tôi khảo sát xác suất phát hiện UI qua hai hình 3 và 4. Qua quan sát, các đường mô phỏng và phân tích trùng khớp nhau, điều này có nghĩa phương pháp phân tích của chúng tôi là hoàn toàn chính xác.



Hình 3. Sự ảnh hưởng của SNR tại E và tính chính xác ước tính kênh truyền lên xác suất phát hiện UI



Hình 4. Sự ảnh hưởng của chiều cao UAV D2 và SNR tại E lên xác suất phát hiện UI

Quan sát hình 3, chúng ta có các kết quả như sau:

- Khi tăng SNR tại E thì xác suất phát hiện UI càng tăng. Điều này được giải thích là vì khi công suất phát tại UI càng lớn thì khả năng giải mã thông tin tại các UAVs hợp pháp càng dễ dàng. Điều này đồng nghĩa với việc hiệu năng phát hiện UI tăng lên.

- Xác suất phát hiện UI giảm khi tăng Ω_e . Lý do là khi tăng Ω_e tức là tính chính xác ước tính kênh truyền không hoàn hảo giảm. Điều này dẫn tới việc giải mã thành công các tính hiệu đặc biệt của các UAVs hợp pháp sẽ giảm xuống. Kết quả là hiệu năng UI sẽ giảm.

Dựa trên hình 4, chúng ta quan sát được một số kết quả như sau:

- Khi tăng chiều cao của một UAV hợp pháp (không mất tính tổng quát chúng tôi tăng chiều cao của UAV D2), xác suất phát hiện UI sẽ

tăng. Tuy nhiên khi chiều cao quá lớn thì xác suất phát hiện UI lại giảm. Điều này có nghĩa là tồn tại một điểm tối ưu của chiều cao UAV làm cho hiệu năng phát hiện UI là tốt nhất. Lý do là bởi vì khi chiều cao của UAV hợp pháp quá thấp hoặc quá cao thì khoảng cách tới UI càng xa, do đó khả năng giải mã thành công trong hai trường hợp này là khó khăn. Do đó, hiệu năng sẽ giảm khi chiều cao của UAV là quá thấp hoặc quá cao.

- Một lần nữa chúng ta thấy khi tăng SNR tại E từ 0 đến 15 dB thì hiệu năng phát hiện UI sẽ tăng. Điều này đã được giải thích ở hình 3.

4. Kết luận

Trong bài báo này, hiệu năng phát hiện UAV không xác định được khảo sát. Một dạng của hệ thống IDS sử dụng hai UAVs hợp pháp đã được đề xuất nhằm xác định UAV bất hợp pháp. Theo đó, dựa trên SNR của việc giải mã thành công tín hiệu từ UI tại hai UAVs hợp pháp, công thức dạng tường minh của xác suất phát hiện UAV không hợp pháp được trình bày. Ngoài ra, sự ảnh hưởng của SNR tại UI, tính chính xác của ước tính kênh truyền và chiều cao của UAV hợp pháp lên hiệu năng phát hiện UI đã được khảo sát. Kết luận chỉ ra rằng tồn tại chiều cao tối ưu của UAV nhằm tăng hiệu năng phát hiện UI.

Tài liệu tham khảo

- [1] Z. Sheng, C. Mahapatra, C. Zhu, and V. C. M. Leung, "Recent advances in industrial wireless sensor networks toward efficient management in IoT," *IEEE Access*, vol. 3, pp. 622–637, May 2015.
- [2] B. Ji, Y. Li, B. Zhou, C. Li, K. Song, and H. Wen, "Performance analysis of UAV relay assisted IoT communication network enhanced with energy harvesting," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 38 738–38 747, 2019.
- [3] J. M. Williams, R. Khanna, J. P. Ruiz-Rosero, G. Pisharody, Y. Qian, C. R. Carlson, H. Liu, and G. Rmirez-Gonzalez, "Weaving the wireless web: Toward a low-power, dense wireless sensor network for the industrial IoT," *IEEE Microwave Mag.*, vol. 18, no. 7, pp. 40–63, Oct. 2017.
- [4] Y. Zeng, Q. Wu, and R. Zhang, "Accessing from the sky: A tutorial on UAV communications for 5G and beyond," *Proc. of the IEEE.*, vol. 107, no. 12, pp. 2327–2375, 2019.
- [5] M. Mozaffari, W. Saad, "Unmanned aerial vehicle with underlaid device-to-device communications: Performance and tradeoffs," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 15, no. 6, pp. 3949–3963, Jun. 2016.
- [6] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, Y.-H. Nam, and M. Debbah, "A tutorial on UAV for wireless network: Application, challenges, and open problems," *IEEE Commun. surveys & tutorials*, vol. 21, no. 3, pp. 2334–2360, Mar. 2019.
- [7] X. Sun, D. W. K. Ng, Z. Ding, Y. Xu, and Z. Zhong, "Physical layer security in UAV systems: Challenges and opportunities," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 26, no. 5, pp. 40–47, Oct. 2019.
- [8] J. Tang, G. Chen, and J. Coon, "Secrecy performance analysis of wireless communications in the presence of UAV jammer and randomly located UAV eavesdroppers," *IEEE Trans. Inf. Forensics Secur.*, vol. 14, no. 11, pp. 3026–3041, Apr. 2019.
- [9] P. Nguyen, T. Kim, D. H. L. Miao, E. Kenneally, D. Massey, E. Frew, R. Han, and T. Vu, "Towards RF-based localization of a drone and its controller," in *Proc. Micro Aerial Veh. Networks, Sys., and Applicat.*, Seoul, Korea, Jun. 2019, pp. 21–26.
- [10] D.-D. Tran, D.-B. Ha, V. N. Vo, C. So-In, H. Tran, T. G. Nguyen, Z. Baig, and S. Sanguanpong, "Performance analysis of DF/AF cooperative MISO wireless sensor networks with NOMA and SWIPT over Nakagami-m fading," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 56 142–56 161, Oct. 2018.
- [11] Y. Chen, N. Zhao, and Z. D. M.-S. Alouini, "Multiple UAVs as relays: Multi-hop single link versus multiple dual-hop links," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 17, no. 9, pp. 6348–6359, Aug. 2018.