

PHÂN TÍCH XÁC SUẤT DỪNG CỦA VIỆC LỰA CHỌN UAV THU THẬP NĂNG LƯỢNG

Hồ Văn Khương

Trường Đại học Bách khoa - ĐHQG TP.HCM

Email: hvkhuong@hcmut.edu.vn

Ngày nhận bài: 16/6/2020; Ngày chấp nhận đăng: 17/7/2020

TÓM TẮT

Bài báo này phân tích hiệu năng của hệ thống truyền thông chuyển tiếp được hỗ trợ bởi các thiết bị bay không người lái (Unmanned Aerial Vehicle - UAV) trong đó chỉ một UAV trong số nhiều UAV được chọn làm thiết bị chuyển tiếp. Tất cả các UAV đều có khả năng thu thập năng lượng từ tín hiệu tần số vô tuyến. Trước tiên, công thức xác suất dừng dạng tường minh chính xác được đề xuất. Sau đó, mô phỏng Monte-Carlo được tiến hành để xác nhận độ chính xác của công thức được đề xuất. Cuối cùng, nhiều kết quả được cung cấp để minh họa ảnh hưởng của các thông số vận hành then chốt đến xác suất dừng của việc lựa chọn UAV.

Từ khóa: Xác suất dừng, UAV, thu thập năng lượng, truyền thông chuyển tiếp.

1. MỞ ĐẦU

Thiết bị bay không người lái (UAV) có lợi thế về tính cơ động cao, chi phí thấp và triển khai theo yêu cầu, nên đã được ứng dụng nhiều trong những năm gần đây, đặc biệt là trong lĩnh vực viễn thông [1]. Các UAV, có thể di chuyển và vận hành như các trạm gốc mini di động trên không, được sử dụng để cung cấp các dịch vụ không dây [2]. Không giống như các thiết bị chuyển tiếp truyền thống được cố định tại các vị trí cụ thể, UAV có thể thay đổi vị trí của chúng để cung cấp vùng phủ sóng lớn [3]. Hơn nữa, việc sử dụng UAV gần đây đã nổi lên để đáp ứng nhu cầu lưu lượng cục bộ cao trong các mạng thông tin di động thế hệ tiếp theo [4].

Năng lượng có sẵn của UAV để cung cấp năng lượng cho các mạch điện tử onboard bị hạn chế do sử dụng pin làm nguồn năng lượng. Giải pháp cho vấn đề năng lượng bị hạn chế của các UAV là trang bị cho các UAV khả năng tự thu thập năng lượng trong các tín hiệu tần số vô tuyến để tự cấp năng lượng cho hoạt động của chúng [5]. Hơn nữa, trong trường hợp có nhiều UAV thì làm thế nào để chọn một UAV làm thiết bị chuyển tiếp cho việc truyền thông tin cậy là vấn đề rất đáng quan tâm hiện nay.

Một số công trình đã tập trung vào việc xây dựng nhóm UAV để tăng xác suất kết nối đầu cuối [6-8]. Trong nghiên cứu của Abualhaol & Matalgah, một nhóm slave UAV phát thông tin mà được chuyển tiếp bởi master UAV đến máy thu trên mặt đất, xác suất dừng được phân tích cho kênh truyền Nakagami- m [6]. Theo Chen *et al.*, nhiều UAV được khai thác như các thiết bị chuyển tiếp trong hai cấu hình mạng (đơn tuyến nhiều chặng và nhiều tuyến hai chặng) [7]. Tỷ lệ bit lỗi và xác suất dừng của hệ thống chuyển tiếp được hỗ trợ bởi các UAV đã được phân tích [7]. Ngoài ra, vị trí tối ưu của UAV cũng được xác định. Trong nghiên cứu của Hanna *et al.* [8], khoảng cách từ nhóm UAV đến thiết bị nguồn đa ăng-ten và thiết bị đích được tối ưu nhằm tối đa dung lượng kênh truyền.

Khác với các nghiên cứu trước [6-8], bài báo này chỉ chọn một UAV để chuyển tiếp

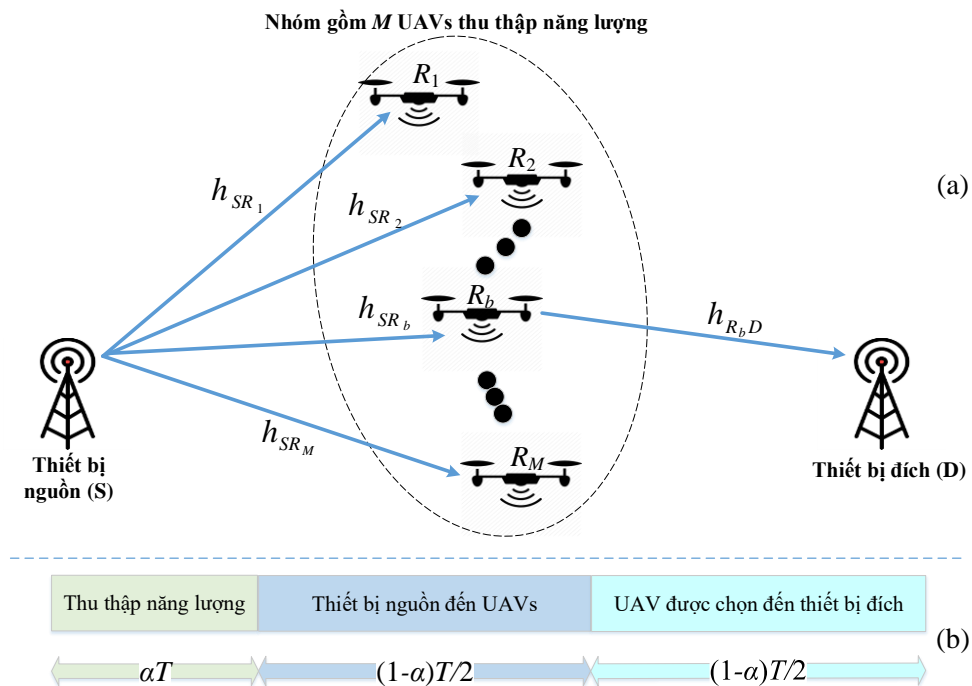
thông tin từ thiết bị nguồn trên mặt đất đến thiết bị đích trên mặt đất và tất cả các UAV đều có khả năng thu thập năng lượng từ các tín hiệu của thiết bị nguồn. Lựa chọn UAV có khả năng thu thập năng lượng có thể giảm thiểu các yêu cầu về đồng bộ tín hiệu, băng thông truyền và công suất bị hạn chế của các UAV.

Sau đây là những đóng góp chính của nghiên cứu này:

- Đề xuất một phương pháp lựa chọn UAV mà chỉ chọn một UAV làm thiết bị chuyển tiếp từ một nhóm UAV, tất cả đều có khả năng thu thập năng lượng từ tín hiệu tần số vô tuyến cho truyền tin cậy mà không chịu các áp lực lớn về băng thông phát, tiêu thụ năng lượng, và đồng bộ tín hiệu.
- Đề xuất một công thức ở dạng tường minh chính xác về xác suất dừng (Outage Probability - OP) cho việc lựa chọn UAV thu thập năng lượng có xét đến suy hao đường truyền và fading Rayleigh.
- Cung cấp nhiều kết quả để có cái nhìn sâu sắc về tác động của các thông số vận hành chính như công suất phát, hệ số chia thời gian và hiệu suất chuyển đổi năng lượng của UAV đến độ tin cậy truyền tin của hệ thống truyền thông chuyển tiếp được hỗ trợ bởi các UAV.

Bài viết tiếp tục như sau: phần 2 trình bày mô hình hệ thống. Sau đó, OP được phân tích chi tiết trong phần 3. Tiếp theo, mô phỏng Monte-Carlo được thực hiện để xác minh tính chính xác của phân tích lý thuyết trong phần 4. Phần này cũng cung cấp các kết quả khác nhau về hiệu năng của việc lựa chọn UAV thu thập năng lượng theo các thông số vận hành chính. Cuối cùng, phần 5 trình bày kết luận của nghiên cứu này.

2. MÔ HÌNH HỆ THỐNG



Hình 1. Mô hình hệ thống

Xét hệ thống truyền thông chuyển tiếp được hỗ trợ bởi các UAV như được mô tả trong Hình 1(a), trong đó thiết bị nguồn trên mặt đất S giao tiếp với thiết bị đích trên mặt đất D .

Giả sử rằng truyền thông trực tiếp giữa S và D không khả thi do một số nguyên nhân như đường truyền xa, fading, shadowing, ... Do đó, truyền thông giữa S và D cần sự trợ giúp của UAV tốt nhất (ký hiệu là R_b), được chọn từ M UAV có sẵn mà hoạt động như các thiết bị chuyển tiếp có khả năng thu thập năng lượng. Đặt UAV thứ i là R_i , trong đó $i \in \Phi_R = \{1, 2, \dots, M\}$. Khi đó, UAV tốt nhất được định nghĩa là UAV có tỷ số tín hiệu trên nhiễu (Signal-to-Noise Ratio - SNR) từ tín hiệu nguồn lớn hơn SNR của bất kỳ UAV R_j nào khác với $j \in \Phi_R \setminus b$ để giải mã thành công nhất tín hiệu nguồn.

Giả sử rằng tất cả các kênh truyền là độc lập, phẳng và có phân bố Rayleigh và không thay đổi trong mỗi lần truyền nhưng thay đổi độc lập từ lần truyền này đến lần truyền khác. Hệ số kênh truyền của tuyến u - v được ký hiệu là h_{uv} , trong đó $u \in \{S, R_i\}$ và $v \in \{R_i, D\}$. Khi đó, hàm mật độ xác suất (Probability Density Function - PDF) và hàm phân phối tích lũy (Cumulative Distribution Function - CDF) của độ lợi kênh truyền của tuyến u - v lần lượt là

$$f_{|h_{uv}|^2}(x) = \frac{1}{\bar{\gamma}_{uv}} e^{-\frac{x}{\bar{\gamma}_{uv}}} \quad (1)$$

$$F_{|h_{uv}|^2}(x) = 1 - e^{-\frac{x}{\bar{\gamma}_{uv}}} \quad (2)$$

trong đó: $x \geq 0$ và $\bar{\gamma}_{uv} = \Xi\{|h_{uv}|^2\}$ là giá trị trung bình của biến ngẫu nhiên $|h_{uv}|^2$ mà còn được gọi là công suất fading của tuyến u - v ; Ξ là toán tử kỳ vọng.

Tính đến suy hao đường truyền [7], công suất fading của tuyến u - v có thể được mô hình là $\bar{\gamma}_{uv} = \kappa d_{uv}^{-\tau}$, trong đó $\kappa = (4\pi f_c / c)^{-2}$, τ là số mũ suy hao đường truyền, d_{uv} là khoảng cách của tuyến u - v , f_c là tần số sóng mang [Hz] và $c = 3 \times 10^8$ [m/s] là tốc độ ánh sáng.

Với thực tế là năng lượng có sẵn của UAV để cung cấp năng lượng cho các mạch điện tử onboard bị hạn chế do sử dụng pin như một nguồn năng lượng, các UAV nên tự cung cấp năng lượng bằng cách thu thập năng lượng từ tín hiệu tần số vô tuyến của thiết bị nguồn và sử dụng năng lượng thu thập được để khuếch đại và chuyển tiếp tín hiệu nhận được đến thiết bị đích. Như đã thấy trong Hình 1(b), tổng thời gian T để truyền tin từ thiết bị nguồn đến thiết bị đích được chia thành 3 giai đoạn. Trong suốt giai đoạn 1 kéo dài αT với $0 < \alpha < 1$ là hệ số chia thời gian, các UAV thu thập năng lượng từ tín hiệu tần số vô tuyến của thiết bị nguồn. Năng lượng mà UAV R_i , $i \in \Phi_R$, thu hoạch được trong giai đoạn này là $EH_{R_i} = \eta \alpha TP_S |h_{SR_i}|^2$, trong đó P_S biểu thị công suất phát của thiết bị nguồn, η là hiệu suất chuyển đổi năng lượng, h_{SR_i} là hệ số kênh truyền của tuyến S - R_i . Trong giai đoạn 2 kéo dài $(1-\alpha)T/2$, thiết bị nguồn phát tín hiệu x_S đến các UAV. Ở cuối giai đoạn này, UAV tốt nhất R_b được chọn theo tiêu chí đã đề cập ở đầu phần này. UAV tốt nhất hoạt động như thiết bị chuyển tiếp để khuếch đại tín hiệu nguồn và phát tín hiệu được khuếch đại đến thiết bị đích trong giai đoạn 3 kéo dài $(1-\alpha)T/2$.

Trong giai đoạn 2, tín hiệu thu được tại UAV tốt nhất R_b có thể được biểu thị dưới dạng $y_{R_b} = x_S h_{SR_b} + n_{R_b}$, trong đó x_S là tín hiệu được truyền bởi S với công suất phát P_S , $P_S = \Xi\{|x_S|^2\}$, h_{SR_b} là hệ số kênh truyền của tuyến S - R_b và n_{R_b} là nhiễu tại R_b . Không mất tính tổng quát, nhiễu tại máy thu v với $v \in \{R_i, D\}$ và $i \in \Phi_R$ được giả sử là nhiễu Gaussian

trắng cộng (Additive White Gaussian Noise - AWGN) với giá trị trung bình bằng 0 và phương sai N_0 , nghĩa là $\Xi\{n_v\} = 0$ và $\Xi\{|n_v|^2\} = N_0$. Khi đó, SNR tức thời của tuyến S - R_b là

$$\gamma_{SR_b} = \psi |h_{SR_b}|^2 \quad (3)$$

trong đó $\psi = \frac{P_S}{N_0}$ là SNR được chuẩn hóa.

Trong giai đoạn 3, UAV tốt nhất R_b tiêu thụ năng lượng thu thập được để chuyển tiếp tín hiệu nguồn được khuếch đại x_{R_b} đến thiết bị đích với công suất phát như sau:

$$P_{R_b} = \frac{EH_{R_b}}{(1-\alpha)T/2} = \xi \eta P_S |h_{SR_b}|^2 \quad (4)$$

trong đó $\xi = \frac{2\alpha}{1-\alpha}$.

Tín hiệu nguồn được khuếch đại x_{R_b} , được truyền từ R_b đến D , và được biểu thị là $x_{R_b} = \beta y_{R_b}$, trong đó hệ số khuếch đại β được tính sao cho công suất phát của R_b là P_{R_b} trong (4), nghĩa là

$$\beta = \sqrt{\frac{\Xi\{|x_{R_b}|^2\}}{\Xi\{|y_{R_b}|^2\}}} = \sqrt{\frac{P_{R_b}}{P_S |h_{SR_b}|^2 + N_0}} \quad (5)$$

Do đó, tín hiệu nhận được tại thiết bị đích được biểu thị dưới dạng $y_D = x_{R_b} h_{R_b,D} + n_D = \beta x_S h_{SR_b} h_{R_b,D} + \beta h_{R_b,D} n_{R_b} + n_D$, trong đó $h_{R_b,D}$ là hệ số kênh truyền của tuyến R_b - D và n_D là nhiễu tại D . Khi đó, SNR của tuyến S - R_b - D có thể được thể hiện như sau:

$$\gamma_D = \frac{\beta^2 P_S |h_{SR_b}|^2 |h_{R_b,D}|^2}{\beta^2 |h_{R_b,D}|^2 N_0 + N_0} \quad (6)$$

Thay (5) vào (6) và sau một số phép đơn giản hóa, ta thu được

$$\gamma_D = \frac{P_S |h_{SR_b}|^2 |h_{R_b,D}|^2}{|h_{R_b,D}|^2 N_0 + \frac{N_0 P_S |h_{SR_b}|^2}{P_{R_b}} + \frac{N_0^2}{P_{R_b}}} \quad (7)$$

Vì công suất phát P_S lớn hơn nhiều so với công suất nhiễu N_0 nên $\frac{N_0^2}{P_{R_b}} = 0$. Do đó, (7)

có thể được tính gần đúng như sau:

$$\gamma_D = \frac{P_S |h_{SR_b}|^2 |h_{R_b,D}|^2}{|h_{R_b,D}|^2 N_0 + \frac{N_0 P_S |h_{SR_b}|^2}{P_{R_b}}} \quad (8)$$

Thay thế P_{R_b} trong (4) vào (8), ta thu được

$$\gamma_D = \frac{\xi \eta \psi |h_{SR_b}|^2 |h_{R_b,D}|^2}{\xi \eta |h_{R_b,D}|^2 + 1} \quad (9)$$

3. PHÂN TÍCH HIỆU NĂNG

Để đánh giá nhanh hiệu năng của việc lựa chọn UAV thu thập năng lượng, biểu thức dạng tường minh chính xác của xác suất dừng được suy ra trong phần này. Nhắc lại rằng trong số M UAV thì chỉ có UAV tốt nhất R_b được chọn theo nguyên tắc lựa chọn từng phần mà cung cấp SNR lớn nhất trên tất cả các tuyến S-UAV. Do đó, chỉ số của UAV tốt nhất có thể được ký hiệu là $b = \arg \max_{i \in \Phi_R} \gamma_{SR_i}$. Khi đó, SNR tại R_b được biểu diễn tương đương là

$\gamma_{SR_b} = \max_{i \in \Phi_R} \gamma_{SR_i}$. Để thuận tiện trình bày, tất cả các UAV được giả sử là đặt đồng nhất, dẫn

đến $\bar{\gamma}_{SR_1} = \bar{\gamma}_{SR_2} = \dots = \bar{\gamma}_{SR_M} = \bar{\gamma}_{SR}$ mà là công suất fading của tuyến S-UAV. Đặt

$X = \max_{i \in \Phi_R} |h_{SR_i}|^2$, ta đặt được thông kê của X trong bổ đề sau.

Bổ đề 1: CDF và PDF của X lần lượt được cho bởi

$$F_X(x) = \sum_{q=0}^M (-1)^q C_M^q e^{-\frac{q}{\bar{\gamma}_{SR}} x} \quad (10)$$

$$f_X(x) = \frac{M}{\bar{\gamma}_{SR}} \sum_{q=0}^{M-1} (-1)^q C_{M-1}^q e^{-\frac{q+1}{\bar{\gamma}_{SR}} x} \quad (11)$$

trong đó $x \geq 0$ và $C_M^q = \frac{M!}{q!(M-q)!}$ là hệ số nhị thức.

Chứng minh:

PDF của X được định nghĩa là

$$F_X(x) = \Pr\{X < x\} = \Pr\left\{\max_{i \in \Phi_R} |h_{SR_i}|^2 < x\right\} \quad (12)$$

Vì tất cả các tuyến S- R_i là độc lập nên (12) được viết lại thành

$$F_X(x) = \prod_{i=1}^M \Pr\left\{|h_{SR_i}|^2 < x\right\} = \left[F_{|h_{SR_i}|^2}(x)\right]^M \quad (13)$$

Thay CDF của $|h_{SR_i}|^2$ được cho trong (2) vào (13) với lưu ý rằng $\bar{\gamma}_{SR_i} = \bar{\gamma}_{SR}$ do phân bố đồng nhất của các UAV, ta thu được:

$$F_X(x) = \left(1 - e^{-\frac{x}{\bar{\gamma}_{SR}}}\right)^M \quad (14)$$

Sử dụng khai triển nhị thức $(a + b)^n = \sum_{m=0}^n C_n^m a^m b^{n-m}$, ta có thể thu gọn (14) xuống (10), hoàn thành một phần của chứng minh.

Lấy đạo hàm của (10) theo x , ta có thể thu được PDF của X giống hệt như (11), hoàn thành phần còn lại của chứng minh. ■

Dựa trên lý thuyết thông tin, SNR của tuyến S - R_b - D , γ_D , nên lớn hơn một mức ngưỡng γ_{th} để giữ kết nối đầu cuối tin cậy¹. Xác suất mà γ_D không lớn hơn mức ngưỡng đó được biết như xác suất dừng (OP), nghĩa là $OP = \Pr\{\gamma_D < \gamma_{th}\} = F_{\gamma_D}(\gamma_{th})$. Sử dụng γ_D trong (9), ta có thể viết lại $F_{\gamma_D}(\gamma_{th})$ ở dạng ngắn gọn như sau:

$$F_{\gamma_D}(\gamma_{th}) = \Pr\left\{\frac{\xi\eta XY}{\xi\eta Y + 1} < \frac{\gamma_{th}}{\psi}\right\} \quad (15)$$

trong đó $X = |h_{SR_b}|^2 = \max_{i \in \Phi_R} |h_{SR_i}|^2$ và $Y = |h_{R_b D}|^2$.

Bổ đề 2: Biểu thức dạng tường minh chính xác của xác suất dừng của việc lựa chọn UAV thu thập năng lượng được cho bởi

$$OP = F_{\gamma_D}(\gamma_{th}) = 1 - \frac{2M}{\psi \bar{\gamma}_{SR}} \sum_{q=0}^{M-1} (-1)^q C_{M-1}^q e^{-\frac{(q+1)\gamma_{th}}{\psi \bar{\gamma}_{SR}}} \sqrt{\frac{\psi \bar{\gamma}_{SR} \gamma_{th}}{(q+1)\xi\eta \bar{\gamma}_{RD}}} K_1\left(2\sqrt{\frac{(q+1)\gamma_{th}}{\xi\eta \psi \bar{\gamma}_{SR} \bar{\gamma}_{RD}}}\right) \quad (16)$$

trong đó $\bar{\gamma}_{R_1 D} = \bar{\gamma}_{R_2 D} = \dots = \bar{\gamma}_{R_M D} = \bar{\gamma}_{RD}$ và $K_1(\cdot)$ là hàm Bessel hiệu chỉnh bậc nhất loại hai.

Chứng minh:

Viết lại (15) như sau:

$$F_{\gamma_D}(\gamma_{th}) = \Pr\left\{\xi\eta Y \left(X - \frac{\gamma_{th}}{\psi}\right) < \frac{\gamma_{th}}{\psi}\right\} \quad (17)$$

Phương trình (17) có thể được đơn giản hóa bằng cách xem xét hai trường hợp của X là

$$F_{\gamma_D}(\gamma_{th}|X) = \begin{cases} \Pr\left\{Y < \frac{\gamma_{th}}{\xi\eta(\psi X - \gamma_{th})}\right\}, & X \geq \frac{\gamma_{th}}{\psi} \\ 1, & X < \frac{\gamma_{th}}{\psi} \end{cases} \quad (18)$$

¹Dung lượng kênh truyền mà D có thể đạt được là $C_D = \frac{1-\alpha}{2} \log(1 + \gamma_D)$. Do đó, D giải mã thành công thông tin nguồn nếu dung lượng kênh truyền của nó lớn hơn hiệu suất phổ yêu cầu C_{th} . Điều này tương đương γ_D lớn hơn $\gamma_{th} = 2^{2C_{th}/(1-\alpha)} - 1$.

Như vậy, xác suất dừng không điều kiện được biểu diễn như sau:

$$F_{\gamma_D}(\gamma_{th}) = \int_0^{\frac{\gamma_{th}}{\psi}} f_X(x) dx + \int_{\frac{\gamma_{th}}{\psi}}^{\infty} F_Y\left(\frac{\gamma_{th}}{\xi\eta(\psi x - \gamma_{th})}\right) f_X(x) dx \quad (19)$$

Thế $F_Y(x)$ trong (2) vào phương trình trên và sau một số phép đơn giản hóa, ta có thể đơn giản hóa (19) hơn nữa như sau:

$$F_{\gamma_D}(\gamma_{th}) = \int_0^{\frac{\gamma_{th}}{\psi}} f_X(x) dx + \int_{\frac{\gamma_{th}}{\psi}}^{\infty} \left(1 - e^{-\frac{\gamma_{th}}{\xi\eta\bar{\gamma}_{RD}(\psi x - \gamma_{th})}}\right) f_X(x) dx = 1 - \int_{\frac{\gamma_{th}}{\psi}}^{\infty} e^{-\frac{\gamma_{th}}{\xi\eta\bar{\gamma}_{RD}(\psi x - \gamma_{th})}} f_X(x) dx \quad (20)$$

Cần lưu ý rằng $\bar{\gamma}_{R,D} = \bar{\gamma}_{RD}$, $i \in \Phi_R$, do phân bố đồng nhất của các UAV. Do đó, $F_Y(x) = 1 - e^{-x/\bar{\gamma}_{RD}}$ được dùng trong (20).

Bây giờ, thay $f_X(x)$ trong (11) vào (20), ta sẽ thu được

$$F_{\gamma_D}(\gamma_{th}) = 1 - \frac{M}{\bar{\gamma}_{SR}} \sum_{q=0}^{M-1} (-1)^q C_{M-1}^q \int_{\frac{\gamma_{th}}{\psi}}^{\infty} e^{-\left(\frac{\gamma_{th}}{\xi\eta\bar{\gamma}_{RD}(\psi x - \gamma_{th})} + \frac{q+1}{\bar{\gamma}_{SR}}x\right)} dx \quad (21)$$

Bằng cách đổi biến $t = \psi x - \gamma_{th}$, (21) trở thành

$$F_{\gamma_D}(\gamma_{th}) = 1 - \frac{M}{\psi\bar{\gamma}_{SR}} \sum_{q=0}^{M-1} (-1)^q C_{M-1}^q e^{-\frac{(q+1)\gamma_{th}}{\bar{\gamma}_{SR}\psi}} \int_0^{\infty} e^{-\left(\frac{\gamma_{th}}{\xi\eta\bar{\gamma}_{RD}t} + \frac{(q+1)t}{\psi\bar{\gamma}_{SR}}\right)} dt \quad (22)$$

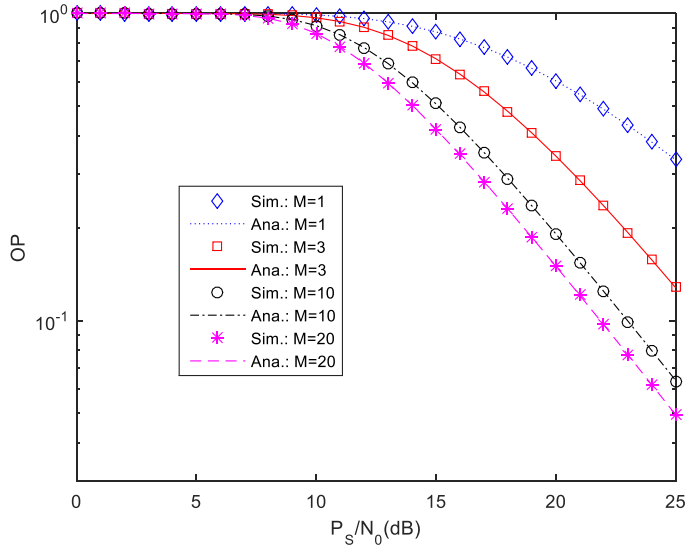
Sử dụng $\int_0^{\infty} e^{-\frac{\beta}{4x} - \gamma x} dx = \sqrt{\frac{\beta}{\gamma}} K_1(\sqrt{\beta\gamma})$ trong [9, phương trình (3.324.1)] để tính tích

phân cuối cùng trong (22), ta có thể biểu diễn (22) ở dạng tường minh chính xác như (16). Điều này hoàn thành việc chứng minh. ■

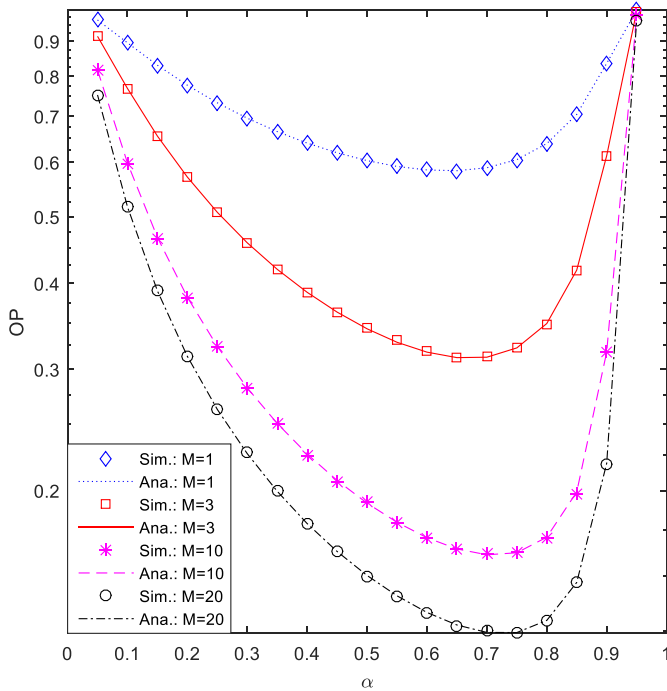
4. KẾT QUẢ MINH HỌA

Trong phần này, mô phỏng Monte-Carlo được thực hiện để đạt được các kết quả mô phỏng nhằm chứng minh tính hợp lệ của biểu thức lý thuyết được đề xuất trong (16) cũng như để có cái nhìn sâu sắc về độ tin cậy của việc lựa chọn UAV thu thập năng lượng. Một số thông số mô phỏng được cố định trong suốt phần này là tần số sóng mang $f_c = 900$ MHz và số mũ suy hao đường truyền $\tau = 2$ (tương ứng với suy hao đường truyền trong không gian tự do).

Hình 2 minh họa xác suất dừng theo SNR được chuẩn hóa $\psi = P_s / N_0$ khi khoảng cách của các tuyến ($S-R_i$, R_i-D) lần lượt là $d_{SR} = 100$ m và $d_{RD} = 50$ m; hệ số chia thời gian là $\alpha = 0,5$; hiệu suất chuyển đổi năng lượng là $\eta = 0,8$; hiệu suất phổ yêu cầu là $C_{th} = 0,1$ bps/Hz. Hình này cho thấy sự trùng khớp giữa phân tích và mô phỏng, do đó, xác nhận tính chính xác của biểu thức đề xuất trong (16). Ngoài ra, độ tin cậy của tuyến $S-R_b-D$ được cải thiện khi SNR được chuẩn hóa tăng. Hơn nữa, hiệu quả của việc lựa chọn UAV đã được chứng minh, mà dựa trên quan sát trong Hình 2 là số lượng UAV càng nhiều thì xác suất dừng càng thấp.



Hình 2. Xác suất dừng theo SNR được chuẩn hóa.
 “Sim.” = “Mô phỏng” và “Ana.” = “Phân tích”

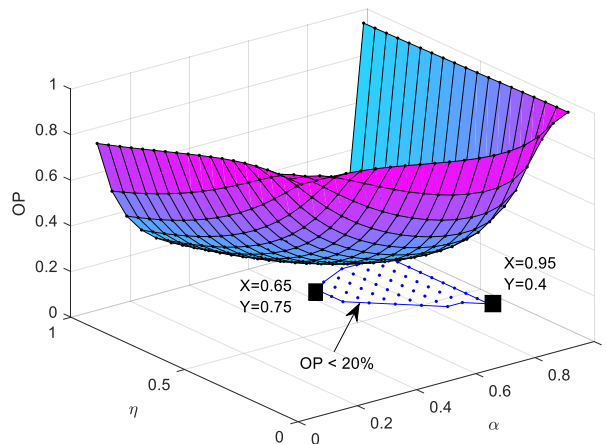


Hình 3. Xác suất dừng theo hệ số chia thời gian

Hình 3 biểu diễn ảnh hưởng của thời gian để thu thập năng lượng lên xác suất dừng của D với cùng các tham số như Hình 2, ngoại trừ $\psi = P_s / N_0 = 20$ dB. Hình này xác nhận tính chính xác của biểu thức được đề xuất trong (16) do sự trùng khớp giữa phân tích và mô phỏng. Ngoài ra, OP giảm khi tăng thời gian cho thu thập năng lượng (nghĩa là tăng α). Điều này là do UAV thu thập được nhiều năng lượng hơn để giữ kết nối đến D đáng tin cậy khi tăng α . Tuy nhiên, càng nhiều thời gian cho thu thập năng lượng thì càng ít thời gian cho

truyền tin, làm cho dung lượng kênh truyền thấp hơn trong giai đoạn 3 mà sau cùng, sẽ làm tăng OP. Do đó, khi hệ số chia thời gian lớn hơn một giá trị nhất định (ví dụ: $\alpha = 0,7$ với $M = 10$ như trong Hình 3), OP tăng khi tăng α . Như vậy, α nên được tối ưu để đạt được truyền thông tin cậy. Hơn nữa, độ tin cậy truyền tin được cải thiện bằng cách triển khai nhiều UAV hơn, cho thấy hiệu quả của việc lựa chọn UAV.

Bên cạnh hệ số chia thời gian, hiệu suất chuyển đổi năng lượng là một yếu tố quan trọng khác ảnh hưởng đến lượng năng lượng thu thập, mà cuối cùng sẽ ảnh hưởng đến hiệu năng hệ thống. Hình 4 biểu thị OP theo cả α và η với các thông số tương tự như Hình 3 ngoại trừ $M = 10$. Kết quả cho thấy rằng cho trước α thì η càng lớn sẽ cho OP càng nhỏ. Điều này hợp lý bởi vì tăng η giúp UAV thu thập được nhiều năng lượng hơn và do đó, truyền tin hiệu với công suất lớn hơn và cho OP thấp hơn. Để dễ quan sát ảnh hưởng của cả α và η lên OP, chúng ta tìm vùng trên mặt phẳng (η, α) mà OP nhỏ hơn một mức nhất định cho độ tin cậy kết nối chấp nhận được. Hình 4 biểu thị vùng này trong đó OP nhỏ hơn 20%. Ta thấy rằng hiệu suất chuyển đổi năng lượng càng thấp thì càng cần nhiều thời gian để thu thập năng lượng. Việc mà η tỷ lệ nghịch với OP là hợp lý để giữ cho lượng năng lượng thu thập được trên một mức nhất định (nghĩa là, tích của α và η là hằng số cho lượng năng lượng thu thập không đổi: $EH_{R_i} = \eta\alpha TP_S |h_{SR_i}|^2$).



Hình 4. Xác suất dừng theo α và η

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã mô tả một hệ thống truyền thông chuyển tiếp được hỗ trợ bởi các UAV trong đó chỉ có một UAV trong số nhiều UAV được chọn làm thiết bị chuyển tiếp. Tất cả các UAV đều có khả năng thu thập năng lượng từ tín hiệu tần số vô tuyến. Hiệu năng của hệ thống đã được phân tích theo xác suất dừng của thiết bị đích thông qua biểu thức dạng tường minh chính xác được đề xuất. Phân tích được xác minh bằng mô phỏng Monte-Carlo. Nhiều kết quả cho thấy hiệu quả của việc lựa chọn UAV trong việc giữ kết nối tin cậy qua khoảng cách lớn. Ngoài ra, các kết quả đã chứng minh rằng hệ số phân chia thời gian cho quá trình thu thập năng lượng có thể được tối ưu hóa để đạt được hiệu năng hệ thống tốt nhất.

Một trong các vấn đề thu hút nhiều sự quan tâm về hệ thống truyền thông chuyển tiếp được hỗ trợ bởi các UAV là bảo mật thông tin vì các UAV có thể là các thiết bị nghe lén nhằm trích xuất thông tin mật của thiết bị nguồn. Do đó, hướng phát triển của bài báo này là nghiên cứu các giải pháp bảo mật cho hệ thống truyền thông chuyển tiếp được hỗ trợ bởi các UAV.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Santos N.P., Lobo V., and Bernardino A. - Directional statistics for 3D model-based UAV tracking, *IEEE Access* **8** (2020) 33884-33897.
2. Mozaffari M., Saad W., Bennis M., Nam Y., and Debbah M. - A tutorial on UAVs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems, *IEEE Communications Surveys & Tutorials* **21** (3) (2019) 2334-2360.
3. Ji L., Chen J., and Feng Z. - Spectrum allocation and performance analysis for backhauling of UAV assisted cellular network, *China Communications* **16** (8) (2019) 83-92.
4. Sobouti M.J., Rahimi Z., Mohajezadeh A.H., Seno S.A.H., Ghanbari R., Marquez-Barja J.M., and Ahmadi H. - Efficient deployment of small cell base stations mounted on unmanned aerial vehicles for the internet of things infrastructure, *IEEE Sensors Journal* **20** (13) (2020) 7460-7471.
5. Abdelhady A.M., Amin O., Shihada B., Alouini M. - Spectral efficiency and energy harvesting in multi-cell SLIPT systems, *IEEE Transactions on Wireless Communications* **19** (5) (2020) 3304-3318.
6. Abualhaol I.Y., Matalgah M.M. - Outage probability analysis in a cooperative UAVs network over nakagami-m fading channels, *IEEE Vehicular Technology Conference, Montreal, Que. (2006)* 1-4.
7. Chen Y., Zhao N., Ding Z., and Alouini M. - Multiple UAVs as relays: Multi-hop single link versus multiple dual-hop links, *IEEE Transactions on Wireless Communications* **17** (9) (2018) 6348-6359.
8. Hanna S., Krijestorac E., Yan H. and Cabric D. - UAV swarms as amplify-and-forward MIMO relays, *2019 IEEE 20th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC), Cannes, France (2019)* 1-5.
9. Zwillinger D., Moll V., Gradshteyn I. and I. Ryzhik - Definite Integrals of elementary functions, in: *Table of Integrals, Series, and Products (8th Edn)* (Ed. Zwillinger D.), Boston: Academic Press (2015) 249-519.

ABSTRACT

OUTAGE PROBABILITY ANALYSIS OF ENERGY HARVESTING UAV SELECTION

Ho Van Khuong

Ho Chi Minh City University of Technology, VNU-HCM

Email: *hvkhuong@hcmut.edu.vn*

This paper analyzes reliability performance of an UAV (Unmanned Aerial Vehicles)-aided relaying system where only one UAV among multiple UAVs, all capable of harvesting energy from radio frequency signals, is selected as a relay. To this end, a precise closed-form outage probability formula is first derived. Then, Monte-Carlo simulations are conducted to validate the proposed formula. Finally, various results are provided to illustrate the impact of key operation parameters on the outage performance of the UAV selection.

Keywords: Outage probability, UAV, energy harvesting, relaying.