

Phân bổ tài nguyên cho mạng chuyển tiếp không dây nhận thức với thu hoạch năng lượng

Resource allocation for relaying cognitive network with energy harvesting

Lê Anh Uyên Vũ^{1,*}, Nguyễn Xuân Phương¹, Nguyễn Tiến Tùng²

¹Trường Đại học Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh

²Trường Đại học Công nghiệp Thành phố Hồ Chí Minh

*Tác giả liên hệ: vu.le @ut.edu.vn

Ngày nhận bài: 20/6/2024 ; Ngày chấp nhận đăng: 15/7/2024

Tóm tắt:

Bài báo đề cập đến nghiên cứu một mạng truyền thông không dây dựa trên hệ thống vô tuyến nhận thức với một cặp thu phát sơ cấp và một mạng chuyển tiếp sơ cấp có nhiều nguồn thu. Trong mạng sơ cấp, một nút chuyển tiếp sử dụng mô hình thu hoạch năng lượng để thu năng lượng từ tín hiệu vô tuyến của các nguồn phát thứ cấp và sơ cấp, sau đó, sử dụng năng lượng thu hoạch để truyền thông tin cho nhiều người dùng Internet vạn vật thông qua kỹ thuật đa truy cập phân chia thời gian. Nhóm tác giả đề xuất phương pháp tối ưu hóa để đồng thời tối ưu công suất, khoảng thời gian cho truyền năng lượng và thông tin nhằm tối đa hóa tổng thông lượng của mạng sơ cấp. Để giải quyết bài toán, nhóm chuyển đổi thành một vấn đề dễ tính toán hơn và đề xuất một thuật toán lặp, trong đó giải pháp dạng đóng thu được ở mỗi lần lặp. Hiệu quả của phương pháp đề xuất so với các thuật toán khác được xác minh thông qua kết quả mô phỏng.

Từ khóa: Mạng vô tuyến nhận thức; Truyền thông không dây; Thu thập năng lượng; Internet vạn vật.

Abstract:

This paper investigates a relay-based cognitive wireless-powered communication network with multiple secondary receivers and a secondary relaying network. In the secondary network, a relay adopts an energy model to harvest energy from radio frequency signals of the primary and secondary sources and subsequently utilizes the harvested energy to cooperate with the source for information transmission to multiple Internet-of-things users over time-division multiple access. The research group formulated a novel optimization problem that jointly optimizes the power and time fraction for energy and information transmission to maximize the sum throughput of the secondary network. The authors first converted the non-convex problem to a more computationally tractable problem and then proposed an iterative algorithm in which closed-form solutions are obtained at each iteration. Thus, simulation results verify and demonstrate the effectiveness of the proposed approach.

Key words: Cognitive radio network; Wireless communication; Energy harvesting; Internet of things.

1. Giới thiệu

Hiện nay với sự tăng trưởng nhanh chóng về số lượng các thiết bị Internet vạn vật (IoT) do xuất hiện nhiều ứng dụng trong các lĩnh vực như chăm sóc sức khỏe, nhà máy thông minh, ngôi nhà thông minh [1], [2]. Nhiều ứng dụng IoT được triển khai trong các môi trường nhiều khó

khăn, độc hại hoặc tại những nơi gặp thiên tai, các cơ sở hạ tầng viễn thông bị phá hủy [3]. Tuy nhiên, việc triển khai này cũng gây cản trở sự thay thế nguồn năng lượng cho các thiết bị, nhất là các thiết bị sử dụng pin. Một trong những công nghệ giúp giải quyết vấn đề năng lượng

cho các ứng dụng IoT là nạp năng lượng (EH) không dây từ tín hiệu vô tuyến (RF).

Công nghệ EH được nghiên cứu khá nhiều, hiện nay tập trung chủ yếu theo hai hướng: Công nghệ thu hoạch năng lượng, đồng thời truyền thông tin (SWIPT) và công nghệ chỉ tập trung truyền năng lượng không dây (WPT). Với hệ SWIPT, các thiết bị có nguồn pin hạn chế, vừa nạp năng lượng, vừa thực hiện truyền hoặc nhận thông tin trong tín hiệu RF [4]. Đối với hệ WPT, việc truyền năng lượng không dây hoàn toàn độc lập với truyền nhận thông tin, cụ thể hơn, trong hệ này có những nút chỉ làm nhiệm vụ cung cấp năng lượng không dây và không tham gia vào quá trình thu phát thông tin của hệ [5]. Nhiều công trình đã sử dụng công nghệ SWIPT trong các mô hình như truyền thông hợp tác [6], bảo mật lớp vật lý [7], hệ thống truyền thông nhận thức [8]. Trong nghiên cứu [6], sự tác động của hai cách thức phân bổ năng lượng cho kỹ thuật đa truy cập phi trực giao (NOMA) gồm: NOMA với phân bổ năng lượng cố định (F-NOMA) và NOMA lấy cảm hứng từ vô tuyến nhận thức (CR-NOMA), trên hệ thống SWIPT. Nghiên cứu [7] cho thấy một khuôn khổ bảo vệ chung về an ninh năng lượng và quyền riêng tư thông tin cho hệ EH với phương pháp học tập liên kết. Bằng cách giải quyết sự cân bằng giữa xác suất hoạt động và cơ hội truy cập phổ, các tác giả đã đề xuất một giải pháp tối ưu giúp tối đa hóa thông lượng của hệ nhận thức thu hoạch năng lượng [8]. Tương tự như vậy, công nghệ WPT cũng được nghiên cứu rộng rãi trong những hệ thống truyền thông như hệ thiết bị kết nối thiết bị (D2D) [9], hệ IoT [10]. Với mục tiêu là tối đa hóa hiệu suất năng lượng trung bình của tất cả các liên kết D2D, trong khi vẫn đảm bảo chất lượng dịch vụ của người dùng và các ràng buộc EH thuộc liên kết D2D. Các vấn đề phân bổ tài nguyên bao gồm phân bổ khe thời gian EH của thiết bị, phân bổ công suất và khối tài nguyên phổ cũng được tối ưu và đề cập trong nghiên cứu [9]. Kuang và cộng sự [10] triển khai một mô hình có khả năng truyền dữ

liệu hiệu quả ở tốc độ cao cho đa thiết bị hai chiều và thu năng lượng.

Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả giới thiệu một mạng vô tuyến nhận thức, nơi có một mạng thứ cấp và mạng sơ cấp đồng thời tồn tại, mạng sơ cấp chia sẻ băng tần cho mạng thứ cấp. Nhóm tập trung nghiên cứu mạng vô tuyến nhận thức dạng nền tức công suất của các nút phát thứ cấp cần dưới một ngưỡng cho trước từ quy định của mạng sơ cấp. Mạng sơ cấp gồm một cặp thu phát. Mạng thứ cấp gồm một nguồn phát, một nút chuyển tiếp và đa người dùng.

Cấu trúc phần còn lại của bài báo này bao gồm: Giới thiệu mô hình hệ thống sử dụng công nghệ thu hoạch năng lượng không dây được trình bày trong mục 2, sau đó, cho thấy một số kết quả để đánh giá những thuật toán đề ra. Cuối cùng, nhóm kết luận những kết quả thu được, đồng thời, nêu những định hướng nghiên cứu tiếp theo với kỹ thuật thu hoạch năng lượng không dây.

2. Bài toán điều khiển công suất cho hệ thống thu thập năng lượng không dây

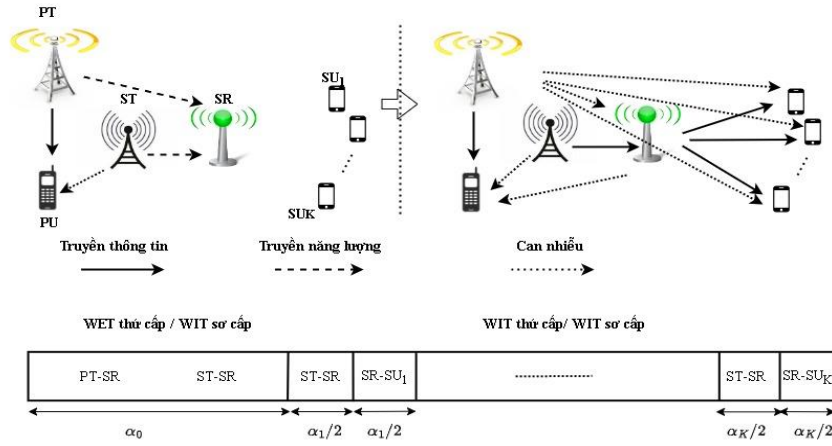
2.1. Mô hình hệ thống

Nhóm xem xét một mạng sơ cấp cùng tồn tại với một mạng chuyển tiếp sơ cấp. Mạng sơ cấp bao gồm một nguồn phát (PT) giao tiếp với người dùng sơ cấp (PU). Mạng thứ cấp có một nguồn phát (ST) có kế hoạch giao tiếp với K người dùng thứ cấp, tức SU_k , $k \in \{1, 2, \dots, K\}$. Tuy nhiên, do quá trình truyền tín hiệu bị suy hao nghiêm trọng bởi các vật cản nên những liên kết trực tiếp giữa PT và SU không khả dụng. Như vậy, nút chuyển tiếp thứ cấp (SR) hỗ trợ ST chuyển tiếp các thông điệp tương ứng tới các SU. Nhóm giả định rằng ST được trang bị N_t^{st} ăng ten, PT, PU, SR và SU là các nút đơn ăng ten. Đặt $\mathbf{h}_{st, sr} \in C^{N_t^{st} \times 1}$ và $\mathbf{h}_{st, pu} \in C^{N_t^{st} \times 1}$ biểu thị các vector kênh của các liên kết ST-SR, ST-PU tương ứng. Đặt $h_{pt, pu}$, $h_{pt, sr}$, h_{pt, su_k} , h_{sr, su_k} , và $h_{sr, pu}$ biểu thị các hệ số kênh của PT-PU, PT-SR,

PT-SU_k, SR-SU_k và SR-PU tương ứng. Thông tin trạng thái kênh hoàn hảo (CSI) của tất cả liên kết được giả định là có sẵn tại các nguồn phát.

Sơ đồ khối về thời gian truyền cho mạng thứ cấp của mạng RCWPCN dựa trên kỹ thuật đa truy cập phân chia thời gian (time-division multiple access: TDMA), tức mỗi nhiệm vụ như nạp năng lượng hoặc truyền thông tin được thực hiện trong mỗi khe thời gian con trực giao (Hình 1). Chú ý rằng kỹ thuật TDMA áp dụng trong nghiên cứu này như sau: Các nút phát truyền năng lượng và tín hiệu tới nút thu trong một

khoảng thời gian nhất định. Như Hình 1, PT và ST truyền năng lượng cho SR trong khoảng thời gian α_0 , sau đó, quá trình truyền thông tin được thực hiện từ ST tới SR một khoảng thời gian $\alpha_k/2$ và truyền thông tin từ SR tới mỗi người dùng thứ k một khoảng thời gian $\alpha_k/2$. Tổng thời gian hệ thực hiện cả truyền năng lượng và truyền tín hiệu tới tất cả K người dùng là $T = \alpha_0 + \sum_{i=1}^K \alpha_i/2$. Không mất tính tổng quát, tổng thời gian này được chuẩn hóa thành đơn vị.



Hình 1. Mô hình hệ thống và sơ đồ thể hiện hai pha: Nạp năng lượng và truyền thông tin.

Toàn bộ quá trình truyền từ ST tới người dùng trong mạng thứ cấp được chia thành hai pha liên tiếp gồm pha nạp năng lượng (WET) và pha truyền thông tin (WIT). Lưu ý rằng, trong mạng sơ cấp, PT đồng thời truyền tín hiệu tới PU trong hai giai đoạn của mạng thứ cấp. Trong pha WET, SR được cấp nguồn từ cả hai tín hiệu RF của PT và ST, sau đó, trong pha WIT, SR hỗ trợ ST truyền thông tin đến người dùng.

2.2. Pha nạp năng lượng cho mạng sơ cấp

Trong khoảng thời gian α_0 , PT và ST truyền dữ liệu x_{pu} , $|x_{pu}|^2 = 1$ và tín hiệu năng lượng x_e , $|x_e|^2 = 1$, được gửi cho PU và SR với công suất phát P_p và P_e tương ứng. Giả sử ST sử dụng kỹ thuật tỷ lệ truyền tối đa (MRT) để truyền tín hiệu đến SR với vector định dạng chùm tia $\mathbf{w}_e = \sqrt{P_e} \mathbf{h}_{st, sr} / \|\mathbf{h}_{st, sr}\|$. Tín hiệu nhận được tại SR được biểu thị bằng:

$$r_{sr}^{eh} = \mathbf{h}_{st, sr}^H \mathbf{w}_e x_e + \sqrt{P_p} h_{pt, sr} x_{pu} + n_{sr} \quad (1)$$

Với $n_{sr} \sim CN(0, \delta_{sr}^2)$ là nhiễu Gauss trắng (AWGN) tại SR. Cả hai tín hiệu của PT và ST đều được sử dụng cho EH tại SR. Dựa trên mô hình EH thực tế [11], có thể tính được năng lượng thu được tại SR như sau:

$$E_{nln} = \Theta_0 \alpha_0 \quad (2)$$

Với,

$$\Theta_0 \triangleq \phi \left(P_e \|\mathbf{h}_{st, sr}\|^2 + P_p |h_{pt, sr}|^2 \right) \quad (3)$$

Trong đó, ϕ là hiệu suất chuyển đổi năng lượng.

2.3. Pha truyền thông tin

Sau giai đoạn WET thứ cấp, trong pha WIT thứ cấp, thông tin được truyền từ ST đến người dùng với sự hỗ trợ của SR theo kỹ thuật TDMA. Truyền tín hiệu giữa ST và SU_k thực hiện trong

mỗi khe thời gian con trực giao (TS), được ký hiệu là $\alpha_k, k \in \{1, \dots, K\}$, chia thành hai bước pha truyền tín hiệu. Lưu ý, giả định rằng PT truyền tín hiệu x_{pu} đến PU với công suất phát P_p trong hai pha này. Trước hết, ST truyền tín hiệu $x_k, |x_k|^2 = 1$ đến SR với công suất phát P_{sk} bằng kỹ thuật MRT trong khoảng thời gian $\alpha_k / 2$. Do đó, tín hiệu nhận được tại SR có dạng:

$$r_{sr} = \mathbf{h}_{st, sr}^H \mathbf{w}_{x_k} x_k + \sqrt{P_p} h_{pt, sr} x_{pu} + n_{sr} \quad (4)$$

Trong đó, $\mathbf{w}_{x_k} \triangleq \sqrt{P_{sk}} \frac{\mathbf{h}_{st, sr}}{\|\mathbf{h}_{st, sr}\|}$, $n_{sr} \sim CN(0, \delta_{sr}^2)$ là

AWGN tại SR. Tiếp đến, dựa trên giao thức khuếch đại và truyền (Amplify-and-Forward: AF), SR sử dụng công suất phát p_k để chuyển tiếp phiên bản khuếch đại của tín hiệu nhận được với hệ số khuếch đại $\beta \triangleq \sqrt{\frac{1}{P_{sk} \|h_{st, sr}\|^2 + P_p |h_{pt, sr}|^2 + \delta_{sr}^2}}$ đến SU_k trong thời gian $\alpha_k / 2$. Do đó, tín hiệu nhận được ở SU_k được đưa ra:

$$r_k = \sqrt{p_k} h_{sr, ru_k} (\beta r_{sr}) + \sqrt{P_p} h_{pt, su_k} x_{pu} + n_k \quad (5)$$

Trong đó, $n_k \sim CN(0, \delta_k^2)$ là AWGN tại SU_k . Do đó, thông lượng có thể đạt được cho người dùng SU_k được biểu thị:

$$R_k = W \frac{\alpha_k}{2} \log(1 + \chi_k) \quad (6)$$

Với,

$$\chi_k \triangleq \frac{P_{sk} \|h_{st, sr}\|^2 p_k |h_{sr, su_k}|^2}{P_{sk} \|h_{st, sr}\|^2 X_2 + p_k |h_{sr, su_k}|^2 X_1 + X_1 X_2} \quad (7)$$

$$X_1 = P_p |h_{pt, sr}|^2 + \delta_{sr}^2 \quad (8)$$

$$X_2 = P_p |h_{pt, su_k}|^2 + \delta_k^2. \quad (9)$$

2.4. Hạn chế công suất phát của máy phát thứ cấp

Do hoạt động ở chế độ nền, thiết bị mạng thứ cấp được phép sử dụng cùng phổ tần với mạng

sơ cấp. Tuy nhiên, công suất phát của mạng thứ cấp được đảm bảo dưới ngưỡng quy định trước để tránh ảnh hưởng tiêu cực đến việc truyền tải thông tin của mạng sơ cấp. Biểu diễn I_p là công suất nhiễu cực đại nút nhận PU có thể chấp nhận được [12]. Vì vậy, ở mạng thứ cấp tại pha WET, công suất phát của ST để EH tại SR bị hạn chế như sau:

$$P_E \leq \hat{P}_E \triangleq \min \left\{ \frac{I_p}{\|\mathbf{h}_{st, pu}\|^2}, P_{\max} \right\} \quad (10)$$

Trong đó, P_{\max} là công suất tối đa của ST. Trong pha đầu tiên của pha WIT thứ cấp, công suất phát của ST phải ràng buộc:

$$P_{sk} \leq \hat{P}_S \triangleq \min \left\{ \frac{I_p}{\|\mathbf{h}_{st, pu}\|^2}, P_{\max} \right\} \quad (11)$$

Trong pha thứ hai của giai đoạn WIT thứ cấp, công suất phát của SR để truyền dữ liệu tới U_k phải bị hạn chế:

$$p_k \leq \frac{I_p}{|h_{sr, pu}|^2} \quad (12)$$

2.5. Phân bổ tài nguyên để tối đa hóa thông lượng tổng của hệ thống

Bài toán tối đa hóa thông lượng tổng của hệ thống dựa theo giao thức AF cho mạng thứ cấp có thể được xây dựng dưới dạng toán học:

$$\begin{aligned} (P1): \max_{\substack{\alpha_0, \{\alpha_k\}, \\ P_E, \{p_k\}}} & \sum_{k=1}^K W \frac{\alpha_k}{2} \log(1 + \chi_k) \\ \text{s.t. } C1: & \sum_{k=0}^K \alpha_k \leq 1, \alpha_k \in (0, 1), \forall k, \\ C2: & \sum_{k=0}^K \frac{\alpha_k P_k}{2} \leq \Theta_0 \alpha_0, \forall k, \\ C3: & p_k \geq 0, \forall k, C4: 0 \leq P_{sk} \leq P_{\max} \\ C5: & P_{sk} = P_{\max}, \\ & (10), (11), (12), \end{aligned} \quad (13)$$

Trong đó, Θ_0 và χ_k lần lượt được đưa ra trong (3), (7). P_{\max} biểu thị công suất phát tối đa cho phép của ST. Ràng buộc C2 chỉ ra rằng tổng mức tiêu thụ năng lượng của SR cho pha WIT

không được lớn hơn năng lượng thu được trong pha WET. Ràng buộc C3 thể hiện rằng công suất phát của SR không vượt quá công suất phát cho phép. Để tăng hiệu năng truyền thông tin trong pha WIT, năng lượng thu hoạch nên được sử dụng tối đa, tức ràng buộc (10) được giữ.

Bổ đề 1: $R_k = W \log(1 + \chi_k)$ là hàm lõm của ba biến p_k, α_k .

Chứng minh: Có thể dễ dàng kiểm tra bằng cách xem dấu của đạo hàm bậc hai R_k tương ứng với từng biến.

3. Giải pháp đề xuất để xác định cực đại thông lượng tổng

Trong phần này, nhóm tác giả thiết kế giải pháp tối đa hóa tổng thông lượng (13) của hệ. Lưu ý rằng, mặc dù hàm mục tiêu có dạng tổng của các hàm lõm nhưng do sự liên kết mạnh của các biến α_k và p_k trong C2 dẫn tới (P1) là một vấn đề tối ưu không lồi (non-convex optimization). Vì vậy, đây là một thách thức để có được nghiệm của (P1). Nhằm có được giải pháp khả thi, trước tiên, cần sử dụng biến phụ $\varepsilon_k = \alpha_k p_k$ để biến đổi hàm mục tiêu không lồi của (P1) thành hàm mục tiêu tương đương:

$$(P2): \max_{\substack{\alpha_0, \{\alpha_k\}, \\ \{\varepsilon_k\}}} \sum_{k=1}^K \frac{W \alpha_k \log \left(1 + \frac{A \varepsilon_k \omega_k / \alpha_k}{X_1 \varepsilon_k \omega_k / \alpha_k + B} \right)}{2} \quad (14)$$

$$s.t. C1, \bar{C}2: \sum_{k=0}^K \varepsilon_k \leq 2\Theta_0 \alpha_0, \forall k,$$

$$\bar{C}3: \varepsilon_k \geq 0, \forall k, C4, C5,$$

$$(11), (12),$$

Trong đó, $A \triangleq P_{sk} \|\mathbf{h}_{st, sr}\|^2$, $B = P_{sk} \|\mathbf{h}_{st, sr}\|^2 X_2 + X_1 X_2$. Để giải (P2), cần đưa ra mệnh đề sau:

Mệnh đề 1: (P2) là bài toán tối ưu lồi (convex optimization) do hàm mục tiêu là các tổng của các hàm lõm đã được chứng minh dưới đây và không có các ràng buộc không lồi.

Chứng minh: Cần chứng minh rằng mỗi hàm trong (P2) đều lõm đối với hai biến ε_k và α_k . Tham khảo tài liệu [13], có thể chứng minh

tính lõm của R_k với hai biến ε_k và α_k bằng cách kiểm tra dấu của ma trận Hessian $H_k = \begin{bmatrix} t_{0k} & t_{1k} \\ t_{1k} & t_{2k} \end{bmatrix}$.

Trong đó, $t_{0k} = -\Psi \varepsilon_k^2$, $t_{2k} = -\Psi \alpha_k^2$ lần lượt là đạo hàm riêng bậc hai của R_k theo ε_k và α_k , $t_{1k} = \Psi \varepsilon_k \alpha_k$ là đạo hàm riêng của R_k theo từng biến còn lại, với

$$\Psi = \frac{AB \omega_k [2(A + X_1) X_1 \varepsilon_k \omega_k^2 + 2AX_1 \alpha_k \omega_k + AB \alpha_k \omega_k]}{2[(X_1 \varepsilon_k \omega_k + \alpha_k B)((A + X_1) \varepsilon_k \omega_k + \varepsilon_k B)]^2 / \alpha_k + B}.$$

Có thể nhận ra $t_{0k} = t_{2k} (\varepsilon / \alpha)^2$, $t_{1k} = t_{2k} (\varepsilon / \alpha)$. Lưu ý, một vector số thực tồn tại dạng $\mathbf{u} = [u_1, u_2]^T$ để:

$$\mathbf{u}^T H_k \mathbf{u} = u_1^2 t_{0k} + 2u_1 u_2 t_{1k} + u_2^2 t_{2k}. \quad (15)$$

Thay thế t_{0k} và t_{1k} vào (15), có được $\mathbf{u}^T H_k \mathbf{u} = t_{2k} (u_1 (\varepsilon_k / \alpha_k) - u_2)^2 < 0$ do $t_{2k} < 0$. Vì vậy, R_k là một hàm lõm. Hàm mục tiêu của (P2) có dạng tổng các hàm lõm với các biến ε_k và α_k . Để giải quyết vấn đề này, cần chia thành các bước như sau:

Bước 1: Xác định phương án tối ưu phân bổ thời gian truyền thông tin (PTI) α_k^* với ε_k và α_0 đã cho. Theo mệnh đề 1, có thể sử dụng Lagrangian của (P2):

$$L(\mathbf{a}, \lambda) = \sum_{k=1}^K R_k - \lambda \left(\sum_{k=0}^K \alpha_k - 1 \right), \quad (16)$$

Trong đó, $\mathbf{a} \triangleq \{\alpha_k\}$, và λ là hệ số Lagrangian tương ứng với C1. Để đạt được giải pháp tối ưu, điều kiện Karush-Kuhn-Tucker nên thỏa mãn:

$$\frac{\partial L(\mathbf{a}, \lambda)}{\partial \alpha_k} = \frac{W}{2} \log \left(1 + \frac{A \varepsilon_k \omega_k}{X_1 \varepsilon_k \omega_k + \alpha_k B} \right) - \frac{WAB \alpha_k \varepsilon_k \omega_k}{2(X_1 \varepsilon_k \omega_k + \alpha_k B)(A \varepsilon_k \omega_k + X_1 \varepsilon_k \omega_k + \alpha_k B)} - \lambda^* = 0 \quad (17)$$

$$\lambda^* \left(\sum_{k=0}^K \alpha_k^* - 1 \right) = 0 \quad (18)$$

Vì $\lambda^* > 0$ nên $\left(\sum_{k=0}^K \alpha_k^* - 1\right) = 0$. Đặt $\kappa \triangleq \frac{A\varepsilon_k \omega_k}{X_1 \varepsilon_k \omega_k + \alpha_k B}$,

(17) có thể biểu diễn:

$$\partial L(\alpha, \lambda) / \partial \alpha_k = \log(1 + \kappa) - \frac{\kappa(A - X_1 \kappa)}{A(\kappa + 1)} - \frac{2\lambda^*}{W} = 0 \quad (19)$$

Dễ dàng nhận thấy $y(\kappa) = \log(1 + \kappa) - \frac{\kappa(A - X_1 \kappa)}{A(\kappa + 1)}$ là

hàm đơn điệu tăng do đạo hàm bậc nhất $y'(\kappa) = \frac{2X_1 \kappa^2 + (A + X_1)\kappa}{A(\kappa + 1)^2} > 0$. Điều này tồn tại một

nghiệm duy nhất $y(\kappa) - \frac{2\lambda^*}{W} = 0$. Do đó, có được

$$\frac{A\varepsilon_1 \omega_1}{X_1 \varepsilon_1 \omega_1 + \alpha_1 B} = \dots = \frac{A\varepsilon_K \omega_K}{X_1 \varepsilon_K \omega_K + \alpha_K B}, \text{ tức là:}$$

$$(P3): \Xi(\alpha_0, \varepsilon) = \max_{\alpha_0, \varepsilon} W \left(\frac{1 - \alpha_0}{2} \right) \times \log \left(\frac{A \sum_{k=1}^K \varepsilon_k \omega_k}{X_1 \sum_{k=1}^K \varepsilon_k \omega_k + (1 - \alpha_0) B} \right) \quad (22)$$

$$s.t. \bar{C}2: \sum_{k=1}^K \varepsilon_k \leq 2\Theta_0 \alpha_0, \bar{C}3.$$

Cho trước α_0 , (P3) được xem là bài toán không lồi đối với ε_k bằng cách kiểm tra dấu của đạo hàm bậc hai của hàm mục tiêu. Nhóm tác giả cung cấp bổ đề sau để xác định phân bố năng lượng tối ưu tại ST.

Bổ đề 2: Phân bố năng lượng tối ưu thu được như sau:

$$\varepsilon_k^* = \max \left[0, \frac{(1 - \alpha_0) \omega_k (\sqrt{\Delta_k} + (A + X_1) B) \pm \Omega_k}{2} \right] \quad (23)$$

Với, $\Delta_k \triangleq (AB)^2 + \frac{2WAX_1(A + X_1)B\omega_k}{\theta}$, $\Omega_k = \left(2X_1(A + X_1) \sum_{i=1, i \neq k}^K \varepsilon_i \omega_i \right) \omega_k$.

Để tìm giá trị tối ưu θ , nhóm thực hiện một thuật toán tìm kiếm bisection với hạn chế

$$\frac{\varepsilon_1 \omega_1}{\alpha_1^*} = \dots = \frac{\varepsilon_K \omega_K}{\alpha_K^*} \quad (20)$$

Với α_0 cho trước, từ (20) và $\sum_{k=0}^K \alpha_k^* - 1 = 0$, PTI α_k^* là:

$$\alpha_k^* = \frac{(1 - \alpha_0) \varepsilon_k \omega_k}{\sum_{k=1}^K \varepsilon_k \omega_k} \quad (21)$$

Bước 2: Dẫn ra dạng đóng cho giải pháp phân bố năng lượng tối ưu (EA) ε_k^* với α_0 và α_k^* đã cho. Thế (21) vào (14), bài toán (P2) trở thành:

$\bar{C}2: \sum_{k=1}^K \varepsilon_k \leq 2\Theta_0 \alpha_0$ thực hiện trong khoảng $\theta \in (0, M)$, M là một giá trị đủ lớn.

Bước 3: Sau khi đã tìm được giá trị tối ưu ε_k^* , thế vào (P3):

$$\Xi(\alpha_0, \varepsilon^*) = \max_{\alpha_0} W \left(\frac{1 - \alpha_0}{2} \right) \log \left(\frac{A \sum_{k=1}^K \varepsilon_k^* \omega_k}{X_1 \sum_{k=1}^K \varepsilon_k^* \omega_k + (1 - \alpha_0) B} \right) \quad (24)$$

Sau đó, dùng thuật toán tìm kiếm một chiều (1D) cho $\Xi(\alpha_0, \varepsilon^*)$ để xác định giá trị tối ưu α_0^* .

Thuật toán tối ưu tổng quát như sau:

Thuật toán tối ưu dung lượng tổng

1. Khởi tạo các giá trị bằng phần mềm Matlab: Tạo các kênh truyền ngẫu nhiên theo phân bố Rayleigh: $\mathbf{h}_{st, sr}, \mathbf{h}_{st, pu}, h_{pt, pu}, h_{pt, sr}, h_{pt, su_k}, h_{sr, su_k}$, và $h_{sr, pu}, \tau_d = 0, \tau_u = 1, \Gamma = (\sqrt{5} - 1)/2$, một giá trị κ rất nhỏ.
2. Bắt đầu thực hiện vòng lặp.

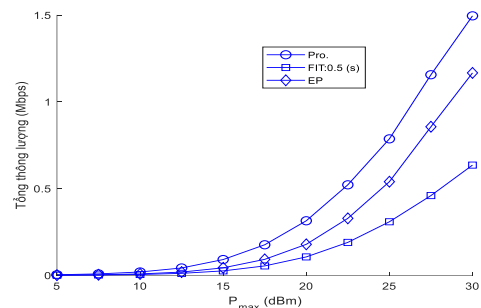
Thuật toán tối ưu dung lượng tổng

3. Tính $\tau_1 = \tau_u - (\tau_u - \tau_d)\kappa$, $\tau_2 = \tau_d + (\tau_u - \tau_d)\kappa$.
 4. Tính $\epsilon^* = \{\epsilon_k^*\}$ theo (23) với giá trị τ_1 .
 5. Tính giá trị $\Xi_1(\tau_1)$ với các giá trị τ_1 và ϵ^* .
 6. Tính $\epsilon^* = \{\epsilon_k^*\}$ theo (23) với giá trị τ_2 .
 7. Tính giá trị $\Xi_2(\tau_2)$ với các giá trị τ_2 và ϵ^* .
 8. Nếu $\Xi_1(\tau_1) > \Xi_2(\tau_2)$ thì $\tau_u = \tau_2$, ngược lại $\tau_d = \tau_1$.
 9. Kết thúc vòng lặp khi $|\tau_d - \tau_u| < \kappa$.
- Kết quả thu được: $\alpha_0^* = (\tau_u - \tau_d) / 2$, ϵ^* , α_k^* .

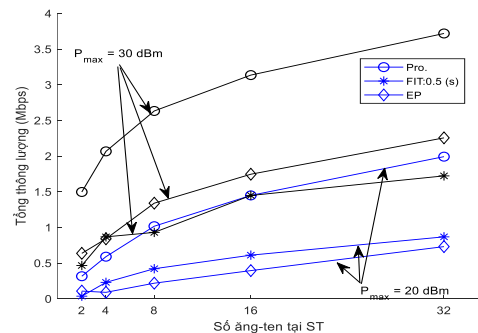
4. Một số kết quả đạt được

Các thông số thiết lập để thực hiện mô phỏng: Vị trí của PT và PR lần lượt là (50 m, 10 m) và (50 m, -10 m), vị trí của ST, SR và SU là (0 m, 0 m), (50 m, 0 m) và (100 m, 0 m). Hệ số chuyển đổi năng lượng $\phi = 0.8$. Băng thông $W = 1$ MHz, ngưỡng nhiễu $I_p = 20$ dBm. Để so sánh, nhóm giới thiệu hai giải thuật toán khác gồm thuật toán thực hiện khi cố định thời gian truyền năng lượng (FIT) và thuật toán khi chia năng lượng bằng nhau (EP). Với thuật toán FIT, cho α_0 một giá trị trong khoảng (0,1), sau đó, thực hiện tối ưu các biến α_k và p_k như cách thức trình bày ở mục 3. Với thuật toán EP, thiết lập giá trị ϵ_k như nhau, còn lại các biến khác α_0 , α_k thực hiện như các bước ở mục 3. Hình 2 biểu diễn tổng thông lượng của hệ theo công suất phát tối đa ST, P_{\max} với số lượng SU là 4, số ăng ten tại ST là 2, công suất phát của PT là 5 dBm. Các ký hiệu “Pro.”, “FIT:0.5 (s)” và “EP” chỉ thuật toán đề xuất, thuật toán với khoảng thời gian truyền năng lượng cố định cụ thể là 0.5s và thuật toán với việc chia đều công suất của SR khi truyền cho những người dùng SU. Tổng thông lượng của hệ tăng đáng kể khi công suất P_{\max} tăng, nếu công suất phát thấp dưới 15 dBm, sự chênh lệch hiệu năng của các thuật toán không đáng kể. Tại Hình 2 cũng cho thấy thuật toán đề xuất “Pro” đã chứng minh tính hiệu quả khi đạt tổng thông lượng cao hơn so với các thuật toán còn lại như “FIT: 0.5 (s)” và “EP”.

Để đánh giá hiệu năng của hệ thống với số lượng ăng ten tại ST, nhóm tác giả khảo sát tổng thông lượng theo số lượng ăng ten như Hình 3. Có thể nhận thấy hiệu năng của thuật toán đề xuất luôn vượt trội so với các thuật toán khác cả tại $P_{\max} = 20$ dBm và $P_{\max} = 30$ dBm. Số ăng ten của ST càng tăng, tổng thông lượng của hệ càng lớn. Điều này có thể lý giải do lượng năng lượng của SR thu được nhiều hơn, cũng như tín hiệu truyền từ ST tới SR được tăng cường.



Hình 2. Tổng thông lượng truyền thay đổi theo công suất phát tối đa của ST, P_{\max} .



Hình 3. Tổng thông lượng thay đổi theo số ăng ten của ST với $P_{\max} = 20$ (dBm), $P_{\max} = 30$ (dBm).

5. Kết luận

Nhóm đã nghiên cứu bài toán tối đa hóa tổng thông lượng của mạng vô tuyến nhận thức có thu hoạch năng lượng bằng cách tối ưu hóa chung thời gian nạp năng lượng và thông tin, công suất phát của nút chuyển tiếp. Vấn đề tối ưu được giải quyết bằng ba bước trong đó thực hiện thuật toán lặp, mỗi lần lặp có các giải pháp dạng đóng cho các biến cần tối ưu. Thuật toán đề xuất đã chứng minh tính vượt trội so với các thuật toán khác và được kiểm chứng thông qua các kết quả mô phỏng. Trong hướng nghiên cứu tiếp theo, nhóm tác giả sẽ áp dụng các kỹ thuật truy cập tiên tiến như truy cập phi trực giao cho quá trình truyền của nút chuyển tiếp. Ngoài ra, việc đánh giá hệ EH trong bối cảnh bảo mật lớp vật lý [14] cũng là một hướng nghiên cứu cần được xem xét.

Tài liệu tham khảo

- [1] K. W. Choi, P. A. Rosyady, L. Ginting, A. A. Aziz, D. Setiawan, and D. I. Kim, "Theory and experiment for wireless-powered sensor networks: How to keep sensors alive," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 17, no. 1, pp. 430-444, Jan. 2018, doi: 10.1109/TWC.2017.2767579.
- [2] Z. Chu, F. Zhou, Z. Zhu, R. Q. Hu, and P. Xiao, "Wireless powered sensor networks for Internet of Things: Maximum throughput and optimal power allocation," *IEEE Internet Things J.*, vol. 5, no. 1, pp. 310-321, Feb. 2018, doi: 10.1109/JIOT.2017.2782367.
- [3] R. Zhang and C. K. Ho, "MIMO broadcasting for simultaneous wireless information and power transfer," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 12, no. 5, pp. 1989-2001, May 2013, doi: 10.1109/TWC.2013.031813.120224.
- [4] I. Krikidis, S. Timotheou, S. Nikolaou, G. Zheng, D. W. K. Ng, and R. Schober, "Simultaneous wireless information and power transfer in modern communication systems," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 11, pp. 104-110, Nov. 2014, doi: 10.1109/MCOM.2014.6957150.
- [5] T. -T. Nguyen, V. -D. Nguyen, J. -H Lee, and Y. -H. Kim, "Sum rate maximization for multi-user wireless powered IoT network with non-linear energy harvester: Time and power allocation," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 149698-149710, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2947321.
- [6] Z. Yang, Z. Ding, P. Fan, and N. Al-Dhahir, "The impact of power allocation on cooperative non-orthogonal multiple access networks with SWIPT," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 16, no. 7, pp. 4332-4343, Jul. 2017, doi: 10.1109/TWC.2017.2697380.
- [7] Q. Pan, J. Wu, A. K. Bashir, J. Li, W. Yang, and Y. D. Al-Otaibi, "Joint protection of energy security and information privacy for energy harvesting: An incentive federated learning approach," *IEEE Trans. Ind. Inf.*, vol. 18, no. 5, pp. 3473-3483, May 2022, doi: 10.1109/TII.2021.3105492.
- [8] X. Liu, K. Zheng, K. Chi, and Y.-H. Zhu, "Cooperative spectrum sensing optimization in energy-harvesting cognitive radio networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 19, no. 11, pp. 7663-7676, Nov. 2020, doi: 10.1109/TWC.2020.3015260.
- [9] M. M. Salim, H. A. Elsayed, M. S. Abdalzaher, and M. M. Fouda, "RF energy harvesting effectiveness in relay-based D2D communication," in *2023 Int. Conf. Computer Sci., Inf. Technol. Eng. (ICCoSITE)*, Jakarta, Indonesia, doi: 10.1109/ICCoSITE57641.2023.10127846.
- [10] Z. Kuang, G. Liu, G. Li, and X. Deng, "Energy efficient resource allocation algorithm in energy harvesting-based D2D heterogeneous networks," *IEEE IoT J.*, vol. 6, no. 1, pp. 557-567, Feb. 2019, doi: 10.1109/JIOT.2018.2842738.
- [11] P. K. Sharma, Y. -S. Jeong, J. H. Park, "EH-HL: Effective Communication Model by Integrated EH-WSN and Hybrid LiFi/WiFi for IoT," *IEEE IoT J.*, vol. 5, no. 3, pp. 1719-1726, Jun. 2018, doi: 10.1109/JIOT.2018.2791999.
- [12] E. Boshkovska, D. W. K. Ng, N. Zlatanov, and R. Schober, "Practical non-linear energy harvesting model and resource allocation for SWIPT systems," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 19,

- no. 12, pp. 2082-2085, Dec. 2015, doi: 10.1109/LCOMM.2015.2478460.
- [13] T. -T. Nguyen, V. -D. Nguyen, Q. -V. Pham, J. -H. Lee, and Y. -H. Kim, "Resource allocation for AF relaying wireless-powered networks with nonlinear energy harvester," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 25, no. 1, pp. 229-233, Jan. 2021, doi: 10.1109/LCOMM.2020.3023937.
- [14] N. Wang, P. Wang, A. Alipour-Fanid, L. Jiao, and K. Zeng, "Physical-layer security of 5G wireless networks for IoT: Challenges and opportunities," *IEEE IoT J.*, vol. 6, no. 5, pp. 8169-8181, Oct. 2019, doi: 10.1109/JIOT.2019.2927379.