

ĐẠI HỌC QUỐC GIA TP. HỒ CHÍ MINH
TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA

PHẠM VĂN QUYẾT

**TỐI ƯU HIỆU NĂNG HỆ THỐNG TRUYỀN ĐỒNG THỜI
THÔNG TIN VÀ NĂNG LƯỢNG CÓ SỰ HỖ TRỢ CỦA
MẶT PHẢN XẠ THÔNG MINH**

Ngành: Kỹ thuật Viễn thông

Mã số ngành: 9520208

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ

TP. HỒ CHÍ MINH - NĂM 2024

Công trình được hoàn thành tại **Trường Đại học Bách Khoa – ĐHQG-HCM**

Người hướng dẫn: PGS.TS. Hà Hoàng Kha

Phản biện độc lập:

Phản biện độc lập:

Phản biện:

Phản biện:

Phản biện:

Luận án sẽ được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án họp tại

.....
.....

vào lúc giờ ngày tháng năm

Có thể tìm hiểu luận án tại thư viện:

- Thư viện Trường Đại học Bách Khoa – ĐHQG-HCM
- Thư viện Đại học Quốc gia Tp.HCM
- Thư viện Khoa học Tổng hợp Tp.HCM

CHƯƠNG 1 GIỚI THIỆU

1.1 Sự cần thiết của nghiên cứu

1.1.1 Xu hướng tăng trưởng lưu lượng dữ liệu di động

Sự phát triển bùng nổ của các dịch vụ chất lượng cao như: truyền hình ảnh, phim chất lượng cao, video 3 chiều (Three-dimensional: 3D), theo dõi sức khỏe, y tế từ xa, thiết bị không người lái,.. đã đặt ra yêu cầu cấp thiết phải nâng cao hơn nữa hiệu suất phổ và hiệu suất năng lượng của các mạng viễn thông. Theo báo cáo mới nhất của Ericsson [1], vào thời điểm cuối năm 2022, số lượng thuê bao di động trên toàn cầu có thể đạt đến 8.4 tỷ, và con số này tiếp tục tăng nhanh qua mỗi quý. Dự báo số thuê bao di động vào khoảng 9.2 tỷ vào năm 2028, trong đó thuê bao 5G khoảng 5 tỷ. Bên cạnh đó lưu lượng dữ liệu cũng đang tăng lên mạnh mẽ do sự phát triển nhanh chóng của các thiết bị thông minh. Theo [2], tổng lưu lượng dữ liệu toàn cầu đến năm 2030 được dự đoán là 5016 EB/tháng, tăng hơn 80 lần so với năm 2020. Lưu lượng dữ liệu trên một người dùng cũng tăng đột biến, dự đoán năm 2030 là 257.1 GB/tháng cao gấp 50 lần so với năm 2020.

1.1.2 Mức tiêu thụ năng lượng trong ngành viễn thông

Số lượng thiết bị di động trong ngành viễn thông đang tăng lên mạnh mẽ trong thời gian gần đây dẫn đến việc tiêu thụ năng lượng sẽ tăng lên đáng kể. So với 4G, mạng 5G được dự báo sẽ tiêu thụ năng lượng cao hơn 2-3 lần, và con số này còn tiếp tục tăng lên khi phát triển lên hệ thống mạng 6G [5]. Bên cạnh đó, việc xử lý một lượng lớn pin do các thiết bị di động thải ra cũng là thách thức lớn về mặt kinh phí và đặc biệt là vấn đề ô nhiễm môi trường.

1.2 Đặt vấn đề và hướng nghiên cứu

Từ những vấn đề nêu trên, việc đáp ứng được các yêu cầu về nâng cao tối đa hiệu năng của hệ thống, trong khi vẫn đảm bảo tiết kiệm năng lượng tiêu thụ là một bài toán cần được xem xét và tính toán cẩn thận. Trên thực tế bài toán đó có thể giải quyết được thông qua ba giải pháp chính. *Thứ nhất*, các hệ thống cần được thiết kế một cách tối ưu, quản lý tốt và phân bổ hiệu quả các nguồn tài nguyên của hệ thống. *Thứ hai*, các thiết bị phần cứng tiêu thụ ít năng lượng cần được ưu tiên sử dụng trong các hệ thống viễn thông (ví dụ: các mặt phản xạ thông minh (Intelligent reflecting surface: IRS)). *Thứ ba*, các hệ thống vô tuyến cần được đẩy mạnh hơn nữa việc ứng dụng và phát triển các công nghệ thu thập năng lượng nhằm tái tạo năng lượng, bù đắp các tiêu hao trong quá trình sử dụng và kéo dài thời gian hoạt động của các thiết bị. Chính vì các

nguyên nhân cấp thiết như trên, luận án nghiên cứu đề xuất các thuật toán tối ưu nhằm nâng cao hiệu năng của các hệ thống vô tuyến truyền thông tin và thu thập năng lượng đồng thời có sự hỗ trợ của mặt phản xạ thông minh.

1.3 Các nghiên cứu liên quan

1.3.1 Thu thập năng lượng tần số vô tuyến (RF-EH)

1.3.2 Truyền thông tin và năng lượng đồng thời (SWIPT)

1.3.3 SWIPT trong hệ thống thông tin vô tuyến sử dụng mặt phản xạ thông minh

1.4 Phương pháp nghiên cứu và những đóng góp chính

Luận án tiến hành khảo sát, phân tích, tổng hợp, và đánh giá ưu nhược điểm của các công trình có liên quan, sau đó đề xuất các mô hình hệ thống và các thuật toán nhằm nâng cao hiệu năng của hệ thống.

Các đóng góp chính của luận án được tóm tắt như sau:

- Đề xuất thuật toán cho bài toán tối đa tổng năng lượng thu thập (SHE) theo mô hình phi tuyến của các người dùng trong hệ thống MU-MIMO SWIPT sử dụng IRS. Kết quả mô phỏng thể hiện sự hội tụ tốt của thuật toán đề xuất. Đồng thời, SHE của hệ thống có IRS với các ma trận TPC, hệ số PS và ma trận dịch pha được thiết kế tối ưu đã cải thiện đáng kể so với mô hình có ma trận pha cố định và mô hình không có IRS.
- Đề xuất thuật toán tối đa hiệu suất phổ (SE) và hiệu suất năng lượng (EE) của mạng thứ cấp trong hệ thống vô tuyến nhận thức dạng nền (CR) MU-MIMO SWIPT sử dụng IRS với CSI không hoàn hảo của các người dùng sơ cấp (PU). Thông qua kết quả mô phỏng, thuật toán do luận án đề xuất được đánh giá là đảm bảo sự hội tụ. Ngoài ra, SE và EE của mạng thứ cấp với mô hình có IRS vượt trội so với mô hình không có IRS. Đặc biệt, kết quả mô phỏng cũng cho thấy, với thuật toán thiết kế bền vững đề xuất, hiệu năng của hệ thống luôn đạt được hiệu quả tốt với các mức lỗi kênh truyền khác nhau.
- Đề xuất thuật toán tối đa tổng tốc độ dữ liệu (SR) của các SU trong hệ thống MU-MIMO SWIPT CR sử dụng IRS tích cực với CSI không hoàn hảo của các PU. Kết quả mô phỏng khẳng định sự hội tụ của thuật toán đề xuất. Ngoài ra, SR của các SU của hệ thống sử dụng IRS tích cực luôn tốt hơn hệ thống sử dụng IRS thụ động.
- Đề xuất thuật toán tối ưu đa mục tiêu (MOOP) nhằm tối đa đồng thời SR và

SHE của các người dùng trong hệ thống MU-MIMO SWIPT sử dụng IRS. Kết quả mô phỏng cho thấy thuật toán đề xuất hội tụ tốt. SR và SHE của hệ thống có IRS đều nâng cao rõ rệt so với mô hình không có IRS và mô hình có IRS với ma trận pha cố định. Đặc biệt, sự tương nhượng giữa SR và SHE trong hệ thống đề xuất được khảo sát đầy đủ, toàn diện thông qua các kết quả mô phỏng bài toán tối ưu đa mục tiêu.

1.5 Cấu trúc của luận án

Cấu trúc của luận án được xây dựng thành các chương như sau:

- Chương 1: Giới thiệu.
- Chương 2: Tổng quan các vấn đề nghiên cứu và lý thuyết liên quan.
- Chương 3: Tối đa tổng năng lượng thu thập trong hệ thống MU-MIMO SWIPT có sự hỗ trợ IRS.
- Chương 4: Tối đa hiệu suất phổ và hiệu suất năng lượng trong hệ thống vô tuyến nhận thức MU-MIMO SWIPT có sự hỗ trợ IRS.
- Chương 5: Tối đa hiệu suất phổ trong hệ thống vô tuyến nhận thức dạng nền MU-MIMO SWIPT có sự hỗ trợ của IRS tích cực.
- Chương 6: Tối ưu đa mục tiêu trong hệ thống MU-MIMO SWIPT có sự hỗ trợ IRS.
- Chương 7: Kết luận chung và hướng phát triển.

CHƯƠNG 2 TỔNG QUAN CÁC VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU VÀ LÝ THUYẾT LIÊN QUAN

2.1 Kỹ thuật đa ngõ vào đa ngõ ra MIMO

Kỹ thuật MIMO là kỹ thuật sử dụng nhiều antenna trong đồng thời cả các thiết bị phát và các thiết bị thu. Kỹ thuật MIMO là một phương pháp quan trọng trong nâng cao độ lợi phân tập, từ đó cải thiện đáng kể hiệu năng của hệ thống. Từ những ưu điểm của kỹ thuật MIMO và sự phát triển của công nghệ, các thiết kế liên quan MIMO được phát triển mở rộng và nhanh chóng hơn. Trong tiểu mục này, luận án trình bày một số dạng MIMO cơ bản bao gồm: MIMO điểm-điểm, MIMO nhiều người dùng (Multiuser MIMO: MU-MIMO).

2.2 Vấn đề thu thập năng lượng vô tuyến

Thu thập năng lượng vô tuyến (RF-EH) là một giải pháp tiềm năng giúp tái tạo năng lượng, kéo dài thời gian hoạt động của các thiết bị. Nhờ sự phát triển trong công nghệ, việc ứng dụng các kỹ thuật RF-EH ngày càng trở nên hiệu quả và khả thi hơn. Do đó, RF-EH hiện đang ngày càng thu hút được sự quan tâm rất lớn trong cộng đồng học thuật cũng như trong công nghiệp. Trong phần này, luận án trình bày các ứng dụng của RF-EH và các kỹ thuật RF-EH trong SWIPT.

2.3 Công nghệ vô tuyến nhận thức

2.3.1 Khái niệm vô tuyến nhận thức

Công nghệ vô tuyến nhận thức là công nghệ mà trong đó thiết bị vô tuyến hoặc hệ thống vô tuyến có thể cảm nhận được môi trường trường điện từ của nó và có thể tự hiệu chỉnh các tham số hệ thống để chất lượng và hiệu năng của hệ thống.

2.3.2 Hệ thống vô tuyến nhận thức

Trong một hệ thống CR có hai mạng (hoặc người dùng): mạng (hoặc người dùng) sơ cấp và mạng (hoặc người dùng) thứ cấp. Mạng (hoặc người dùng) sơ cấp là mạng được cấp phép sử dụng phổ tần, trong khi đó mạng (hoặc người dùng) thứ cấp không được cấp phép sử dụng phổ tần. Dựa vào nguyên lý hoạt động, hệ thống vô tuyến nhận thức được chia là 3 loại chính: hệ thống vô tuyến nhận thức dạng nền (underlay), dạng chồng chập (overlay) và dạng đan xen (interweave) [37].

2.4 Mặt phản xạ thông minh trong thông tin vô tuyến

2.4.1 Khái niệm và ưu điểm IRS

2.4.1.1 Khái niệm IRS

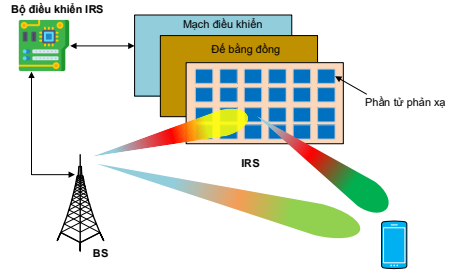
Mặt phản xạ thông minh (IRS) là một mặt bao gồm nhiều phần tử phản xạ, mỗi phần tử phản xạ được cấu tạo từ các vật liệu đặc biệt cho phép thay đổi pha và biên độ sóng phản xạ qua mỗi phần tử đó.

2.4.1.2 Ưu điểm IRS [48,49]

- Các phần tử phản xạ chỉ phản xạ một cách thụ động các sóng truyền đến chúng mà không yêu cầu nguồn để tạo ra các phát xạ tần số vô tuyến.
- IRS hoạt động ở chế độ FD nhưng lại không khuếch đại nhiều và cũng không gây ra hiện tượng tự can nhiễu như các hệ thống FD truyền thống.
- IRS có cấu tạo nhỏ gọn, trọng lượng nhẹ do đó dễ dàng triển khai, lắp đặt.

2.4.2 Nguyên lý hoạt động của IRS

Cấu trúc điển hình của một IRS được minh họa như trong Hình 2.1. Khi tác động lên các phần tử phản xạ để làm thay đổi một số tính chất của các phần tử này (dạng hình học, kích thước, hướng, hay trật tự sắp xếp, v.v.) thì sẽ làm thay đổi đặc tính phản xạ của IRS, từ đó cho phép cấu hình lại mô trường truyền một cách thông minh.



Hình 2.1: Cấu trúc IRS [48].

2.4.3 Ứng dụng của IRS

- IRS có thể được triển khai để hỗ trợ các người dùng không có LOS do bị che chắn, hay ở các cạnh rìa của các tế bào.
- IRS có khả năng hỗ trợ nâng cao tính bảo mật cho hệ thống vô tuyến
- IRS hỗ trợ các mạng SWIPT.

2.4.4 Thách thức đối với IRS

- Các phần tử IRS phải được thiết kế một cách cẩn thận để đạt được mục đích tăng cường tín hiệu có ích, đồng thời loại bỏ can nhiễu. - IRS không có các chuỗi phát tần số cao tần, do đó để đạt được CSI là khá khó khăn.

2.5 Lý thuyết cơ bản về toán tối ưu

2.5.1 Bài toán tối ưu cơ bản

Xem xét một bài toán tối ưu cơ bản như sau:

$$\min_{\mathbf{x}} f(\mathbf{x}) \quad (2.24a)$$

$$\text{s.t. } \mathbf{x} \in \mathcal{S}. \quad (2.24b)$$

Trong đó hàm số $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ là hàm mục tiêu mong muốn được tối thiểu. Vector \mathbf{x} là vector chứa n biến độc lập: $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \in \mathbb{R}^n$. $\mathcal{S} \in \mathbb{R}^n$ là tập khả thi (tập ràng buộc). Bài toán tối ưu (2.24) là bài toán đi tìm giá trị vector $\mathbf{x} \in \mathcal{S}$ sao cho hàm mục tiêu $f(\mathbf{x})$ đạt giá trị nhỏ nhất, lúc này vector \mathbf{x} được gọi là nghiệm tối ưu.

2.5.2 Tối ưu lồi

Bài toán cực tiểu hàm mục tiêu lồi hoặc cực đại hàm mục tiêu lõm với tập khả thi là tập lồi thì được gọi là bài toán tối ưu lồi.

2.5.3 Một số phương pháp giải bài toán tối ưu không lồi

2.5.3.1 Phương pháp tối thiểu cận trên (Majorization-Minimization)

Phương pháp tối thiểu cận trên được thực hiện qua hai bước. Bước thứ nhất là tìm hàm chứa đường bao trên (Majorization). Bước thứ hai là thực hiện tối thiểu (Minimization) hàm thay thế đó [62].

2.5.3.2 Phương pháp tối đa cận dưới (Minorization-Maximization)

Tương tự phương pháp tối thiểu cận dưới, phương pháp tối đa cận dưới (Minorization-Maximization: MM) được áp dụng cho bài toán cực đại. Trình tự thực hiện dạng này ngược với dạng tối thiểu cận trên, cụ thể: bước thứ nhất là tìm đường bao dưới xấp xỉ (Minorization), và bước thứ hai là tối đa (Maximization) đường bao dưới đó.

2.5.3.3 Phương pháp tối ưu luân phiên

Phương pháp tối ưu luân phiên (Alternating Optimization: AO) là một phương pháp lặp áp dụng để tìm lời giải cho các bài toán tối ưu nhiều biến bằng cách lần lượt giải bài toán gốc theo từng biến trong khi cố định các biến còn lại.

2.5.3.4 Giải thuật Dinkelbach cho tối ưu phân số lõm-lồi

Giải thuật Dinkelbach biến đổi tương đương bài toán dạng phân số thành một dạng trừ đa thức như sau

$$F(\lambda_n) = \max_{\mathbf{x} \in \mathcal{F}} f(\mathbf{x}) - \lambda_n g(\mathbf{x}). \quad (2.26)$$

2.6 Kết luận chương

Chương này đã trình bày tổng quan lý thuyết các vấn đề chính bao gồm: kỹ thuật MIMO, thu thập năng lượng tần số vô tuyến (RF), truyền thông tin và năng lượng đồng thời (SWIPT), công nghệ vô tuyến nhận thức (CR), mặt phản xạ thông minh (IRS) và lý thuyết cơ bản về các bài toán tối ưu.

CHƯƠNG 3 TỐI ĐA NĂNG LƯỢNG THU THẬP TRONG HỆ THỐNG MU-MIMO SWIPT SỬ DỤNG IRS

Nội dung của chương này được trình bày trong công trình số 1.

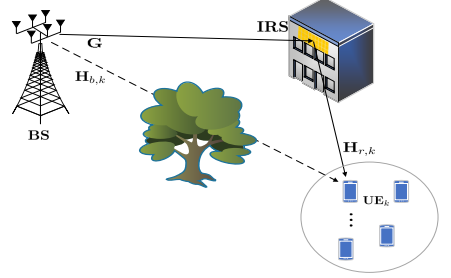
3.1 Giới thiệu

Chương này đề xuất thuật toán cho bài toán tối đa SHE theo mô hình phi tuyến của các người dùng trong hệ thống MU-MIMO SWIPT IRS với các điều kiện ràng buộc

đảm bảo các yêu cầu chất lượng dịch vụ của từng người dùng về mặt tốc độ dữ liệu và năng lượng thu thập tối thiểu. Các người dùng sử dụng kỹ thuật chia công suất (Power splitting: PS) để đồng thời nhận thông tin (Information decoding: ID) và thu thập năng lượng (Energy harvesting: EH).

3.2 Mô hình hệ thống và bài toán thiết kế

Xem xét một hệ thống như trong Hình 3.1 với K UE, $\mathcal{K} = \{1, \dots, K\}$. BS, các EU được trang bị N_t, N_r antenna. IRS gồm M phần tử phản xạ. Hệ số phản xạ của phần tử phản xạ thứ m -th là $\phi_m = \beta_m e^{j\theta_m}$ với $\theta_m \in (0, 2\pi]$ và $\beta_m \in [0, 1]$, $m \in \mathcal{M} = \{1, \dots, M\}$ lần lượt là pha và biên độ phản xạ. Để đạt được cường độ phản xạ tối đa, giả thiết thường được sử dụng là $\beta_m = 1$ [67]. $\Phi = \text{diag}(\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_M)$ là ma trận pha của IRS. Vector dữ liệu đến SU_k là $\mathbf{s}_k \in \mathbb{C}^{d_k \times 1}$ với $d_k \leq \min\{N_t, N_r\}$ là số luồng dữ liệu của UE_k . Ma trận TPC tín hiệu \mathbf{s}_k cho UE_k là $\mathbf{F}_k \in \mathbb{C}^{N_t \times d_k}$. Khi đó, tín hiệu nhận được tại UE_k là:



Hình 3.1: Mô hình hệ thống MU-MIMO SWIPT có sử dụng IRS.

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{F}_k \mathbf{s}_k + \sum_{j=1, j \neq k}^K \mathbf{H}_k \mathbf{F}_j \mathbf{s}_j + \mathbf{n}_{a_k}, k \in \mathcal{K}, \quad (3.1)$$

với $\mathbf{H}_k \triangleq \mathbf{H}_{b,k} + \mathbf{H}_{r,k} \Phi \mathbf{G}$ là kênh truyền hiệu dụng từ BS và BS-IRS đến UE_k , và $\mathbf{n}_{a_k} \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \sigma_{a_k}^2 \mathbf{I}_{N_r})$ là nhiễu trắng cộng phân bố Gaussian (AWGN) tại UE_k . Tín hiệu thu tại các mạch ID của UE_k được là $\mathbf{y}_k^{ID} = \sqrt{\rho_k} \mathbf{y}_k + \mathbf{n}_{c_k}$ với $\mathbf{n}_{c_k} \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \sigma_{c_k}^2 \mathbf{I}_{N_r})$ là nhiễu do mạch ID tạo ra tại UE_k [75]. Tốc độ dữ liệu đạt được tại UE_k có thể được xác định như sau

$$\mathcal{R}_k(\mathbf{F}, \boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{\phi}) = \log_2 |\mathbf{I}_k + \mathbf{H}_k \mathbf{F}_k \mathbf{F}_k^H \mathbf{H}_k^H \mathbf{J}_k^{-1}|, \quad (3.3)$$

Mặt khác, tín hiệu nhận được ở đầu vào các mạch EH tại UE_k có thể được biểu diễn là $\mathbf{y}_k^{EH} = \sqrt{1 - \rho_k} \mathbf{y}_k$.

Với các mô hình EH phi tuyến, năng lượng thu thập được tại UE_k có thể được biểu diễn [20]

$$\mathcal{E}_k^{NL}(\mathbf{F}, \boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{\phi}) = \frac{\Gamma_k}{1 + \exp(-c_k (\mathcal{E}_k(\mathbf{F}, \boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{\phi}) - b_k))} - \Gamma_k \Omega_k, \quad (3.4)$$

với $\mathcal{E}_k(\mathbf{F}, \boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{\phi}) = (1 - \rho_k) \text{Tr} \left(\sum_{j=1}^K \mathbf{H}_k \mathbf{F}_j \mathbf{F}_j^H \mathbf{H}_k^H \right)$, $\Gamma_k = P_k / (1 - \Omega_k)$. Luận án giả sử CSI là hoàn hảo tại BS.

Bài toán thiết kế có thể được xây dựng là

$$\max_{\mathbf{F}, \boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{\phi}} \quad \mathcal{E}^{NL}(\mathbf{F}, \boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{\phi}) = \sum_{k=1}^K \mathcal{E}_k^{NL}(\mathbf{F}, \boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{\phi}) \quad (3.7a)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{k=1}^K \text{Tr}(\mathbf{F}_k \mathbf{F}_k^H) \leq P_{max}, \quad (3.7b)$$

$$\mathcal{R}_k(\mathbf{F}, \boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{\phi}) \geq \mathbf{r}_{min,k}, \quad k \in \mathcal{K}, \quad (3.7c)$$

$$\mathcal{E}_k^{NL}(\mathbf{F}, \boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{\phi}) \geq \mathbf{e}_{min,k}, \quad k \in \mathcal{K}, \quad (3.7d)$$

$$|\phi_m| = 1, \quad m \in M, \quad (3.7e)$$

$$0 \leq \rho_k \leq 1, \quad k \in \mathcal{K}, \quad (3.7f)$$

với P_{max} là quỹ công suất phát tối đa tại BS, $\mathbf{r}_{min,k}$ là yêu cầu tốc độ người dùng tối thiểu và $\mathbf{e}_{min,k}$ là yêu cầu năng lượng thu thập tối thiểu tại UE_k. Có thể thấy rằng hàm mục tiêu trong bài toán (3.7) là phi tuyến và không lồi theo các biến ma trận TPC, hệ số PS và các pha.

3.3 Đề xuất thuật toán cho tối đa tổng năng lượng thu thập

Trong phần này, cách tiếp cận AO được áp dụng để tách bài toán ban đầu trong (3.7) thành hai bài toán con. Đầu tiên, các ma trận TPC và các hệ số PS được tối ưu trong khi các pha cố định. Để giải quyết khó khăn về tính không lồi và không tuyến tính của hàm mục tiêu và các ràng buộc, các hàm xấp xỉ được xác định dựa trên nguyên lý của phương pháp MM để chuyển bài toán thiết kế thành một bài toán lồi. Sau đó, với các ma trận TPC và các hệ số PS đã cho, pha của các phần tử phản xạ sẽ được tối ưu. Cuối cùng, dựa trên Thuật toán 3.1 và Thuật toán 3.2, luận án đề xuất Thuật toán AO 3.3 để lần lượt tối ưu các ma trận TPC, các hệ số PS và các pha để tối đa SHE được miêu tả sau

Thuật toán 3.3 Thuật toán AO cho tối ưu các ma trận TPC, các hệ số PS và các pha cho tối đa SHE

Các đầu vào: Số vòng lặp tối đa t_{max} , ngưỡng dung sai cho phép ϵ .

Khởi tạo: $\mathbf{F}^{(0)}, \boldsymbol{\rho}^{(0)}, \boldsymbol{\phi}^{(0)}$ khả thi và đặt $t = 0$.

Với $\boldsymbol{\phi} = \boldsymbol{\phi}^{(0)}$ cố định, giải Thuật toán 3.1 để đạt được $\mathbf{F}^{(*)}$, và $\boldsymbol{\rho}^{(*)}$;

Lặp

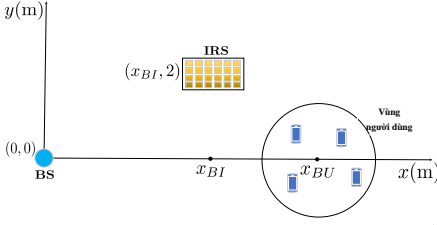
Với $\mathbf{F} = \mathbf{F}^{(*)}$ và $\boldsymbol{\rho} = \boldsymbol{\rho}^{(*)}$ cố định, giải Thuật toán 3.2 để đạt được $\boldsymbol{\phi}^{(*)}$.

Với $\boldsymbol{\phi} = \boldsymbol{\phi}^{(*)}$ cố định, giải Thuật toán 3.1 để đạt được $\mathbf{F}^{(*)}$, và $\boldsymbol{\rho}^{(*)}$;

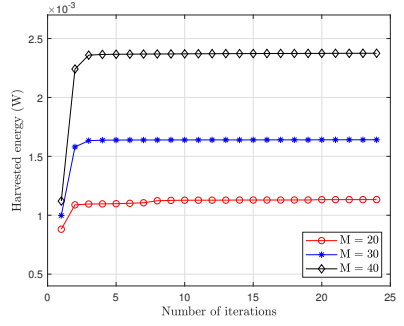
Cập nhật $t \leftarrow t + 1$, $\mathbf{F}^{(t)} = \mathbf{F}^{(*)}$, $\boldsymbol{\rho}^{(t)} = \boldsymbol{\rho}^*$, $\boldsymbol{\phi}^{(t)} = \boldsymbol{\phi}^{(*)}$;

Cho đến khi $\frac{|\mathcal{E}^{NL}(\mathbf{F}^{(t)}, \boldsymbol{\rho}^{(t)}, \boldsymbol{\phi}^{(t)}) - \mathcal{E}^{NL}(\mathbf{F}^{(t-1)}, \boldsymbol{\rho}^{(t-1)}, \boldsymbol{\phi}^{(t-1)})|}{\mathcal{E}^{NL}(\mathbf{F}^{(t-1)}, \boldsymbol{\rho}^{(t-1)}, \boldsymbol{\phi}^{(t-1)})} \leq \epsilon$ hoặc $t > t_{max}$

Các đầu ra: Các giá trị tối ưu $\mathbf{F}^{(opt)} = \mathbf{F}^{(*)}$, $\boldsymbol{\rho}^{(opt)} = \boldsymbol{\rho}^{(*)}$, $\boldsymbol{\phi}^{(opt)} = \boldsymbol{\phi}^{(*)}$.



Hình 3.2: Mô hình mô phỏng cho hệ thống MU-MIMO SWIPT IRS.



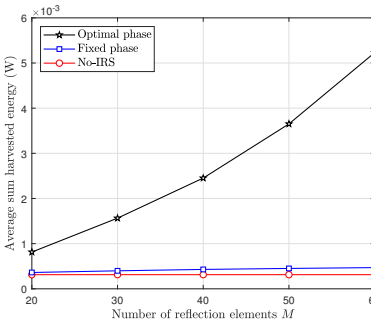
Hình 3.3: Sự hội tụ của Thuật toán AO.

3.4 Kết quả mô phỏng

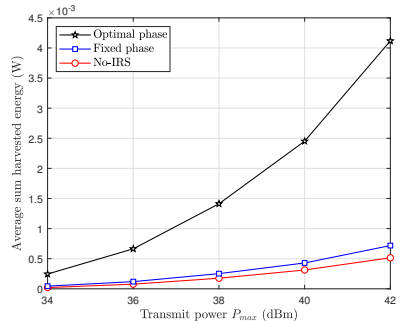
BS được đặt tại tọa độ $(0, 0)$, IRS tại tọa độ $(x_{BI}, 2)$, và có $K = 4$ UE phân bố ngẫu nhiên trong vùng $(x_{BU}, 0)$ có bán kính là 2 m, như trong Hình.3.2. Các tham số mô phỏng được thiết lập là $N_t = 4$, $d_k = 2$, $N_r = 2$, $\alpha_{BI} = 2.2$, $\alpha_{IU} = 2.2$, $\alpha_{BU} = 3.6$, $\sigma_{a_k}^2 = \sigma_{c_k}^2 = 10^{-8}$ W, $P_k = 24$ mW, $c_k = 150$ và $b_k = 0.014$. Hệ số suy hao được đặt là $L_0 = 10^{-3}$ tại $d_0 = 1$ m. Ngoài trừ các thiết lập khác, các tham số mô phỏng được đặt là $P_{max} = 40$ dBm, $x_{BI} = 4$ m, $x_{BU} = 5$ m và $M = 40$, $e_{min,k} = e_{min} = 0.01$ mW, $r_{min,k} = r_{min} = 1$ bps/Hz.

1. *Khảo sát đặc tính hội tụ của thuật toán đề xuất:* Từ Hình 3.3 có thể thấy rằng OF của SHE không giảm qua các vòng lặp và nhanh chóng đạt giá trị hội tụ chỉ sau khoảng dưới 10 vòng. Ngoài ra từ Hình 3.3 đã cho thấy rằng số vòng lặp để đạt được đến giá trị hội tụ của Thuật toán 3.3 thì không thay đổi nhiều khi số phần tử phản xạ thay đổi.

2. *Khảo sát trung bình SHE theo số phần tử phản xạ:* Qua kết quả trong Hình 3.4 có thể thấy rằng trung bình SHE được tăng theo số phần tử phản xạ tại IRS. Hình 3.4 cho thấy rằng mô hình với các pha tối ưu có thể đạt được SHE cao hơn đáng kể so với mô hình No-IRS hoặc Fixed phase. Các kết quả này đã cho thấy sự hiệu quả khi triển khai IRS trong hệ thống MIMO SWIPT.



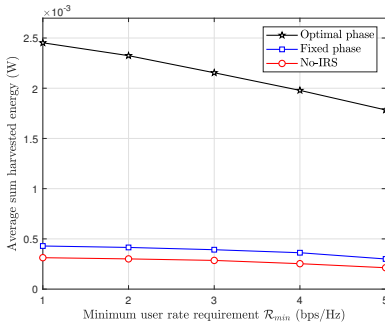
Hình 3.4: Trung bình SHE theo M .



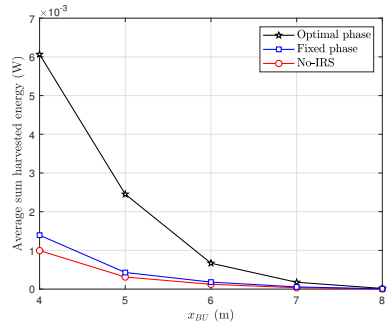
Hình 3.5: Trung bình SHE theo P_{max} .

3. Ảnh hưởng của công suất phát tối đa P_{max} tại BS lên trung bình SHE: Hình 3.5 cho thấy trung bình SHE tăng lên đáng kể khi P_{max} tăng lên. Thêm vào đó, Hình 3.5 cũng chỉ ra rằng hiệu năng của hệ thống về mặt năng lượng thu thập với các pha được thiết kế tối ưu thì tốt hơn nhiều so với các mô hình không có IRS hoặc mô hình có IRS với pha cố định.

4. Khảo sát sự tương nhượng giữa r_{min} và trung bình SHE: Hình 3.6 biểu diễn trung bình SHE theo r_{min} . Theo kết quả trong Hình 3.6, trung bình SHE giảm xuống khi r_{min} tăng lên. Điều này là do các ràng buộc của bài toán tối ưu thì trở nên nghiêm ngặt hơn khi r_{min} tăng lên. Khi đó, các giá trị tối ưu có xu hướng nâng cao tốc độ người dùng để thỏa mãn điều kiện ràng buộc về tốc độ bằng việc hi sinh năng lượng thu thập.



Hình 3.6: Trung bình SHE theo r_{min} .



Hình 3.7: Trung bình SHE theo x_{BU} .

5. Nghiên cứu sự ảnh hưởng của vị trí các người dùng lên trung bình SHE: Từ Hình 3.7 có thể thấy rằng trung bình SHE giảm xuống khi các người dùng cách xa BS và IRS. Mô hình đề xuất với các pha tối ưu vẫn có hiệu năng về mặt SHE cao hơn hai mô hình còn lại.

3.5 Kết luận chương

Trong chương này, việc tối đa SHE của các người dùng trong hệ thống MU-MIMO SWIPT có sử dụng IRS được khảo sát một cách đầy đủ. Các kết quả mô phỏng đã cho thấy sự hội tụ của thuật toán đề xuất được đảm bảo tốt. Các kết quả mô phỏng thể hiện rằng hệ thống MU-MIMO SWIPT IRS với các pha tối ưu có thể cải thiện SHE một cách đáng kể. Do đó, việc sử dụng IRS và hệ thống MU-MIMO SWIPT là một cách tiếp cận hiệu quả để nâng cao hiệu năng của hệ thống về mặt thu thập năng lượng.

CHƯƠNG 4 TỐI ĐA HIỆU SUẤT PHỔ VÀ HIỆU SUẤT NĂNG LƯỢNG TRONG HỆ THỐNG VÔ TUYẾN NHẬN THỨC MU-MIMO SWIPT SỬ DỤNG IRS

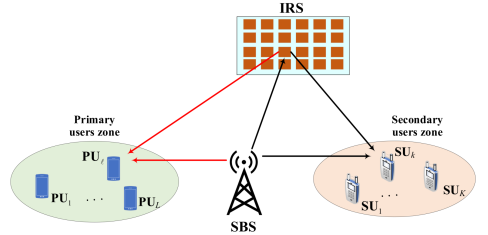
Nội dung của chương này được trình bày trong công trình số 4 và số 5.

4.1 Giới thiệu

Chương này xem xét một hệ thống vô tuyến nhận thức (Cognitive radio: CR) dạng nền MU-MIMO SWIPT có sự hỗ trợ IRS, trong đó, các người dùng thứ cấp (SU) dùng kỹ thuật PS để thực hiện ID và EH đồng thời. Mục tiêu của chương này nhằm tối đa SE và EE của các SU dưới điều kiện ràng buộc năng lượng thu thập tối thiểu tại mỗi SU lớn hơn mức yêu cầu tối thiểu và công suất can nhiễu do SBS gây ra tại các người dùng sơ cấp (PU) phải đảm bảo không vượt quá mức ngưỡng cho phép.

4.2 Mô hình hệ thống và bài toán thiết kế

Xem xét một hệ thống như trong Hình 4.1 với K SU và L PU, tập các SU và PU lần lượt là $\mathcal{K} = \{1, \dots, K\}$ và $\mathcal{L} = \{1, \dots, L\}$. SBS, các SU và các PU được trang bị N_t , N_r và N_{PU} antenna. IRS tích cực gồm M phần tử phản xạ. Hệ số phản xạ của phần tử phản xạ thứ m -th là $\phi_m = \beta_m e^{j\theta_m}$ với $\theta_m \in (0, 2\pi]$ và $\beta_m \in [0, 1]$, $m \in \mathcal{M} = \{1, \dots, M\}$ lần lượt là pha và biên độ phản xạ. $\Phi = \text{diag}(\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_M)$ là ma trận hệ số phản xạ (RCM) của IRS.



Hình 4.1: Mô hình hệ thống MU-MIMO SWIPT CR IRS.

Vector dữ liệu đến SU_k là $\mathbf{s}_k \in \mathbb{C}^{d_k \times 1}$ với $d_k \leq \min\{N_t, N_r\}$ là số luồng dữ liệu của SU_k . Ma trận TPC tín hiệu \mathbf{s}_k cho SU_k là $\mathbf{F}_k \in \mathbb{C}^{N_t \times d_k}$.

Luận án giả sử CSI hoàn hảo của các kênh truyền trong mạng thứ cấp, trong khi giả sử CSI không hoàn hảo của các kênh truyền PU. Các lỗi kênh truyền PU được mô hình biên độ sai số giới hạn (NBE). Khi đó, tổng công suất can nhiễu tại PU_ℓ là

$$P_{I_\ell}(\mathbf{F}, \boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{\phi}) = \sum_{k=1}^K \|\mathbf{L}_\ell \mathbf{F}_k\|_F^2 = \|\mathbf{L}_\ell \tilde{\mathbf{F}}\|_F^2, \quad (4.6)$$

với $\tilde{\mathbf{F}} \triangleq [\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2, \dots, \mathbf{F}_K]$, $\tilde{\mathbf{F}} \in \mathbb{C}^{N_t \times d_k K}$, $\mathbf{L}_\ell = \mathbf{L}_{b,\ell} + \mathbf{L}_{r,\ell} \Phi \mathbf{G}$.

Bài toán tối đa SE (SEM) được xây dựng như sau

$$\max_{\mathbf{F}, \boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{\phi}} \quad \mathcal{R}(\mathbf{F}, \boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{\phi}) = \sum_{k=1}^K \mathcal{R}_k(\mathbf{F}, \boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{\phi}) \quad (4.7a)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{k=1}^K \text{Tr}(\mathbf{F}_k \mathbf{F}_k^H) \leq P_{max}, \quad (4.7b)$$

$$\mathcal{E}_k^{NL}(\mathbf{F}, \boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{\phi}) \geq e_{min,k}, \forall k \in \mathcal{K}, \quad (4.7c)$$

$$|\phi_m| = 1, \forall m \in \mathcal{M}, \quad (4.7d)$$

$$0 \leq \rho_k \leq 1, \forall k \in \mathcal{K}, \quad (4.7e)$$

$$P_{I_\ell}(\mathbf{F}, \boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{\phi}) \leq \Upsilon_\ell, \forall \ell \in \mathcal{L}. \quad (4.7f)$$

với P_{max} là công suất phát tối đa tại SBS, $e_{min,k}$ là năng lượng yêu cầu tối thiểu cần thu thập được tại SU_k , và Υ_ℓ là ngưỡng IP cho phép tại PU_ℓ . Lưu ý rằng bài toán (4.7) không lỗi do tính không lõm của hàm mục tiêu, các ràng buộc không lỗi. Đặc biệt, ràng buộc (4.7f) là các ràng buộc bán vô hạn rất khó để giải quyết.

Bài toán tối đa EE (EEM) được xây dựng như sau

$$\max_{\mathbf{F}, \boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{\phi}} \quad \Psi(\mathbf{F}, \boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{\phi}) = \frac{\sum_{k=1}^K \mathcal{R}_k(\mathbf{F}, \boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{\phi})}{\sum_{k=1}^K \text{Tr}(\mathbf{F}_k \mathbf{F}_k^H) + P_0} \quad (4.8a)$$

$$\text{s.t.} \quad (4.7b) - (4.7f). \quad (4.8b)$$

Bài toán 4.8 là bài toán không lỗi do hàm mục tiêu là một hàm phân số và các ràng buộc là các ràng buộc không lỗi.

4.3 Đề xuất phương pháp cho tối đa SE

Bằng cách khai thác sự tương đương giữa hàm tốc độ dữ liệu và MMSE, hàm mục tiêu trong bài toán gốc ban đầu được chuyển thành một hàm tương đương để có thể được phân tách dễ dàng hơn [105]. Sau đó, luận án tách bài toán thành ba bài toán con bao gồm: *Bài toán con số 1 - Đồng thời tối ưu $\{\mathbf{U}, \mathbf{W}\}$ với $\{\mathbf{F}, \boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{\phi}\}$ được cố định*, *Bài toán con số 2 - Đồng thời tối ưu $\{\mathbf{F}, \boldsymbol{\rho}\}$ với $\{\mathbf{U}, \mathbf{W}, \boldsymbol{\phi}\}$ được cố định* và *Bài toán con số 3 - Tối ưu $\{\boldsymbol{\phi}\}$ với $\{\mathbf{F}, \boldsymbol{\rho}, \mathbf{U}, \mathbf{W}\}$ cố định*. Cuối cùng, luận án đề xuất Thuật toán 4.3 lần lượt tìm các ma trận TPC, các hệ số PS và các pha của các phần tử phản xạ tối ưu của bài toán (4.7).

4.4 Đề xuất phương pháp cho tối đa EE

Trong phần này, luận án áp dụng phương pháp MM để tìm các hàm thay thế phù hợp cho hàm tốc độ dữ liệu và hàm thu thập năng lượng phi tuyến, đồng thời, áp dụng phương pháp Dinkelbach để giải quyết hàm mục tiêu phân số EE. Ngoài ra, luận án sử dụng kỹ thuật P-CCP để xử lý các ràng buộc không lỗi UMC của IRS. Bài toán 4.8 được tách thành hai bài toán con: *Bài toán con số 4: Tối ưu đồng thời $\{\mathbf{F}, \boldsymbol{\rho}\}$ với $\boldsymbol{\phi}$ cố định* và *Bài toán con số 5: Tối ưu $\boldsymbol{\phi}$ với $\{\mathbf{F}, \boldsymbol{\rho}\}$ cố định*. Theo đó, thuật toán lặp tối

Thuật toán 4.3 Thuật toán AO để tối ưu các ma trận TPC, các hệ số PS và các pha của IRS cho tối đa SE

- 1: **Đầu vào:** Số vòng lặp tối đa ι_{max} , ngưỡng dung sai thuật toán ϵ .
 - 2: **Khởi tạo:** $\mathbf{F}^{(0)}$, $\boldsymbol{\rho}^{(0)}$, $\phi^{(0)}$ khả thi và đặt $\iota = 0$.
 - 3: **Lặp:**
 - 4: Cố định $\{\mathbf{F}^{(\iota)}, \boldsymbol{\rho}^{(\iota)}, \phi^{(\iota)}\}$, tính $\mathbf{U}^{(*)}$ và $\mathbf{W}^{(*)}$ sử dụng (4.11) và (4.12);
 - 5: Cố định $\{\phi^{(\iota)}, \mathbf{U}^{(*)}, \mathbf{W}^{(*)}\}$, tìm $\{\mathbf{F}^{(*)}, \boldsymbol{\rho}^{(*)}\}$ bằng cách giải (4.28) sử dụng Thuật toán 4.1;
 - 6: Cố định $\{\mathbf{F}^{(*)}, \boldsymbol{\rho}^{(*)}, \mathbf{U}^{(*)}, \mathbf{W}^{(*)}\}$, tìm $\phi^{(*)}$ bằng cách giải (4.34) sử dụng Thuật toán 4.2;
 - 7: Cập nhật $\iota \leftarrow \iota + 1$, $\mathbf{F}^{(\iota)} = \mathbf{F}^{(*)}$, $\boldsymbol{\rho}^{(\iota)} = \boldsymbol{\rho}^{(*)}$, $\phi^{(\iota)} = \phi^{(*)}$;
 - 8: **Cho đến khi:** $\frac{|\mathcal{F}(\mathbf{F}^{(\iota)}, \boldsymbol{\rho}^{(\iota)}, \phi^{(\iota)}) - \mathcal{F}(\mathbf{F}^{(\iota-1)}, \boldsymbol{\rho}^{(\iota-1)}, \phi^{(\iota-1)})|}{\mathcal{F}(\mathbf{F}^{(\iota-1)}, \boldsymbol{\rho}^{(\iota-1)}, \phi^{(\iota-1)})} \leq \epsilon$ hoặc $\iota > \iota_{max}$.
 - 9: **Đầu ra:** $\mathbf{F}^{(opt)} = \mathbf{F}^{(\iota)}$, $\boldsymbol{\rho}^{(opt)} = \boldsymbol{\rho}^{(\iota)}$, $\phi^{(opt)} = \phi^{(\iota)}$.
-

ưu để đạt được ma trận TPC, các hệ số PS, ma trận dịch pha tối ưu được mô tả chi tiết trong Thuật toán 4.6.

Thuật toán 4.6 Thuật toán tối ưu lặp để tìm các ma trận TPC, hệ số PS, ma trận dịch pha tối ưu cho bài toán tối đa EE

- 1: **Đầu vào:** Số vòng lặp tối đa ι_{max} , ngưỡng dung sai lỗi ε .
 - 2: **Khởi tạo:** $\mathbf{F}^{(0)}$, $\boldsymbol{\rho}^{(0)}$, $\phi^{(0)}$, thiết lập $\iota = 0$.
 - 3: **Lặp:**
 - 4: Cố định $\{\phi^{(\iota)}\}$, tìm $\{\bar{\mathbf{F}}, \bar{\boldsymbol{\rho}}\}$ bằng cách giải (4.38) sử dụng Thuật toán 4.4;
 - 5: Cố định $\{\bar{\mathbf{F}}, \bar{\boldsymbol{\rho}}\}$, tìm ϕ bằng cách giải (4.43) sử dụng Thuật toán 4.5;
 - 6: Cập nhật $\iota \leftarrow \iota + 1$, $\mathbf{F}^{(\iota)} = \bar{\mathbf{F}}$, $\boldsymbol{\rho}^{(\iota)} = \bar{\boldsymbol{\rho}}$, $\phi^{(\iota)} = \bar{\phi}$.
 - 7: **Cho đến khi:** $\frac{|\Psi(\mathbf{F}^{(\iota)}, \boldsymbol{\rho}^{(\iota)}, \phi^{(\iota)}) - \Psi(\mathbf{F}^{(\iota-1)}, \boldsymbol{\rho}^{(\iota-1)}, \phi^{(\iota-1)})|}{\Psi(\mathbf{F}^{(\iota-1)}, \boldsymbol{\rho}^{(\iota-1)}, \phi^{(\iota-1)})} \leq \varepsilon$ hoặc $\iota > \iota_{max}$.
 - 8: **Đầu ra:** $\mathbf{F}^{(opt)} = \mathbf{F}^{(\iota)}$, $\boldsymbol{\rho}^{(opt)} = \boldsymbol{\rho}^{(\iota)}$, $\phi^{(opt)} = \phi^{(\iota)}$.
-

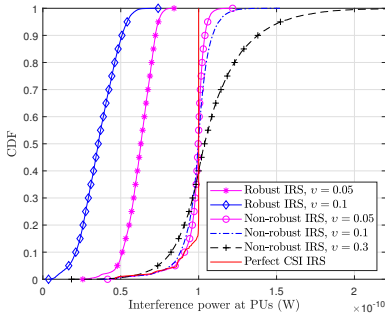
4.5 Kết quả mô phỏng

Vị trí của SBS, IRS, vị trí trung tâm của các SU và vị trí trung tâm của các PU được đặt lần lượt tại các tọa độ (0, 0) m, (4, 4) m, $(x_{BU}, 0)$ m, và $(x_{BP}, 0)$ m. Các giá trị thành phần không chắc chắn NBE được đặt là $\varepsilon_{b,\ell} = v \|\bar{\mathbf{L}}_{b,\ell}\|_F$ và $\varepsilon_{r,\ell} = v \|\bar{\mathbf{L}}_{r,\ell}\|_F$ với mọi $\ell \in \mathcal{L}$ và $v \in [0, 1]$ [104]. Ngoại trừ có các phát biểu khác, luận án đặt $P_{max} = 40$ dBm, $x_{BU} = 5$ m, $M = 20$, $N_t = 4$, $v = 0.05$, $d_k = 2$, $\forall k \in \mathcal{K}$, $N_r = N_{PU} = 2$, $\sigma_{a_k}^2 = \sigma_{c_k}^2 = -60$ dBm, $\forall k \in \mathcal{K}$, $P_k = 24$ mW, và $a_k = 150$, $b_k = 0.014$, $\forall k \in \mathcal{K}$

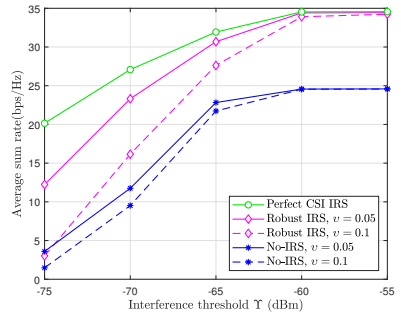
[110], $\epsilon = 10^{-3}$, $\kappa_{max} = t_{max} = \iota_{max} = 100$. Trong mô phỏng bài toán SEM, các tham số là $\alpha_{BI} = 2.2$, $\alpha_{IU} = 2.2$, $\alpha_{BU} = 3.6$, $\alpha_{IP} = 2.4$, $K = 4$ SU, $L = 2$ PU, $x_{BP} = -150$ m, $M = 20$, $e_{min,k} = 0.02$ mW, và $\Upsilon_\ell = \Upsilon = -70$ dBm. Trong mô phỏng bài toán EEM, luận án đặt $\alpha_{BI} = \alpha_{IU} = \alpha_{IP} = 2.2$, $\alpha_{BU} = 3.75$, $x_{BP} = -50$ m, $K = 2$ SU, $L = 2$ PU, $M = 30$, $\Upsilon_\ell = \Upsilon = -60$ dBm, $\omega = 10$, $\omega_{max} = 1000$, $\tau = 5$ [108], $P = 1$ W, $p_k = 5$ mW, $P_s = 100$ mW, $P_d = 0.33$ mW [112].

1. *Sự hội tụ của các thuật toán đề xuất:* Hình 4.2 và Hình 4.3 cho thấy thuật toán SEM và EEM đề xuất đều hội tụ tốt.

2. *Đánh giá tính hiệu quả của thuật toán thiết kế bền vững:* Các kết quả trong Hình 4.4 cho thấy IP tại các PU gây ra bởi SBS với thuật toán thiết kế bền vững đã được đề xuất luôn đảm bảo dưới mức ngưỡng can nhiễu cho phép ($\Upsilon = -70$ dBm) với các mức lỗi CSI v khác nhau. Kết quả mô phỏng đã chứng minh thuật toán thiết kế bền vững cho trường hợp CSI không hoàn hảo trong chương này có hiệu quả rất cao. Điều này giúp cho hệ thống hoạt động ổn định và bền vững.



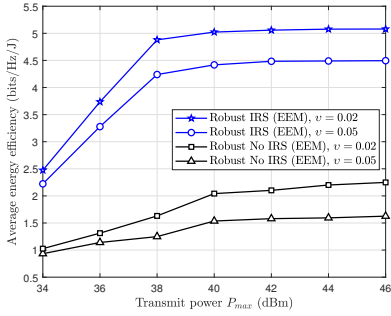
Hình 4.4: Hàm CDF của công suất can nhiễu tại các PU.



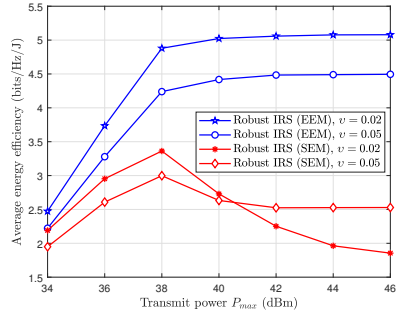
Hình 4.5: Trung bình SR của các SU với Υ khác nhau.

3. *Đánh giá SE của hệ thống với các ngưỡng IP Υ :* Các kết quả trong Hình 4.5 chỉ ra rằng khi mức ngưỡng IP tăng lên các tốc độ dữ liệu của tất cả các mô hình khảo sát cũng tăng lên. Ngoài ra, SR của các mô hình cũng tăng lên khi lỗi CSI không hoàn hảo giảm xuống.

4. *Đánh giá EE của các mô hình EEM:* Hình 4.9 cung cấp EE trung bình cho hai trường hợp của hệ thống có IRS và không có IRS theo P_{max} . EE trung bình có sự thay đổi khác nhau ứng với sự thay đổi của công suất phát tại SBS. Khi công suất phát tại SBS dưới 38 dBm thì EE trung bình tăng rõ rệt khi công suất của SBS tăng lên. Tuy nhiên, khi tăng P_{max} từ 38 dBm trở lên thì EE trung bình không được cải thiện đáng kể, và tiến đến giá trị bão hòa khi công suất phát lớn hơn 42 dBm. 5. *Đánh giá EE của*



Hình 4.9: Trung bình EE theo công suất phát P_{max} .



Hình 4.10: EE trung bình theo P_{max} cho EEM và SEM.

EEM và SEM: Như được thấy trong Hình 4.10, EE của bài toán SEM giảm khá mạnh khi công suất phát tăng lên. Ngoài ra, EE của bài toán EEM luôn cao hơn bài toán SEM, đặc biệt là khi công suất phát lớn. Lý do là bài toán SEM tập trung sử dụng hết quỹ công suất phát nhằm cải thiện hiệu suất phổ, do đó dẫn đến EE bị giảm xuống.

4.6 Kết luận chương

Chương này đã đề xuất thuật toán tối đa SE và va thuật toán tối đa EE của hệ thống MU-MIMO SWIPT CR có sử dụng IRS. Trong bài toán SEM luận án sử dụng mối liên hệ giữa MMSE và hàm tốc độ dữ liệu để chuyển hàm mục tiêu thành một hàm có thể phân tách được. Với bài toán EEM, luận án áp dụng phương pháp MM và Dinkelbach để giải quyết khó khăn trong hàm mục tiêu phân số. Sau đó, thuật toán AO, xấp xỉ lồi liên tiếp và các ràng buộc LMI đã được kết hợp để tìm được lời giải tối ưu cho các ma trận TPC tại SBS, ma trận dịch pha tại IRS và các hệ số PS tại các SU. Kết quả mô phỏng đã cho thấy hiệu năng của các hệ thống có IRS được thiết kế tối ưu tốt hơn nhiều so với các hệ thống không sử dụng IRS.

CHƯƠNG 5 TỐI ĐA HIỆU SUẤT PHỔ TRONG HỆ THỐNG VÔ TUYẾN NHẬN THỨC MU-MIMO SWIPT SỬ DỤNG IRS TÍCH CỰC

Nội dung của chương này được trình bày trong công trình số 2.

5.1 Giới thiệu

Chương này đề xuất thuật toán tối đa SR của các SU trong hệ thống vô tuyến nhận thức dạng nền MU-MIMO SWIPT được hỗ trợ bởi một IRS tích cực (MU-MIMO SWIPT CR IRS tích cực) với các SU sử dụng kỹ thuật PS để thực hiện ID và EH cùng lúc. Bài

toán tối đa SR được thực hiện bằng cách thiết kế tối ưu đồng thời các ma trận TPC tại SBS, ma trận hệ số phản xạ (reflection coefficient matrix: RCM) tại IRS và các hệ số PS tại các SU dưới các điều kiện ràng buộc quỹ công suất phát tại SBS, ràng buộc IP tại các PU nhỏ hơn một ngưỡng cho phép, ràng buộc công suất khuếch đại trên IRS, ràng buộc biên độ trên các phần tử phản xạ của IRS, và yêu cầu HE tối thiểu của từng SU.

5.2 Mô hình hệ thống và bài toán thiết kế

Xét một hệ thống MU-MIMO SWIPT CR có sự hỗ trợ của IRS như trong Chương 4, tuy nhiên, IRS trong Chương 5 này là IRS tích cực gồm M phần tử phản xạ. Do đó, hệ số phản xạ của phần tử phản xạ thứ m -th là $\phi_m = \beta_m e^{j\theta_m}$ với $\theta_m \in (0, 2\pi]$ và $\beta_m \in [0, \beta_m^{max}]$, $m \in \mathcal{M} = \{1, \dots, M\}$ lần lượt là pha và biên độ phản xạ. $\Phi = \text{diag}(\phi_1, \phi_2 \dots, \phi_M)$ là ma trận hệ số phản xạ (RCM) của IRS.

Tín hiệu nhận được tại SU_k được viết lại

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{H}_{U,k} \mathbf{F}_k \mathbf{s}_k + \sum_{j=1, j \neq k}^K \mathbf{H}_{U,k} \mathbf{F}_j \mathbf{s}_j + \mathbf{H}_{IU,k} \Phi \mathbf{n}_I + \mathbf{n}_{a_k}, \forall k \in \mathcal{K}, \quad (5.1)$$

với $\mathbf{H}_{U,k} \triangleq \mathbf{H}_{BU,k} + \mathbf{H}_{IU,k} \Phi \mathbf{G}$ là kênh truyền tổng từ SBS đến SU_k , và $\mathbf{n}_I \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \sigma_I^2 \mathbf{I}_{N_r})$, $\mathbf{n}_{a_k} \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \sigma_{a_k}^2 \mathbf{I}_{N_r})$ là nhiễu cộng trắng tại IRS và SU_k [118]. Khi đó, tín hiệu nhận được tại SU_k cho ID là $\mathbf{y}_k^{ID} = \sqrt{\rho_k} \mathbf{y}_k + \mathbf{n}_{c_k}$ với $\mathbf{n}_{c_k} \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \sigma_{c_k}^2 \mathbf{I}_{N_r})$ là vector nhiễu mạch ID [75]. Do đó, tốc độ dữ liệu (nats/s/Hz) tại SU_k là

$$\mathcal{R}_k(\mathbf{F}, \boldsymbol{\rho}, \Phi) = \ln |\mathbf{I} + \mathbf{H}_{U,k} \mathbf{F}_k \mathbf{F}_k^H \mathbf{H}_{U,k}^H \mathbf{J}_k^{-1}|, \forall k \in \mathcal{K}. \quad (5.2)$$

Tương tự, tín hiệu nhận tại SU_k cho EH là $\mathbf{y}_k^{EH} = \sqrt{1 - \rho_k} \mathbf{y}_k$. Công suất nhiễu $\sigma_{a_k}^2$ rất nhỏ so với công suất tín hiệu nhận được nên công suất nhiễu có thể được bỏ qua. Khi đó, năng lượng đầu vào mạch EH tại SU_k là $\mathcal{E}_k(\mathbf{F}, \boldsymbol{\rho}, \Phi) =$

$$(1 - \rho_k) \text{Tr} \left(\sum_{j=1}^K \mathbf{H}_{U,k} \mathbf{F}_j \mathbf{F}_j^H \mathbf{H}_{U,k}^H \right) + (1 - \rho_k) \sigma_I^2 \text{Tr} (\mathbf{H}_{IU,k} \Phi \Phi^H \mathbf{H}_{IU,k}^H)$$

HE tại SU_k theo mô hình phi tuyến là [20]

$$\mathcal{E}_k^{NL}(\mathbf{F}, \boldsymbol{\rho}, \Phi) = \frac{\Gamma_k}{1 + \exp(-p_k (\mathcal{E}_k(\mathbf{F}, \boldsymbol{\rho}, \Phi) - q_k))} - \Gamma_k \Omega_k, \quad (5.6)$$

với $\Omega_k = (1 + \exp(p_k q_k))^{-1}$, $\Gamma_k = P_k / (1 - \Omega_k)$. Ở đây, P_k là công suất bão hòa của mạch EH SU_k , các tham số p_k và q_k là các tham số mạch EH.

Tổng IP tại PU_ℓ gây ra bởi SBS được biểu diễn như sau

$$P_{I_\ell}(\mathbf{F}, \boldsymbol{\rho}, \Phi) = \|\mathbf{H}_{P,\ell} \tilde{\mathbf{F}}\|_F^2 + \sigma_I^2 \|\mathbf{H}_{IP,\ell} \Phi\|_F^2, \forall \ell \in \mathcal{L}, \quad (5.7)$$

với $\mathbf{H}_{P,\ell} = \mathbf{H}_{BP,\ell} + \mathbf{H}_{IP,\ell} \Phi \mathbf{G}$, $\tilde{\mathbf{F}} \triangleq [\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2, \dots, \mathbf{F}_K] \in \mathbb{C}^{N_t \times d}$, $d = \sum_k^K d_k$.

Luận án giả sử CSI hoàn hảo của các kênh truyền trong mạng thứ cấp, trong khi giả sử CSI không hoàn hảo của các kênh truyền PU. Các lỗi kênh truyền PU được mô hình biên độ sai số giới hạn (NBE).

Công suất tín hiệu đầu ra của IRS tích cực là [111].

$$\sum_{k=1}^K \text{Tr}(\Phi \mathbf{G} \mathbf{F}_k \mathbf{F}_k^H \mathbf{G}^H \Phi^H) + \sigma_I^2 \text{Tr}(\Phi \Phi^H) \leq P_{IRS}^{max}, \quad (5.11)$$

trong đó, P_{IRS}^{max} là công suất khuếch đại tối đa.

Bài toán thiết kế được biểu diễn như sau

$$\max_{\mathbf{F}, \boldsymbol{\rho}, \Phi} \mathcal{R}(\mathbf{F}, \boldsymbol{\rho}, \Phi) = \sum_{k=1}^K \mathcal{R}_k(\mathbf{F}, \boldsymbol{\rho}, \Phi) \quad (5.12a)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{k=1}^K \text{Tr}(\mathbf{F}_k \mathbf{F}_k^H) \leq P_{max}, \quad (5.12b)$$

$$\mathcal{E}_k^{NL}(\mathbf{F}, \boldsymbol{\rho}, \Phi) \geq \mathbf{e}_k^{req}, \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad (5.12c)$$

$$|\phi_m| \leq \beta_m^{max}, \quad \forall m \in \mathcal{M}, \quad (5.12d)$$

$$0 \leq \rho_k \leq 1, \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad (5.12e)$$

$$(5.10), (5.11), \quad (5.12f)$$

trong đó P_{max} là quỹ công suất phát của SBS trong khi \mathbf{e}_k^{req} là yêu cầu HE tối thiểu tại SU_k . Lưu ý rằng bài toán (5.12) không lồi do tính không lồi của hàm mục tiêu và các ràng buộc không lồi. Ngoài ra, ràng buộc bán vô hạn (5.10) đặt ra thêm nhiều thách thức để giải quyết bài toán(5.12).

5.3 Đề xuất phương pháp cho tối đa SR

Thuật toán 5.3 Thuật toán AO để xác định các ma trận TPC, các hệ số PS và RCM tối ưu

- 1: **Đầu vào:** I_{max}, ϵ .
 - 2: **Khởi tạo:** $\mathbf{F}^{(0)}, \boldsymbol{\rho}^{(0)}, \Phi^{(0)}$ khả thi và thiết lập $\iota = 0$.
 - 3: **Lặp:**
 - 4: Với $\{\mathbf{F}^{(\iota)}, \boldsymbol{\rho}^{(\iota)}, \Phi^{(\iota)}\}$ cố định, tìm $\bar{\mathbf{U}}$ và $\bar{\mathbf{W}}$ sử dụng (5.16) và (5.17);
 - 5: Với $\{\Phi^{(\iota)}, \bar{\mathbf{U}}, \bar{\mathbf{W}}\}$ cố định, tìm $\{\bar{\mathbf{F}}, \bar{\boldsymbol{\rho}}\}$ bằng cách giải (5.44) theo Thuật toán 5.1;
 - 6: Với $\{\bar{\mathbf{F}}, \bar{\boldsymbol{\rho}}, \bar{\mathbf{U}}, \bar{\mathbf{W}}\}$ cố định, tìm $\bar{\Phi}$ bằng cách giải (5.50) theo Thuật toán 5.2;
 - 7: Cập nhật $\iota \leftarrow \iota + 1$, $\mathbf{F}^{(\iota)} = \bar{\mathbf{F}}, \boldsymbol{\rho}^{(\iota)} = \bar{\boldsymbol{\rho}}, \Phi^{(\iota)} = \bar{\Phi}$.
 - 8: **Cho đến khi:** $\frac{|\mathcal{F}(\mathbf{F}^{(\iota)}, \boldsymbol{\rho}^{(\iota)}, \Phi^{(\iota)}) - \mathcal{F}(\mathbf{F}^{(\iota-1)}, \boldsymbol{\rho}^{(\iota-1)}, \Phi^{(\iota-1)})|}{\mathcal{F}(\mathbf{F}^{(\iota-1)}, \boldsymbol{\rho}^{(\iota-1)}, \Phi^{(\iota-1)})} \leq \epsilon$ hoặc $\iota > I_{max}$.
 - 9: **Đầu ra:** $\mathbf{F}^{\text{opt}} = \mathbf{F}^{(\iota)}, \boldsymbol{\rho}^{\text{opt}} = \boldsymbol{\rho}^{(\iota)}, \Phi^{\text{opt}} = \Phi^{(\iota)}$.
-

Để giải quyết vấn đề gốc ban đầu không thể giải trực tiếp, luận án tận dụng phương

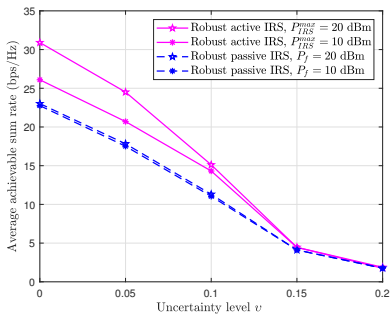
pháp MMSE để chuyển đổi OF thành một hàm có thể giải quyết được (bài toán đã biến đổi) [105]. Sau đó, luận án tách bài toán đã biến đổi thành ba bài toán con, bao gồm: *Bài toán con 1: Tối ưu đồng thời $\{\mathbf{U}, \mathbf{W}\}$ với $\{\mathbf{F}, \boldsymbol{\rho}, \Phi\}$ cố định*, *Bài toán con 2: Tối ưu đồng thời $\{\mathbf{F}, \boldsymbol{\rho}\}$ với $\{\mathbf{U}, \mathbf{W}, \Phi\}$ cố định* và *Bài toán con 3: Tối ưu $\{\Phi\}$ với $\{\mathbf{F}, \boldsymbol{\rho}, \mathbf{U}, \mathbf{W}\}$ cố định*. Cuối cùng, thuật toán AO để xác định các ma trận TPC, các hệ số PS và RCM tối ưu cho bài toán (5.12) được trình bày trong Thuật toán 5.3.

5.4 Kết quả mô phỏng

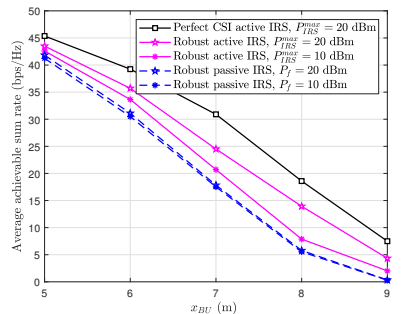
Tham số mô phỏng được thiết lập như sau $K = 3$ SU, $L = 2$ PU, $\sigma_{a_k}^2 = \sigma_{c_k}^2 = \sigma_I^2 = -70$ dBm, $d_k = 2$, $N_r = N_{PU} = 2$, $\alpha_{BP} = 3.6$ và $\alpha_{IP} = 2.4$, $P_k = 24mW$, $p_k = 150$, $q_k = 0.014$, $\alpha_{BI} = \alpha_{IU} = 2.2$, $\kappa_{BI} = \kappa_{IU} = \kappa_{IP} = 3$, $\epsilon = 10^{-3}$, $I_{max} = 100$. SBS đặt tại vị trí $(0, 0)$ m và IRS tại $(x_{BI}, 4)$ m. Các SU trong vùng $(x_{BU}, 0)$ m với bán kính 2 m, các PU phân bố trong vùng $(-150, 0)$ m với bán kính 10 m. Sai số có giới hạn được đặt là $\tau_{b,\ell} = v \|\bar{\mathbf{H}}_{BP,\ell}\|_F$ và $\tau_{r,\ell} = v \|\bar{\mathbf{H}}_{IP,\ell}\|_F, \forall \ell \in \mathcal{L}$ với $v \in [0, 1]$ [104]. Để đạt được sự công bằng trong so sánh với IRS tích cực, luận án đặt công suất phát SBS trong hệ thống được hỗ trợ bởi IRS thụ động là $P_{max} + P_f$ với $P_f = P_{IRS}^{max}$. Ngoại trừ có quy định khác, luận án đặt $P_{max} = 40$ dBm, $x_{BU} = 7$ m, $x_{BI} = 4$ m, $M = 20$, $N_t = 4$, $e_k^{req} = 0.01$ mW, $\Upsilon_\ell = \Upsilon = -70$ dBm, $\alpha_{BU} = 3.6$, $v = 0.05$, $\beta_m^{max} = 1.9, \forall m \in \mathcal{M}$.

1. *Khảo sát sự hội tụ của thuật toán AO:* Hình 5.1 cho thấy hàm mục tiêu SR của tất cả các mô hình khảo sát không giảm qua các vòng lặp.

2. *Khảo sát SR có thể đạt được theo các mức độ không chắc chắn về CSI:* Hình 5.5 cho thấy SR có thể đạt được giảm khi mức độ không chắc chắn về CSI tăng lên. Điều này là do với mức độ không chắc chắn lớn hơn, hệ thống phải phân phối nhiều bậc tự do hơn để giải quyết các ràng buộc bền vững IP. Kết quả trong Hình 5.5 cũng cho thấy rằng hệ thống với IRS tích cực vượt trội so với hệ thống với IRS thụ động. Khoảng cách hiệu năng lớn hơn khi mức độ không chắc chắn về CSI nhỏ hơn.



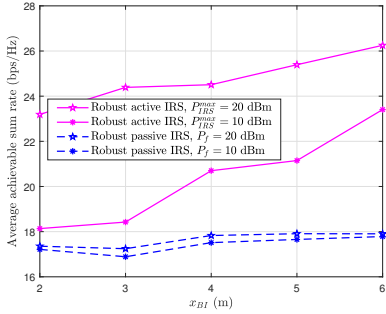
Hình 5.5: SR trung bình theo các mức độ không chắc chắn về CSI.



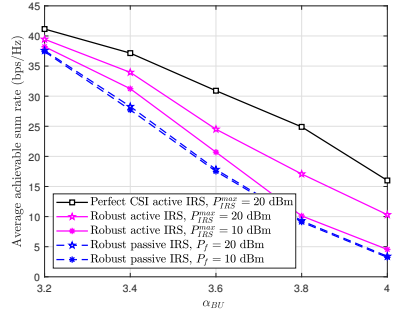
Hình 5.7: SR trung bình theo vị trí trung tâm của các SU.

3. *Khảo sát SR trung bình theo vị trí trung tâm của các SU:* Hình 5.7 cho thấy khi khoảng cách giữa SBS và các SU tăng lên, SR trung bình giảm đáng kể trên tất cả các mô hình. Tuy nhiên, đối với bất kỳ vị trí SU nào, các mô hình IRS tích cực cho thấy hiệu năng vượt trội so với các mô hình IRS thụ động.

4. *Khảo sát SR trung bình theo vị trí của IRS:* Trong Hình 5.8, có thể quan sát thấy rằng SR của hệ thống được hỗ trợ bởi IRS tích cực tốt hơn so với hệ thống được hỗ trợ bởi IRS thụ động cho bất kỳ vị trí nào của IRS.

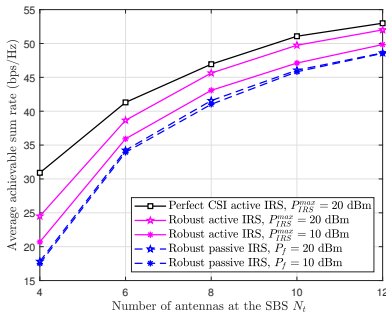


Hình 5.8: SR trung bình theo vị trí của IRS x_{BI} .

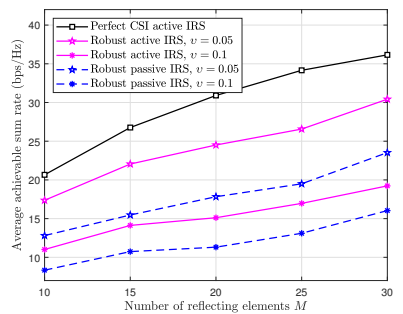


Hình 5.9: SR trung bình theo hệ số suy hao đường truyền α_{BU} .

5. *Khảo sát SR có thể đạt được theo hệ số suy hao đường truyền giữa SBS và các SU:* Hình 5.9 cho thấy rằng SR của tất cả các mô hình giảm nhanh chóng khi hệ số α_{BU} tăng lên. Điều này chủ yếu là do suy giảm tín hiệu trở nên nghiêm trọng hơn khi α_{BU} tăng. Kết quả là, các tín hiệu nhận được tại các SU trở nên yếu hơn. Ngoài ra khi suy hao các đường truyền giữa SBS và các SU trở nên nghiêm trọng hơn, vai trò của IRS tích cực trở nên quan trọng hơn.



Hình 5.10: SR trung bình theo số antenna của SBS.



Hình 5.11: SR trung bình theo số lượng các phần tử phản xạ IRS.

6. *Khảo sát SR có thể đạt được theo số antenna của SBS:* Hình 5.10 cho thấy khi số antenna của SBS tăng lên, các SR trung bình tăng đáng kể. Điều này là do số lượng antenna của SBS càng nhiều, càng cung cấp nhiều độ lợi ghép kênh không gian, điều này tăng cường SR của hệ thống. Ngược lại, như có thể thấy từ Hình 5.10, SR của hệ thống được hỗ trợ bởi IRS tích cực luôn vượt trội so với hệ thống được hỗ trợ bởi IRS thụ động. Tuy nhiên, sự chênh lệch hiệu năng này giảm đi khi số lượng antenna của SBS tăng lên. Sự giảm này là do vai trò của IRS trở nên không quan trọng khi số lượng antenna của SBS tăng lên.

7. *Khảo sát SR có thể đạt được theo số RE của IRS:* Hình 5.11 cho thấy SR trung bình với $P_{IRS}^{max} = 20$ dBm của các SU tăng lên theo số lượng RE M . Hơn nữa, với cùng mức độ không chắc chắn, SR trung bình của các SU theo mô hình sử dụng IRS tích cực cao hơn so với mô hình sử dụng IRS thụ động.

5.5 Kết luận chương

Trong chương này, luận án đã nghiên cứu hệ thống MU MIMO SWIPT CR được hỗ trợ bởi IRS tích cực, trong đó mỗi SU sử dụng kỹ thuật PS để thực hiện ID và EH đồng thời. Luận án đã tối ưu đồng thời các các ma trận TPC của SBS, RCM của IRS và các hệ số PS của SU để tối đa SR có thể đạt được của các SU, trong điều kiện ràng buộc quỹ công suất tại SBS, HE yêu cầu tối thiểu tại mỗi SU, ràng buộc IP bền vững tại các PU, và các ràng buộc biên độ trên các RE của IRS và ràng buộc công suất khuếch đại của IRS tích cực. Kết quả mô phỏng đã xác minh sự vượt trội của hệ thống MU MIMO SWIPT CR với sự hỗ trợ của IRS tích cực so với mô hình sử dụng IRS thụ động. Ngoài ra, kết quả mô phỏng chứng minh tính bền vững của thuật toán đề xuất đối với các CSI không hoàn hảo. Các kết quả mô phỏng đã cho thấy sự ảnh hưởng của số lượng RE của IRS, quỹ công suất phát, số lượng antenna của SBS, và ngưỡng can nhiễu cho phép đối với SR có thể đạt được.

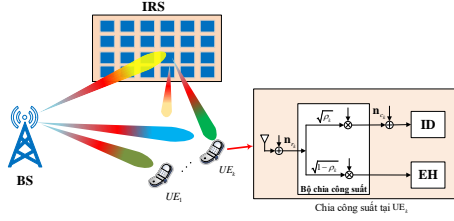
CHƯƠNG 6 TỐI ƯU ĐA MỤC TIÊU TRONG HỆ THỐNG MU-MIMO SWIPT SỬ DỤNG IRS

Nội dung của chương này đã được trình bày trong công trình số 3.

6.1 Giới thiệu

Trong chương này, luận án nghiên cứu tối ưu đa mục tiêu (Multiple-Objective Optimization Problem: MOOP) của tốc độ dữ liệu và năng lượng thu thập tại các người dùng trong hệ thống MU-MIMO SWIPT sử dụng IRS, trong đó mỗi người dùng sử dụng kỹ thuật phân chia công suất để đồng thời thực hiện giải mã thông tin và thu thập năng lượng.

6.2 Mô hình hệ thống



Hình 6.1: Mô hình hệ thống MU-MIMO SWIPT sử dụng IRS.

Xem xét một hệ thống như trong Hình 3.1 với K UE, $\mathcal{K} = \{1, \dots, K\}$. BS, các EU được trang bị N_t, N_r antenna. IRS gồm M phần tử phản xạ. Hệ số phản xạ của phần tử phản xạ thứ m -th là $\phi_m = \beta_m e^{j\theta_m}$ với $\theta_m \in (0, 2\pi]$ và $\beta_m \in [0, 1]$, $m \in \mathcal{M} = \{1, \dots, M\}$ lần lượt là pha và biên độ phản xạ. Để đạt được cường độ phản xạ tối đa, giả thiết thường được sử dụng là $\beta_m = 1$ [67]. $\Phi = \text{diag}(\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_M)$ là ma trận dịch pha của IRS. Vector dữ liệu đến SU_k là $\mathbf{s}_k \in \mathbb{C}^{d_k \times 1}$ với $d_k \leq \min\{N_t, N_r\}$ là số luồng dữ liệu của UE_k . Ma trận TPC tín hiệu \mathbf{s}_k cho UE_k là $\mathbf{F}_k \in \mathbb{C}^{N_t \times d_k}$.

6.3 Tối ưu đa mục tiêu

Để thực hiện được mục tiêu của chương này là đồng thời tối đa SR và SHE tại các người dùng, đầu tiên, luận án xây dựng hai bài toán SOOP, sau đó xây dựng bài toán MOOP từ hai bài toán SOOP đó.

6.3.1 Bài toán đơn mục tiêu SRM

Bài toán SRM có thể được biểu diễn như sau

$$\text{SOOP 1 : } \min_{\mathbf{F}, \boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{\phi}} F_1(\mathbf{F}, \boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{\phi}) \triangleq - \sum_{k=1}^K \mathcal{R}_k(\mathbf{F}, \boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{\phi}), \quad (6.1a)$$

$$\text{s.t. } \sum_{k=1}^K \text{Tr}(\mathbf{F}_k \mathbf{F}_k^H) \leq P_{max}, \quad (6.1b)$$

$$\mathcal{R}_k(\mathbf{F}, \boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{\phi}) \geq \mathbf{r}_k^{req}, \quad k \in \mathcal{K}, \quad (6.1c)$$

$$\mathcal{E}_k^{NL}(\mathbf{F}, \boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{\phi}) \geq \mathbf{e}_k^{req}, \quad k \in \mathcal{K}, \quad (6.1d)$$

$$|\phi_m| = 1, \quad m \in \mathcal{M}, \quad (6.1e)$$

$$0 \leq \rho_k \leq 1, \quad k \in \mathcal{K}, \quad (6.1f)$$

với P_{max} là quỹ công suất phát tối đa tại BS, \mathbf{r}_k^{req} và \mathbf{e}_k^{req} là tốc độ dữ liệu và năng lượng thu thập tối thiểu tại UE_k . Ràng buộc (6.1b) yêu cầu công suất phát tại BS phải nhỏ hơn P_{max} .

6.3.2 Bài toán đơn mục tiêu SHEM

Bài toán đơn mục tiêu thứ hai SHEM được luận án xây dựng như sau

$$\text{SOOP 2 : } \min_{\mathbf{F}, \boldsymbol{\rho}, \phi} F_2(\mathbf{F}, \boldsymbol{\rho}, \phi) \triangleq - \sum_{k=1}^K \mathcal{E}_k^{NL}(\mathbf{F}, \boldsymbol{\rho}, \phi), \quad (6.2a)$$

$$\text{s.t.} \quad (6.1b) - (6.1f). \quad (6.2b)$$

6.3.3 MOOP cho SRM và SHEM

Chú ý rằng các hàm mục tiêu của các bài toán SRM trong SOOP1 và SHEM trong SOOP2 thì trái ngược với nhau. Việc tối đa hiệu năng SR có thể dẫn đến sự suy giảm năng lượng thu thập trong bài toán SHEM. Do đó, cần thiết phải xây dựng bài toán MOOP để đồng thời tối đa SR và SHE. Bài toán MOOP được biểu diễn như sau

$$\text{MOOP : } \min_{\mathbf{F}, \boldsymbol{\rho}, \phi} F_3(\mathbf{F}, \boldsymbol{\rho}, \phi) \triangleq [F_1(\mathbf{F}, \boldsymbol{\rho}, \phi), F_2(\mathbf{F}, \boldsymbol{\rho}, \phi)], \quad (6.3a)$$

$$\text{s.t.} \quad (6.1b) - (6.1f) \quad (6.3b)$$

trong đó hàm mục tiêu trong bài toán SOOP1 và SOOP2 là các thành phần trong vector hàm mục tiêu trong (6.3).

6.4 Đề xuất giải pháp cho SRM và SHEM

Luận án đề xuất thuật toán AO để phân tách từng bài toán SOOP1, SOOP2 và MOOP ban đầu thành các bài toán con có thể xử lý được. Đầu tiên, luận án thiết kế các ma trận TPC và các hệ số PS tối ưu với các pha cố định. Sau đó, với các ma trận TPC và các hệ số PS cố định, luận án tìm các pha tối ưu. Trong mỗi bài toán con, để giải quyết các mục tiêu và các ràng buộc không lồi, luận án tìm các hàm thay thế phù hợp bằng cách áp dụng phương pháp MM để xây dựng lại các bài toán thiết kế thành các bài toán lồi.

6.4.1 Đề xuất giải pháp cho bài toán đơn mục tiêu SRM

Trình tự các bước tối ưu các ma trận TPC, các hệ số PS và các pha để tối đa SR được trình bày trong Thuật toán 6.1.

6.4.2 Đề xuất giải pháp cho bài toán đơn mục tiêu SHEM

Chi tiết thuật toán AO để tìm các ma trận TPC, các hệ số PS và ma trận dịch pha tối ưu cho bài toán SHEM được trình bày trong Thuật toán 6.2.

6.4.3 Đề xuất giải pháp cho bài toán đa mục tiêu của SRM và SHEM

Với F_1^* và F_2^* là các giá trị tối ưu của SOOP1 and SOOP2, bài toán MOOP trong (6.3) được viết lại thành

$$\min_{\mathbf{F}, \boldsymbol{\rho}, \phi} \max_{p \in \{1,2\}} \omega_p \left[\frac{F_p(\mathbf{F}, \boldsymbol{\rho}, \phi) - F_p^*}{|F_p^*|} + \tau \sum_{q \in \{1,2\}} \frac{F_q(\mathbf{F}, \boldsymbol{\rho}, \phi) - F_q^*}{|F_q^*|} \right], \quad (6.4a)$$

$$\text{s.t. (6.1b) - (6.1f),} \quad (6.4b)$$

với τ là một số dương đủ nhỏ được chọn trong khoảng 0.0001 và 0.01 [135]. Các trọng số $\omega_p \in [0, 1]$ với $\omega_1 + \omega_2 = 1$ được đặt với các giá trị khác nhau để khảo sát sự tương nhượng giữa SR và SHE.

Bằng việc giải các bài toán tối ưu lồi trong (6.39) và (6.41), thuật toán lặp để tìm các ma trận TPC, các hệ số PS và ma trận dịch pha tối ưu được miêu tả trong Thuật toán 6.3.

Thuật toán 6.3 Thuật toán AO cho bài toán MOOP

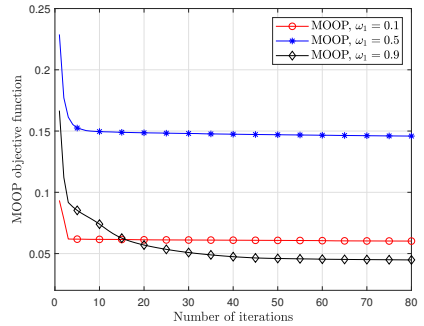
- 1: **Đầu vào:** ι_{max}, ε .
 - 2: **Khởi tạo:** $\mathbf{F}^{(0)} = \mathbf{F}_*^{(0)}, \phi^{(0)} = \phi_*^{(0)}, \boldsymbol{\rho}^{(0)} = \boldsymbol{\rho}_*^{(0)}$ khả thi và đặt $\iota = 0$;
 - 3: Thiết lập các trọng số ω_1 và $\omega_2 = 1 - \omega_1, \iota = 0$;
 - 4: **Lặp:**
 - 5: κ_{max} và $\kappa = 0, \mathbf{F}^{(\kappa)} = \mathbf{F}_*^{(\iota)}, \boldsymbol{\rho}^{(\kappa)} = \boldsymbol{\rho}_*^{(\iota)}$;
 - 6: **Lặp:**
 - 7: Với $\phi = \phi_*^{(\iota)}$ cố định, giải bài toán (6.39) để đạt được $\tilde{\mathbf{F}}$ và $\tilde{\boldsymbol{\rho}}$;
 - 8: Cập nhật $\kappa \leftarrow \kappa + 1, \mathbf{F}^{(\kappa)} = \tilde{\mathbf{F}}, \boldsymbol{\rho}^{(\kappa)} = \tilde{\boldsymbol{\rho}}$;
 - 9: **Cho đến khi:** $\frac{|\tilde{F}_3(\mathbf{F}^{(\kappa)}, \boldsymbol{\rho}^{(\kappa)}) - \tilde{F}_3(\mathbf{F}^{(\kappa-1)}, \boldsymbol{\rho}^{(\kappa-1)})|}{\tilde{F}_3(\mathbf{F}^{(\kappa-1)}, \boldsymbol{\rho}^{(\kappa-1)})} < \varepsilon$ hoặc $\kappa > \kappa_{max}$;
 - 10: **Đạt được** $\mathbf{F} = \tilde{\mathbf{F}}, \boldsymbol{\rho} = \tilde{\boldsymbol{\rho}}$;
 - 11: $\phi^{(t)} = \phi_*^{(\iota)}, t_{max}, \beta > 0, \beta_{max} > 0, \delta > 1, t = 0$;
 - 12: **Lặp:**
 - 13: Với $\mathbf{F}, \boldsymbol{\rho}$ cố định, giải bài toán (6.41) để đạt được $\tilde{\phi}$;
 - 14: Cập nhật $t \leftarrow t + 1, \beta = \min(\delta\beta, \beta_{max}), \phi^{(t)} = \tilde{\phi}$;
 - 15: **Cho đến khi:** $\frac{|\tilde{F}_3(\phi^{(t)}) - \tilde{F}_3(\phi^{(t-1)})|}{\tilde{F}_3(\phi^{(t-1)})} < \varepsilon$ hoặc $t > t_{max}$;
 - 16: **Đạt được** $\phi = \tilde{\phi}$;
 - 17: Cập nhật $\iota \leftarrow \iota + 1, \mathbf{F}_*^{(\iota)} = \mathbf{F}, \boldsymbol{\rho}_*^{(\iota)} = \boldsymbol{\rho}, \phi_*^{(\iota)} = \phi$;
 - 18: **Cho đến khi:** $\frac{|\tilde{F}_3(\mathbf{F}_*^{(\iota)}, \boldsymbol{\rho}_*^{(\iota)}, \phi_*^{(\iota)}) - \tilde{F}_3(\mathbf{F}_*^{(\iota-1)}, \boldsymbol{\rho}_*^{(\iota-1)}, \phi_*^{(\iota-1)})|}{\tilde{F}_3(\mathbf{F}_*^{(\iota-1)}, \boldsymbol{\rho}_*^{(\iota-1)}, \phi_*^{(\iota-1)})} < \varepsilon$ hoặc $\iota > \iota_{max}$;
 - 19: **Đầu ra:** $\mathbf{F}^{(opt)} = \mathbf{F}_*^{(\iota)}, \boldsymbol{\rho}^{(opt)} = \boldsymbol{\rho}_*^{(\iota)}, \phi^{(opt)} = \phi_*^{(\iota)}$;
-

6.5 Kết quả mô phỏng

BS được đặt tại tọa độ (0, 2), IRS tại tọa độ (3, 4), và có $K = 3$ UE phân bố ngẫu nhiên trong vùng (5, 2) có bán kính là 2 m. Các tham số mô phỏng được thiết lập là $N_t = 4$, $d_k = 2$, $N_r = 2$, $\alpha_{BI} = 2.2$, $\alpha_{IU} = 2.2$, $\alpha_{BU} = 3.75$, $\sigma_{a_k}^2 = \sigma_{c_k}^2 = -60$ dBm, $P_k = 24$ mW, $c_k = 150$, $b_k = 0.014$, $\beta = 10$, $\beta_{max} = 1000$, $\delta = 5$ $\kappa_{max} = t_{max} = \iota_{max} = 100$ và $\varepsilon = 10^{-3}$. Hệ số suy hao được đặt là $L_0 = 10^{-3}$ tại $d_0 = 1$ m. Ngoài trừ các thiết lập khác, các tham số mô phỏng được đặt là $P_{max} = 40$ dBm, và $M = 30$, $e_{min,k} = e_{min} = 0.01$ mW, $r_{min,k} = r_{min} = 1$ bps/Hz.

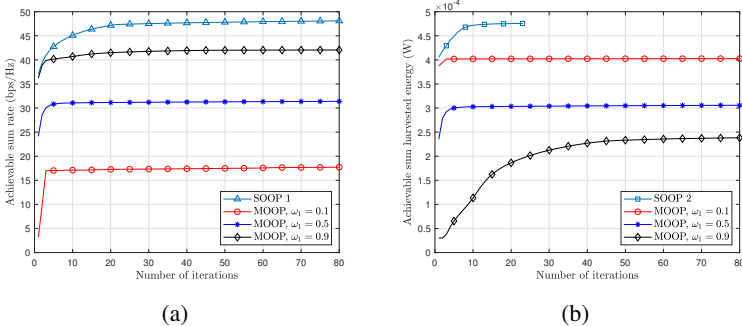
1. Khảo sát đặc tính hội tụ của thuật toán MOOP:

Luận án khảo sát tính hội tụ của thuật toán MOOP đề xuất của một kênh ngẫu nhiên với $P_{max} = 40$ dBm và các giá trị ω_1 khác nhau trong Hình 6.2. Kết quả từ Hình 6.2 cũng cho thấy rằng sự hội tụ của MOOP nhanh hơn với ω_1 nhỏ, điều này là do bài toán MOOP ưu tiên tối ưu SHE trong hàm mục tiêu, mà hàm mục tiêu SHE là hàm tuyến tính do đó lời giải tối ưu dễ dàng đạt được hiệu quả hơn.



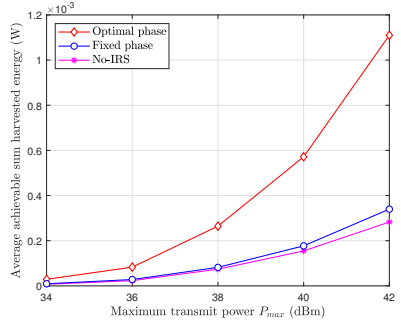
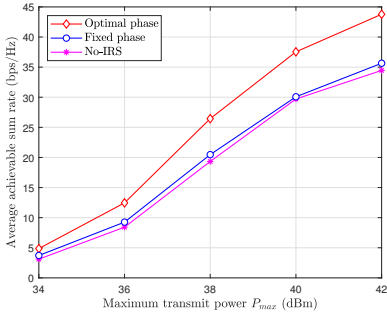
Hình 6.2: Sự hội tụ của thuật toán MOOP.

Hình 6.3 cho thấy sự tăng lên của SR và SHE của các bài toán đơn mục tiêu và bài toán MOOP. Có thể quan sát thấy rằng, SR và SHE không giảm qua các vòng lặp. Thêm vào đó, do bài toán MOOP phải luôn đảm bảo sự tương nhượng giữa SR và SHE, các giá trị tối ưu của bài toán MOOP với các ω_1 khác nhau luôn nhỏ hơn giá trị tối ưu của các bài toán đơn mục tiêu SOOPs tương ứng.



Hình 6.3: SR và SHE của thuật toán SOOP và MOOP.

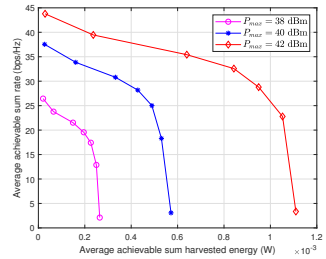
2. *Đánh giá SR trung bình và SHE trung bình của tất cả người dùng với các mức công suất phát P_{max}* : Hình 6.4 và 6.5 cho thấy SR và SHE của tất cả các mô hình đều tăng lên khi P_{max} tăng. Tuy nhiên, mô hình “Optimal phase” có hiệu năng vượt trội hơn so với các mô hình còn lại. Thêm vào đó, kết quả cũng chỉ ra rằng SR và SHE của hệ thống với mô hình “Fixed phase” không tốt hơn đáng kể so với mô hình “No-IRS”. Do đó, việc tối ưu các pha của IRS trong hệ thống MU-MIMO SWIPT là hết sức quan trọng nhằm nâng cao hiệu năng của hệ thống.



Hình 6.4: SR theo công suất phát của BS Hình 6.5: SHE theo công suất phát của BS

3. *Khảo sát sự tương nhượng giữa SR và SHE của các người dùng:*

Kết quả trong Hình 6.6 cho thấy SR giảm khi SHE tăng lên. Điều này đã chứng minh rằng SRM và SLEM là các bài toán đối lập nhau. Do đó, kết quả trong Hình 6.6 mô tả đầy đủ về sự tương nhượng giữa SR và SHE, từ đó cho phép các nhà thiết kế hệ thống có thể điều khiển hiệu năng của hệ thống phù hợp với yêu cầu cụ thể bằng cách thiết lập các trọng số một cách phù hợp.



Hình 6.6: Sự tương nhượng giữa SR và SHE đạt được bằng thuật toán MOOP.

6.6 Kết luận chương

Trong chương này, luận án đã xem xét sự tương nhượng giữa SR và SHE của các người dùng trong hệ thống MU-MIMO SWIPT dưới các điều kiện ràng buộc về công suất phát tối đa tại BS, yêu cầu tốc độ dữ liệu và năng lượng thu thập tối thiểu tại các người dùng bằng cách đồng thời thiết kế tối ưu các ma trận TPC tại BS, các hệ số PS tại các người dùng và ma trận dịch pha tại IRS. Để đạt được đầy đủ sự tương nhượng giữa SR

và SHE, luận án đã xây dựng bài toán thiết kế thành một bài toán tối ưu đa mục tiêu MOOP, sau đó áp dụng phương pháp Tchebycheff biến thể có trọng số để chuyển bài toán MOOP thành một bài toán tối ưu đơn mục tiêu SOOP.

CHƯƠNG 7 KẾT LUẬN CHUNG VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN

7.1 Kết luận chung

Luận án đã cung cấp các nội dung cơ bản về các công nghệ tiên tiến trong thông tin vô tuyến và các vấn đề về bài toán tối ưu. Trong đó, bao gồm các lý thuyết cơ sở về kỹ thuật đa ngõ vào đa ngõ ra (MIMO), kỹ thuật thu thập năng lượng vô tuyến, công nghệ vô tuyến nhận thức (CR), mặt phản xạ thông minh (IRS). Đặc biệt, IRS là một công nghệ đầy hứa hẹn giúp nâng cao hiệu năng của các hệ thống thông tin vô tuyến hiện đại. Ngoài ra, luận án cũng cung cấp các nội dung tổng quát về bài toán tối ưu và các phương pháp giải cho các bài toán tối ưu không lồi. Từ đó, luận án đã đề xuất các mô hình hệ thống và các giải thuật tối ưu hóa hiệu năng của các hệ thống truyền đồng thời thông tin và năng lượng có sự hỗ trợ của IRS. Các đóng góp chính của luận án cụ thể như sau:

- Đề xuất thuật toán tối đa tổng năng lượng thu thập được tại các người dùng trong mô hình hệ thống MU-MIMO SWIPT sử dụng IRS với các ràng buộc về công suất phát của BS, QoS và năng lượng tối thiểu thu thập được tại mỗi người dùng. Bằng cách sử dụng giải thuật AO, MM, và các phương pháp xấp xỉ khác, bài toán tối ưu đã được giải quyết hiệu quả cho việc thiết kế các ma trận TPC tại BS, các hệ số PS tại các người dùng và pha của các phần tử phản xạ tại IRS. Kết quả mô phỏng cho thấy hiệu năng của hệ thống MU-MIMO SWIPT sử dụng IRS đã tăng lên đáng kể so với hệ thống không sử dụng IRS và hệ thống có IRS với các pha cố định. Qua đó có thể khẳng định rằng, việc ứng dụng IRS vào các hệ thống thông tin vô tuyến là rất có ý nghĩa và đầy triển vọng. Kết quả của đóng góp này được công bố trong công trình số 1.
- Đề xuất thuật toán tối đa SE và EE của mạng thứ cấp trong mô hình hệ thống IRS MU-MIMO SWIPT CR. Nhằm nghiên cứu mô hình hệ thống đề xuất trong điều kiện sát thực tế hơn, luận án đã sử dụng mô hình NLEH và giả sử CSI của các kênh truyền liên quan đến các PU là không hoàn hảo. Các bài toán thiết kế là các bài toán tối ưu không lồi, do hàm mục tiêu là không lồi theo các biến thiết kế. Ngoài ra với việc xem xét mô hình NLEH và CSI không hoàn hảo của các PU đã làm cho các ràng buộc năng lượng thu thập tối thiểu và ràng buộc IP tại các PU trở nên vô cùng phức tạp và không thể giải trực tiếp. Do đó, trong bài

toán tối đa SE, luận án đã xây dựng lại hàm mục tiêu ban đầu thành một hàm có thể phân tách được bằng cách áp dụng mối liên hệ giữa MMSE và hàm tốc độ dữ liệu. Trong bài toán tối đa EE, luận án đã sử dụng phương pháp MM và giải thuật Dinkelbach để giải quyết khó khăn do bài toán tối ưu phân số gây ra. Tiếp theo, các bài toán tối ưu ban đầu được tách thành các bài toán tối ưu con. Cuối cùng, trong mỗi bài toán tối ưu con, luận án đề xuất thuật toán AO dựa trên việc áp dụng các phương pháp xấp xỉ lồi liên tiếp và phương pháp chuyển các ràng buộc IP không lồi thành các LMI để tìm lời giải tối ưu cho từng biến thiết kế bao gồm các ma trận TPC tại SBS, các hệ số PS tại các SU và ma trận pha tại IRS. Kết quả mô phỏng đã chứng minh sự hiệu quả của thuật toán thiết kế bền vững đề xuất cho hệ thống có CSI không hoàn hảo khi đảm bảo mức can nhiễu tại các PU luôn nhỏ hơn mức cho phép. Đồng thời, các kết quả cũng cho thấy SE và EE của các hệ thống có IRS vượt trội hơn so với các hệ thống không sử dụng IRS. Kết quả của đóng góp này được công bố trong các công trình số 4 và số 5.

- Đề xuất thuật toán tối đa SE trong hệ thống MU-MIMO SWIPT CR sử dụng IRS tích cực với CSI không hoàn hảo của các PU bằng cách thiết kế tối ưu đồng thời các ma trận tiền mã hóa TPC tại SBS, ma trận dịch pha tại IRS và các hệ số PS tại các SU. Bài toán thiết kế gặp rất nhiều thách thức về mặt toán học do hàm mục tiêu không lồi. Ngoài ra, các ràng buộc năng lượng thu thập phi tuyến tại mỗi SU, ràng buộc IP với điều kiện CSI không hoàn hảo tại các PU đều là các ràng buộc không lồi. Những thách thức này đã làm cho bài toán thiết kế không thể giải trực tiếp. Để tìm được lời giải tối ưu cho bài toán thiết kế, luận án đã tìm các hàm xấp xỉ thay thế và các tập lồi trong của các ràng buộc. Ngoài ra, các ràng buộc IP không lồi tại các PU đã được chuyển thành các LMI. Cuối cùng, luận án đã đề xuất thuật toán AO để lần lượt tìm các lời giải tối ưu cho các biến thiết kế. Kết quả mô phỏng cho thấy thuật toán thiết kế bền vững đảm bảo hiệu quả với các mức lồi CSI khác nhau, đồng thời SE của hệ thống có IRS tích cực được cải thiện hơn rất nhiều so với hệ thống có IRS thụ động, điều này khẳng định sự hiệu quả của việc triển khai IRS tích cực trong hệ thống MU-MIMO SWIPT CR. Kết quả của đóng góp này được công bố trong công trình số 2.
- Đề xuất thuật toán tối ưu đa mục tiêu (MOOP) đồng thời tối đa SR và SHE trong hệ thống MU-MIMO SWIPT sử dụng IRS, trong đó các người dùng sử dụng kỹ thuật PS để thực hiện ID và EH cùng lúc. Hàm mục tiêu của bài toán MOOP là một vector hai thành phần bao gồm SR và SHE, do đó không thể giải trực tiếp. Để giải bài toán MOOP này, đầu tiên luận án đã áp dụng phương pháp Tchebycheff trọng số biến thể để chuyển bài toán MOOP thành một bài toán SOOP. Sau đó, luận án đã áp dụng phương pháp MM để tìm các hàm thay thế

phù hợp và chuyển các bài toán tối ưu không lồi thành các bài toán tối ưu lồi. Cuối cùng, thuật toán AO đã được đề xuất để lần lượt tối ưu các biến thiết kế bao gồm các ma trận TPC tại BS, các hệ số PS tại các người dùng và ma trận pha tại IRS. Kết quả mô phỏng đã đánh đầy đủ sự tương nhượng giữa bài toán tối đa SR và bài toán tối đa SHE của các người dùng. Kết quả của đóng góp này được công bố trong công trình số 3.

7.2 Hướng phát triển

Dựa trên các kết quả nghiên cứu đã đạt được và kế thừa các nghiên cứu có liên quan, luận án đề xuất các hướng nghiên cứu phát triển trong tương lai như sau:

- Trong các nghiên cứu luận án đã thực hiện, các pha của IRS được giả sử là liên tục. Với giả sử này, hiệu năng của hệ thống có thể đạt được là lớn nhất. Tuy nhiên, trong các hệ thống thực tế, việc tạo ra các pha liên tục là khó, tốn nhiều tài nguyên và không khả thi. Đây là một hạn chế của luận án khi phát triển hệ thống trong thực tế. Do đó, để toàn diện hơn, các hướng nghiên cứu tiếp theo có thể được phát triển với việc xem xét các pha của IRS là rời rạc. Mô hình tín hiệu và bài toán thiết kế được xây dựng tương tự như trong mô hình hệ thống sử dụng IRS với pha liên tục. Tuy nhiên, phương pháp giải các bài toán tối ưu cho các IRS có pha rời rạc được thực hiện thông qua các giải thuật tối ưu rời rạc hoặc tối ưu kết hợp rời rạc và liên tục.
- Việc ứng dụng các IRS vào các mô hình hệ thống thông tin vô tuyến được nghiên cứu trong Chương 3, 4, 5 và 6 đã cho thấy sự hiệu quả của IRS khi giúp cho hiệu năng của các hệ thống được cải thiện rõ rệt so với hệ thống không có IRS, tuy nhiên phạm vi phủ sóng của các hệ thống này chỉ tập trung về một phía của IRS. Trong khi đó, trong thực tế người dùng có thể phân bố ngẫu nhiên trước hoặc sau IRS. Đây cũng là một hạn chế của IRS, làm giảm khả năng hỗ trợ của IRS trong các hệ thống thông tin vô tuyến hiện nay. Do đó, để nâng cao độ rộng phủ sóng trong hệ thống vô tuyến, đảm bảo thông tin cho các người dùng cả trước và sau IRS, hướng phát triển là nghiên cứu ứng dụng STAR-RIS vào các mô hình hệ thống đã đề xuất trong luận án này. Phương pháp thiết kế pha tối ưu cho các STAR-RIS là tập trung thiết kế các hệ số phân chia công suất tín hiệu cho từng phần tử của STAR-RIS theo giao thức chia năng lượng (ES), các hệ số phân chia thời gian cho từng phần tử của STAR-RIS theo giao thức chuyển mạch thời gian (TS) hoặc số lượng phần tử của STAR-RIS dành cho chế độ phát hoặc chế độ truyền theo giao thức chuyển mạch chế độ (MS).

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC ĐÃ CÔNG BỐ

Tạp chí quốc tế

1. **Pham Van Quyet** and Ha Hoang Kha, "Energy harvesting maximization for multiuser MIMO SWIPT systems with intelligent reflecting surfaces," *Telecommunication Systems*, vol. 80, pp. 497-511, Aug. 2022, doi: 10.1007/s11235-022-00918-x, ISSN: 10184864. (ISI-Q2)
2. **Pham Van Quyet** and Ha Hoang Kha, "Robust transmission design for active IRS-aided multiuser MIMO cognitive radio systems with non-linear energy harvesting models," *Telecommunication Systems*, Mar. 2024, doi:10.1007/s11235-024-01117-6, ISSN: 10184864. (ISI-Q2)

Tạp chí trong nước

3. **Pham Van Quyet** and Ha Hoang Kha, "Multi-Objective Optimization for IRS-Aided Multi-user MIMO SWIPT Systems," *REV Journal on Electronics and Communications*, Vol. 13, No. 3–4, Jul.–Dec. 2023, doi: 10.21553/rev-jec.337, ISSN: 1859-378X.

Kỷ yếu hội nghị quốc tế

4. **Pham Van Quyet** and Ha Hoang Kha, "Spectral Efficiency Optimization in IRS-Aided Multiuser MIMO SWIPT Cognitive Radio Systems," 2022 RIVF International Conference on Computing and Communication Technologies (RIVF), Ho Chi Minh City, Vietnam, 2022, pp. 203-208, doi: 10.1109/RIVF55975.2022.10013849, ISSN: 2162-786X.
5. **Pham Van Quyet** and Ha Hoang Kha, "Energy Efficiency Optimization for IRS-Aided Multiuser MIMO SWIPT Cognitive Radio Systems with Imperfect CSI," 2023 International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEE), Ho Chi Minh, Vietnam, 2023, pp. 85-90, doi: 10.1109/ISEE59483.2023.10299857, ISBN:979-8-3503-1548-6.