

**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT TP.HCM**

PHẠM MINH NAM

**NGHIÊN CỨU HIỆU NĂNG MẠNG TRUYỀN THÔNG VÔ TUYẾN ĐA
CHẠNG TRONG ĐIỀU KIỆN CÔNG SUẤT PHÁT HẠN CHẾ**

Chuyên ngành: Kỹ thuật điện tử
Mã số chuyên ngành: 9520203

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ

TP. HỒ CHÍ MINH – năm 2020

Công trình được hoàn thành tại **Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp.HCM**

Người hướng dẫn khoa học 1: TS. Trần Trung Duy

Người hướng dẫn khoa học 2: PGS.TS. Phan Văn Ca

Phản biện 1:

Phản biện 2:

Phản biện 3:

Luận án sẽ được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án Cấp Cơ sở học tại
Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp.HCM
vào ngày tháng năm

GIỚI THIỆU

1. Lý do chọn đề tài:

Gần đây, việc giải quyết sự khan hiếm phổ tần phục vụ trong thông tin vô tuyến ngày càng cấp bách. Mạng truyền thông thứ cấp hoạt động ở chế độ nền của vô tuyến nhận thức (UCRN: Underlay Cognitive Radio Networks) là một giải pháp tiết kiệm dải tần hiệu quả do không cần cấp phát tần số mới. Các trạm phát bị hạn chế công suất để tránh nhiễu đồng kênh quá giới hạn lên mạng sơ cấp (PN: Primary Network). Mặt khác, môi trường thông tin thay đổi liên tục sẽ rất khó khăn để duy trì một kết nối ổn định, hiệu quả từ nguồn đến đích. Chính vì vậy, mạng vô tuyến đa chặng thứ cấp (MUCRN: Multi-hop Underlay Cognitive Radio Networks) là một giải pháp truyền tin hiệu quả hơn so với truyền trực tiếp. Bên cạnh đó, giải pháp cung cấp năng lượng và truyền tin đồng thời (SWIPT: Simultaneous Wireless Information and Power Transfer) nên được trang bị nhằm duy trì sự kết nối, kéo dài thời gian sống của mạng ở những nơi không có nguồn cung cấp. Để bảo mật thông tin, bảo mật lớp vật lý (PLS: Physical-layer Security) là một giải pháp thích hợp ứng dụng cho các mạng có các phần tử có khả năng xử lý thấp. Với mục đích nghiên cứu những giải pháp phục vụ cho những yêu cầu thực tiễn ở trên, tác giả đã đề xuất đề tài “***Nghiên cứu hiệu năng mạng truyền thông vô tuyến đa chặng trong điều kiện công suất phát hạn chế***”.

2. Mục tiêu và nội dung nghiên cứu:

a) Nâng cao hiệu suất sử dụng phổ tần bằng cách chia sẻ phổ tần của mạng sơ cấp (PN) cho mạng đa chặng thứ cấp (MUCRN).

b) Đề xuất các giải pháp nâng cao hiệu năng truyền thông mạng đa chặng mục tiêu nhằm đảm bảo chất lượng dịch vụ (QoS: Quality of Service).

c) Đưa ra giải pháp nâng cao khả năng bảo mật truyền thông trong MUCRN bằng phương pháp bảo mật lớp vật lý nhằm thích nghi với các trạm thu phát có khả năng xử lý hạn chế.

d) Áp dụng khả năng thu thập năng lượng vô tuyến ở các trạm phát trong MUCRN nhằm đa dạng hóa khả năng cung cấp nguồn, nâng cao hiệu quả sử dụng năng lượng, kéo dài thời gian sống của mạng, tăng tính thực tiễn khi triển khai xây dựng mạng.

3. Nhiệm vụ nghiên cứu: Nghiên cứu về hiệu năng, khả năng bảo mật thông tin trong các mô hình mạng MUCRN kiểu mới trong môi trường truyền tin có các đặc tính chuyên biệt

4. Phạm vi nghiên cứu: Mạng MUCRN truyền thông một chiều theo giao thức HD với kênh truyền có đặc tính fading chậm.

5. Phương pháp nghiên cứu: Dựa vào lý thuyết tín hiệu, lý thuyết toán, lý thuyết thống kê đồng thời sử dụng mô phỏng kiểm chứng để đánh giá chất lượng và hiệu quả của các thuật toán, các giải pháp đề xuất.

6. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn đề tài.

Về khoa học: là tiền đề cho những công trình nghiên cứu hiệu năng cho những mạng cụ thể, chuyên sâu khác như 5G, WSNs.

Về thực tiễn: Đề xuất của luận án làm nền tảng cho các ứng dụng qui hoạch, nâng cấp, lắp đặt mới các trạm thu phát.

7. Cấu trúc luận án: Gồm 7 chương trong đó từ chương 3 đến chương 6 phân tích từng mô hình đề xuất cụ thể và chương 7 kết luận toàn bộ luận án.

CHƯƠNG 1 TỔNG QUAN

1.1 Tình hình nghiên cứu:

Qua nghiên cứu các công trình liên quan trước đây, một số ý chính tóm lược được rút ra như sau:

- [38-40, 44-46, 54] Hạn chế công suất phát tuân theo UCR là giải pháp khả thi tiết kiệm phổ tần.

- [16, 41-42, 51-52] Dùng Rayleigh fading khi các trạm thu phát không trong tầm nhìn thẳng NLOS. Ngược lại, nếu trong tầm LOS thì sử dụng Rician fading. Ngoài ra, sử dụng mô hình kênh khác nhau sẽ thu được kết quả khác nhau.

- [52, 53] Với sự tương quan tầm nhìn khác nhau của các trạm thu phát, có thể dùng đan xen mô hình fading phù hợp với môi trường thực tế.

- [55, 56] Cần chú ý đến ảnh hưởng của kênh truyền từ trạm phát đến trạm nghe lén để nâng cao bảo mật thông tin.

- [56-58, 67] MIMO tăng hiệu năng mạng nhưng việc tính toán khá phức tạp, rất không phù hợp với các trạm trung gian có cấu hình thấp, xử lý hạn chế.
- [59-65] TAS/SC, TAS/MRC giữ được các ưu điểm về hiệu năng MIMO nhưng sử dụng ít thông tin CSI hơn, đòi hỏi tính toán thấp hơn.
- [58, 66] Tương quan giữa các ăng ten có thể được bỏ qua khi phân tích hệ thống có bậc phân tập cao.
- [67-70] Cộng tác chọn lựa relay trong mạng hai chặng có hiệu quả tốt. Tuy nhiên, kết quả chỉ ứng dụng được cho mạng hai chặng mà không phát huy được cho mạng đa chặng do còn phụ thuộc vào các chặng khác.
- [17, 93] Cộng tác ngoại tuyến trong mạng đa chặng hiệu quả hơn truyền trực tiếp.
- [71-72] PLS dùng Jamming hiệu quả khi nghiên cứu về bảo mật thông tin trong mạng chuyển tiếp, tuy nhiên cần đồng bộ chặt chẽ với các trạm phát khác. Jammer có thể trong cùng một hệ thống ăng ten, trong cùng một cụm hay bên ngoài mạng.
- [55, 98] Cần thiết dùng giao thức RF để truyền tin trong mạng đa chặng để đảm bảo bảo mật.
- [73-75] Đề xuất các giải pháp chọn lựa tuyến đường đa chặng khi có nhiều tuyến cùng lúc có khả năng chuyển thông tin từ nguồn đến đích. Tuy nhiên các trạm trong đề xuất vẫn là các trạm thu phát đơn lẻ, hiệu năng thu phát không cao. Cần đề xuất chọn đường đi với các trạm thu phát đa ăng ten hay dạng cụm.
- [43-44, 76-79] đề cập đến mạng hai chặng thu hoạch năng lượng vô tuyến để truyền tin (SWIPT). Thu hoạch vô tuyến cần tìm được hệ số phân chia thời gian tối ưu trong TSR hay phân chia công suất tối ưu trong PSR.
- [81, 82] Thu hoạch vô tuyến trong mạng đa chặng cần chú ý đến đề xuất giao thức mới sao cho tránh thời gian thu hoạch quá dài (không đảm bảo slow fading) nhưng cần thu hoạch càng nhiều năng lượng càng tốt. Có thể dùng đa hệ thống dạng cụm, hệ thống đa ăng ten để tăng mức thu hoạch được. Cần tối ưu hệ số phân chia như mạng hai chặng.
- [43, 76] Khai thác thu hoạch năng lượng trong mạng dual-hop từ duy nhất trạm phát, độ lợi kênh truyền trong phát thông tin và phát năng lượng là đồng nhất.
- [44, 77-78] Khai thác thu hoạch năng lượng trong mạng dual-hop từ CCI (Co-Channel Interference), do đó cần tính toán ảnh hưởng của CCI trong quá trình giải mã tin.

- [75, 81-84] Khai thác năng lượng từ trạm phát năng lượng Beacon, do có sự phân lập riêng biệt thời gian thu hoạch từ Beacon và thời gian truyền tin từ trạm phát nên không gây CCI lên quá trình nhận tin. Có thể phát triển dùng cho mạng đa chặng, hệ thống dạng cụm, hệ thống đa ăng ten để hỗ trợ truyền thông.

1.2 Một số hướng được khai thác trong đề tài:

- Dùng mô hình UCRN để tiết kiệm tần số. Ứng dụng đặc tả kênh truyền phù hợp với tình trạng của môi trường truyền thông.

- Dùng đa anten (TAS/SC) để tăng năng lượng thu hoạch, cải thiện hiệu năng cả mạng sơ cấp (PN) và mạng thứ cấp (SN).

- Dùng mạng cụm (Cluster-based), jamming hay giao thức chọn đường đi trong mạng lưới thứ cấp để tăng hiệu năng mạng vô tuyến đa chặng. Giải pháp chọn đường đi có thể được xem như là một hình thức cộng tác ngoại tuyến mới.

- Dùng cộng tác giữa các trạm nội bộ trong cùng một tuyến đa chặng để có thể bỏ qua một số chặng, tăng hiệu năng truyền thông.

CHƯƠNG 2 CƠ SỞ LÝ THUYẾT

2.1 Đặc tả kênh truyền vô tuyến

Trình bày đặc tả toán học các kênh truyền vô tuyến trong luận án.

2.2 Các mô hình truyền thông đa chặng

Trình bày một số hình thái mạng trong các nghiên cứu trước đây.

2.3 Giao thức truyền thông mạng đa chặng

Trình bày về giao thức bắt tay và giao thức chuyển thông tin.

2.3.1 Giao thức chuyển tiếp thông tin

Sơ lược các giao thức AF, DF, RF cùng với ưu nhược điểm.

2.3.2 Giao thức truy nhập kênh truyền

Sơ lược giao thức giải quyết tranh chấp kênh vô tuyến với báo hiệu RTS/CTS theo IEEE 802.11.

2.4 Chế độ hạn chế công suất phát

Trình bày về hạn chế công suất theo dạng nền của vô tuyến nhận thức.

2.5 Khiếm khuyết phần cứng

Trình bày lý thuyết xây dựng mô hình nghiên cứu khiếm khuyết phần cứng (HI: Hardware Impairment) trong hệ thống thông tin vô tuyến.

2.6 Mạng vô tuyến dạng cụm

Trình bày về mạng cụm và giải pháp phân tập phát thu trong mạng cụm.

2.7 Bảo mật lớp vật lý

Trình bày lý thuyết về khái niệm dung lượng dừng, dung lượng bảo mật, xác suất dừng bảo mật (SOP: Secrecy Outage Probability), xác suất nghe lén (IP: Intercept Probability), xác suất dung lượng bảo mật khác không (PNSC: Probability of Non-zero Secrecy Capacity).

2.8 Thu hoạch năng lượng vô tuyến để truyền tin

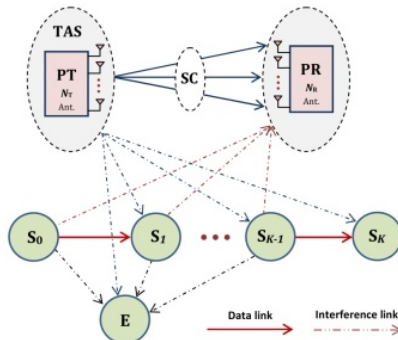
Trình bày cách thức thu hoạch năng lượng vô tuyến để truyền tin từ trạm phát chính (không có CCI), thu hoạch thêm từ trạm đồng kênh ngoài (có CCI), từ trạm phát năng lượng. Cách thức thu hoạch năng lượng và truyền tin trong trạm đơn anten và đa anten.

CHƯƠNG 3 MẠNG ĐA CHẶNG THỨ CẤP GỒM CÁC TRẠM THU PHÁT BỐ TRÍ THEO TẦM NHÌN THẲNG

3.1 Giới thiệu

Các công trình trước đây của nghiên cứu sinh [C2, J9] đều cho thấy hiệu năng mạng đa chặng thứ cấp (MUCRN) bị ảnh hưởng lớn từ yếu tố PUs của mạng sơ cấp. Dựa trên kết quả đó, nghiên cứu sinh đề xuất giải pháp trang bị nhiều anten trong mạng sơ cấp với mong muốn nâng cao hiệu năng mạng sơ cấp. Từ đó, các trạm phát thứ cấp có cơ hội nâng cao công suất phát, cải thiện hiệu năng mạng. Do các trạm thu phát có khả năng tính toán hạn chế, kỹ thuật phân tập TAS/SC được đề xuất sử dụng trong mạng sơ cấp có nhiều anten. Qua nghiên cứu, luận án đã đề xuất một số giải pháp để nâng cao hiệu năng mạng MUCRN.

3.2 Mô hình nghiên cứu



Hình 3.1: Mô hình mạng chuyển tiếp đa chặng với tầm nhìn thẳng.

Mạng PN nhiều anten và phân tập TAS/SC (Transmit Anten Selection / Selection Combining). Mạng MUCRN có thông tin được truyền từ S_0 đến S_K qua K chặng theo giao thức HD (Half-duplex). Tầm nhìn từ trạm thứ cấp đến trạm kế tiếp hay trạm nghe lén là LOS. Tầm nhìn từ mạng sơ cấp là NLOS. Trạm nghe lén E đánh chặn thông tin trên từng chặng.

3.3 Phân tích hiệu năng

3.3.1 Xác suất dừng của mạng sơ cấp

Xác suất dừng OP_{PN} (TAS/SC) ở (3.18), OP_{PN} tối ưu ở (3.20). Xuyên nhiễu tối đa I_P ở (3.21).

3.3.2 Xác suất dừng của mạng đa chặng thứ cấp

- Trường hợp Rician fading:
 - † OP_{e2e} tổng quát ở (3.26) và (3.27).
 - † Xét khi SNR cao, OP_{e2e} trong (3.28).
- Trường hợp Rayleigh fading:
 - † OP_{e2e} tổng quát ở (3.29).
 - † Xét khi SNR cao, OP_{e2e} trong (3.30).

3.3.3 Xác suất nghe lén trong mạng mục tiêu

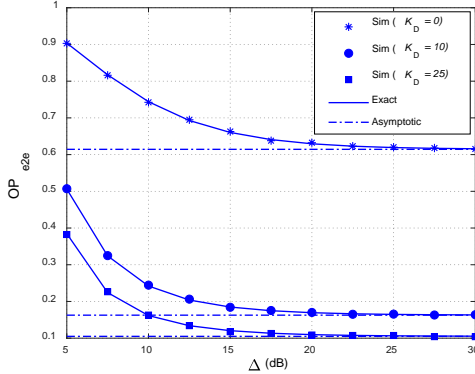
- Trường hợp Rician fading:
 - † IP trong trường hợp tổng quát ở (3.32).
 - † Xét khi SNR cao, IP trong (3.33).
- Trường hợp Rayleigh fading:
 - † IP trong trường hợp tổng quát ở (3.34).
 - † Xét khi SNR cao, IP trong (3.35).

3.4 Các kết quả đạt được

3.4.1 Ảnh hưởng của tỉ số phát SNR sơ cấp lên khả năng chịu xuyên nhiễu tại trạm thu sơ cấp

I_P tăng theo tỉ số SNR như trong hình Hình 3.1 của tài liệu toàn văn luận án.

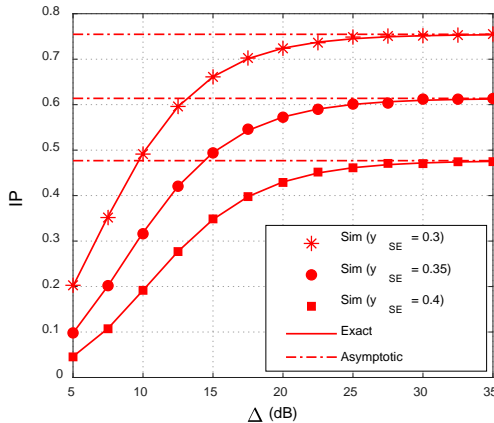
3.4.2 Xác suất dừng mạng thứ cấp



Hình 3.3: OP_{e2e} vẽ theo Δ khi $N_T = 4$, $N_R = 3$, $K = 7$.

Với miền Δ đủ lớn, đặc tuyến OP_{e2e} sẽ dần hội tụ về giá trị tiệm cận. Hình vẽ cho thấy hiệu năng cải thiện vượt trội khi bố trí các trạm theo tầm nhìn thẳng LOS ($K_D \neq 0$) so với NLOS ($K_D = 0$). Giá trị K_D càng lớn, hiệu năng càng được cải thiện.

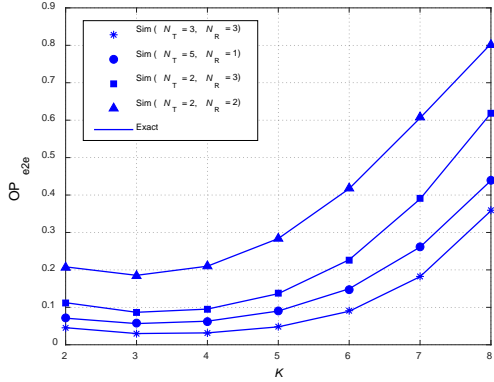
3.4.3 Xác suất nghe lén trong mạng thứ cấp



Hình 3.4: IP vẽ theo Δ .

Khi trạm nghe lén càng cách xa mạng đa chặng thứ cấp ($y_E = 0.4$) khả năng nghe lén càng giảm hơn so với được bố trí gần mạng mục tiêu ($y_E = 0.3$).

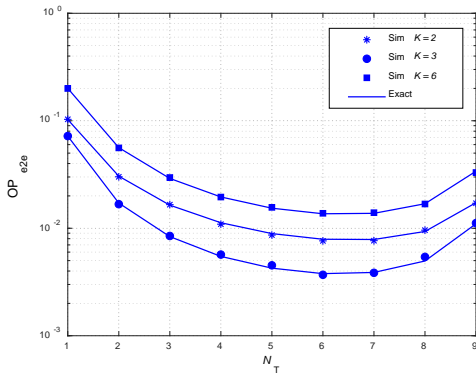
3.4.4 Ảnh hưởng của số chặng thứ cấp lên hiệu năng hệ thống



Hình 3.5: OP_{e2e} vẽ theo số chặng K khi $\Delta = 20(\text{dB})$, $K_D = 30$.

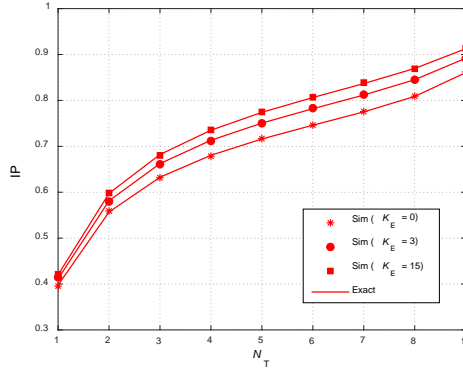
Xét về tổng thể, số chặng $K = 3$ là tối ưu nhất khi đặt mục tiêu xác suất dừng OP_{e2e} thấp nhất. Kết quả trên cũng cho thấy mạng đa chặng (3 chặng) hiệu quả hơn mạng dual-hop (2 chặng) trong trường hợp đang khảo sát. Ngoài ra, kết quả trên cũng tương đồng với một công trình khác của nghiên cứu sinh [13] khi đặt mục tiêu SOP tối ưu. Với việc thay đổi số lượng Anten thu phát, nghiên cứu kết luận việc trang bị nhiều Anten thu phát trong mạng sơ cấp sẽ cải thiện đáng kể hiệu năng mạng đa chặng (giảm xác suất dừng OP_{e2e}).

3.4.5 Ảnh hưởng của phân bố ăng ten phát và thu ở mạng sơ cấp lên hiệu năng mạng thứ cấp



Hình 3.7: OP_{e2e} theo số ăng ten phát N_T khi $\Delta = 20\text{dB}$, $K_D = 30$.

Hình 3.7 khảo sát trường hợp thay đổi số lượng anten tại đầu phát trong khi vẫn giữ nguyên tổng số anten của tuyến sơ cấp là $N_T + N_R = 10$. Kết quả cho thấy chúng ta có thể lựa chọn số lượng anten phát tối ưu sao cho OP_{e2e} thấp nhất. Nghĩa là cùng một lượng anten nhưng nếu phân phối hợp lý số lượng giữa thu và phát sẽ cải thiện hiệu năng tốt hơn.



Hình 3.8: IP theo số ăng ten phát N_T khi $\Delta = 20$ dB, $K = 4$.

Để giảm IP mà không ảnh hưởng nhiều đến hiệu năng hệ thống, cần thiết kế tuyến thông tin sao cho hệ số K_E nhỏ.

3.5 Kết luận của chương

- SNR phát chỉ ảnh hưởng đến OP_{e2e} khi có giá trị thấp. Khi Δ đủ lớn, hiệu năng mạng không thay đổi.

- Nhiều anten sẽ cải thiện OP_{e2e} của mạng mục tiêu nhưng làm tăng IP. Tuy nhiên, nếu cùng tổng số anten, việc phân phối hợp lý anten ở trạm phát/thu trong mạng sơ cấp sẽ đạt được hiệu năng mạng đa chặng tốt hơn.

- Tăng số chặng K lớn sẽ cải thiện IP nhưng làm tăng OP_{e2e} . Ngược lại, nếu K nhỏ, tồn tại một giá trị số chặng tối ưu K^* để OP_{e2e} nhỏ nhất. Kết quả mô phỏng cho thấy mạng đa chặng được tối ưu tốt hơn mạng 2 chặng về hiệu năng OP_{e2e} trong cùng điều kiện truyền tin.

- OP_{e2e} thấp hơn khi tăng Rician K-factor giữa các trạm trong mạng đa chặng thứ cấp. Ngược lại, IP giảm nếu giá trị Rician K-factor thấp hơn ở các kênh nghe lén.

CHƯƠNG 4 MẠNG ĐA CHẶNG THỨ CẤP GỒM CÁC TRẠM THU PHÁT ĐƯỢC TRANG BỊ NHIỀU ANTEN VÀ THU HOẠCH NĂNG LƯỢNG VÔ TUYẾN

4.1 Giới thiệu

Trong chương trước, luận án đã nghiên cứu giải pháp trang bị nhiều anten trong mạng sơ cấp để tăng hiệu năng mạng và đã đạt được kết quả tốt. Tiếp tục phát triển mô hình, nghiên cứu sinh đề xuất nghiên cứu giải pháp trang bị nhiều anten trong mạng đa chặng MUCRN. Kết hợp với kỹ thuật SWIPT, các anten sẽ không những nâng cao được hiệu năng truyền thông mà còn tăng mức thu hoạch năng lượng, góp phần cải thiện hơn nữa hiệu năng mạng. Vấn đề được quan tâm nghiên cứu tiếp theo là xác suất dừng bảo mật (SOP) và xác suất dung lượng bảo mật khác không (PNSC) trong mạng đa chặng đa anten.

4.2 Mô hình nghiên cứu



Hình 4.1: Mô hình mạng đa chặng kết hợp thu hoạch năng lượng vô tuyến
Mạng thứ cấp MUCRN có các trạm được trang bị N_D đảm nhận truyền tin từ S_0 đến S_K theo giao thức HD, sử dụng phân tập TAS/SC như chương 3. Ngoài ra, các trạm thứ cấp còn thu hoạch năng lượng vô tuyến để truyền tin từ trạm phát năng lượng PB (Power Beacon). Trạm nghe lén sử dụng SC để nghe lén thông tin trong mạng thứ cấp.

4.3 Phân tích hiệu năng

4.3.1 Công suất trung bình của trạm thứ cấp

$\mathcal{E}\{P_{k,b}\}$ được tính trong (4.15).

4.3.2 Xác suất dừng bảo mật

Xác suất dừng bảo mật được tính trong bốn trường hợp sau:

+ Khi $\omega_0 < 0$: $\omega_0 < 0$: $SOP_k(Q_v) = 1$.

+ Khi $\omega_0 > 0$, và $\omega_{3,v} > 0$: $SOP_k(Q_v)$ trong công thức (4.22). Xét tiệm cận khi $P_S/N_0 \rightarrow +\infty$ thì $SOP_k(Q_v)$ biến đổi thành (4.24).

+ Khi $\omega_0 > 0, \omega_{3,v} < 0$: $SOP_k(Q_v)$ ở công thức (4.25). Xét tiệm cận khi $P_S/N_0 \rightarrow +\infty$, $SOP_k(Q_v)$ biến đổi thành (4.26).

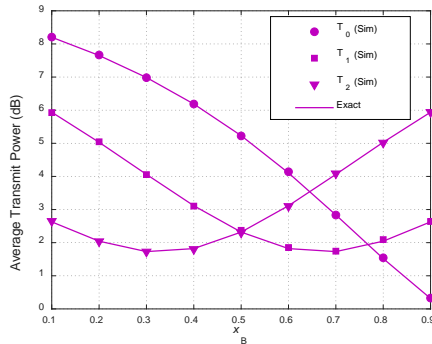
+ Khi $\omega_0 > 0, \omega_{3,v} = 0$: $SOP_k(Q_v)$ rút ra trong công thức (4.27). Xét tiệm cận khi $P_S/N_0 \rightarrow +\infty$ thì biến đổi thành (4.28).

4.3.3 Xác suất dung lượng bảo mật khác không

PNSC được trình bày trong công thức (4.30).

4.4 Các kết quả đạt được

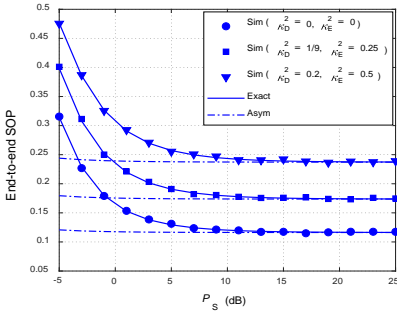
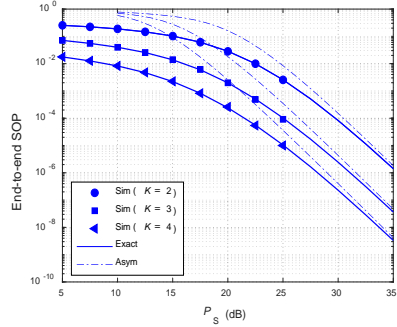
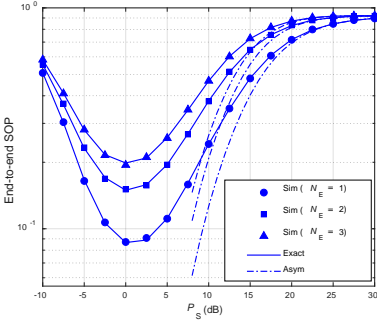
4.4.1 Các yếu tố ảnh hưởng đến công suất phát trung bình



Hình 4.3: Công suất phát trung bình của trạm thứ cấp theo vị trí PB, PU.

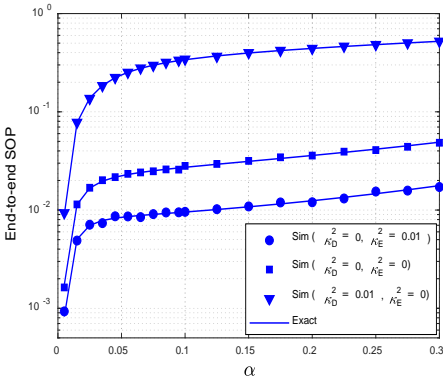
Công suất trạm thứ cấp phụ thuộc nhiều vào số lượng trạm thu sơ cấp (PU), trạm phát năng lượng (PB) và vị trí tương quan của trạm phát so với trạm PU hay PB.

4.4.2 Các yếu tố ảnh hưởng đến xác suất dừng bảo mật

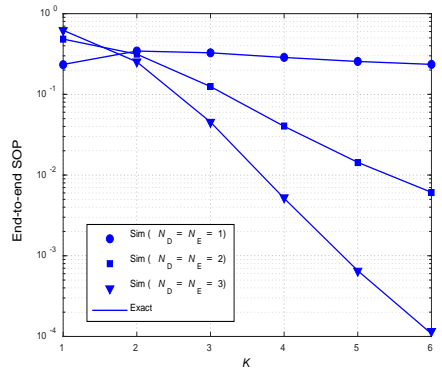


Các Hình 4.4, Hình 4.5, và Hình 4.6 vẽ với các thông số κ_D^2, κ_E^2 khác nhau kiểm chứng tính đúng đắn của ba trường hợp trong biểu thức SOP trong mục 4.3.2.

Trong hình 4.7, SOP có xu hướng tăng khi tăng giá trị hệ số phân chia thời gian thu hoạch năng lượng vô tuyến α . Vì vậy, đề xuất thiết kế hệ số α trong vùng giá trị thấp sẽ có hiệu năng bảo mật tốt hơn. Ngoài ra, mức khiếm khuyết phân cứng của kênh chính (κ_D^2) nhỏ hơn kênh nghe lén (κ_E^2) sẽ làm giảm SOP. Về ảnh hưởng của số anten, Hình 4.8 cho thấy số lượng anten trang bị trong các trạm thứ cấp càng nhiều thì SOP có xu hướng giảm hơn mặc dù trạm nghe lén cũng được trang bị số anten tương đương. Mặt khác, sự cải thiện hiệu năng bảo mật là đáng kể khi số chặng lớn.

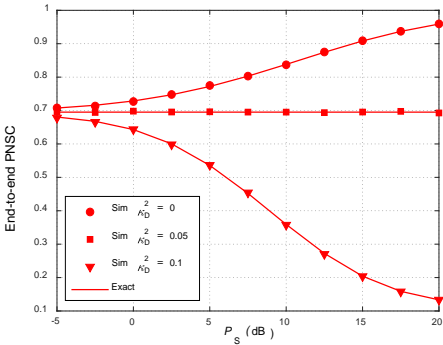


Hình 4.7: Ảnh hưởng của α lên SOP

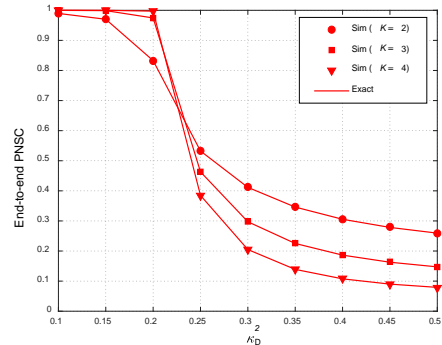


Hình 4.8: SOP theo K và số anten.

4.4.3 Các yếu tố ảnh hưởng đến xác suất dung lượng bảo mật khác không



Hình 4.1: PNSC theo công suất phát



Hình 4.2: PNSC theo K và số anten

Hình 4.9 vẽ đặc tuyến PNSC theo công suất P_S với tương quan mức khiếm khuyết phân cứng κ_D^2, κ_E^2 khác nhau. Khi $\kappa_D^2 = \kappa_E^2$, giá trị PNSC không phụ thuộc P_S . Khi $\kappa_D^2 < \kappa_E^2$, có sự gia tăng PNSC nếu tăng P_S . Ngược lại, trong trường hợp $\kappa_D^2 > \kappa_E^2$, PNSC giảm khi P_S lớn. Quan sát PNSC một lần nữa trong Hình 4.10 cho thấy PNSC suy giảm rất nhanh khi κ_D^2 vượt qua giá trị mốc $\kappa_E^2 = 0.2$. Điều này càng khẳng định được tầm quan trọng khi thiết kế mạng có $\kappa_D^2 < \kappa_E^2$ sẽ cải thiện được thông số hiệu năng bảo mật PNSC trong mạng đa chặng đa anten.

4.5 Kết luận của chương

- Giá trị SOP thấp khi mức khiếm khuyết phần cứng (HI) trên kênh chính (κ_D^2) thấp. Đặc biệt, nếu HI ở tuyến chính thấp hơn tuyến nghe lén (κ_E^2) thì hiệu năng cải thiện hơn trong cả SOP và PNSC.

- SOP khi P_S lớn tiệm cận về hằng số. Ngược lại, khi P_S nhỏ, có thể tìm được công suất phát tối ưu để SOP thấp nhất trong một số trường hợp cụ thể.

- SOP tăng khi trạm nghe lén tăng số lượng anten (N_E) trong khi các trạm thu phát khác giữ nguyên (N_D). Tuy nhiên, SOP thấp hơn nếu trạm thứ cấp được trang bị nhiều anten hơn cho dù trạm nghe lén cũng được trang bị giống như vậy.

- SOP giảm nhanh khi α thấp, tuy nhiên chưa khảo sát được mức tối ưu α^* . Ngoài ra, thiết kế K lớn nâng cao hiệu năng nhờ kéo giảm SOP.

CHƯƠNG 5 TRUYỀN TIN CỘNG TÁC TRONG MẠNG ĐA CHẶNG THỨ CẤP CÓ THU HOẠCH NĂNG LƯỢNG VÔ TUYẾN

5.1 Giới thiệu

Trong các chương trước, luận án đã nghiên cứu đến trường hợp các trạm trung gian chuyển tiếp được sắp xếp theo tuần tự lần lượt từ trạm nguồn đến trạm đích (đồng nghĩa với thông tin sẽ bắt buộc đi qua tất cả các trạm trung gian được sắp đặt trước khi đến trạm đích). Vấn đề đặt ra là nếu thông tin truyền đi được phép bỏ qua một số trạm trung gian chuyển tiếp thì hiệu năng mạng được dự đoán sẽ tốt hơn thay vì phải đi qua hết tất cả các trạm trung gian. Vì vậy, luận án đã đề xuất nghiên cứu giải pháp nâng cao hiệu năng mạng đa chặng mục tiêu bằng sự cộng tác truyền tin của các trạm thu phát trên tuyến thông tin MUCRN. Các trạm thu phát đều có khả năng thu hoạch năng lượng vô tuyến truyền tin và bị hạn chế công suất phát. Tiếp theo chương 4, luận án đã nghiên cứu và tìm được giá trị tối ưu hệ số phân chia thời gian α^* của kỹ thuật SWIPT trong cả trường hợp truyền tin tuần tự thông thường và truyền tin cộng tác.

5.2 Mô hình nghiên cứu



Hình 5.1: Mô hình mạng đa chặng cộng tác có thu hoạch năng lượng vô tuyến.

Mô hình hoạt động của mạng đơn anten MUCRN tương tự như những chương trình trước. Điểm khác biệt là thông tin từ S_k phát đến S_{k+1} có thể được nhận và chuyển tiếp bởi S_{k+i} ($i > 1$) thay vì S_{k+1} . Ngoài ra, tất cả các trạm trong mạng MUCRN đều thu hoạch năng lượng vô tuyến để truyền tin theo giao thức HD.

5.3 Phân tích hiệu năng

5.3.1 Công suất phát trạm thứ cấp

5.3.2 Truyền thông điểm – điểm

Xác suất dừng $S_t \rightarrow S_r$ trong (5.17).

5.3.3 Truyền thông điểm – đa điểm

Trường hợp $\mathbf{H} \neq \{\emptyset\}$: OP trong công thức (5.21).

Trường hợp $\mathbf{H} = \{\emptyset\}$: OP trong công thức (5.24).

5.3.4 Truyền thông từ nguồn đến đích

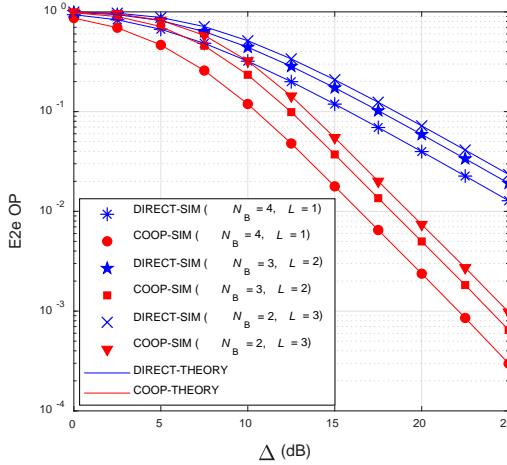
5.3.4.1 *Giao thức truyền thông tuần tự qua từng chặng DIRECT:*
OP^{DIRECT} trong công thức (5.26).

5.3.4.2 *Giao thức truyền thông cộng tác COOP:*
OP^{COOP} trong công thức (5.27).

5.3.4.3 *Số chặng tối đa từ nguồn đến đích cuối:*
Giới hạn mức HI tối đa trong (5.29) và số chặng tối đa trong công thức (5.30).

5.4 Những kết quả đạt được

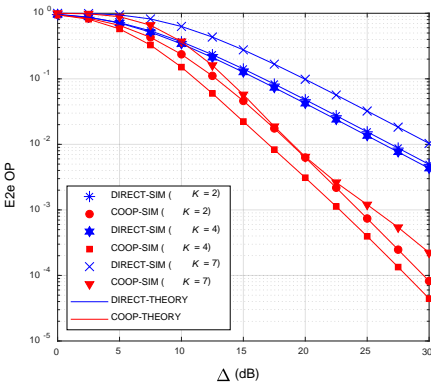
5.4.1 Ảnh hưởng của số lượng trạm phát năng lượng và số trạm sơ cấp



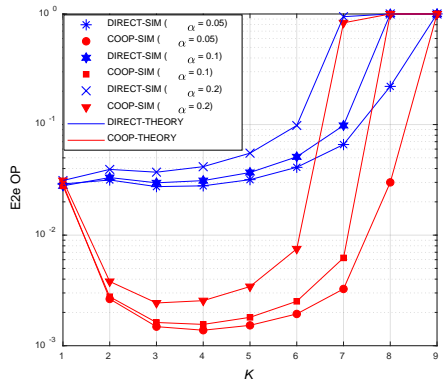
Hình 5.4: Ảnh hưởng của N_B và L lên đặc tuyến OP^{DIRECT} và OP^{COOP}

Trong các giá trị N_B và L đã vẽ, xác suất dừng OP của COOP luôn thấp hơn DIRECT, đặc biệt là ở vùng SNR lớn. Độ dốc của các đặc tuyến cho thấy độ lợi phân tập của COOP cao hơn hẳn DIRECT. Bên cạnh đó, xác suất dừng của cả hai giao thức đều giảm khi N_B lớn hơn và L nhỏ hơn.

5.4.2 Ảnh hưởng của số chặng trong mạng thứ cấp

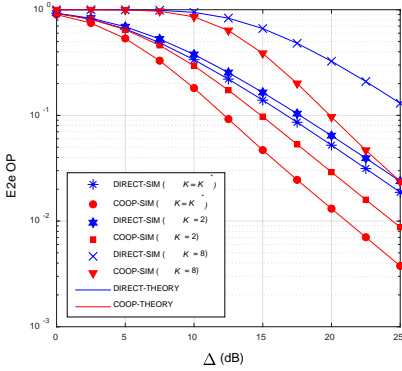


Hình 5.5: OP^{DIRECT} và OP^{COOP} với một số giá trị K khác nhau



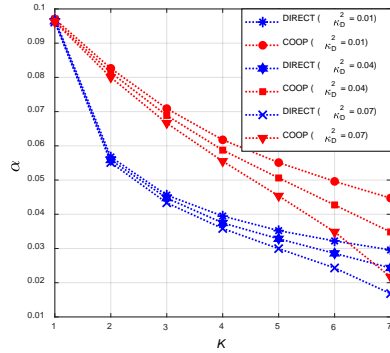
Hình 5.6: Ảnh hưởng của K, α lên đặc tuyến OP.

Hình 5.5 cho giá trị tốt nhất của OP đạt được với $K = 4$ cho cả hai giao thức DIRECT và COOP. Nghĩa là khi $K = 4$ thì hiệu năng tốt hơn so với khi giảm $K = 2$ hay tăng lên $K = 7$. Vì vậy, kết quả cho thấy có tồn tại một giá trị số chặng tối ưu K^* để OP thấp nhất trong cả DIRECT và COOP. Hình 5.6 lại cho thấy K^* phụ thuộc vào α và khác nhau giữa hai giao thức. Hơn nữa, khi $K \geq K_{\max}$ thì OP = 1.

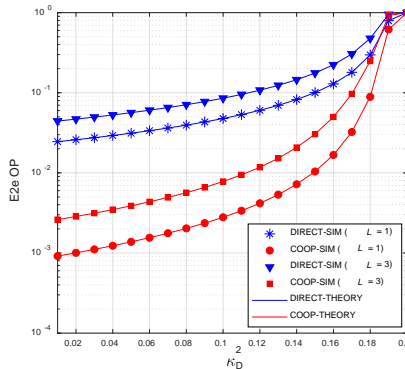


Hình 5.7: OP vẽ khi $\alpha = 0.05$ và so sánh khi K^* với $K = 2, K = 8$.

Hình 5.7 so sánh và cho thấy ưu điểm vượt trội của OP khi chọn số chặng thiết kế tối ưu K^* với hệ số thời gian thu hoạch năng lượng $\alpha = 0.05$ cố định. Do đó, đề xuất tối ưu K khi không thể thay đổi α . Ngược lại, Hình 5.9 đưa ra các giá trị tối ưu về hệ số thời gian α^* tùy theo số chặng K . Dựa vào số liệu trên, chúng ta có thể tối ưu hệ số α khi số chặng K trong mạng không thay đổi.



Hình 5.9: Biểu diễn giá trị α^* theo số chặng K .



Hình 5.10: Ảnh hưởng của κ_D^2 lên OP.

Trong hình Hình 5.10, xác suất dừng của cả hai giao thức là 1 khi $\kappa_D^2 \geq \kappa_{D,\max}^2$.

5.5 Kết luận của chương

- Xác suất dừng OP^{COOP} nhỏ hơn OP^{DIRECT} trong cùng điều kiện. Độ lợi phân tập của giao thức COOP cao hơn DIRECT. Ngoài ra, khi N_B lớn thì OP cải thiện. Ngược lại, khi L lớn thì OP giảm trong cả COOP và DIRECT.

- Với một giá trị α , có thể tìm thấy số chặng thiết kế tối ưu K^* để OP là tốt nhất. Nghiên cứu cho thấy $K^*(\text{COOP})$ thường lớn hơn $K^*(\text{DIRECT})$. Ở chiều ngược lại, với mỗi K thì giá trị tối ưu α^* có xu hướng thấp hơn khi K lớn hơn dù giao thức DIRECT hay COOP. Tuy nhiên giá trị α^* trong COOP luôn cao hơn DIRECT trong cùng điều kiện khảo sát.

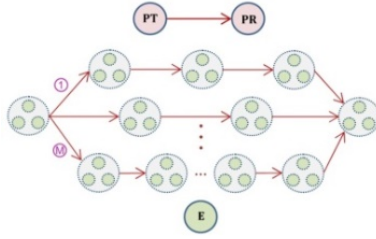
- Ngoài ra, mức khiếm khuyết phần cứng (HI) ít ảnh hưởng đến giá trị α^* nhưng HI thấp sẽ cải thiện hiệu năng tốt hơn. Nếu HI vượt quá giá trị giới hạn $\kappa_{D,\max}^2$ hay $K \geq K_{\max}$ thì OP = 1.

CHƯƠNG 6 PHƯƠNG THỨC CHỌN ĐƯỜNG ĐI TRONG MẠNG ĐA CHẶNG THỨ CẤP DẠNG CỤM

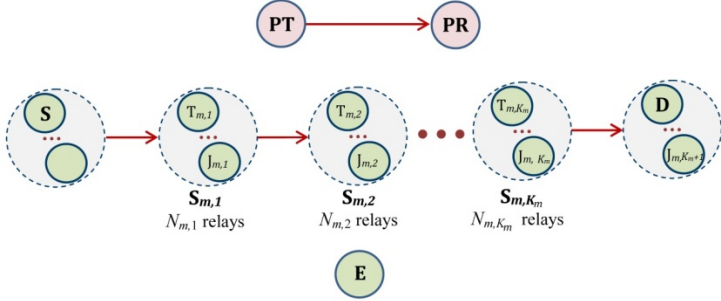
6.1 Giới thiệu

Các mô hình đề xuất trước đây của luận án chỉ đặt bối cảnh có duy nhất một tuyến MUCRN có thể truyền thông tin từ nguồn đến đích trong điều kiện hạn chế công suất phát. Tuy nhiên, trong cấu trúc mạng vô tuyến Ad-hoc, WSNs, V2V, các nút mạng (các trạm thu phát) được bố trí sắp xếp theo hình lưới. Vì vậy, sẽ có đồng thời nhiều tuyến thông tin dạng MUCRN trong mạng lưới có thể thực hiện chuyển thông tin từ nguồn đến đích. Vấn đề cần nghiên cứu là làm thế nào để chọn được một tuyến đa chặng phù hợp nhất để truyền tin? Nếu có một giải pháp chọn được một tuyến MUCRN tốt nhất theo một tiêu chí cho trước cũng đồng nghĩa với giải pháp đó cải thiện hiệu năng mạng. Luận án đề xuất ba giao thức chọn đường đi là BEST, MAXV, và RAND, sử dụng trong mạng lưới gồm nhiều tuyến MUCRN đồng thời so sánh ưu nhược điểm của ba giao thức trên.

6.2 Mô hình nghiên cứu



Hình 6.1: Mô hình tổng quát M tuyến đa chặng.



Hình 6.2: Tuyến đa chặng thứ m .

Có M tuyến MUCRN trong mạng lưới. Giả định tuyến thứ m được chọn có $K_m + 1$ cụm gồm cụm nguồn (S), cụm đích (D) và các cụm chuyển tiếp ($S_{m,k}$). Mỗi cụm có $N_{m,k}$ trạm thu phát. Trong cụm phát thì có trạm phát tin gọi là $T_{m,k-1}$. Trong cụm thu thì có trạm thu $T_{m,k}$ và trạm phát jamming gọi là $J_{m,k}$.

6.3 Phân tích hiệu năng

6.3.1 Xác suất dừng mạng sơ cấp

OP của mạng sơ cấp được đưa ra ở công thức (6.10).

6.3.2 Cấp phát công suất trong mạng thứ cấp

Công suất của jammer và trạm phát thứ cấp đưa ra ở công thức (6.14).

6.3.3 Xác suất dung lượng bảo mật khác không của tuyến thứ m

PNSC_m được đưa ra trong công thức (6.16), diễn giải ở (6.17) và (6.18).

6.3.4 Các giải pháp lựa chọn tuyến thông tin đa chặng

6.3.4.1 Giao thức BEST:

$\text{PNSC}_{\text{BEST}}$ trình bày trong công thức (6.25).

6.3.4.2 Giao thức MAXV:

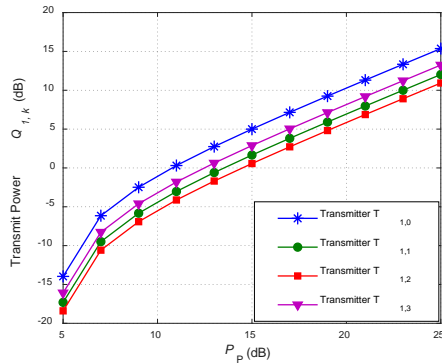
$\text{PNSC}_{\text{MAXV}}$ trình bày trong công thức (6.26).

6.3.4.3 Giao thức RAND:

$PNSC_{RAND}$ trình bày trong công thức (6.27).

6.4 Các kết quả đạt được

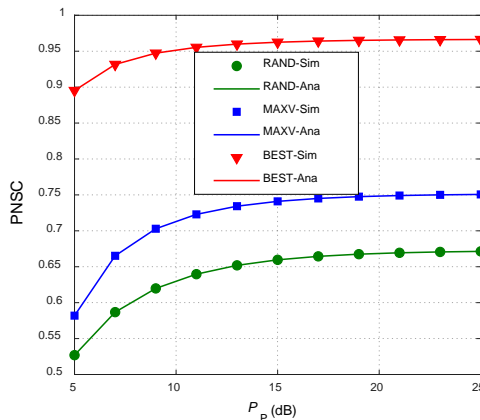
6.4.1 Ảnh hưởng của công suất phát trạm sơ cấp đến mức hạn chế công suất phát thứ cấp



Hình 6.3: Ảnh hưởng P_p đến $Q_{1,k}$ trên tuyến thông tin 3 chặng.

Kết quả cho thấy sự tương quan vị trí giữa các cụm trung gian $S_{l,k}$ so với PR là khác nhau nên mức công suất bị hạn chế là khác nhau

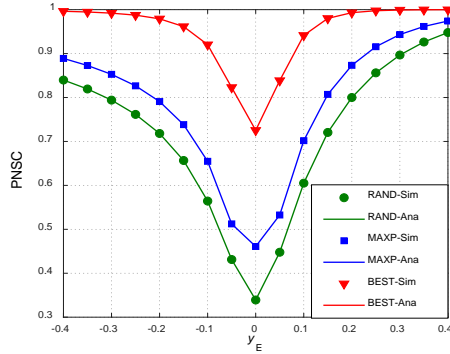
6.4.2 Ảnh hưởng của công suất phát trạm sơ cấp lên xác suất bảo mật khác không ở mạng thứ cấp



Hình 6.4: Ảnh hưởng P_p lên PNSC trong các giao thức đề xuất.

Nhìn chung, cả ba giao thức đều cải thiện khi tăng P_p . Tuy nhiên, mức độ cải thiện chỉ ở vùng P_p thấp. Khi P_p đủ lớn, PNSC ít thay đổi.

6.4.3 Ảnh hưởng của vị trí trạm nghe lén lên xác suất bảo mật khác không PNSC



Hình 6.5: Ảnh hưởng của vị trí trạm nghe lén lên PNSC.

Mức ảnh hưởng của yếu tố vị trí trạm nghe lén lên hiệu năng PNSC của các giao thức được vẽ trong Hình 6.5. Giá trị thấp nhất của PNSC trong cả ba giao thức đều tại $(0.5,0)$ khi thực hiện di chuyển trạm nghe lén theo trục $x_E = 0.5$. Do khi trạm nghe lén ở điểm trên sẽ có vị trí gần các trạm phát thứ cấp nhất trên quỹ đạo dịch chuyển. Vì vậy, trong thiết kế mạng cần có giải pháp phân luồng tuyến để thay thế cho những tuyến thông tin quá gần trạm nghe lén.

6.5 Kết luận của chương

- Công suất phát sơ cấp P_p ảnh hưởng đến PNSC mạng MUCRN khi có giá trị nhỏ nhưng gần như không thay đổi khi ở vùng giá trị lớn.

- Giao thức BEST đạt hiệu năng cao nhất, giao thức MAXV đạt thứ hai, trong khi giao thức RAND thấp nhất. Tuy nhiên để sử dụng giao thức có hiệu năng càng cao đòi hỏi mức tính toán, ước lượng CSI càng lớn vốn không thích hợp với các trạm có năng lực xử lý thấp.

- Vị trí của trạm nghe lén ảnh hưởng lớn đến bảo mật. Vì vậy, luận án đề xuất khi thiết kế mạng mới hay thực hiện định tuyến trong mạng đa chặng cần có giải pháp phân luồng tuyến hợp lý để tránh sử dụng những tuyến thông tin quá gần trạm nghe lén, không đảm bảo về hiệu năng bảo mật.

CHƯƠNG 7 KẾT LUẬN

7.1 Kết luận và những đóng góp của luận án

Với mục đích nâng cao hiệu suất sử dụng phổ tần, toàn bộ các mô hình nghiên cứu trong luận án đều đều đặt giả thiết các mạng vô tuyến đa chặng bị hạn chế công suất phát để giảm ảnh hưởng đến các trạm thu sơ cấp. Nghiên cứu cho thấy trong trường hợp khi trạm thu phát sơ cấp và trạm thu phát thứ cấp đặt gần nhau, có xảy ra can nhiễu đan xen nhau thì mức công suất phát trạm sơ cấp có ảnh hưởng đến hiệu năng mạng đa chặng thứ cấp. Tuy nhiên, mức độ ảnh hưởng chỉ đáng kể khi công suất nhỏ. Khi công suất phát đủ lớn, hiệu năng mạng đa chặng không thay đổi. (Kết luận trong chương 3 & 6). Ngoài ra, khi các trạm phát sơ cấp đặt cách xa, hầu như không can nhiễu đến trạm thu thứ cấp, luận án quan tâm đến mức công suất phát của trạm thứ cấp có được nhờ vào khả năng thu năng lượng vô tuyến từ trạm phát năng lượng (PB) gần đó. Kết quả (từ chương 4 & 5) cho thấy công suất trạm thứ cấp phụ thuộc nhiều vào số lượng trạm thu sơ cấp (PU) cùng trạm phát năng lượng (PB). Ngoài ra, mức công suất trên còn phụ thuộc vào vị trí tương quan của trạm phát sơ cấp với trạm PU hay PB. Qua nghiên cứu, luận án kết luận việc hạn chế công suất phát để thực hiện truyền thông trong mạng đa chặng mà không cần cấp phát dải tần số mới là hoàn toàn khả thi, góp phần nâng cao hiệu suất sử dụng phổ tần số.

Để nghiên cứu về hiệu năng truyền thông của mạng vô tuyến đa chặng, luận án quan tâm đến thông số hiệu năng xác suất dừng (OP) của một mạng MUCRN và đưa ra nhiều đề xuất để nâng cao hiệu năng mạng. Đề xuất đầu tiên là xây dựng mạng đa chặng có các trạm thu phát liên kề nằm trong tầm nhìn thẳng (LOS). Nghiên cứu (trong chương 3) cho thấy OP của mạng đa chặng tầm nhìn thẳng thấp hơn hẳn so với trường hợp các nút mạng không trong tầm nhìn thẳng (NLOS). Hơn nữa, mức độ cải thiện hiệu năng càng lớn khi thiết kế giá trị Rician K -factor của kênh truyền thứ cấp càng lớn. ($\kappa_D^2 = 10$ có OP = 0.17 trong khi $\kappa_D^2 = 0$ có OP = 0.6). Đề xuất tiếp theo là sử dụng kỹ thuật đa anten với phân tập TAS/SC trong mạng sơ cấp. Kết quả nghiên cứu cho thấy đây là giải pháp hiệu quả để giảm xác suất dừng của mạng đa chặng thứ cấp nếu số anten được trang bị lớn. Trong trường hợp không thể tăng số lượng anten thì việc phân chia hợp lý số lượng anten đang có giữa trạm phát và trạm thu sơ cấp cũng có tác dụng cải thiện hơn hiệu năng mạng đa chặng mục tiêu. Một đề xuất quan trọng tiếp theo là dùng kỹ thuật truyền thông cộng tác để nâng cao hiệu năng mạng. Trong giao thức truyền thông cộng tác được đề xuất, thông tin có thể đi

tất để về trạm đích sớm hơn. Kết quả nghiên cứu đã cho thấy độ lợi phân tập của giao thức truyền thông công tác được đề xuất lớn hơn nhiều so với giao thức truyền tuần tự thông thường, góp phần chứng minh được hiệu quả của giải pháp đề xuất trong việc nâng cao hiệu năng truyền thông so với các giải pháp trước đây. Tiếp đến, đề xuất thiết kế số chặng tối ưu trong mạng MUCRN sẽ giảm được xác suất dừng. Các kịch bản nghiên cứu đều cho thấy mạng đa chặng được thiết kế với số chặng tối ưu có hiệu năng tốt hơn mạng hai chặng trong cùng điều kiện truyền tin.

Tiếp tục nghiên cứu về hiệu năng bảo mật thông tin trong mạng vô tuyến đa chặng bằng phương pháp bảo mật lớp vật lý (PLS), luận án tập trung đánh giá và đưa ra nhiều đề xuất để cải thiện hiệu năng bảo mật. Cụ thể như về xác suất nghe lén thông tin (IP) trong mạng đa chặng, các giải pháp tăng hiệu năng truyền thông (bằng cách tăng công suất phát, tăng số anten phát trong mạng sơ cấp đa anten, giảm số chặng trong mạng thứ cấp) đều dẫn đến IP lớn hơn. Do đó, luận án đề xuất cân cân bằng giữa yếu tố truyền thông và yếu tố bảo mật trong thiết kế mạng đa chặng. Một giải pháp khác không cần đánh đổi hiệu năng truyền thông nhưng vẫn giảm được một ít IP là thiết kế mạng có giá trị Rician K -factor thấp ở các kênh nghe lén (IP giảm lớn nhất 6% khi $\kappa_E^2 = 15$ xuống $\kappa_E^2 = 0$). Tiếp theo, đối với mạng đa chặng đa anten, phân tập phát/thu theo dạng TAS/SC, luận án đề xuất trang bị số lượng anten nhiều hơn để giảm xác suất dừng bảo mật (SOP). Giải pháp trên cải thiện hiệu năng bảo mật tốt hơn nữa nếu kết hợp với tăng số chặng trong mạng nhiều hơn, ngay cả khi trạm nghe lén cũng được trang bị số anten như trạm chính. Về xác suất dung lượng bảo mật khác không (PNSC), luận án đề xuất sử dụng công nghệ có mức khiếm khuyết phần cứng thấp trong mạng đa chặng để tăng PNSC. Khi đó, SOP cũng giảm xuống thấp hơn. Dựa vào PNSC, luận án đề xuất giải pháp chọn tuyến thông tin đa chặng theo hiệu năng bảo mật nhờ ba giao thức BEST, MAXV, và RAND phù hợp với khả năng thu thập CSI khác nhau của mạng. Đặc biệt, nghiên cứu cho thấy hiệu năng bảo mật phụ thuộc rất lớn vào vị trí trạm nghe lén, vì vậy luận án đề xuất khi thiết kế mạng mới hay thực hiện định tuyến trong mạng đa chặng cần có giải pháp phân luồng tuyến hợp lý để tránh sử dụng những tuyến thông tin quá gần trạm nghe lén, không đảm bảo an toàn thông tin.

Bên cạnh đó, luận án đã nghiên cứu ảnh hưởng của việc thu thập năng lượng vô tuyến truyền tin (SWIPT) lên hiệu năng mạng đa chặng. Tương tự như đề xuất

trước đây, việc tăng số lượng anten trong trạm thu phát đa chặng không những giảm được SOP mà còn tăng năng lượng thu hoạch được, góp phần tăng công suất phát ở mạng thứ cấp, cải thiện hiệu năng mạng. Vì vậy, đề xuất thiết kế hệ số thời gian thu hoạch (α) thấp trong hệ thống đa anten sẽ cải thiện hiệu năng bảo mật. Đối với mạng đơn anten, kết quả nghiên cứu cho thấy có tồn tại giá trị α tối ưu (α^*) để hiệu năng tốt nhất, phù hợp với những công trình trước đây khi đánh giá về SOP [134] hay OP [44]. Hơn nữa, luận án đã đưa ra được mối liên hệ của giá trị tối ưu α^* với các thông số thiết kế mạng khác như số chặng K hay giao thức truyền tin được dùng trong mạng. Trong trường hợp mạng sử dụng giao thức có giá trị α không thể thay đổi, luận án đề xuất thiết kế tối ưu số chặng K để đạt hiệu năng truyền thông tốt nhất. Ngược lại, khi mạng có sẵn và không thể thay đổi số chặng K , luận án đề xuất sử dụng giá trị tối ưu α^* tương ứng để tăng hiệu năng truyền thông qua mạng MUCRN.

Toàn bộ những kết luận trên đây của luận án cho thấy việc thiết kế mạng truyền thông đa chặng hoạt động trong điều kiện hạn chế công suất phát là hoàn toàn khả thi. Để mạng đa chặng hoạt động hiệu quả, nhiều đề xuất có giá trị đã được đưa ra nhằm đạt được hiệu năng truyền thông cũng như hiệu năng bảo mật mạng tốt nhất.

7.2 Hướng phát triển của luận án

Mặc dù có những đóng góp cụ thể nhưng luận án chưa thể nghiên cứu hết những giải pháp để đạt được mục tiêu ban đầu. Một số hướng nghiên cứu phát triển mở rộng trong thời gian tới như sau:

- Sử dụng các đặc tả kênh truyền ở dạng tổng quát như Nakagami-m, Generalized-K cho các kênh truyền vô tuyến liên quan.
- Ứng dụng các kỹ thuật truyền thông mới vào mạng đa chặng như NOMA, Massive MIMO.
- Nghiên cứu hiệu năng của mạng đa chặng hai chiều (two-way) hay mạng đa chặng song công (full-duplex).
- Phát triển các giao thức mới hiệu quả hơn trong việc chọn đường đi, giao thức truy nhập lớp MAC thích hợp hơn trong môi trường mạng lưới.

--- oOo ---