

**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 2021**

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 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 23 tháng 01 năm 2020

# NHỮNG ĐỀ XUẤT NGHIÊN CỨU CỦA LUẬN ÁN

## Đề xuất 1:

Các công trình trước đây của nghiên cứu sinh 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 tối ưu 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. Kết quả đã được nghiên cứu sinh công bố trên tạp chí SCIE (*International Journal of Communication Systems - IJCS*):

P. M. Nam, T. T. Duy, and P. V. Ca, "End-to-end security-reliability analysis of multi-hop cognitive relaying protocol with TAS/SC-based primary communication, total interference constraint and asymmetric fading channels," *International Journal of Communication Systems*, vol. 32, no. 2, pp. 1-16, 2019.

## Đề xuất 2:

Kỹ thuật thu hoạch năng lượng vô tuyến để truyền tin (SWIPT) là giải pháp tốt để tăng tính linh động, thích nghi với hạ tầng cơ sở truyền thông. Tiếp tục kế thừa kết quả từ đề xuất 1, nghiên cứu sinh đề xuất nghiên cứu giải pháp trang bị nhiều anten trong mạng đa chặng MUCRN dùng phân tập thu/phát là TAS/SC. 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. Hai thông số hiệu năng bảo mật cần được quan tâm là SOP và PNSC. Các kết quả nghiên cứu đã được nghiên cứu sinh và một đồng tác giả chính công bố trên tạp chí SCIE (*Sensors*):

P. T. Tin, P. M. Nam, T. T. Duy, P. T. Tran, and M. Voznak, "Secrecy Performance of TAS/SC-Based Multi-Hop Harvest-to-Transmit Cognitive WSNs Under Joint Constraint of Interference and Hardware Imperfection," *Sensors*, vol. 19, no. 5, p. 1160, 2019.

### Đề xuất 3:

Trong thực tế, các nút mạng được bố trí theo dạng lưới. Vì vậy, khi thiết lập một mạng MUCRN trong một mạng lưới sẽ có trường hợp hai trạm trung gian gần về khoảng cách địa lý (gần về cự ly truyền thông) nhưng có thể xa khi xét theo sự sắp xếp theo thứ tự truyền tin (cách nhau qua nhiều chặng). Đề xuất 3 nghiên cứu giao thức cộng tác giữa các trạm để chỉ trạm thu được gần đích nhất phát chuyển tiếp thông tin ở khe thời gian kế tiếp, rút ngắn quãng đường thông tin đi đến đích. Các trạm thu phát đều có khả năng thu hoạch năng lượng vô tuyến truyền tin và bị hạn chế công suất phát. Nghiên cứu tìm được giá trị tối ưu hệ số phân chia thời gian  $\alpha^*$  của kỹ thuật SWIPT trong cả trường hợp truyền tin tuân tự thông thường và truyền tin cộng tác. Các kết quả nghiên cứu của đề xuất được nghiên cứu sinh công bố tạp chí SCIE (*Electronics*):

P. M. Nam, T. T. Duy, P. V. Ca, P. N. Son, and N. H. An, "Outage Performance of Power Beacon-Aided Multi-Hop Cooperative Cognitive Radio Protocol Under Constraint of Interference and Hardware Noises," *Electronics*, vol. 9, no. 6, p. 1054, 2020.

### Đề xuất 4:

Các mô hình đề xuất trước chỉ đặt bối cảnh khi có một tuyến MUCRN duy nhất truyền tin từ nguồn đến đích trong điều kiện hạn chế công suất phát. Trong trường hợp xuất hiện nhiều mạng đa chặng (tuyến đa chặng) có thể truyền thông tin từ nguồn đến đích, đề xuất 4 đánh giá ba giao thức chọn đường đi là BEST, MAXV, và RAND, sử dụng trong mạng lưới gồm nhiều mạng MUCRN. Nghiên cứu cũng đồng thời so sánh ưu nhược điểm của ba giao thức trên dựa trên yêu cầu về CSI khác nhau của từng giao thức. Kết quả nghiên cứu đã được nghiên cứu sinh công bố trong hội nghị INISCOM2019, được xuất bản trong *Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering (SCOPUS)*.

P. M. Nam, P. V. Ca, T. T. Duy, and K. N. Le, "Secrecy Performance Enhancement Using Path Selection over Cluster-Based Cognitive Radio Networks," in INISCOM2019, *Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*, 2019, vol. 293, pp. 65-80: Springer Nature Switzerland AG

## NHỮNG ĐÓNG GÓP CỦA LUẬN ÁN

Luận án nghiên cứu và đề xuất những giải pháp nâng cao hiệu năng truyền thông của mạng MUCRN (Multi-hop Underlay Cognitive Radio Networks) bị ràng buộc công suất phát. Bên cạnh đó, luận án cũng nghiên cứu kỹ thuật thu hoạch năng lượng vô tuyến và bảo mật lớp vật lý.

Đầu tiên, luận án đưa ra các mô hình chuyển tiếp đa chặng hiệu quả nhằm nâng cao hiệu năng của mạng thứ cấp với điều kiện ràng buộc công suất phát và sự ảnh hưởng của nhiễu đồng kênh từ mạng sơ cấp. Cụ thể, luận án đề xuất các mô hình chọn đường, chuyển tiếp phân tập, chuyển tiếp cộng tác và các kỹ thuật chọn lựa nút chuyển tiếp hiệu quả. Hơn nữa, luận án cũng nghiên cứu các mô hình tổng quát trong đó mạng sơ cấp sử dụng các kỹ thuật thu/phát có phân tập để nâng cao hiệu năng cho mạng sơ cấp, đồng thời cũng nâng cao khả năng sử dụng phổ tần cho mạng thứ cấp. Bên cạnh đó, các bài toán tối ưu số chặng, số anten cũng đã được nghiên cứu trong luận án.

Thứ hai, bởi vì các thiết bị vô tuyến thứ cấp bị hạn chế về kích thước và năng lượng, kỹ thuật thu thập năng lượng sóng vô tuyến đã được sử dụng để cung cấp năng lượng cho các thiết bị này. Luận án cũng đề xuất các mô hình thu thập năng lượng hiệu quả từ các trạm phát năng lượng được đặt trong mạng thứ cấp. Về mặt thiết kế, luận án thiết kế khoảng thời gian thu thập năng lượng tối ưu cho mạng chuyển tiếp đa chặng thứ cấp.

Kế tiếp, bảo mật thông tin cho mạng chuyển tiếp đa chặng là một trong những vấn đề then chốt. Do đó, luận án nghiên cứu vấn đề bảo mật lớp vật lý cho các mô hình đề xuất. Cụ thể, luận án nghiên cứu các hiệu năng bảo mật và sự đánh đổi giữa độ tin cậy của việc truyền dữ liệu và bảo mật thông tin. Đối với mạng đa chặng đa anten, phân tập phát/thu theo dạng TAS/SC, đề xuất trang bị số lượng anten nhiều hơn để giảm xác suất dừng bảo mật. Đặc biệt, luận án đề xuất giải pháp chọn tuyến thông tin đa chặng theo ba giao thức BEST, MAXV, và RAND có tính thực tiễn cao. Hơn nữa, luận án cũng đề xuất mô hình chuyển tiếp đa chặng cộng tác để đạt được hiệu năng cao hơn cho các mạng chuyển tiếp đa chặng với các nút thứ cấp đơn anten.

Cuối cùng, hiệu năng của tất cả các mô hình đều được đánh giá bằng các biểu thức toán học và kiểm chứng sự chính xác thông qua mô phỏng Monte Carlo. Bởi vì hầu hết các biểu thức được đưa ra dưới dạng tường minh, nên chúng có

thể được sử dụng hiệu quả trong việc đánh giá và thiết kế hệ thống. Hơn nữa, những mô hình đề xuất 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. Những đề xuất trong luận án nếu được triển khai hoàn toàn có thể nâng cao hiệu năng truyền thông cũng như bảo mật thông tin.

## 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. Các mạng thế hệ mới như WSNs, VANETs, MANET đều hoạt động đan xen với các hạ tầng mạng sẵn có. Mạng truyền thông thứ cấp hoạt động ở chế độ nền của vô tuyến nhận thức (UCRN) là một giải pháp tiết kiệm dải tần hiệu quả do không cần cấp phát tần số mới. Hơn nữa, 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) 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) 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) 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, đề tài luận án “*Nghiên cứu hiệu năng mạng truyền thông vô tuyến đa chặng trong điều kiện công suất phát hạn chế*” được nghiên cứu sinh lựa chọn để thực hiện nghiên cứu.

### 2. Mục tiêu 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.

## CHƯƠNG 1 TỔNG QUAN VỀ VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU

Đề cập đến các phân tích chi tiết của nghiên cứu sinh về các công trình trước đó trong cùng lĩnh vực, bao gồm các nghiên cứu quốc tế và trong nước. Từ đó phát triển hướng nghiên cứu mới phục vụ mục tiêu luận án. Chi tiết được trình bày từ trang 10 đến trang 27 trong toàn văn luận án.

## CHƯƠNG 2 CƠ SỞ LÝ THUYẾT

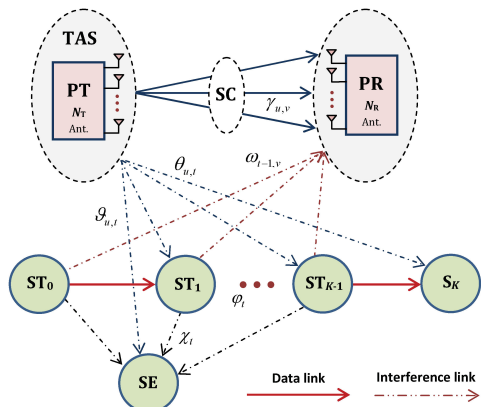
Đề cập ngắn gọn về nền tảng lý thuyết các kênh truyền vô tuyến, các mô hình và giao thức mạng đa chặng cùng với giao thức báo hiệu MAC. Lý thuyết về chế độ hạn chế công suất phát, khiếm khuyết phần cứng, bảo mật lớp vật lý hay thu hoạch năng lượng vô tuyến và truyền tin được trình bày trong phần này. Chi tiết nội dung từ trang 28 đến trang 40 của bản toàn văn luận án.

## 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 cải thiện hiệu năng mạng thứ cấp.

### 3.2 Mô hình đề xuất



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

Mạng sơ cấp (PN) có nhiều anten và phân tập TAS/SC (Transmit Anten Selection / Selection Combining). Mạng thứ cấp MUCRN có thông tin được truyền từ  $S_0$  đến  $S_K$  qua  $K$  chặng, sử dụng giao thức Half-duplex (HD). 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

$$\text{Tối ưu: } OP_{PN} = \left[ 1 - \exp\left(-\lambda_{pp} \frac{\sigma_p(I_p + 1)}{\Delta}\right) \right]^{N_T N_R} \quad (3.20), \quad I_p = \left[ \frac{\Delta}{\lambda_{pp} \sigma_p} \ln\left(\frac{1}{1 - (\varepsilon_{OP})^{\frac{1}{N_T N_R}}}\right) - 1 \right]. \quad (3.21)$$

#### 3.3.2 Xác suất dừng của mạng đa chặng thứ cấp

Trường hợp Rician fading:

$$OP_{e2e} = 1 - \prod_{k=1}^K \left[ 1 - \sum_{m=0}^{N_{R-1}} \lambda_{PS_k} \beta_0 \int_0^{+\infty} \frac{\beta_1 x + \beta_2}{\beta_1 x + \beta_3} \exp\left(-\frac{\beta_4}{\beta_1 x + \beta_3}\right) \exp(-\lambda_{PS_k} x) dx \right]. \quad (3.27)$$

$$OP_{e2e} \rightarrow 1 - \prod_{k=1}^K \left[ 1 - \sum_{m=0}^{N_{R-1}} \lambda_{PS_k} \beta_0 \int_0^{+\infty} \frac{\beta_5 x}{\beta_5 x + (m+1)\lambda_{S_{k-1}P}} \exp\left(-\frac{\beta_4}{\beta_5 x + (m+1)\lambda_{S_{k-1}P}}\right) \exp(-\lambda_{PS_k} x) dx \right]. \quad (3.28)$$

Trường hợp Rayleigh fading:

$$OP_{e2e} = 1 - \prod_{k=1}^K \left[ \sum_{m=0}^{N_{R-1}} \frac{\lambda_{PS_k} \beta_6}{\beta_7} \exp\left(\lambda_{PS_k} \frac{\beta_8}{\beta_7}\right) E_1\left(\lambda_{PS_k} \frac{\beta_8}{\beta_7}\right) \right], \quad (3.29)$$

$$OP_{e2e} \rightarrow 1 - \prod_{k=1}^K \left[ \sum_{m=0}^{N_{R-1}} \frac{\lambda_{PS_k} \beta_6}{\beta_9} \exp\left(\frac{(m+1)\lambda_{S_{k-1}P} \lambda_{PS_k}}{\beta_9}\right) E_1\left(\frac{(m+1)\lambda_{S_{k-1}P} \lambda_{PS_k}}{\beta_9}\right) \right]. \quad (3.30)$$

#### 3.3.3 Xác suất nghe lén trong mạng mục tiêu

Trường hợp Rician fading:

$$IP = 1 - \prod_{k=1}^K \left[ \sum_{m=0}^{N_{R-1}} \lambda_{PE} \beta_0 \int_0^{+\infty} \frac{\mu_1 x + \mu_2}{\mu_1 x + \mu_3} \exp\left(-\frac{\mu_4}{\mu_1 x + \mu_3}\right) \exp(-\lambda_{PE} x) dx \right], \quad (3.32)$$

$$IP \rightarrow 1 - \prod_{k=1}^K \left[ \sum_{m=0}^{N_{R-1}} \lambda_{PE} \beta_0 \int_0^{+\infty} \frac{\mu_5 x}{\mu_5 x + (m+1)\lambda_{S_{k-1}P}} \exp\left(-\frac{\mu_4}{\mu_5 x + (m+1)\lambda_{S_{k-1}P}}\right) \exp(-\lambda_{PE} x) dx \right]. \quad (3.33)$$

Trường hợp Rayleigh fading:

$$IP = 1 - \prod_{k=1}^K \left[ 1 - \sum_{m=0}^{N_{R-1}} \frac{\lambda_{PE} \beta_6}{\mu_6} \exp\left(\lambda_{PE} \frac{\mu_7}{\mu_6}\right) E_1\left(\lambda_{PE} \frac{\mu_7}{\mu_6}\right) \right], \quad (3.34)$$

$$IP \rightarrow 1 - \prod_{k=1}^K \left[ 1 - \sum_{m=0}^{N_{R-1}} \frac{\lambda_{PE} \beta_6}{\mu_8} \exp\left(\frac{(m+1)\lambda_{S_{k-1}P} \lambda_{PE}}{\mu_8}\right) E_1\left(\frac{(m+1)\lambda_{S_{k-1}P} \lambda_{PE}}{\mu_8}\right) \right]. \quad (3.35)$$

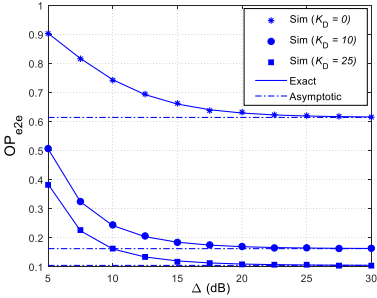


### 3.4 Các kết quả đạt được:

#### 3.4.1 Ảnh hưởng của tỉ số SNR phát lên mức xuyên nhiễu ở trạm thu sơ cấp

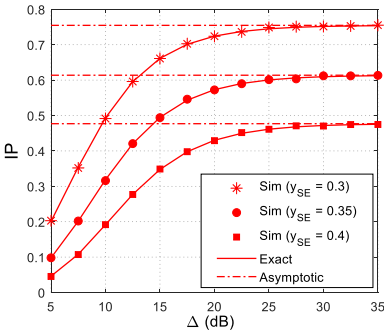
Nghiên cứu cho thấy giá trị ngưỡng  $I_P$  tăng cùng với  $\epsilon_{OP}$ .

#### 3.4.2 Xác suất dừng mạng đa chặng thứ cấp



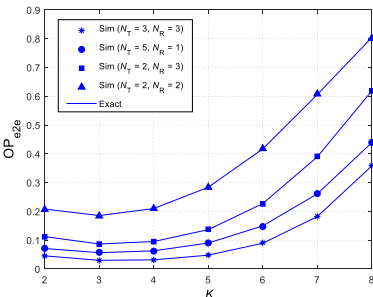
Hình 3.3:  $OP_{e2e}$  vẽ theo  $\Delta$ .

#### 3.4.3 Xác suất nghe lén trong mạng đa chặng



Hình 3.4: IP vẽ theo  $\Delta$ .

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



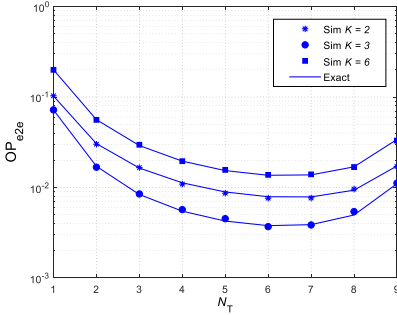
Hình 3.5:  $OP_{e2e}$  vẽ theo số chặng  $K$

Hình 3.3 cho thấy với miền công suất phát ( $\Delta$ ) đủ lớn, đặc tuyến  $OP_{e2e}$  sẽ dần hội tụ về giá trị tiệm cận khi  $\Delta > 20\text{dB}$ . 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

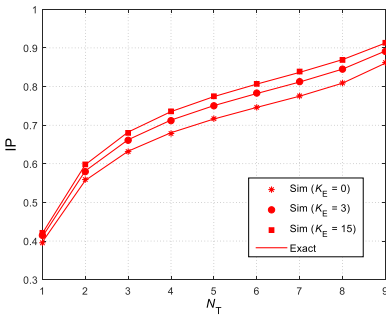
Trong Hình 3.4, khi trạm nghe lén càng cách xa mạng đa chặng thứ cấp ( $\gamma_E = 0.4$ ) khả năng nghe lén càng giảm hơn so với được bố trí gần mạng này ( $\gamma_E = 0.3$ ).

Trong Hình 3.5, số chặng  $K = 3$  là tối ưu nhất khi đặt mục tiêu xác suất dừng  $OP_{e2e}$  thấp nhất. Hơn nữa, mạng đa chặng (3 chặng) hiệu quả hơn mạng dual-hop (2 chặng) trong trường hợp đang khảo sát. 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.

### 3.4.5 Ảnh hưởng của phân bố anten phát và thu lên hiệu năng mạng đa chặng



Hình 3.7: OP<sub>e2e</sub> theo số anten N<sub>T</sub>.



Hình 3.8: IP theo số anten phát N<sub>T</sub>.

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<sub>e2e</sub> 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 cho thấy IP giảm lớn nhất 6% khi K<sub>E</sub> giảm từ 15 xuống 0. Do đó, để giảm IP mà không ảnh hưởng nhiều đến hiệu năng truyền thông, cần thiết kế tuyến thông tin sao cho hệ số K<sub>E</sub> nhỏ.

## 3.5 Kết luận của chương

SNR phát của trạm sơ cấp chỉ ảnh hưởng đến OP<sub>e2e</sub> mạng thứ cấp khi nhỏ hơn 20dB. Ngoài miền trên, hiệu năng mạng đa chặng thứ cấp hầu như không thay đổi.

Nhiều anten sẽ cải thiện OP<sub>e2e</sub> của mạng đa chặng nhưng làm tăng IP. Tuy nhiên, nếu có cùng tổng số anten thì 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<sub>e2e</sub>. Ngược lại, nếu K nhỏ, tồn tại một giá trị số chặng tối ưu K\* để OP<sub>e2e</sub> nhỏ nhất. Kết quả mô phỏng cho thấy mạng đa chặng (3 chặng) được tối ưu tốt hơn mạng dual-hop về hiệu năng OP<sub>e2e</sub> trong cùng điều kiện truyền tin.

OP<sub>e2e</sub> thấp hơn khi hệ số Rician K-factor giữa các trạm trong mạng đa chặng thứ cấp lớn hơn. Ngược lại, IP giảm nếu giá trị Rician K-factor thấp hơn ở các kênh nghe lớn.

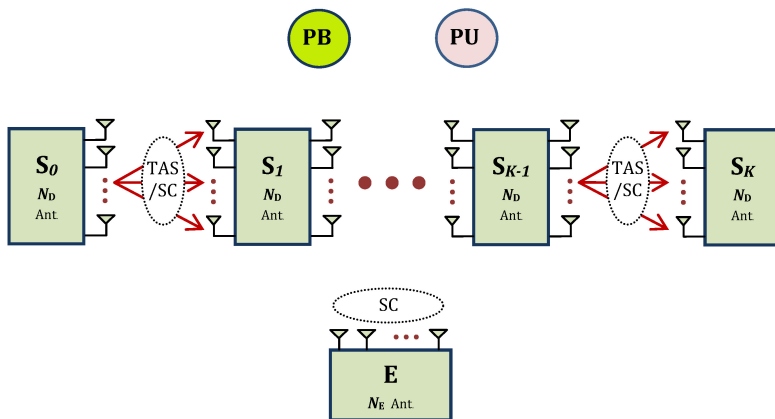
# CHƯƠNG 4 MẠNG ĐA CHẶNG THỨ CẤP GỒM CÁC TRẠM THU PHÁT ĐƯỢC TRANG BỊ NHIỀU ANTEN VÀ THU HOẠCH NĂNG LƯỢNG VÔ TUYẾN

## 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 khả quan. 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 đề xuất

Mạng MUCRN có các trạm thứ cấp được trang bị  $N_D$  anten, phân tập TAS/SC như Chương 3, thực hiện truyền tin lần lượt từ  $S_0$  đến  $S_K$  theo giao thức HD. Ngoài ra, các trạm trên còn thu hoạch năng lượng vô tuyến từ trạm phát năng lượng PB (Power Beacon). Trạm nghe lén được trang bị  $N_E$  anten và phân tập thu SC để nghe lén thông tin trong mạng thứ cấp.



Hình 4.1: Mô hình mạng đa chặng kết hợp thu hoạch năng lượng vô tuyến.

### 4.3 Phân tích hiệu năng

#### 4.3.1 Công suất trung bình của trạm thứ cấp

$$\mathcal{E} P_{k,b} = \sum_{v=1}^{W-1} \left( F_{Z_k^{\min}} \left( \frac{v+1}{W} \right) - F_{Z_k^{\min}} \left( \frac{v}{W} \right) \right) \frac{v}{W} P_S + 1 - F_{Z_k^{\min}} \quad 1 \quad P_S. \quad (4.15)$$

#### 4.3.2 Xác suất dừng bảo mật

$$\dagger \omega_0 < 0: \text{SOP}_k Q_v = 1.$$

$$\dagger \omega_0 > 0 \& \omega_{3,v} > 0: \text{SOP}_k Q_v = 1 + \sum_{n=1}^{N_D^2} \sum_{m=0}^{N_E-1} -1^{n+m} \beta_0 \int_0^{\omega_0} \exp \beta_1 y \exp \left( -\frac{\beta_2}{y} \right) dy. \quad (4.22)$$

$$P_S / N_0 \rightarrow +\infty: \text{SOP}_k Q_v \approx 1 - \left( 1 - \exp \left( -\lambda_{S_k E} \frac{\omega_0}{\omega_{3,v}} \right) \right)^{N_E}. \quad (4.24)$$

$$\dagger \omega_0 > 0 \& \omega_{3,v} < 0: \text{SOP}_k Q_v = 1 + \sum_{n=1}^{N_D^2} \sum_{m=0}^{N_E-1} -1^{n+m+1} \beta_0 \int_{\omega_0}^{+\infty} \exp \beta_1 y \exp \left( -\frac{\beta_2}{y} \right) dy. \quad (4.25)$$

$$P_S / N_0 \rightarrow +\infty: \text{SOP}_k Q_v \approx \left( 1 - \exp \left( -\lambda_{S_k S_{k+1}} \frac{\omega_2}{\omega_{3,v}} \right) \right)^{N_D^2}. \quad (4.26)$$

$$\dagger \omega_0 > 0 \& \omega_{3,v} = 0: \text{SOP}_k Q_v = 1 + \sum_{n=1}^{N_D^2} \sum_{m=0}^{N_E-1} -1^{n+m} \frac{C_{N_D^2}^n C_{N_E-1}^m N_E \lambda_{S_k E}}{m+1 \lambda_{S_k E} + n \lambda_{S_k S_{k+1}} \frac{\omega_2}{\omega_0}} \exp \left( -n \lambda_{S_k S_{k+1}} \frac{\omega_{1,v}}{\omega_0} \right). \quad (4.27)$$

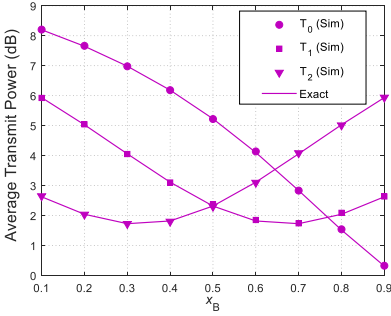
$$P_S / N_0 \rightarrow +\infty: \text{SOP}_k Q_v \approx 1 + \sum_{n=1}^{N_D^2} \sum_{m=0}^{N_E-1} \frac{-1^{n+m} C_{N_D^2}^n C_{N_E-1}^m N_E \lambda_{S_k E}}{m+1 \lambda_{S_k E} + n \lambda_{S_k S_{k+1}} \frac{\omega_2}{\omega_0}}. \quad (4.28)$$

#### 4.3.3 Xác suất dung lượng bảo mật khác không

$$\text{PNSC}_k = \sum_{v=1}^W \Pr(P_{k,b} = Q_v) \times \begin{cases} \sum_{n=1}^{N_D^2} \sum_{m=0}^{N_E-1} (-1)^{n+m+1} \mu_0 \int_0^1 \exp(\mu_1 y) \exp \left( -\frac{\mu_2}{y} \right) dy, & \kappa_D^2 > \kappa_E^2 \\ \sum_{n=1}^{N_D^2} \sum_{m=0}^{N_E-1} (-1)^{n+m+1} \mu_0 \int_1^{+\infty} \exp(\mu_1 y) \exp \left( -\frac{\mu_2}{y} \right) dy, & \kappa_D^2 < \kappa_E^2 \\ \sum_{n=1}^{N_D^2} \sum_{m=0}^{N_E-1} (-1)^{n+m} C_{N_D^2}^n C_{N_E-1}^m \frac{N_E \lambda_{S_k E}}{(m+1) \lambda_{S_k E} + n \lambda_{S_k S_{k+1}}}, & \kappa_D^2 = \kappa_E^2. \end{cases} \quad (4.30)$$

## 4.4 Các kết quả đạt được

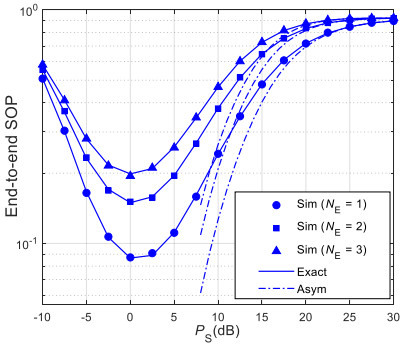
### 4.4.1 Các yếu tố ảnh hưởng đến công suất phát trung bình



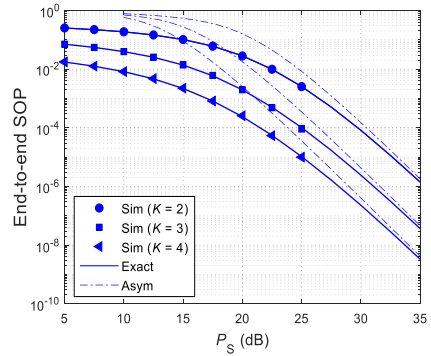
Hình 4.3: Công suất phát trung bình của trạm thứ cấp theo vị trí PB, PU.

Công suất trung bình của trạm thứ cấp phụ thuộc vào công suất tối đa danh định của trạm phát đó và vị trí tương quan của chúng với trạm phát năng lượng (PB) hay trạm thu sơ cấp (PU).

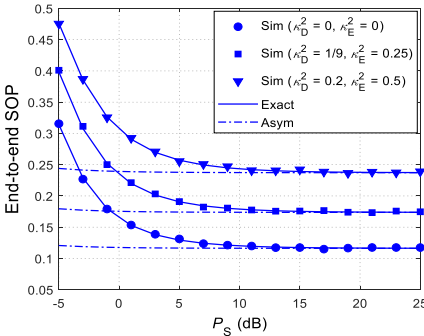
### 4.4.2 Các yếu tố ảnh hưởng đến xác suất dừng bảo mật



Hình 4.4: SOP khi  $\omega_0 > 0$  &  $\omega_{3,v} > 0$



Hình 4.5: SOP khi  $\omega_0 > 0$  &  $\omega_{3,v} < 0$

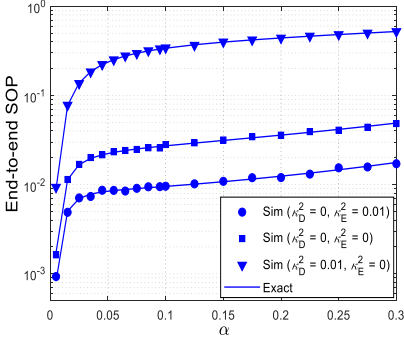


Hình 4.6: SOP khi  $\omega_0 > 0$  &  $\omega_{3,v} = 0$

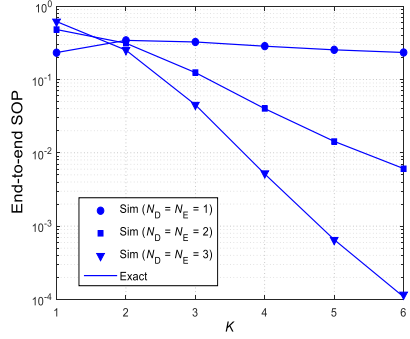
Các Hình 4.4, Hình 4.5 và Hình 4.6 vẽ với các thông số  $\kappa_D^2, \kappa_E^2$  khác nhau kiểm chứng tính đúng đắn của SOP trong mục 4.3.

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  $\alpha$ . Vì vậy, đề xuất thiết kế hệ số  $\alpha$  trong vùng giá trị thấp sẽ có hiệu năng bảo mật tốt hơn. Ngoài ra, mức

khuyết phần cứng của kênh chính  $\kappa_D^2$  nhỏ hơn kênh nghe lén  $\kappa_E^2$  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.

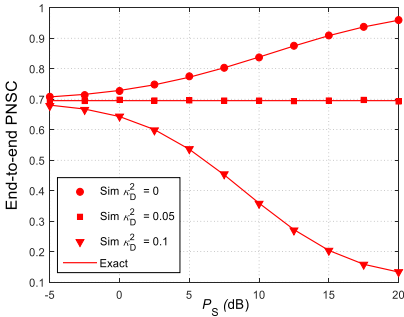


Hình 4.7: Ảnh hưởng của  $\alpha$  lên SOP

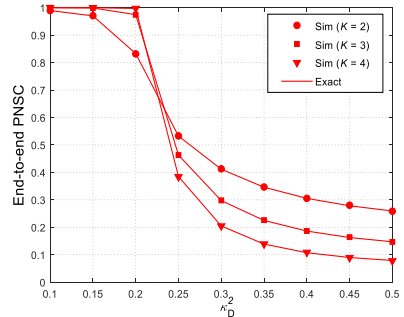


Hình 4.8: SOP theo  $K$  và số anten.

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



Hình 4.9: PNSC theo công suất phát



Hình 4.10: PNSC theo  $K$  và số anten

Hình 4.9 vẽ đặc tuyến PNSC theo công suất  $P_S$  với tương quan mức khuyết phần cứng  $\kappa_D^2, \kappa_E^2$  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  $\kappa_D^2$  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  $\kappa_D^2$  thấp. Đặc biệt, nếu HI ở tuyến chính thấp hơn tuyến nghe lén  $\kappa_E^2$  thì hiệu năng cải thiện hơn trong cả SOP và PNSC.

SOP khi  $P_S$  lớn hơn 20 (dB) sẽ gần về đặc tính tiệm cận. Trong miền nhỏ hơn, có thể tìm được công suất phát tối ưu để SOP thấp nhất trong từng trường hợp cụ thể.

SOP tăng khi trạm nghe lén tăng số lượng anten  $N_E$  trong khi các trạm thu phát chính giữ nguyên số lượng anten  $N_D$ . Ở chiều ngược lại, SOP sẽ thấp nếu trạm thứ cấp được trang bị nhiều anten ( $N_D$  lớn) cho dù trạm nghe lén cũng được trang bị giống như vậy ( $N_D = N_E$ ). Ngoài ra, thiết kế  $K$  lớn nâng cao hiệu năng nhờ kéo giảm SOP trong trường hợp  $N_D = N_E$ .

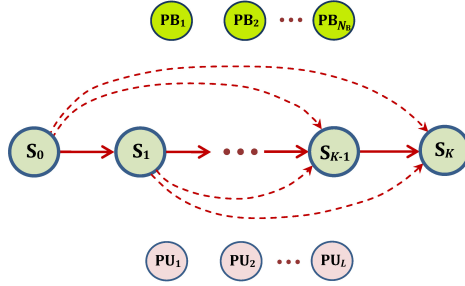
SOP giảm nhanh khi  $\alpha$  thấp, tuy nhiên nghiên cứu chưa tìm được mức tối ưu  $\alpha^*$ . Việc tìm kiếm giá trị tối ưu này nằm ở phần sau của luận án.

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

### 5.1 Giới thiệu

Trong hai chương trước, luận án đã sử dụng giao thức các trạm trung gian bắt buộc chuyển tiếp thông tin theo thứ tự sắp xếp lần lượt từ nguồn đến đích (thông tin sẽ bắt buộc đi qua tất cả các trạm trung gian 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 nâng cao hơn thay vì phải đi qua hết tất cả các trạm trung gian. Trong chương này, luận án đề xuất nghiên cứu giao thức cộng tác truyền tin mới giữa các trạm thu phát chính trên tuyến thông tin mạng 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  $\alpha^*$  của kỹ thuật SWIPT trong cả trường hợp truyền tin tuần tự thông thường (DIRECT) và truyền tin cộng tác (COOP).

## 5.2 Mô hình đề xuất



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 trước. Điểm khác biệt là thông tin từ  $S_k$  phát đến  $S_{k+1}$  có thể được nhận và chuyển tiếp bởi  $S_{k+i}$  ( $i > k$ ) thay vì mặc định là  $S_{k+1}$ . 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 trạm phát thứ cấp

Công suất được rút ra trong công thức (5.10) và (5.12) của toàn văn luận án.

### 5.3.2 Truyền thông điểm – điểm $S_i \rightarrow S_r$

$$\begin{aligned} \text{OP}_{S_i, S_r} = & 1 - \sum_{p=0}^{N_B-1} \frac{2}{p!} (\lambda_{\text{PBS}_i} \lambda_{S_i, S_r} \omega)^{\frac{p+1}{2}} K_{1-p} \left( 2\sqrt{\lambda_{\text{PBS}_i} \lambda_{S_i, S_r} \omega} \right) \\ & + \sum_{p=0}^{N_B-1} \sum_{q=1}^L \frac{(-1)^{q+1} 2C_L^q}{p!} (\lambda_{\text{PBS}_i} \omega)^{\frac{p+1}{2}} \lambda_{S_i, S_r}^{\frac{p-1}{2}} (\mu_1)^{\frac{p-1}{2}} K_{1-p} \left( 2\sqrt{\lambda_{\text{PBS}_i} \omega \mu_1} \right), \end{aligned} \quad (5.17)$$

### 5.3.3 Truyền thông điểm – đa điểm

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

$$\begin{aligned} \text{OP}_{S_r \{ \mathbf{H}, \mathbf{G} \}} = & \sum_{p=0}^{N_B-1} \frac{2}{p!} (\lambda_{\text{PBS}_i} \mu_2)^{\frac{p+1}{2}} K_{p-1} \left( 2\sqrt{\lambda_{\text{PBS}_i} \mu_2} \right) - \sum_{p=0}^{N_B-1} \sum_{q=1}^L \frac{(-1)^{q+1} 2C_L^q}{p!} (\lambda_{\text{PBS}_i})^{\frac{p+1}{2}} \mu_2^{\frac{p-1}{2}} (\mu_5)^{\frac{p-1}{2}} K_{p-1} \left( 2\sqrt{\lambda_{\text{PBS}_i} \mu_5} \right) \\ & - \sum_{p=0}^{N_B-1} \sum_{r=1}^m \sum_{\substack{l_1=l_2=\dots=l_r=1, \\ l_1 < l_2 < \dots < l_r}} \frac{(-1)^{r+1}}{p!} 2 (\lambda_{\text{PBS}_i} \mu_4)^{\frac{p+1}{2}} K_{p-1} \left( 2\sqrt{\lambda_{\text{PBS}_i} \mu_4} \right) \\ & + \sum_{p=0}^{N_B-1} \sum_{q=1}^L \sum_{r=1}^m \sum_{\substack{l_1=l_2=\dots=l_r=1, \\ l_1 < l_2 < \dots < l_r}} \frac{(-1)^{r+q} 2C_L^q}{p!} (\lambda_{\text{PBS}_i})^{\frac{p+1}{2}} \mu_4^{\frac{p-1}{2}} (\mu_6)^{\frac{p-1}{2}} K_{p-1} \left( 2\sqrt{\lambda_{\text{PBS}_i} \mu_6} \right) \end{aligned}$$

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



$$\begin{aligned} \text{OP}_{S_i\{\emptyset, G_i\}} &= 1 - \sum_{p=0}^{N_B-1} \sum_{r=1}^m \sum_{\substack{l_1=l_2=\dots=l_r=1, \\ l_1 < l_2 < \dots < l_r}}^m \frac{(-1)^{r+1}}{p!} 2(\lambda_{\text{PBS}_i} \mu_3)^{\frac{p+1}{2}} \cdot K_{p-1}(2\sqrt{\lambda_{\text{PBS}_i} \mu_3}) \\ &+ \sum_{p=0}^{N_B-1} \sum_{q=1}^L \sum_{r=1}^m \sum_{\substack{l_1=l_2=\dots=l_r=1, \\ l_1 < l_2 < \dots < l_r}}^m \frac{(-1)^{r+q}}{p!} 2C_L^q (\lambda_{\text{PBS}_i})^{\frac{p+1}{2}} \mu_3 (\mu_7)^{\frac{p-1}{2}} K_{p-1}(2\sqrt{\lambda_{\text{PBS}_i} \mu_7}), \end{aligned}$$

### 5.3.4 Truyền thông từ nguồn đến đích

Giao thức truyền thông tuần tự qua từng chặng DIRECT:

$$\text{OP}^{\text{DIRECT}} = 1 - \prod_{k=1}^K \left[ \begin{aligned} &\sum_{p=0}^{N_B-1} \frac{2}{p!} (\lambda_{\text{PBS}_{k-1}} \lambda_{S_{k-1}S_k} \omega)^{\frac{p+1}{2}} K_{1-p}(2\sqrt{\lambda_{\text{PBS}_{k-1}} \lambda_{S_{k-1}S_k} \omega}) \\ &- \sum_{p=0}^{N_B-1} \sum_{q=1}^L \frac{(-1)^{q+1}}{p!} 2C_K^q (\lambda_{\text{PBS}_{k-1}} \omega)^{\frac{p+1}{2}} \lambda_{S_{k-1}S_k} (\mu_1)^{\frac{p-1}{2}} K_{1-p}(2\sqrt{\lambda_{\text{PBS}_{k-1}} \omega \mu_1}) \end{aligned} \right]$$

Giao thức truyền thông cộng tác COOP:

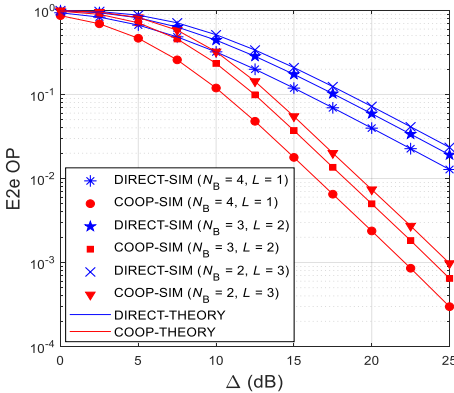
$$\text{OP}^{\text{COOP}} = \sum_{\mathbf{H}_1, \mathbf{G}_1} \text{OP}_{S_0\{\mathbf{H}_1, \mathbf{G}_1\}}^{\text{COOP}}$$

Số chặng giới hạn tối đa từ nguồn đến đích:

$$K_{\max} = \left\lceil (1 - \alpha) \mathcal{N} \log_2(1 + 1/\kappa_D^2) / R_{\text{th}} \right\rceil.$$

## 5.4 Những kết quả đạt được

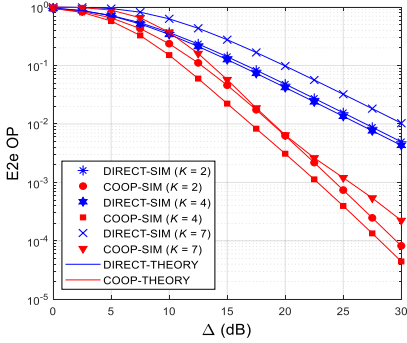
### 5.4.1 Ảnh hưởng của số lượng trạm phát năng lượng và số trạm sơ cấp



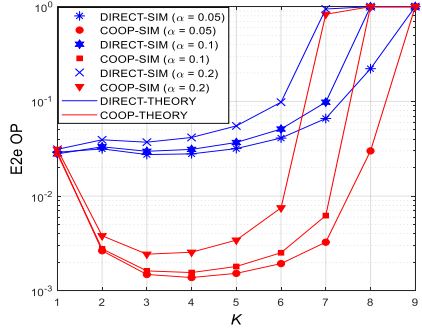
Hình 5.4: Ảnh hưởng của  $N_B$  và  $L$ .

Trong các giá trị  $N_B$  và  $L$  đã vẽ, xác suất dừng OP của COOP luôn thấp hơn của DIRECT, đặc biệt là ở vùng  $\Delta$  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



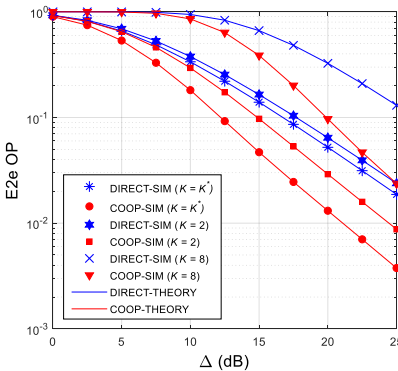
Hình 5.5:  $OP^{\text{DIRECT}}$  và  $OP^{\text{COOP}}$  với các giá trị  $K$  khác nhau



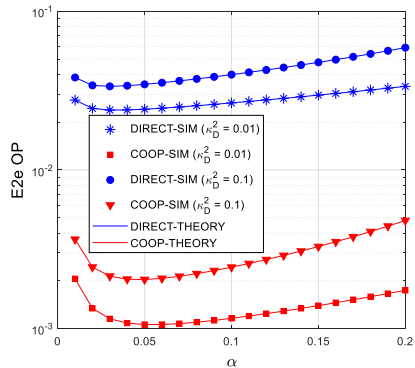
Hình 5.6: Ảnh hưởng của  $K, \alpha$  lên đặc tuyến OP.

Hình 5.5 cho giá trị tốt nhất của OP đạt được với  $K = 4$  trong cả hai giao thức DIRECT và COOP. Nghĩa là khi  $K = 4$  thì hiệu năng mạng 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  $\alpha$  và khác nhau giữa hai giao thức. Hơn nữa, khi  $K \geq K_{\max}$  thì  $OP = 1$ .

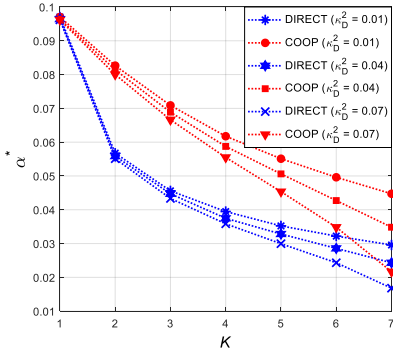
### 5.4.3 Ảnh hưởng của hệ số phân chia thời gian thu hoạch năng lượng



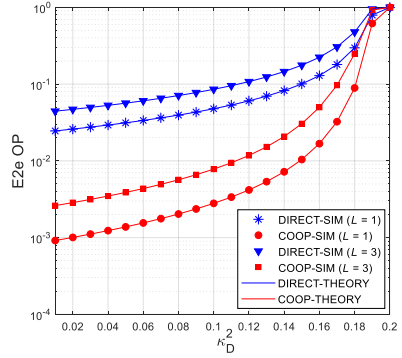
Hình 5.7: OP về khi  $\alpha = 0.05$  và so sánh  $K^*$  với  $K = 2, K = 8$ .



Hình 5.8: Ảnh hưởng của  $\alpha$  lên OP



Hình 5.9: Vẽ giá trị  $\alpha^*$  theo  $K$ .



Hình 5.10: Ảnh hưởng  $\kappa_D^2$  lên OP.

Hình 5.7 cho thấy ưu điểm vượt trội của OP khi chọn số chặng thiết kế tối ưu  $K^*$  so với các giá trị  $K$  không tối ưu với cùng một hệ số thời gian thu hoạch năng lượng  $\alpha = 0.05$ . Do đó, đề xuất cần tối ưu  $K$  khi không thể thay đổi  $\alpha$ . Ngược lại, Hình 5.9 đưa ra các giá trị tối ưu về hệ số thời gian  $\alpha^*$  tùy theo số chặng  $K$ . Dựa vào số liệu trên, chúng ta có thể tối ưu hệ số  $\alpha$  khi số chặng  $K$  trong mạng không thay đổi. 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<sup>COOP</sup> nhỏ hơn OP<sup>DIRECT</sup>. Độ lợi phân tập của giao thức COOP cao hơn DIRECT. Ngoài ra, khi số trạm phát năng lượng  $N_B$  lớn thì OP cải thiện. Ngược lại, khi số trạm sơ cấp nhiều ( $L$  lớn) thì OP giảm trong cả COOP và DIRECT.

Với một giá trị  $\alpha$ , 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  $\alpha^*$  có xu hướng thấp hơn khi  $K$  lớn hơn dù giao thức DIRECT hay COOP. Tuy nhiên giá trị  $\alpha^*$  trong COOP luôn cao hơn DIRECT trong cùng điều kiện khảo sát.

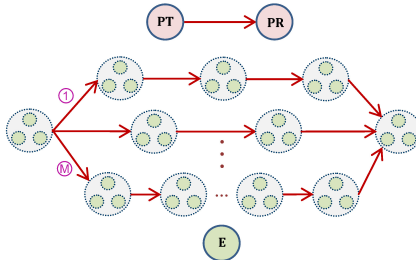
Ngoài ra, mức khiếm khuyết phần cứng (HI) ít ảnh hưởng đến giá trị  $\alpha^*$  nhưng HI thấp sẽ cải thiện hiệu năng tốt hơn. Nếu HI vượt quá giá trị giới hạn  $\kappa_{D,\max}^2$  hay  $K \geq K_{\max}$  thì OP = 1.

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

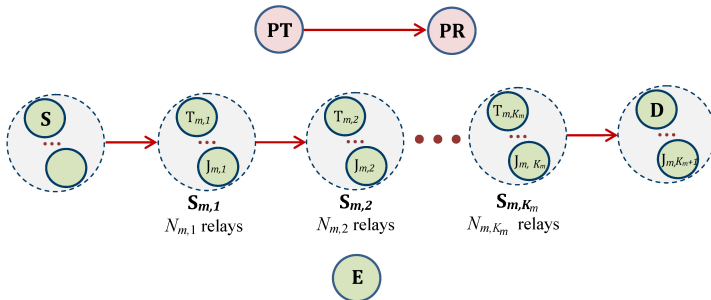
## 6.1 Giới thiệu

Trong cấu trúc mạng vô tuyến MANETs, 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 MUCRN trong mạng lưới có thể thực hiện chuyển thông tin từ nguồn đến đích. Ngoài giải pháp đi tắt qua các trạm thu phát trong cùng một tuyến MUCRN cố định đã nghiên cứu ở chương 5, vấn đề cần nghiên cứu là có thể chọn được một tuyến đa chặng phù hợp nhất trong  $M$  tuyến MUCRN sẵn sàng 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 của mạng lưới. Nội dung Chương 6 được trình bày sau đây đề cập đến ba giao thức chọn đường đi là BEST, MAXV, RAND trong mạng lưới gồm nhiều tuyến MUCRN đồng thời so sánh ưu nhược điểm của ba giao thức trên.

## 6.2 Mô hình đề xuất



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 dùng mạng sơ cấp

$$OP_m = 1 - \exp\left(-\frac{(K_m+1)\lambda_{PTPR}\sigma_P}{P_P}\right) \prod_{k=1}^{K_m+1} \left(\frac{\lambda_{T_{m,k-1}PR}P_P}{\lambda_{T_{m,k-1}PR}P_P + \lambda_{PTPR}P_{T_{m,k-1}}\sigma_P} \frac{\lambda_{J_{m,k}PR}P_P}{\lambda_{J_{m,k}PR}P_P + \lambda_{PTPR}P_{J_{m,k}}\sigma_P}\right) \quad (6.10)$$

#### 6.3.2 Cấp phát công suất trong mạng thứ cấp

$$Q_{m,k} = \frac{\lambda_{T_{m,k}PR}P_P}{\lambda_{PTPR}\sigma_P} \left[ \left( (1 - \varepsilon_{OP}) \exp\left(\frac{(K_m+1)\lambda_{PTPR}\sigma_P}{P_P}\right) \right)^{-\frac{1}{2(K_m+1)}} - 1 \right]^+ \quad (6.14)$$

#### 6.3.3 Xác suất dung lượng bảo mật khác không của MUCRN thứ $m$

$$PNSC_m = \prod_{k=1}^{K_m+1} \left[ \sum_{v=1}^{N_{m,k}} (-1)^{v+1} C_{N_{m,k}}^v \mu_{0,k,v} \nabla_k (I_{1,k,v} - I_{2,k,v} + I_{3,k,v} - I_{4,k,v}) \right] \quad (6.16 - 6.18)$$

#### 6.3.4 Các giao thức chọn mạng MUCRN

Giao thức BEST:  $PNSC_{BEST} = 1 - \prod_{m=1}^M (1 - PNSC_m)$ .

Giao thức MAXV:

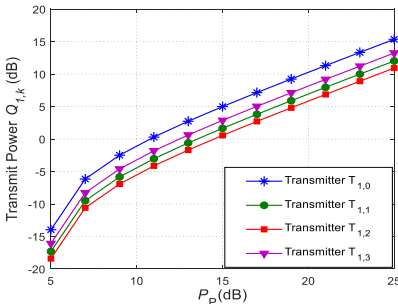
$$PNSC_{MAXV} = \max_{m=1,2,\dots,M} (PNSC_m)$$

Giao thức RAND:

$$PNSC_{RAND} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M PNSC_m$$

### 6.4 Các kết quả đạt được

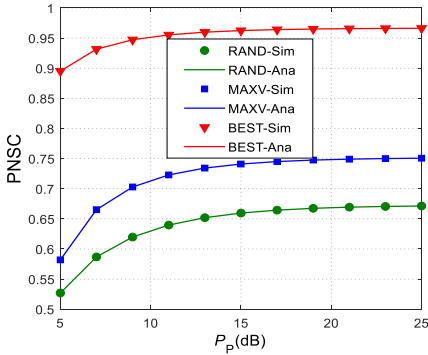
#### 6.4.1 Ảnh hưởng công suất phát sơ cấp đến mức hạn chế công suất thứ cấp



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

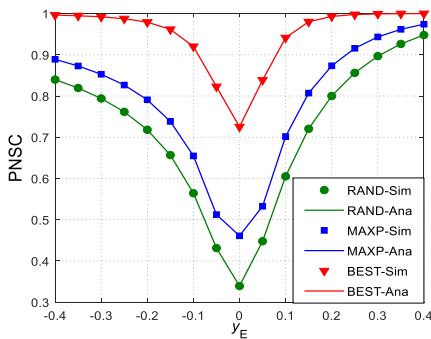
### 6.4.2 Ảnh hưởng của công suất phát trạm sơ cấp lên PNSC của mạng thứ cấp



Hình 6.4: Ảnh hưởng  $P_p$  lên PNSC trong ba giao thức.

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



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

PNSC thấp nhất 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 hơn 20 (dB) nhưng gần như không thay đổi khi ở vùng giá trị lớn hơn.

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 mạng trong luận án đều là các mạng vô tuyến đa chặng bị hạn chế công suất phát. Trong mô hình thứ nhất (từ chương 3), nghiên cứu cho thấy trong trường hợp khi trạm thu phát sơ cấp và trạm thu phát thứ cấp có xảy ra can nhiễu lẫn 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 hơn 20 (dB). Khi công suất lớn hơn giá trị này, hiệu năng mạng đa chặng hầu như giữ nguyên. Điều này cũng được khẳng định lại ở kết luận Chương 6. Trong trường hợp các trạm đa chặng thứ cấp không được cấp nguồn và đặt cách xa trạm phát sơ cấp, luận án đề xuất sử dụng kỹ thuật thu hoạch năng lượng vô tuyến tạo công suất phát tại mỗi trạm. Kết quả nghiên cứu (từ Chương 4 và 5) kết luận rằng công suất trạm thứ cấp phụ thuộc nhiều vào số lượng trạm thu sơ cấp (PU), trạm phát năng lượng (PB) cùng với vị trí tương quan của chính trạm phát đó so với trạm PU hay PB. Từ đó, luận án kết luận việc hạn chế công suất phát để thực hiện truyền thông trong mạng đa chặng là hoàn toàn khả thi và tin cậy, góp phần nâng cao hiệu suất sử dụng phổ tần số, kể cả trong trường hợp không được cấp năng lượng từ nguồn điện trực tiếp.

Để nghiên cứu về hiệu năng truyền thông của mạng vô tuyến đa chặng MUCRN, luận án quan tâm đến thông số hiệu năng xác suất dừng từ nguồn đến đích (OP) và đưa ra nhiều giải pháp để nâng cao hiệu năng mạng. Giải pháp thứ nhất là xây dựng mạng đa chặng có các trạm thu phát liền kề nằm trong tầm nhìn thẳng LOS. Nghiên cứu (trong Chương 3) cho thấy xác suất dừng OP của mạng có tầm nhìn thẳng thấp hơn hẳn so với trường hợp ngược lại (NLOS). Sự chênh lệch về OP phụ thuộc vào hệ số  $K$ -factor của kênh truyền Rician. Mức độ cải thiện hiệu năng càng lớn khi thiết kế giá trị Rician  $K$ -factor của kênh truyền chính càng lớn. Cụ thể như  $K_D = 10$  có  $OP = 0.17$ , so sánh với  $K_D = 0$  có  $OP = 0.6$ . Giải pháp 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 OP của mạng đa chặng thứ cấp nếu số lượng anten được trang bị nhiều. 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. Giải pháp thứ ba (trình bày trong Chương 5) là dùng kỹ thuật truyền thông cộng tác để nâng cao hiệu năng mạng.

Cụ thể, trong giao thức truyền thông cộng tác COOP được đề xuất, thông tin có thể đi tắt để về trạm đích sớm hơn. Kết quả nghiên cứu đã cho thấy độ lợi phân tập của giao thức truyền thông cộng tác COOP được đề xuất vượt trội hơn so với giao thức truyền tuần tự thông thường DIRECT, góp phần chứng minh được hiệu quả của đề xuất trong việc nâng cao hiệu năng truyền thông. Dựa vào kết quả thu được, luận án đề xuất thiết kế số chặng tối ưu trong mạng MUCRN để 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 bằng phương pháp bảo mật lớp vật lý, luận án đã tập trung đánh giá và đưa ra nhiều đề xuất để cải thiện hiệu năng bảo mật. Đa số các giải pháp cải thiện OP đều dẫn đến tăng xác suất nghe lén thông tin (IP) trong mạng đa chặng. Do đó, đề xuất đầu tiên là cần cân bằng giữa yếu tố truyền thông và yếu tố bảo mật trong thiết kế mạng đa chặng. Kết quả trong Chương 3 cho thấy một giải pháp khác không cần đánh đổi OP nhưng vẫn giảm được một phần IP. Đó là thiết kế mạng có giá trị Rician  $K$ -factor thấp ở các kênh nghe lén (IP giảm lớn nhất 6% khi  $K_E$  từ 15 xuống 0). Giải pháp tiếp theo là sử dụng kỹ thuật đa anten với phân tập TAS/SC ngay trong mạng đa chặng (trình bày trong chương 4). Qua nghiên cứu, luận án đề xuất trang bị số lượng anten nhiều hơn để giảm xác suất dừng bảo mật SOP. Ngoài ra, giải pháp trên sẽ tăng hiệu quả hơn nữa nếu kết hợp với tăng số chặng trong mạng mục tiêu, ngay cả khi trạm nghe lén cũng được tăng số anten bằng trạm chính. Xét về thông số hiệu năng xác suất dung lượng bảo mật khác không (PNSC), luận án đề xuất sử dụng công nghệ có mức khiếm khuyết phần cứng (HI) thấp trong mạng đa chặng để tăng PNSC. Cụ thể hơn, HI trong trạm thu phát đa chặng luôn thấp hơn trạm nghe lén. Giải pháp thứ ba nhằm nâng cao hiệu năng bảo mật là dựa vào PNSC để chọn tuyến thông tin đa chặng (trình bày trong Chương 6). Luận án nghiên cứu và so sánh ba giao thức đề xuất là BEST, MAXV, RAND phù hợp các tình trạng mạng khác nhau. Giao thức BEST đạt hiệu năng bảo mật cao nhất, giao thức MAXV đạt thứ hai, trong khi giao thức RAND thấp nhất. Tuy nhiên, giao thức BEST đòi hỏi mức tính toán, ước lượng CSI đầy đủ, vốn không thích hợp với các trạm có năng lực xử lý thấp. Ngoài ra, hiệu năng bảo mật phụ thuộc rất lớn vào vị trí trạm nghe lén, vì vậy luận án đề xuất giải pháp thứ tư là khi thiết kế mạng mới hay thực hiện định tuyến trong mạng đa chặng cần có kịch bản 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.

Cuối cùng, luận án 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 cập trước đó, việc tăng số lượng anten trong trạm thu phát chính sẽ tăng năng lượng thu hoạch được, góp phần tăng công suất phát ở mạng thứ cấp, giảm được SOP (trình bày ở Chương 4). Vì vậy, luận án đề xuất thiết kế hệ số thời gian thu hoạch ( $\alpha$ ) nhỏ để dành nhiều thời gian truyền tin, cải thiện hiệu năng mạng đa chặng đa anten. Đối với mạng đa chặng đơn anten (trình bày trong Chương 5), kết quả nghiên cứu cho thấy có tồn tại giá trị  $\alpha$  tối ưu ( $\alpha^*$ ) để hiệu năng tốt nhất, phù hợp với kết quả những công trình trước đây về dual-hop [44, 79] hay multi-hop [138]. Đặc biệt hơn, luận án đã đưa ra được mối liên hệ của  $\alpha^*$  với các thông số thiết kế mạng khác như số chặng  $K$  hay giao thức truyền tin được dùng trong mạng. Giải pháp tối ưu hiệu năng mạng được đưa ra là trong trường hợp mạng sử dụng một giao thức có giá trị  $\alpha$  không thể thay đổi, luận án đề xuất thiết kế tối ưu số chặng  $K = K^*$ . Ngược lại, khi mạng có sẵn và không thể thay đổi số chặng  $K$ , luận án đề xuất sử dụng hệ số thời gian thu hoạch  $\alpha = \alpha^*$  tùy theo  $K$  để tăng hiệu năng.

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 hoạt động hiệu quả, nghiên cứu đã chứng minh được giải pháp nguồn thay thế từ sóng vô tuyến để truyền tin. Hơn nữa, luận án đã đưa ra nhiều đề xuất có giá trị 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.

--- o0o ---

# DANH MỤC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ

1. **P. M. Nam**, T. T. Duy, P. V. Ca, P. N. Son, and N. H. An, "Outage Performance of Power Beacon-Aided Multi-Hop Cooperative Cognitive Radio Protocol Under Constraint of Interference and Hardware Noises," *Electronics*, vol. 9, no. 6, p. 1054, 2020. (SCIE – IF 2.42)
2. **P. M. Nam**, T. T. Duy, and P. V. Ca, "End-to-end security-reliability analysis of multi-hop cognitive relaying protocol with TAS/SC-based primary communication, total interference constraint and asymmetric fading channels," *International Journal of Communication Systems*, vol. 32, no. 2, pp. 1-16, 2019 (SCIE – IF 1.278).
3. **M. N. Pham**, "On the secrecy outage probability and performance trade-off of the multi-hop cognitive relay networks," *Telecommunication Systems*, vol. 73, no. 3, pp. 349-358, 2020. (SCIE – IF 1.99)
4. **P. M. Nam**, D.-T. Do, N. T. Tung, and P. T. Tin, "Energy harvesting assisted cognitive radio: random location-based transceivers scheme and performance analysis," *Telecommunication Systems*, vol. 65, no. 1, pp. 123-132, 2018. (SCIE – IF 1.99)
5. **P. M. Nam**, T. T. Duy, and P. V. Ca, "Performance of Cluster-based Cognitive Multihop Networks under Joint Impact of Hardware Noises and Non-identical Primary Co-channel Interference," *TELKOMNIKA Telecommunication, Computing, Electronics and Control*, vol. 17, no. 1, 2019 (SCOPUS).
6. P. T. Tin, **P. M. Nam**, T. T. Duy, P. T. Tran, and M. Voznak, "Secrecy Performance of TAS/SC-Based Multi-Hop Harvest-to-Transmit Cognitive WSNs Under Joint Constraint of Interference and Hardware Imperfection," *Sensors*, vol. 19, no. 5, p. 1160, 2019 (SCIE – IF 3.031)
7. N. T. Tung, **P. M. Nam**, and P. T. Tin, "Performance evaluation of two-way with energy harvesting and hardware noises," *Digital Communications and Networks*, 2020. (SCIE – IF 3.41)
8. T. T. Nguyen, **N. M. Pham**, and D. T. Do, "Wireless powered underlay cognitive radio network with multiple primary transceivers: Energy constraint, node arrangement, and performance analysis," *International Journal of Communication Systems*, vol. 30, no. 18, pp. 1-11, 2017. (SCIE – IF 1.278)
9. P. T. Tin, **P. M. Nam**, T. T. Duy, and M. Voznak, "Security-Reliability Analysis for a Cognitive Multi-hop Protocol in Cluster Networks with Hardware Imperfections," *IEIE Transactions on Smart Processing & Computing*, vol. 6, no. 3, pp. 200-209, 2017 2017.
10. **P. M. Nam** and P. T. Tin, "Analysis of Security-Reliability Trade-off for Multi-hop Cognitive Relaying Protocol with TAS/SC Technique," *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, vol. 5, no. 5, pp. 54-62, 2020.
11. **P. M. Nam**, P. V. Ca, T. T. Duy, and K. N. Le, "Secrecy Performance Enhancement Using Path Selection over Cluster-Based Cognitive Radio Networks," in *INISCOM2019, Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*, Springer, vol. 293, pp. 65-80, 2019 (SCOPUS).
12. **P. M. Nam**, P. V. Ca, P. V. Tuan, T. T. Duy, and V. N. Q. Bao, "Security versus Reliability Study for Multi-hop Cognitive M2M Networks With Joint Impact of Interference Constraint and Hardware Noises," presented at the *International Conference on Advanced Technologies for Communications*, Ho Chi Minh, 2018 (IEEE Indexed).
13. P. T. Tin, **P. M. Nam**, T. T. Duy, T. T. Phuong, and M. Voznak, "Throughput Analysis of Power Beacon-Aided Multi-hop Relaying Networks Employing Non-Orthogonal Multiple Access With Hardware Impairments," presented at the *AETA2018, part of the Lecture Notes in Electrical Engineering book series Ostrava-Poruba, Czech Republic* 2018.
14. N. X. Tuyền, **P. M. Nam**, T. T. Duy, and P. V. Ca, "Phân tích hiệu năng mạng chuyển tiếp đa chặng sử dụng NOMA dưới sự ảnh hưởng của giao thoa đồng kênh và khiếm khuyết phần cứng," in *Hội thảo Quốc gia lần thứ XXII về điện tử, Truyền thông và Công nghệ Thông tin (REV-ECIT 2019)*, Hanoi, Vietnam, 2019, vol. 2, pp. 106-111.

MINISTRY OF EDUCATION AND TRAINING  
HCMC UNIVERSITY OF TECHNOLOGY AND EDUCATION

PHAM MINH NAM

**PERFORMANCE EVALUATION OF MULTI-HOP WIRELESS  
RELAYING NETWORKS UNDER THE IMPACT OF LIMITED  
TRANSMIT POWER**

Major: Electronic Engineering

Major code: 9520203

SUMMARY OF PH.D. THESIS

HO CHI MINH CITY – 2021

This thesis was completed at HCMC University of Technology and Education

Supervisor one: Dr. Tran Trung Duy

Supervisor two: Associate Prof. Phan Van Ca

Reviewer 1:

Reviewer 2:

Reviewer 3:

The dissertation was presented at the primary committee of at Faculty of Electrical and Electronics Engineering, HCMC University of Technology and Education, on January 23th, 2021.

## PROPOSALS OF DISSERTATION

### Research 1:

My previous works showed that the multi-hop underlay cognitive radio network (MUCRN) is substantially influenced by primary users (PUs). Therefore, the author proposes that PUs should be equipped with multi-antenna for gaining high performance of the multi-hop secondary network. As a result, the secondary users (SUs) can transmit with a higher power in order to enhance their performance. Because of the low complexity of the computation, the thesis proposes exploiting the TAS/SC technique on the multi-antenna PUs. This research was published in the *International Journal of Communication Systems* – *IJCS* journal, recorded in the SCIE list.

P. M. Nam, T. T. Duy, and P. V. Ca, "End-to-end security-reliability analysis of multi-hop cognitive relaying protocol with TAS/SC-based primary communication, total interference constraint and asymmetric fading channels," *International Journal of Communication Systems*, vol. 32, no. 2, pp. 1-16, 2019.

### Research 2:

Simultaneous Wireless Information and Power Transfer (SWIPT) is the new solution to increase the flexibility and adaptability of the communication environment varying. Inherited from the first, the authors continue researching the multi-antenna equipment proposal on the MUCRN, using TAS/SC diversity technique. Furthermore, the multi-antenna technique on SWIPT improves not only the network performance but also the energy accumulation. Both contribute to enhancing a higher MUCRN performance. The authors focus on SOP and PNSC, which were reflected the secure communication. The work was published in *Sensors*, one of the SCIE categories, and the author is a co-author.

P. T. Tin, P. M. Nam, T. T. Duy, P. T. Tran, and M. Voznak, "Secrecy Performance of TAS/SC-Based Multi-Hop Harvest-to-Transmit Cognitive WSNs Under Joint Constraint of Interference and Hardware Imperfection," *Sensors*, vol. 19, no. 5, p. 1160, 2019.

### Research 3:

Practically, the stations in MUCRN are located in the form of mesh. In that case, two neighbor stations with a short geographical distance might have a further logical arrangement (much more hop inline). The study proposes a cooperative protocol installed on in-route stations allowing the nearest receiving station to decode and forward information to the next hop. It leads to reducing the number of hops on the logical arrangement. The SU stations can harvest energy and receive/transmit information in terms of limited transmit power simultaneously to increase flexibility. My study found the optimal time fraction ( $\alpha^*$ ) in the SWIPT technique in both cases: cooperative protocol (COOP) and sequential protocol (DIRECT). My research was published in the SCIE journal list (*Electronics*).

P. M. Nam, T. T. Duy, P. V. Ca, P. N. Son, and N. H. An, "Outage Performance of Power Beacon-Aided Multi-Hop Cooperative Cognitive Radio Protocol Under Constraint of Interference and Hardware Noises," *Electronics*, vol. 9, no. 6, p. 1054, 2020.

### Research 4:

On the three models were investigated above, the system has a unique path (unique MUCRN), which can transfer information from a source to its destination under the constrained transmit power. In the studied situation below, many MUCRNs coexist in a mesh network, and there are some ways to transfer information via several MUCRNs. The research proposes three methods to select the relevant MUCRN: BEST, MAXV, and RAND. Also, the study gives pros and cons among them based on the different CSI requirements. The contribution of this work was presented in the INISCOM2019, an IEEE conference. Afterward, this research is selected to publish in the *Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*.

P. M. Nam, P. V. Ca, T. T. Duy, and K. N. Le, "Secrecy Performance Enhancement Using Path Selection over Cluster-Based Cognitive Radio Networks," in INISCOM2019, Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering, 2019, vol. 293, pp. 65-80: Springer Nature Switzerland AG.

## LIST OF CONTRIBUTIONS

This thesis proposes and researches the new methods to improve the multi-hop underlay cognitive radio networks (MUCRN) under the limitation of transmit power at the secondary stations. Furthermore, the contents concentrate on harvesting energy for transmitting and transferring information in secure communication.

First, the thesis presents a variety of efficient MUCRNs aimed to enhance the performance of the multi-hop secondary network under the limitation of transmit power and the impact of Co-Channel Interference (CCI) from the PUs. Significantly, the researches of the path selection on the station mesh, the multi-antenna diversity on PUs and SUs, the cooperative communication inside the MUCRN, and exploiting energy from radio have been investigated. Furthermore, the thesis also studies the generic models where the primary network employs the transmit/receive diversity technique in order to increase its performance and exploit the primary-licensed band for the secondary network. Besides, the optimal number of hops and antennas are investigated.

Secondly, the wireless device has typically limited the size, shape, and energy consumption. It is why the energy harvesting technique from the radio needs employing to provide enough energy for themselves. This thesis presents the methods to efficiently harvest energy from a power beacon, a part of the secondary network. In network building, this thesis proposes to design the optimal harvesting time for a MUCRN.

Thirdly, information needs to protect in communication. Hence, this thesis concentrates on secure communication by applying physical-layer security in the studied models. Mainly, it presents the studies of confidential performance and the trade-off between transmission efficiency and security of information. In a multi-hop multi-antenna underlay cognitive radio network with the TAS/SC transmit/receive diversity, this document claims that the stations need more antennas to decrease the Secrecy Outage Probability (SOP). Besides, the thesis also proposes to select the best MUCRN based on three reliable BEST, MAXV, and RAND protocols. Moreover, it shows that the cooperative network has a higher performance than a conventional model, where both are equipped with a single antenna at each secondary transceiver.



Finally, the studied MUCRNs were evaluated by precise mathematical expressions and verified by Monte Carlo simulation. Most of the given formulas have a close-form that can efficiently use on the performance evaluation and the system design. Moreover, these prove that designing a MUCRN operating in the limited transmit power is practical and reliable. Proposals in the thesis are possible to apply in real networks that enhance transmission performance and secure performance.

## **INTRODUCTION**

### 1. Wireless network perspective

Recently, humans have been tackling the shortage of radio frequency bands employing wireless communication. Emerging networks such as WSNs, VANETs, and MANET are operated simultaneously on the same coverage as some previous ones. Underlay cognitive radio network (UCRN) is an efficient solution to saving spectrum without requiring a new license band. Furthermore, the varying wireless channel characteristics are a significant obstacle to maintaining a sustainable connection and high efficiency. As a result, the multi-hop underlay cognitive radio networks (MUCRN) is a much more efficient way when compared to direct transmission. Also, the self-powered and transmitting by simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT) technique should encourage to employ that maintain the connection, last the lifetime of these networks in the unpowered places. Besides, physical-layer security (PLS) is dedicated to protecting the information in low computational MUCRNs. My target resolves the issues above and proposes relevant solutions. That is why the “Performance evaluation of multi-hop wireless relaying networks under the impact of limited transmit power” is studied in my thesis.

### 2. Goals:

a) Improve the spectrum efficiency by sharing the spectrum of the primary network (PN) for the multi-hop secondary network.

b) Propose various methods to increase the transmission performance of the MUCRN to ensure its quality of service (QoS).

c) Give novel solutions to enhance the possibility of secure communication in MUCRN by exploiting physical-layer security (PLS), appropriate for low computation of transceivers.

d) Apply the harvesting energy from radiofrequency at each station to increase the variety of power supply, the energy efficiency, last the lifetime of the network, reliable when designing and installing a new MUCRN.

## Chapter 1 OVERVIEW OF THE RESEARCH

This section summarizes many investigations on over one hundred wireless relay network articles published in domestic or international journals. Afterward, goals are built to start research. It is presented from the 10th page to the 27th page in the full thesis.

## Chapter 2 FUNDAMENTAL THEORY

This chapter presents some fundamental theories of the wireless channel, models, transmission protocols, MAC handshaking protocol in a MUCRN. Next, the basis of limited power scheme, hardware imperfection, physical-layer security, and energy harvesting or simultaneous wireless information and power transfer technique is given shortly and clearly. Detailed content is from the 28th to the 40th page of the thesis.

## Chapter 3 RESEARCH OF THE MULTI-HOP UNDERLAY COGNITIVE RADIO NETWORK LOCATED ON THE LINE OF SIGHT

### 3.1 Brief of works

My previous projects [C2, J9] claim that the multi-hop underlay cognitive radio network (MUCRN) performance is considerably subject to primary users. In that situation, the author proposes many antennas equipped at the primary users to enhance its performance. As a result, the performance of MUCRN improves.

### 3.2 Network model

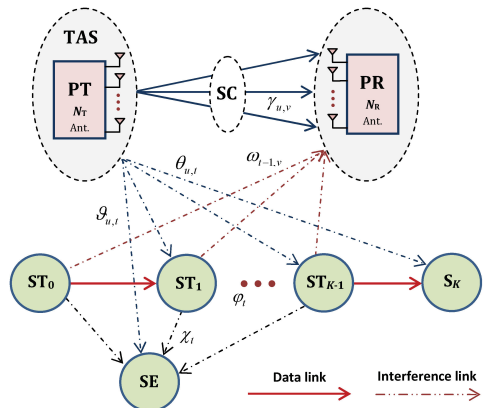


Fig 3.1: Multi-hop underlay cognitive radio network with LOS propagation.

In this study, the primary network equips with many antennas, uses TAS/SC diversity. The MUCRN transfers information from  $S_0$  to  $S_K$  via  $K$  hops belonging to the half-duplex protocol. The vision of a multi-hop station to an adjacent one or the eavesdropper is assumed transparent, or LOS. Conversely, the one from the primary users to the MUCRN is non-LOS.

### 3.3 Performance evaluation

#### 3.3.1 Primary outage probability

$$\text{Opt: } \text{OP}_{\text{PN}} = \left[ 1 - \exp\left(-\lambda_{\text{pp}} \frac{\sigma_p(I_p + 1)}{\Delta}\right) \right]^{N_T N_R} \quad (3.20), \quad I_p = \left[ \frac{\Delta}{\lambda_{\text{pp}} \sigma_p} \ln\left(\frac{1}{1 - (\varepsilon_{\text{OP}})^{\frac{1}{N_T N_R}}}\right) - 1 \right]^+ \quad (3.21)$$

#### 3.3.2 Outage probability of the MUCRN

Case 1: Rician fading

$$\text{OP}_{\text{e2e}} = 1 - \prod_{k=1}^K \left( 1 - \sum_{m=0}^{N_R-1} \lambda_{\text{PS}_k} \beta_0 \int_0^{+\infty} \frac{\beta_1 x + \beta_2}{\beta_1 x + \beta_3} \exp\left(-\frac{\beta_4}{\beta_1 x + \beta_3}\right) \exp(-\lambda_{\text{PS}_k} x) dx \right). \quad (3.27)$$

$$\text{OP}_{\text{e2e}} \rightarrow 1 - \prod_{k=1}^K \left[ 1 - \sum_{m=0}^{N_R-1} \lambda_{\text{PS}_k} \beta_0 \int_0^{+\infty} \frac{\beta_5 x}{\beta_5 x + (m+1)\lambda_{\text{S}_{k-1}\text{P}}} \exp\left(-\frac{\beta_4}{\beta_5 x + (m+1)\lambda_{\text{S}_{k-1}\text{P}}}\right) \exp(-\lambda_{\text{PS}_k} x) dx \right]. \quad (3.28)$$

Case 2: Rayleigh fading

$$\text{OP}_{\text{e2e}} = 1 - \prod_{k=1}^K \left[ \sum_{m=0}^{N_R-1} \frac{\lambda_{\text{PS}_k} \beta_6}{\beta_7} \exp\left(\lambda_{\text{PS}_k} \frac{\beta_8}{\beta_7}\right) E_1\left(\lambda_{\text{PS}_k} \frac{\beta_8}{\beta_7}\right) \right], \quad (3.29)$$

$$\text{OP}_{\text{e2e}} \rightarrow 1 - \prod_{k=1}^K \left[ \sum_{m=0}^{N_R-1} \frac{\lambda_{\text{PS}_k} \beta_6}{\beta_9} \exp\left(\frac{(m+1)\lambda_{\text{S}_{k-1}\text{P}} \lambda_{\text{PS}_k}}{\beta_9}\right) E_1\left(\frac{(m+1)\lambda_{\text{S}_{k-1}\text{P}} \lambda_{\text{PS}_k}}{\beta_9}\right) \right]. \quad (3.30)$$

#### 3.3.3 Intercept probability

Case 1: Rician fading

$$\text{IP} = 1 - \prod_{k=1}^K \left[ \sum_{m=0}^{N_R-1} \lambda_{\text{PE}} \beta_0 \int_0^{+\infty} \frac{\mu_1 x + \mu_2}{\mu_1 x + \mu_3} \exp\left(-\frac{\mu_4}{\mu_1 x + \mu_3}\right) \exp(-\lambda_{\text{PE}} x) dx \right], \quad (3.32)$$

$$\text{IP} \rightarrow 1 - \prod_{k=1}^K \left[ \sum_{m=0}^{N_R-1} \lambda_{\text{PE}} \beta_0 \int_0^{+\infty} \frac{\mu_5 x}{\mu_5 x + (m+1)\lambda_{\text{S}_{k-1}\text{P}}} \exp\left(-\frac{\mu_4}{\mu_5 x + (m+1)\lambda_{\text{S}_{k-1}\text{P}}}\right) \exp(-\lambda_{\text{PE}} x) dx \right]. \quad (3.33)$$

Case 2: Rayleigh fading

$$\text{IP} = 1 - \prod_{k=1}^K \left[ 1 - \sum_{m=0}^{N_R-1} \frac{\lambda_{\text{PE}} \beta_6}{\mu_6} \exp\left(\lambda_{\text{PE}} \frac{\mu_7}{\mu_6}\right) E_1\left(\lambda_{\text{PE}} \frac{\mu_7}{\mu_6}\right) \right], \quad (3.34)$$

$$\text{IP} \rightarrow 1 - \prod_{k=1}^K \left[ 1 - \sum_{m=0}^{N_R-1} \frac{\lambda_{\text{PE}} \beta_6}{\mu_8} \exp\left(\frac{(m+1)\lambda_{\text{S}_{k-1}\text{P}} \lambda_{\text{PE}}}{\mu_8}\right) E_1\left(\frac{(m+1)\lambda_{\text{S}_{k-1}\text{P}} \lambda_{\text{PE}}}{\mu_8}\right) \right]. \quad (3.35)$$

### 3.4 Simulation and discussion

#### 3.4.1 Impact of SNR on the primary interference threshold

The  $I_p$  has a higher value when SNR,  $\epsilon_{OP}$  increases.

#### 3.4.2 Outage probability of the MUCRN

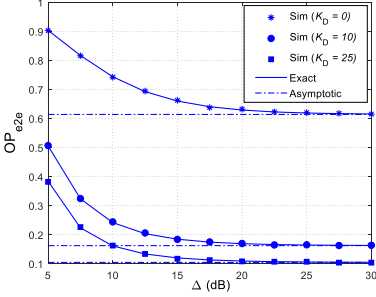


Fig. 3.3:  $OP_{e2e}$  depending  $\Delta$ .

#### 3.4.3 Intercept probability

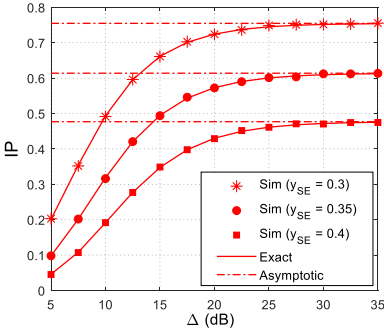


Fig. 3.4: IP depending  $\Delta$ .

#### 3.4.4 Impact of the number of hops and antennas

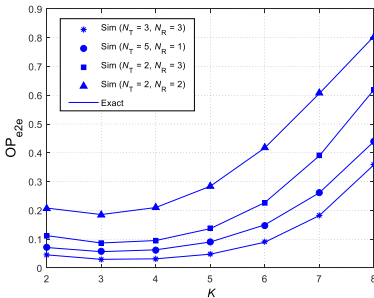


Fig 3.5:  $OP_{e2e}$  depending  $K$

Fig. 3.3 shows that a high SNR range results in  $OP_{e2e}$  converging to asymptotic value as  $\Delta > 20$ dB. Especially, the MUCRN performance significantly improves when its stations are located by the LOS scheme ( $K_D \neq 0$ ), compared to NLOS ( $K_D = 0$ ).

In Fig. 3.4, while the eavesdropper moves far away from  $y_E = 0.3$  to  $y_E = 0.4$ , the intercept probability diminishes gradually. In other words, the security is higher.

In Fig. 3.5,  $K = 3$  is the best number of hops because of achieving the lowest  $OP_{e2e}$ . In other words, the triple-hop network even has a higher performance than the dual-hop one. Moreover, many antennas in the primary network result in improving transmission efficiency considerably.

### 3.4.5 Impact of the antenna distribution

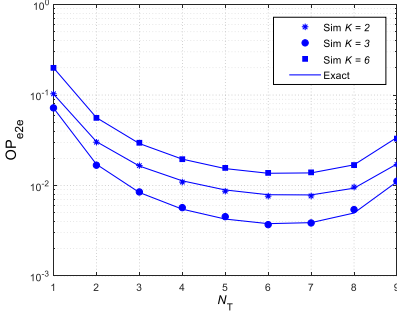


Fig 3.7:  $OP_{e2e}$  according to  $N_T$

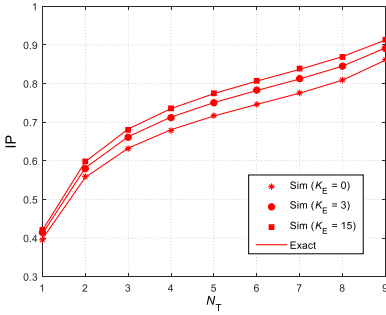


Fig 3.8: IP according to  $N_T$

In Fig. 3.7, assumed the number of antennas is ten ( $N_T + N_R = 10$ ), the study varies  $N_T$  from one to nine, it is shown that we can find the optimal  $N_T$  on the target of the lowest  $OP_{e2e}$ . Consequently, it is recommended to distribute an appropriate antenna number at the transmit and receive sides that enhance better the higher performance.

Fig. 3.8 shows the IP decreases with a maximum of 6% while  $K_E$  downs from 15 to zero. It is a logical solution to diminish IP, higher security without effect on transmission efficiency. Therefore, the multi-hop transceivers need to be installed in terms of the lowest  $K_E$ .

### 3.5 Summary

SNR of the PUs impacts  $OP_{e2e}$  when its value is lower 20dB range. If it is greater, the performance of MUCRN approximates a constant.

More equipped antennas result in not only higher  $OP_{e2e}$  but also higher IP. However, if the primary users have a constant number of antennas, delivering these antennas between transmitter and receiver improves performance.

Increasing the hop number in MUCRN improves the  $OP_{e2e}$  but still gets a higher IP. In contrast, in the range of low  $K$ , the optimal number of hops ( $K^*$ ) can be found by the target of the lowest  $OP_{e2e}$ . In a similar fashion, a triple-hop UCRN has a better performance than a dual-hop one, compared to the same network parameters.

$OP_{e2e}$  is lower if the Rician  $K$ -factor of the relevant channel among multi-hop transceivers is higher. Also, IP and the Rician  $K$ -factor of the eavesdropping channel decrease together.

# Chapter 4 RESEARCH OF THE MULTI-HOP UNDERLAY COGNITIVE RADIO NETWORK EQUIPPED MULTI-ANTENNA HARVEST ENERGY FROM RADIO FREQUENCY

## 4.1 Brief of works

In chapter 3, the thesis gave out the multi-antenna technique equipped with the primary network to have many expected results. The author employs the multi-antenna technique equipped with the MUCRN. Furthermore, simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT) are concurrently used in its transceivers. Therefore, a large number of antennas get more energy from the surroundings and increase the transmission efficiency. Secrecy outage probability (SOP) and probability of non-zero secrecy capacity (PNSC) are represented secure performance in MUCRN.

## 4.2 Network model

Differ from the previous, the secondary transceivers equip  $N_D$  antennas and exploit TAS/SC. They forward information by transmitting step-by-step on each hop from  $S_0$  to  $S_K$  with HD protocol. Besides, they have the capability of self-powered from harvesting energy from a Beacon. An eavesdropper, equipped with  $N_E$  antennas and TAS/SC diversity technique, is assumed to try to catch information on MUCRN illegally.

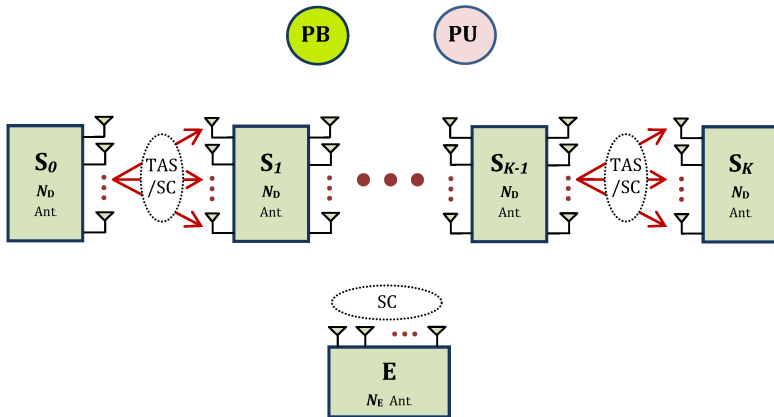


Fig. 4.1: MUCRN with multi-antennas and SWIPT techniques.

### 4.3 Performance evaluation

#### 4.3.1 The average transmit power of the secondary transmitter

$$\mathcal{E} P_{k,b} = \sum_{v=1}^{W-1} \left( F_{Z_k^{\min}} \left( \frac{v+1}{W} \right) - F_{Z_k^{\min}} \left( \frac{v}{W} \right) \right) \frac{v}{W} P_S + 1 - F_{Z_k^{\min}} \quad 1 \quad P_S. \quad (4.15)$$

#### 4.3.2 Secrecy outage probability

$$\dagger \omega_0 < 0: \text{SOP}_k Q_v = 1.$$

$$\dagger \omega_0 > 0 \& \omega_{3,v} > 0: \text{SOP}_k Q_v = 1 + \sum_{n=1}^{N_D^2} \sum_{m=0}^{N_E-1} -1^{n+m} \beta_0 \int_0^{\omega_0} \exp(\beta_1 y) \exp\left(-\frac{\beta_2}{y}\right) dy. \quad (4.22)$$

$$P_S / N_0 \rightarrow +\infty: \text{SOP}_k Q_v \approx 1 - \left( 1 - \exp\left(-\lambda_{S_k E} \frac{\omega_0}{\omega_{3,v}}\right) \right)^{N_E}. \quad (4.24)$$

$$\dagger \omega_0 > 0 \& \omega_{3,v} < 0: \text{SOP}_k Q_v = 1 + \sum_{n=1}^{N_D^2} \sum_{m=0}^{N_E-1} -1^{n+m+1} \beta_0 \int_{\omega_0}^{+\infty} \exp(\beta_1 y) \exp\left(-\frac{\beta_2}{y}\right) dy. \quad (4.25)$$

$$P_S / N_0 \rightarrow +\infty: \text{SOP}_k Q_v \approx \left( 1 - \exp\left(-\lambda_{S_k S_{k+1}} \frac{\omega_2}{\omega_{3,v}}\right) \right)^{N_D^2}. \quad (4.26)$$

$$\dagger \omega_0 > 0 \& \omega_{3,v} = 0: \text{SOP}_k Q_v = 1 + \sum_{n=1}^{N_D^2} \sum_{m=0}^{N_E-1} -1^{n+m} \frac{C_{N_D^2}^n C_{N_E-1}^m N_E \lambda_{S_k E}}{m+1 \lambda_{S_k E} + n \lambda_{S_k S_{k+1}} \omega_0} \exp\left(-n \lambda_{S_k S_{k+1}} \frac{\omega_{1,v}}{\omega_0}\right). \quad (4.27)$$

$$P_S / N_0 \rightarrow +\infty: \text{SOP}_k Q_v \approx 1 + \sum_{n=1}^{N_D^2} \sum_{m=0}^{N_E-1} \frac{-1^{n+m} C_{N_D^2}^n C_{N_E-1}^m N_E \lambda_{S_k E}}{m+1 \lambda_{S_k E} + n \lambda_{S_k S_{k+1}} \omega_2 / \omega_0}. \quad (4.28)$$

#### 4.3.3 Probability of non-zero secrecy capacity

$$\text{PNSC}_k = \sum_{v=1}^W \Pr(P_{k,b} = Q_v) \times \begin{cases} \sum_{n=1}^{N_D^2} \sum_{m=0}^{N_E-1} (-1)^{n+m+1} \mu_0 \int_0^1 \exp(\mu_1 y) \exp\left(-\frac{\mu_2}{y}\right) dy, & \kappa_D^2 > \kappa_E^2 \\ \sum_{n=1}^{N_D^2} \sum_{m=0}^{N_E-1} (-1)^{n+m+1} \mu_0 \int_1^{+\infty} \exp(\mu_1 y) \exp\left(-\frac{\mu_2}{y}\right) dy, & \kappa_D^2 < \kappa_E^2 \\ \sum_{n=1}^{N_D^2} \sum_{m=0}^{N_E-1} (-1)^{n+m} \frac{C_{N_D^2}^n C_{N_E-1}^m N_E \lambda_{S_k E}}{(m+1) \lambda_{S_k E} + n \lambda_{S_k S_{k+1}}}, & \kappa_D^2 = \kappa_E^2. \end{cases} \quad (4.30)$$

## 4.4 Simulation and discussion

### 4.4.1 Conditions impact the average transmit power

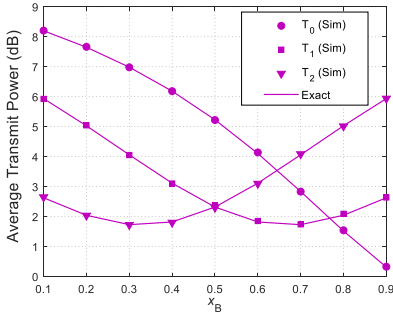


Fig 4.3: The average transmit power of PB, PU according to their locations.

The average transmit power of secondary transmitters depends on the maximum power level ( $P_S$ ) and the distance between themselves to the beacon or the primary user.

### 4.4.2 Conditions impact the secrecy outage probability

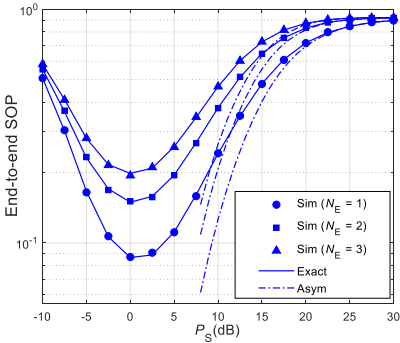


Fig. 4.4: SOP when  $\omega_0 > 0$  &  $\omega_{3,v} > 0$

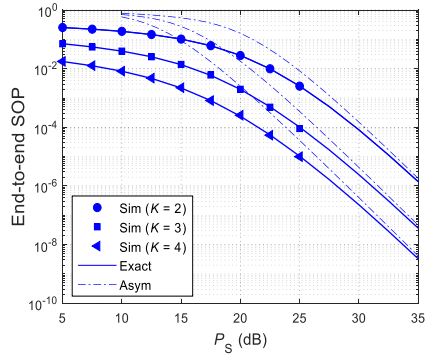


Fig. 4.5: SOP when  $\omega_0 > 0$  &  $\omega_{3,v} < 0$

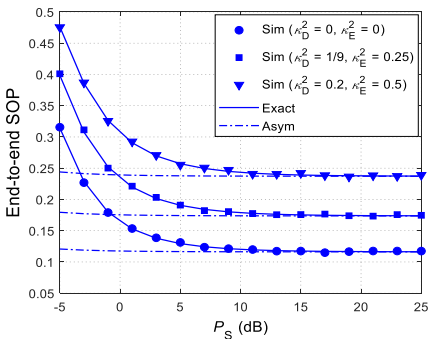


Fig 4.6: SOP when  $\omega_0 > 0$  &  $\omega_{3,v} = 0$

Figs. 4.4, 4.5, and 4.6 are performed with various  $\kappa_D^2, \kappa_E^2$  parameters to verify the closed-form SOP expressions in section 4.3.

Primarily, SOP tends to the high value when the time fraction ( $\alpha$ ) increases in Fig. 4.7. Therefore, the future design should select  $\alpha$  in the low range to achieve high-security performance.



Besides, the SOP diminishes if the hardware impairment of the main channel ( $\kappa_D^2$ ) has a higher value than one ( $\kappa_E^2$ ) on the eavesdropper channel. To study the impact of the multi-antennas, Fig. 4.8 shows that more antennas equipped with MUCRN result in the lower SOP despite the same number on the eavesdropper.

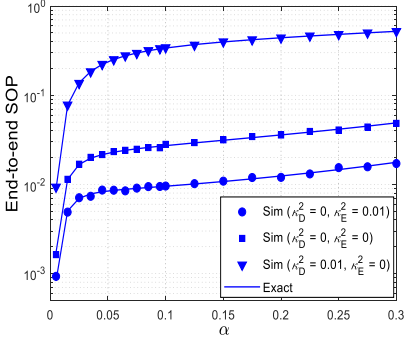


Fig 4.7: SOP according to  $\alpha$ .

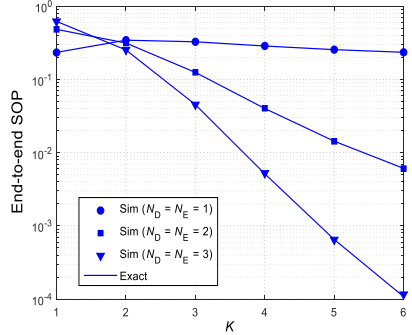


Fig. 4.8: SOP according to  $K, N_D$ .

#### 4.4.3 Conditions impact the probability of non-zero secrecy capacity

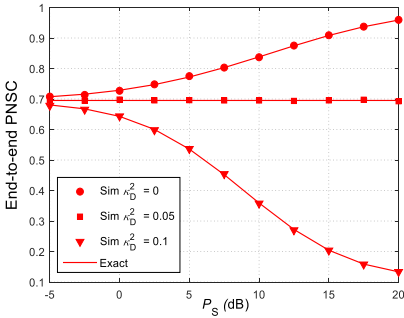


Fig 4.9: PNSC according to  $P_S$

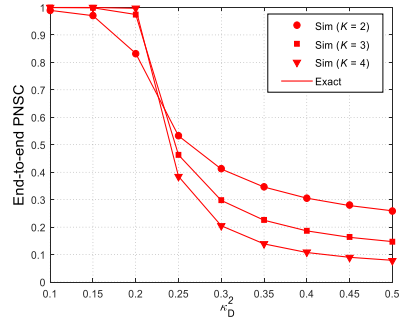


Fig 4.10: PNSC according to  $K, N_D$ .

Fig. 4.9 plots some PNSCs according to various schemes of the  $\kappa_D^2, \kappa_E^2$ . For instance, when increasing  $P_S$  in the case of  $\kappa_D^2 = \kappa_E^2$ , PNSC is a constant,  $\kappa_D^2 < \kappa_E^2$  then PNSC grows up, and others lead to a lower PNSC value. As seen in Fig. 4.10, the second verification shows the PNSC rapidly decreases when  $\kappa_D^2$  is greater than  $\kappa_E^2 = 0.2$ . We should choose a low hardware impairment level to improve the PNSC in the multi-antenna MUCRN.

## 4.5 Summary

Low SOP value occurs as low hardware impairment level (HI) on the MUCRN. Especially if the HI on the main channel ( $\kappa_D^2$ ) is smaller than the HI of the eavesdropping channel ( $\kappa_E^2$ ), both SOP and PNSC are better.

When  $P_S$  is greater than 20dB, SOP nearly achieves the asymptotic value in theory. On the contrary range, the optimum SOP can be found in some particular conditions.

Higher SOP if the eavesdropper has more antennas ( $N_E$ ) in terms of not changing the number of antennas ( $N_D$ ) on MUCRN. In contrast, SOP decreases when the MUCRN is equipped with more antennas despite the number of antennas at the eavesdropper being the same as legal transceivers ( $N_D = N_E$ ). In this case, more hops ( $K$ ) are better for secure performance.

At last, SOP is significantly low when the energy harvesting time fraction is nearly zero. Nevertheless, the study in this section did not find the optimal value ( $\alpha^*$ ) that forces SOP lowest. It is appealed to research in the next of the thesis.

## **Chapter 5 RESEARCH ON COOPERATIVE COMMUNICATION OF THE MULTI-HOP UNDERLAY COGNITIVE RADIO NETWORK HARVEST ENERGY FROM RADIO FREQUENCY**

### **5.1 Brief of works**

The two sections above employ the conventional transmission protocol where the legal transceivers are arranged to forward in the sequential order from source to the destination. (The information must pass over all of the stations in a planned route). Still, it is predicted that the transmission performance enhances well if there is a method to eliminate un-essential relays before going to the destination instead of passing through all stations. In the following, the author proposes and studies the novel cooperative protocol installed in the MUCRN. Moreover, all the stations in MUCRN have the capability of self-powered by harvesting energy and transmitting concurrently.

Continued Chapter 4, this section also studies the optimum time fraction  $\alpha^*$  of the SWIPT technique in both cases: sequentially conventional communication (DIRECT) and cooperative communication (COOP).

## 5.2 Network model

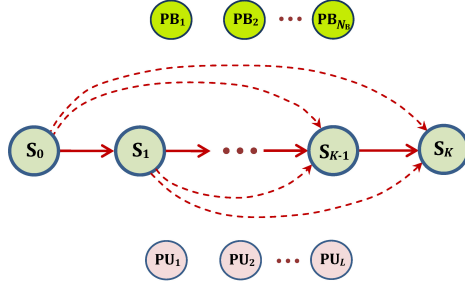


Fig 5.1: MUCRN with cooperative communication and harvesting energy.

The single-antenna MUCRN can decode and forward information from  $S_k$  to  $S_{k+1}$  in the same manner as before. The significant difference is when  $S_k$  transmits,  $S_{k+1}$  and some following stations can receive. Afterward, one of them (assumed  $S_{k+i}$  ( $i > k$ )) is probably selected for the next hop. Apart from that, the MUCRN transceivers apply the SWIPT to self-powered for transmitting.

## 5.3 Performance evaluation

### 5.3.1 The secondary transmit power

It is given at (5.10) and (5.12) in the full report.

### 5.3.2 Point-to-point transmission $S_t \rightarrow S_r$

$$\begin{aligned} \text{OP}_{S_t, S_r} = & 1 - \sum_{p=0}^{N_B-1} \frac{2}{p!} (\lambda_{\text{PBS}_t} \lambda_{S_t, S_r} \omega)^{\frac{p+1}{2}} K_{1-p} \left( 2\sqrt{\lambda_{\text{PBS}_t} \lambda_{S_t, S_r} \omega} \right) \\ & + \sum_{p=0}^{N_B-1} \sum_{q=1}^L \frac{(-1)^{q+1} 2C_L^q}{p!} (\lambda_{\text{PBS}_t} \omega)^{\frac{p+1}{2}} \lambda_{S_t, S_r} (\mu_1)^{\frac{p-1}{2}} K_{1-p} \left( 2\sqrt{\lambda_{\text{PBS}_t} \omega \mu_1} \right), \end{aligned} \quad (5.17)$$

### 5.3.3 Point-to-multipoint transmission

Case 1:  $\mathbf{H} \neq \{\emptyset\}$ : showed OP in (5.21).

$$\begin{aligned} \text{OP}_{S_t, \{\mathbf{H}, \mathbf{G}\}} = & \sum_{p=0}^{N_B-1} \frac{2}{p!} (\lambda_{\text{PBS}_t} \mu_2)^{\frac{p+1}{2}} K_{p-1} \left( 2\sqrt{\lambda_{\text{PBS}_t} \mu_2} \right) - \sum_{p=0}^{N_B-1} \sum_{q=1}^L \frac{(-1)^{q+1} 2C_L^q}{p!} (\lambda_{\text{PBS}_t})^{\frac{p+1}{2}} \mu_2 (\mu_5)^{\frac{p-1}{2}} K_{p-1} \left( 2\sqrt{\lambda_{\text{PBS}_t} \mu_5} \right) \\ & - \sum_{p=0}^{N_B-1} \sum_{r=1}^m \sum_{\substack{l_1=l_2=\dots=l_r=1, \\ l_1 < l_2 < \dots < l_r}} \frac{(-1)^{r+1}}{p!} 2 (\lambda_{\text{PBS}_t} \mu_4)^{\frac{p+1}{2}} K_{p-1} \left( 2\sqrt{\lambda_{\text{PBS}_t} \mu_4} \right) \\ & + \sum_{p=0}^{N_B-1} \sum_{q=1}^L \sum_{r=1}^m \sum_{\substack{l_1=l_2=\dots=l_r=1, \\ l_1 < l_2 < \dots < l_r}} \frac{(-1)^{r+q} 2C_L^q}{p!} (\lambda_{\text{PBS}_t})^{\frac{p+1}{2}} \mu_4 (\mu_6)^{\frac{p-1}{2}} K_{p-1} \left( 2\sqrt{\lambda_{\text{PBS}_t} \mu_6} \right) \end{aligned}$$

Case 2:  $\mathbf{H} = \{\emptyset\}$ : showed OP in (5.24).

$$\begin{aligned} \text{OP}_{S_i\{\emptyset, G\}} &= 1 - \sum_{p=0}^{N_B-1} \sum_{r=1}^m \sum_{\substack{l_1=l_2=\dots=l_r=1, \\ l_1 < l_2 < \dots < l_r}}^m \frac{(-1)^{r+1}}{p!} 2(\lambda_{\text{PBS}_i} \mu_3)^{\frac{p+1}{2}} \cdot K_{p-1}(2\sqrt{\lambda_{\text{PBS}_i} \mu_3}) \\ &+ \sum_{p=0}^{N_B-1} \sum_{q=1}^L \sum_{r=1}^m \sum_{\substack{l_1=l_2=\dots=l_r=1, \\ l_1 < l_2 < \dots < l_r}}^m \frac{(-1)^{r+q}}{p!} 2C_L^q (\lambda_{\text{PBS}_i})^{\frac{p+1}{2}} \mu_3 (\mu_7)^{\frac{p-1}{2}} K_{p-1}(2\sqrt{\lambda_{\text{PBS}_i} \mu_7}), \end{aligned}$$

### 5.3.4 End-to-end communication

DIRECT (Hop-by-hop sequentially communication protocol)

$$\text{OP}^{\text{DIRECT}} = 1 - \prod_{k=1}^K \left[ \begin{aligned} &\sum_{p=0}^{N_B-1} \frac{2}{p!} (\lambda_{\text{PBS}_{k-1}} \lambda_{S_{k-1}S_k} \omega)^{\frac{p+1}{2}} K_{1-p}(2\sqrt{\lambda_{\text{PBS}_{k-1}} \lambda_{S_{k-1}S_k} \omega}) \\ &- \sum_{p=0}^{N_B-1} \sum_{q=1}^L \frac{(-1)^{q+1}}{p!} 2C_K^q (\lambda_{\text{PBS}_{k-1}} \omega)^{\frac{p+1}{2}} \lambda_{S_{k-1}S_k} (\mu_1)^{\frac{p-1}{2}} K_{1-p}(2\sqrt{\lambda_{\text{PBS}_{k-1}} \omega \mu_1}) \end{aligned} \right]$$

COOP (Cooperative communication protocol)

$$\text{OP}^{\text{COOP}} = \sum_{\mathbf{H}_1, \mathbf{G}_1} \text{OP}_{S_0\{\mathbf{H}_1, \mathbf{G}_1\}}^{\text{COOP}}$$

End-to-end maximum number of hops

$$K_{\max} = \left\lceil (1 - \alpha) \aleph \log_2(1 + 1/\kappa_D^2) / R_{\text{th}} \right\rceil.$$

## 5.4 Simulation and discussion

### 5.4.1 Impact of the number of beacons and primary users

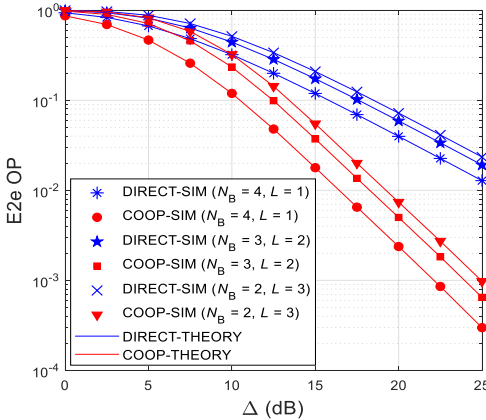


Fig 5.4: Impact of  $N_B$  and  $L$ .

As seen with some  $N_B$  and  $L$  parameters, the OP of the COOP is lower than the DIRECT one. The significant differential occurs in a high SNR range. The high ramps present in the COOP protocol are overwhelming diverse than the DIRECT. Furthermore, the OP of both diminishes when greater  $N_B$  and smaller  $L$ .

### 5.4.2 Impact of the hop number

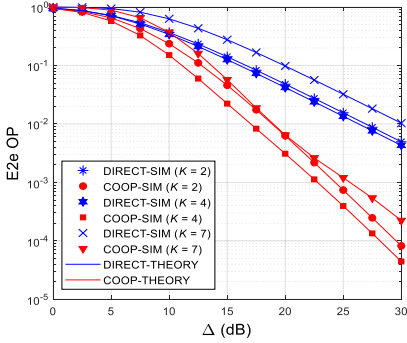


Fig 5.5:  $OP^{\text{DIRECT}}$  and  $OP^{\text{COOP}}$  with various  $K$ .

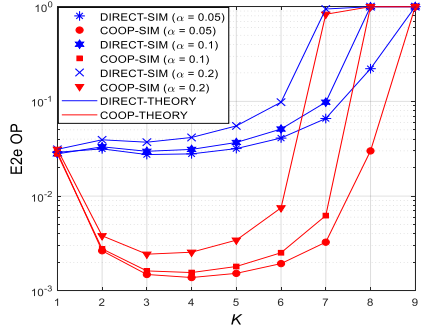


Fig 5.6: OP according to  $K, \alpha$ .

Fig. 5.5 presents the best OP occurred  $K = 4$  in both DIRECT and COOP. In other words,  $K = 4$  results in the OP value having a lower value than  $K = 2$  or  $K = 7$ . It is in meaning to the optimal number of hops ( $K^* = 2$ ) that make the lowest OP in DIRECT mode and COOP mode. Also, Fig. 5.6 displays that the  $K^*$  depends on the energy harvesting time fraction of the SWIPT technique. Moreover, the transmission is discontinuous when  $K > K_{\text{max}}$ .

### 5.4.3 Impact of energy harvesting time fraction

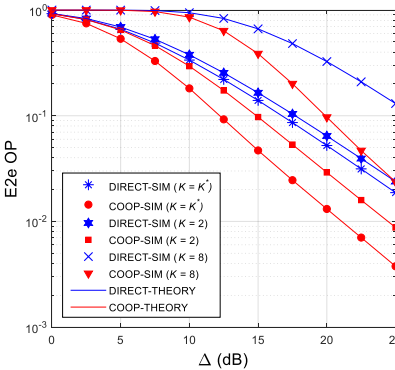


Fig 5.7: OP as  $\alpha = 0.05$ , compared to  $K^*, K = 2, K = 8$ .

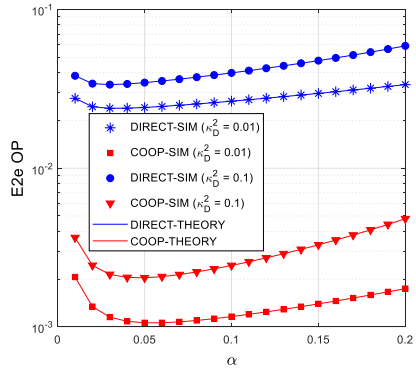


Fig 5.8: OP according to  $\alpha$ .

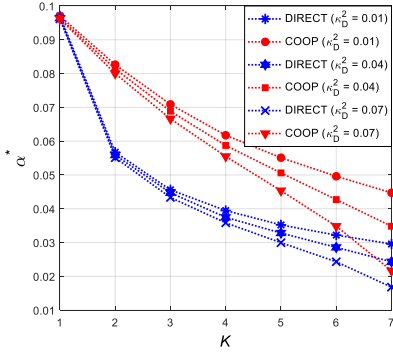


Fig 5.9:  $\alpha^*$  according to  $K$ .

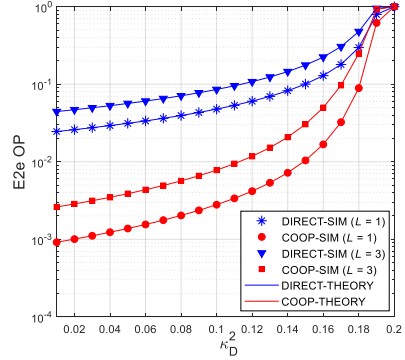


Fig 5.10: Effect of  $\kappa_D^2$  on OP.

As seen in Fig. 5.7, OP's overwhelming characteristic exhibits when compared in terms of various  $K$ . Apparently, the MUCRN designed with the optimum  $K^*$  value has the best OP. It proposes that we could choose an appropriate  $K$  if the MUCRN can not change the time fraction. In contrast, Fig. 5.9 displays some optimum time fraction values ( $\alpha^*$ ) according to the number of hops. Based on this figure, it recommends that we should use the  $\alpha^*$  in the fixed-hop MUCRN. Aside from, Fig. 5.10 confirms the  $OP = 1$  when the hop number is over than its limitation ( $\kappa_D^2 \geq \kappa_{D,max}^2$ ).

## 5.5 Summary

The importance of this research is that the  $OP^{COOP}$  is lower than  $OP^{DIRECT}$ . Apparently, the diversity gain of COOP protocol is higher than DIRECT. Aside, the OP of both diminishes when a greater number of beacons and little PUs existence.

In the case of unvaried  $\alpha$ , we could be found  $K^*$  in order to get the best OP. The research also finds that the  $K^*(COOP)$  is a higher value than  $K^*(DIRECT)$ . Conversely, when increasing  $K$  and finding  $\alpha^*$  respectively, the optimum energy harvesting time fraction gets higher as more hops despite COOP or DIRECT.

Aside, the hardware impairment slightly effects on  $\alpha^*$ . The lower HI level leads to higher performance. The transmission is unsuccessful when the number of hops is greater than  $K_{max}$ .

# Chapter 6 RESEARCH ON PATH-SELECTION OF THE CLUSTER-BASED MULTI-HOP UNDERLAY COGNITIVE RADIO NETWORK

## 6.1 Brief of works

In some practical wireless networks such as MANETs, WSNs, and V2V, their stations (transceivers) are arranged as a mesh. Hence, there exist many paths (MUCRNs) which can carry end to end the information. Shortening the number of hops on a particular MUCRN has been studied above. Is there more efficiency if we can choose the best appropriate MUCRN among  $M$  paths. Indeed, it is still in meaning to improve the performance. In this section, the research presents three methods: BEST, MAXV, RAND, and selecting an appropriate protocol. Furthermore, it also evaluates the pros and cons of each path-selection protocol according to the CSI cost.

## 6.2 Network model

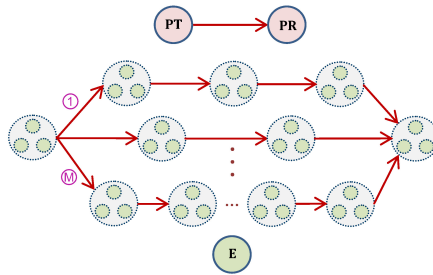


Fig. 6.1: The mesh network of  $M$  MUCRNs.

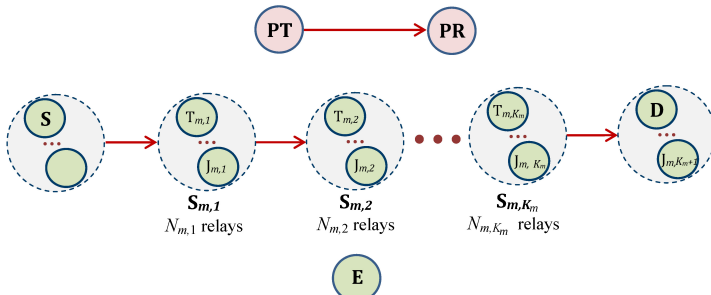


Fig 6.2:  $m$ -th MUCRN in the mesh network.

Generally, there are  $M$  paths (equivalent  $M$  MUCRNs) in a mesh network. It is assumed that the  $m$ th MUCRN has  $K_m+1$  cluster-based stations, including a source (S), a destination (D), and some relays ( $S_{m,k}$ ). Each station has  $N_{m,k}$

transceivers. One of  $N_{m,k}$  is appointed to a data transmission node ( $T_{m,k}$ ), and another transceiver of  $N_{m,k}$  is assigned to transmit jamming signal ( $J_{m,k}$ ).

### 6.3 Performance evaluation

#### 6.3.1 Primary outage probability

$$OP_m = 1 - \exp\left(-\frac{(K_m+1)\lambda_{PTPR}\sigma_p}{P_p}\right) \prod_{k=1}^{K_m+1} \left(\frac{\lambda_{T_{m,k-1}PR}P_p}{\lambda_{T_{m,k-1}PR}P_p + \lambda_{PTPR}P_{T_{m,k-1}}\sigma_p} \frac{\lambda_{J_{m,k}PR}P_p}{\lambda_{J_{m,k}PR}P_p + \lambda_{PTPR}P_{J_{m,k}}\sigma_p}\right) \quad (6.10)$$

#### 6.3.2 Transmit power allocation

$$Q_{m,k} = \frac{\lambda_{T_{m,k}PR}P_p}{\lambda_{PTPR}\sigma_p} \left[ \left( (1 - \varepsilon_{OP}) \exp\left(\frac{(K_m+1)\lambda_{PTPR}\sigma_p}{P_p}\right) \right)^{-\frac{1}{2(K_m+1)}} - 1 \right]^+ \quad (6.14)$$

#### 6.3.3 PNSC of the $m$ -th MUCRN

$$PNSC_m = \prod_{k=1}^{K_m+1} \left[ \sum_{v=1}^{N_{m,k}} (-1)^{v+1} C_{N_{m,k}}^v \mu_{0,k,v} \nabla_k (I_{1,k,v} - I_{2,k,v} + I_{3,k,v} - I_{4,k,v}) \right] \quad (6.16 - 6.18)$$

#### 6.3.4 Path-selection protocols

**BEST:**  $PNSC_{BEST} = 1 - \prod_{m=1}^M (1 - PNSC_m)$ .

**MAXV:**  $PNSC_{MAXV} = \max_{m=1,2,\dots,M} (PNSC_m)$ .

**RAND:**  $PNSC_{RAND} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M PNSC_m$ .

## 6.4 Simulation and discussion

### 6.3.1 Impact of the primary transmit power to the secondary transmit power

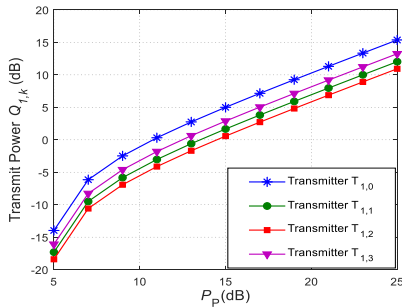


Fig. 6.3: Impact of  $P_p$  on  $Q_{1,k}$  in a triple-hop scheme.

The communication distances among  $S_{I,k}$ , and PR differ that resulting in the various constrained power levels.



### 6.4.2 Impact of the primary transmit power on the PNSC

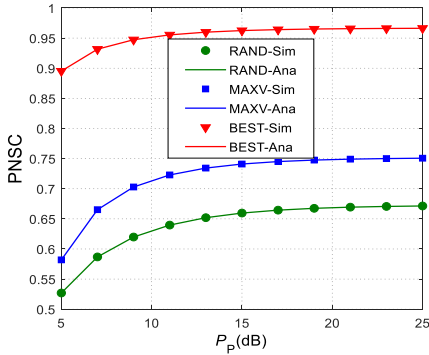


Fig 6.4: Impact of  $P_p$  on the PNSC of three methods.

At a glance, three proposals improve the secure performance when increases  $P_p$ . Nevertheless, when in the high range of  $P_p$ , the PNSCs of three approximate the constant, especially as  $P_p$  is greater than 20dB in this investigation.

### 6.4.3 Impact of the location of the eavesdropper on the PNSC

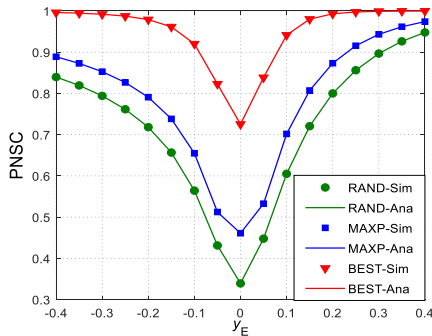


Fig. 6.5: Impact of eavesdropper's place on the PNSC.

When the eavesdropper moves horizontally from left to right with fixed  $x_E = 0.5$ , the lowest PNSC of the three protocols occurs at  $(0.5, 0)$ . It gives the explanation the eavesdropper's location has the nearest to the transceivers at that place. Consequently, selecting an appropriate path where its stations are installed far away from the eavesdropper is suggested in the network design.

## 6.5 Summary

The primary transmit power ( $P_p$ ) impacts the PNSC of the MUCRN when it is less than 20dB in the studied scheme. Out of this range, the PNSC approximates a constant.

The BEST is the highest secure performance, the MAXV is the second, and the RAND is the worst. By contrast, a protocol with better performance requires a large number of CSI and a greater capacity for complex computation. Both are not appropriate with the low computing transceivers.

The location of the eavesdropper is very crucial for secure communication. As a result, when designing a new MUCRN mesh, the thesis proposes splitting or routing appropriately to ignore the adjacent MUCRNs to the eavesdropper because of low secure performance.

## **Chapter 7 CONCLUSION**

### **7.1 Summary of thesis' results**

Four proposed models in this thesis are the wireless multi-hop network under the transmit power constraint at their stations to enhance the spectrum efficiency. In the first model, the Chapter studies the case of the primary and secondary stations influencing each other and claims this affects the transmission performance. It is believed that a considerable effect occurs when the standardized power is less than 20dB. The outage performance is almost steady when the power is out of this range. This characteristic is one again reminded in Chapter 6. Also, in a situation of not being supplied power, this thesis proposes to design the SWIPT technique at every secondary multi-hop transceiver. The results from Chapter 4 and Chapter 5 indicate that secondary transmit power considerably depends on the number of primary users, beacons, and their distances to the secondary transceivers. Therefore, this thesis concludes that communicating by MUCRNs under the limited transmit power condition is realizable, practical, and reliable. It also contributes to increasing the spectrum efficiency despite the missing power supply from the grid.

Research on the transmission performance of the MUCRN, the thesis evaluates the representative performance via the end-to-end outage probability (OP) and gives several solutions to improve it. The first one is to build the MUCRN that its adjacent transceivers are placed on a line of sight vision (LOS). According to Chapter 3, the OP of the MUCRN with LOS is significantly lower than the one without LOS. The differentiation of OPs relies on the  $K$ -factor channel parameter. In particular, MUCRN is designed with a higher Rician  $K$ -factor of the main channels results in more improving performance. For instance,  $K_D = 10$  has  $OP = 0.17$  compared to  $K_D = 0$  with  $OP = 0.6$ . The second solution employs the multi-antenna technique and TAS/SC diversity at the primary network. The research proves that the proposal is efficient at decreasing the OP of the MUCRN when it is equipped with a large of antennas. In some cases, the number of antennas is small by the constraint of

size, shape, or weight. The study proposes appropriately distributing the antennas between transmitter and receiver to improve the transmission performance of the MUCRN. The third solution (presented in Chapter 5) exploits the cooperative communication technique for higher performance of the MUCRN. In the novel method, the information may transfer from the source to the destination via fewer hop than usual. It causes the information early reaches to the target. The research claims that the diversity gain of the new cooperative protocol (COOP) is overwhelming than the one of the conventional protocol (DIRECT). That result contributes to proving the logic of the solution to ensure transmission. Based on the study, the thesis proposes to design the optimal number of hops in the MUCRNs to achieve the best outage performance. Also, the investigation of the simulated scheme shows that the MUCRN with optimum hops has better performance than the dual-hop underlay cognitive radio network in the same coverage.

Next, research on the secure performance by the physical-layer security (PLS), the thesis focuses on evaluating and giving out the numerous proposals to enhance secure communication. Most of the methods can raise OP cause increasing the intercept probability (IP) as well. Therefore, the first solution is the trade-off between the transmission and secure performance in the MUCRN. Chapter 3 concludes that there exists a method that the OP can be steady when diminishing the IP. That is, the MUCRN needs to be designed with the low eavesdropping Rician  $K$ -factor. For example, IP loses the greatest as 6% when  $K_E$  downs from 15 to zero. The following solution, the multi-antenna technique with the TAS/SC diversity, can be directly used in the MUCRN instead of only the primary in the first model (Chapter 3). The study in Chapter 4 suggests the MUCRN should be equipped with more antennas to decrease its secrecy outage probability (SOP). Also, this method achieves better security if the MUCRN has more hops despite the eavesdropper having the same antenna number as legal transceivers. About the probability of non-zero secrecy capacity (PNSC), selecting the low hardware impairment (HI) level technique can raise the PNSC, especially when the HI parameter of the MUCRN is smaller than the HI level on the eavesdropper. The third solution presents the method to select a MUCRN path among the numerous equivalent paths that can carry the information from the source to the destination. It proposes three novel protocols, namely BEST, MAXV, RAND, and evaluates them according to

various network conditions. After investigating, the BEST protocol is the best secure performance. Still, it requires full CSI and complex processing that are not appropriate to install at the low computational transceivers. Because of the significant impact of the eavesdropper location on the MUCRN performance, the fourth recommends choosing the MUCRN located far away from the eavesdropper when designing or routing the wireless mesh networks.

At last, the research on the effect of the simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT) on the performance of MUCRN is performed. Continue above, the higher antenna number raises the harvested energy, contributes to releasing the secondary transmit power, and loses the SOP. As presented in Chapter 4, the thesis suggests designing the low value of energy harvested time fraction ( $\alpha$ ) to reserve more remaining time in the block for transmission in the multi-antenna MUCRN that is an essential solution to improve the performance. Conversely, when evaluating the single-antenna MUCRN with SWIPT, the result shows the optimal value of energy harvested time fraction ( $\alpha^*$ ) to achieve the best transmission performance. This claim is similar to previous dual-hop UCRNs [44, 79] or MUCRN [138]. The research also presents the relationship between  $\alpha^*$  and the number of hops, the communication protocols used in the MUCRN. If MUCRN has an unchanged  $\alpha$  value, it is optimal to design the number of hops  $K = K^*$ . Contrastly, when MUCRN exists before and can not reconfigure the hops, we apply the time fraction  $\alpha = \alpha^*$  according to the available  $K$  to enhance the transmission performance.

All of the conclusions above present the design of a MUCRN operating in a spectrum sharing environment by limited transmit power is reliable. This thesis proves the method to alter the energy supply by harvesting energy from the radio frequency for efficient network operation. Moreover, it also gives out many valuable proposals to improve the information's transmission and security.

## 7.2 Future work

Although the thesis has many valuable contributions, the study has not covered all of the solutions. Some of the future studies can develop as follows:

- Apply the appropriate channels models, especially in a general form such as Nakagami- $m$ , Generalized- $K$  for the relevant channels.

- Exploit new communicating techniques to employ in the MUCRN. For instance, non-orthogonal multiple access (NOMA) or massive MIMO.
- Develop the researches on the two-way communication scheme, wireless multi-hop network with full-duplex.
- Propose the novel protocols that are more efficient in the path-selection, and study the new MAC protocols applied for ones.

--- o0o ---

## PUBLICATIONS

1. **P. M. Nam**, T. T. Duy, P. V. Ca, P. N. Son, and N. H. An, "Outage Performance of Power Beacon-Aided Multi-Hop Cooperative Cognitive Radio Protocol Under Constraint of Interference and Hardware Noises," *Electronics*, vol. 9, no. 6, p. 1054, 2020. (SCIE – IF 2.42)
2. **P. M. Nam**, T. T. Duy, and P. V. Ca, "End-to-end security-reliability analysis of multi-hop cognitive relaying protocol with TAS/SC-based primary communication, total interference constraint and asymmetric fading channels," *International Journal of Communication Systems*, vol. 32, no. 2, pp. 1-16, 2019 (SCIE – IF 1.278).
3. **M. N. Pham**, "On the secrecy outage probability and performance trade-off of the multi-hop cognitive relay networks," *Telecommunication Systems*, vol. 73, no. 3, pp. 349-358, 2020. (SCIE – IF 1.99).
4. **P. M. Nam**, D.-T. Do, N. T. Tung, and P. T. Tin, "Energy harvesting assisted cognitive radio: random location-based transceivers scheme and performance analysis," *Telecommunication Systems*, vol. 65, no. 1, pp. 123–132, 2018. (SCIE – IF 1.99)
5. **P. M. Nam**, T. T. Duy, and P. V. Ca, "Performance of Cluster-based Cognitive Multihop Networks under Joint Impact of Hardware Noises and Non-identical Primary Co-channel Interference," *TELKOMNIKA Telecommunication, Computing, Electronics and Control*, vol. 17, no. 1, 2019 (SCOPUS).
6. P. T. Tin, **P. M. Nam**, T. T. Duy, P. T. Tran, and M. Voznak, "Secrecy Performance of TAS/SC-Based Multi-Hop Harvest-to-Transmit Cognitive WSNs Under Joint Constraint of Interference and Hardware Imperfection," *Sensors*, vol. 19, no. 5, p. 1160, 2019 (SCIE – IF 3.031)
7. N. T. Tung, **P. M. Nam**, and P. T. Tin, "Performance evaluation of two-way with energy harvesting and hardware noises," *Digital Communications and Networks*, 2020. (SCIE – IF 3.41)
8. T. T. Nguyen, **N. M. Pham**, and D. T. Do, "Wireless powered underlay cognitive radio network with multiple primary transceivers: Energy constraint, node arrangement, and performance analysis," *International Journal of Communication Systems*, vol. 30, no. 18, pp. 1-11, 2017. (SCIE – IF 1.278)
9. P. T. Tin, **P. M. Nam**, T. T. Duy, and M. Voznak, "Security–Reliability Analysis for a Cognitive Multi-hop Protocol in Cluster Networks with Hardware Imperfections," *IEIE Transactions on Smart Processing & Computing*, vol. 6, no. 3, pp. 200-209, 2017 2017.
10. **P. M. Nam** and P. T. Tin, "Analysis of Security-Reliability Trade-off for Multi-hop Cognitive Relaying Protocol with TAS/SC Technique," *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, vol. 5, no. 5, pp. 54-62, 2020.
11. **P. M. Nam**, P. V. Ca, T. T. Duy, and K. N. Le, "Secrecy Performance Enhancement Using Path Selection over Cluster-Based Cognitive Radio Networks," in *INISCOM2019, Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*, Springer, vol. 293, pp. 65-80, 2019 (SCOPUS).
12. **P. M. Nam**, P. V. Ca, P. V. Tuan, T. T. Duy, and V. N. Q. Bao, "Security versus Reliability Study for Multi-hop Cognitive M2M Networks With Joint Impact of Interference Constraint and Hardware Noises," presented at the *International Conference on Advanced Technologies for Communications*, Ho Chi Minh, 2018 (IEEE Indexed).
13. P. T. Tin, **P. M. Nam**, T. T. Duy, T. T. Phuong, and M. Voznak, "Throughput Analysis of Power Beacon-Aided Multi-hop Relaying Networks Employing Non-Orthogonal Multiple Access With Hardware Impairments," presented at the *AETA2018, part of the Lecture Notes in Electrical Engineering book series Ostrava-Poruba, Czech Republic* 2018.
14. N. X. Tuyền, **P. M. Nam**, T. T. Duy, and P. V. Ca, "Phân tích hiệu năng mạng chuyển tiếp đa chặng sử dụng NOMA dưới sự ảnh hưởng của giao thoa đồng kênh và khiếm khuyết phần cứng," in *Hội thảo Quốc gia lần thứ XXII về điện tử, Truyền thông và Công nghệ Thông tin (REV-ECIT 2019)*, Hanoi, Vietnam, 2019, vol. 2, pp. 106-111.