

**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO  
TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHỆ KỸ THUẬT  
THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH**

**NGUYỄN VĂN TOÀN**

**ĐỀ XUẤT VÀ ĐÁNH GIÁ HIỆU NĂNG  
CÁC MÔ HÌNH CHUYỂN TIẾP KẾT HỢP  
VỆ TINH - TRẠM MẶT ĐẤT  
SỬ DỤNG MÃ FOUNTAIN**

Chuyên ngành: Kỹ thuật điện tử  
Mã số: 9520203

**TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ**

TP. Hồ Chí Minh, tháng 04/2026

Công trình được hoàn thành tại  
**Trường Đại học Công nghệ Kỹ thuật TP. HCM**

Người hướng dẫn khoa học 1: PGS. TS. Phạm Ngọc Sơn  
Người hướng dẫn khoa học 2: PGS. TS. Trần Trung Duy

Luận án sẽ được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án Cấp chuyên  
môn (khoa) họp tại Trường Đại học Công nghệ Kỹ thuật TP. HCM  
vào ngày      tháng      năm 2026

# MỞ ĐẦU

## Động lực nghiên cứu

Sự gia tăng nhanh chóng của lưu lượng dữ liệu trong các hệ thống thông tin vô tuyến hiện đại, cùng với sự phát triển của các thiết bị thông minh, Internet vạn vật (IoT) và các dịch vụ số, đang đặt ra những yêu cầu ngày càng khắt khe đối với mạng truyền thông, bao gồm tốc độ dữ liệu cao, độ trễ thấp, mật độ kết nối lớn và độ tin cậy cao. Mặc dù các mạng thông tin di động mật đất đã đạt được nhiều tiến bộ qua các thế hệ phát triển, khả năng đáp ứng các yêu cầu này vẫn còn hạn chế trong các kịch bản vùng phủ rộng hoặc điều kiện môi trường bất lợi như vùng biển, miền núi và khu vực hạ tầng kém phát triển.

Trong bối cảnh đó, xu hướng tích hợp giữa mạng vệ tinh và mạng mật đất, đặc biệt là các hệ thống chuyên tiếp kết hợp vệ tinh–trạm mật đất (HSTRN), đã nổi lên như một giải pháp hiệu quả nhằm mở rộng vùng phủ và nâng cao độ tin cậy của hệ thống. Tuy nhiên, các hệ thống HSTRN vẫn phải đối mặt với nhiều thách thức như suy hao đường truyền lớn, pha đỉnh nghiêm trọng và nhiễu đồng kênh, làm suy giảm hiệu năng truyền dẫn. Trong điều kiện này, các kỹ thuật mã hóa với tốc độ cố định khó có thể thích ứng hiệu quả với sự biến động của kênh truyền.

Mã Fountain (FC), với đặc tính sinh mã vô hạn và khả năng tích lũy gói tin linh hoạt, được xem là một giải pháp tiềm năng nhằm nâng cao độ tin cậy trong môi trường truyền dẫn khắc nghiệt. Bên cạnh đó, các kỹ thuật tiên tiến như đa truy nhập không trực giao (NOMA), lựa chọn chuyên tiếp từng phần (PRS) và bề mặt phản xạ thông minh (RIS) đã được chứng minh là có khả năng cải thiện hiệu quả phổ, độ lợi phân tập và chất lượng kênh truyền.

Tuy nhiên, các nghiên cứu hệ thống HSTRN hiện nay chủ yếu xem xét các kịch bản sử dụng độc lập các kỹ thuật hoặc có kết hợp nhưng chưa sử dụng FC, đặc biệt dưới góc độ bảo mật lớp vật lý (PLS) và trong môi trường có nhiễu đồng kênh (CCI). Do đó, việc nghiên cứu các mô hình HSTRN tích hợp FC cùng với các kỹ thuật tiên tiến là cần thiết nhằm nâng cao đồng thời độ tin cậy và khả năng bảo mật của hệ thống.

Xuất phát từ những vấn đề nêu trên, đề tài: **“Đề xuất và đánh giá hiệu năng các mô hình chuyên tiếp kết hợp vệ tinh–trạm mật đất sử dụng mã Fountain”** mang tính cấp thiết, có ý nghĩa khoa học và thực tiễn rõ rệt trong bối cảnh phát triển các hệ thống thông tin vô tuyến thế hệ mới. Các kết quả nghiên cứu của luận án không chỉ góp phần hoàn thiện cơ sở lý thuyết cho việc phân tích và đánh giá hiệu năng của các hệ thống HSTRN trong điều kiện

kênh truyền phức tạp, mà còn cung cấp các định hướng thiết kế quan trọng nhằm nâng cao độ tin cậy và bảo mật lớp vật lý cho hệ thống HSTRN trong các kịch bản triển khai thực tế.

### **Các đóng góp của luận án**

Thứ nhất, mô hình HSTRN sử dụng FC trong môi trường tồn tại nhiễu đồng kênh (CCI) được đề xuất. Các biểu thức giải tích dạng tường minh cho xác suất dừng (OP) và xác suất dừng hệ thống (SOP) được thiết lập và kiểm chứng bằng mô phỏng Monte-Carlo đối với hai phương án thông thường (ConV) và đề xuất (ProP). Kết quả cho thấy phương án ProP khai thác hiệu quả cơ chế tích lũy gói của FC, qua đó cải thiện đáng kể độ tin cậy truyền dẫn và giảm ảnh hưởng của CCI so với phương án ConV. Bên cạnh đó, bài toán tối ưu kết hợp phân bổ công suất và thời gian truyền được giải quyết, chỉ ra sự tồn tại của các cấu hình tham số tối ưu nhằm nâng cao hiệu năng hệ thống, đồng thời cung cấp các định hướng thiết kế quan trọng cho các hệ thống HSTRN trong điều kiện kênh gặp bất lợi dưới tác động của nhiễu.

Thứ hai, Luận án phát triển mô hình PLS–NOMA–HSTRN nhiều cụm người dùng, tích hợp FC và cơ chế lựa chọn chuyên tiếp (PRS) trong kịch bản tồn tại nhiễu thiết bị nghe lén. Các biểu thức giải tích cho các chỉ tiêu hiệu năng và bảo mật (OP, IP, SOP, SIP) được thiết lập và kiểm chứng. Kết quả cho thấy mô hình đề xuất nâng cao đồng thời độ tin cậy và hiệu năng bảo mật, đồng thời làm rõ mối quan hệ đánh đổi giữa hai yếu tố này và xác định các tham số tối ưu, đặc biệt là hệ số phân bổ công suất.

Thứ ba, Luận án đề xuất mô hình PLS–HSTRN tích hợp RIS kết hợp NOMA, FC và PRS, qua đó xây dựng các biểu thức giải tích cho các chỉ tiêu OP, SOP, IP và SIP. Kết quả cho thấy RIS giúp cải thiện đáng kể chất lượng kênh và hiệu năng hệ thống thông qua độ lợi phản xạ và phân tập không gian. Cùng với đó, mô hình đề xuất có RIS cải thiện hiệu năng vượt trội so với các mô hình không RIS. Đồng thời, luận án làm rõ mối quan hệ đánh đổi giữa độ tin cậy, bảo mật và độ trễ, cũng như xác định các miền tham số tối ưu phục vụ thiết kế hệ thống. Các kết quả đạt được cung cấp cơ sở quan trọng cho việc phát triển và tối ưu các hệ thống HSTRN tích hợp đa công nghệ trong các mạng vô tuyến thế hệ mới.

Nhìn chung, các kết quả của Luận án góp phần hoàn thiện cơ sở lý thuyết và cung cấp các định hướng thiết kế hiệu quả cho các hệ thống FC–HSTRN tích hợp đa công nghệ trong các mạng vô tuyến thế hệ mới.

## **Chương 1: Tổng quan**

Trong những năm gần đây, HSTRN được xem là giải pháp tiềm năng nhằm mở rộng vùng phủ và nâng cao độ tin cậy cho các hệ thống sau 5G và 6G. Đồng thời, FC cung cấp khả năng thích nghi kênh và chống mất gói, trong khi NOMA, PRS và RIS cải thiện hiệu quả phổ, phân tập và chất lượng kênh. Tuy nhiên, các nghiên cứu hiện tại chủ yếu xem xét các kỹ thuật này độc lập, trong khi việc tích hợp FC trong HSTRN đa công nghệ còn hạn chế. Đặc biệt, ảnh hưởng của CCI đến cơ chế tích lũy gói của FC và vai trò của FC trong đánh đổi giữa độ tin cậy và bảo mật khi kết hợp với NOMA, PRS và RIS chưa được nghiên cứu đầy đủ. Do đó, việc phát triển các mô hình HSTRN tích hợp FC với các kỹ thuật tiên tiến là cần thiết nhằm khai thác hiệu quả tiềm năng công nghệ và nâng cao hiệu năng và PLS.

## **Chương 2: Cơ sở lý thuyết**

Chương 2 trình bày các cơ sở lý thuyết của hệ thống HSTRN, bao gồm mô hình hệ thống và đặc tính kênh truyền vệ tinh–mặt đất và mặt đất–mặt đất với các mô hình pha đỉnh như Shadowed–Rician, Rayleigh và Nakagami- $m$ . Bên cạnh đó, chương giới thiệu nguyên lý và cơ chế tích lũy gói của FC, cùng các kỹ thuật NOMA và RIS, qua đó làm rõ khả năng nâng cao độ tin cậy, hiệu quả phổ và chất lượng kênh truyền. Các nội dung này tạo nền tảng cho việc xây dựng mô hình và phân tích hiệu năng, bảo mật trong các chương tiếp theo.

## **Chương 3: Hệ thống HSTRN sử dụng FC trong môi trường CCI**

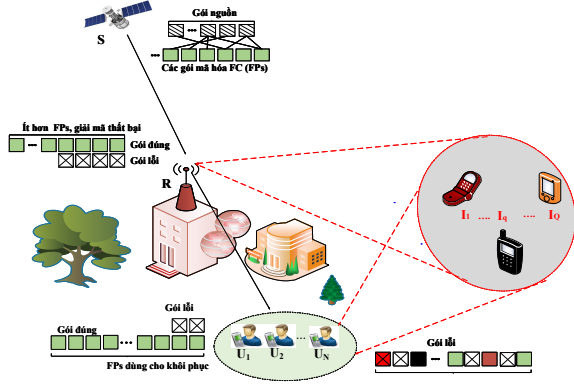
### **3.1. Giới thiệu**

Nội dung của Chương 3 được phát triển dựa trên các kết quả đã công bố trong công trình  $C_1$ :

[ $C_1$ ]. N. V. Toan, T. T. Duy, P. N. Son, D. T. Hung, N. Q. Sang and T. L. Thanh, “Outage Performance Of Hybrid Satellite-Terrestrial Relaying Networks With Rateless Codes In Co-Channel Interference Environment,” in *2023 International Conference on System Science and Engineering*, Ho Chi Minh, Vietnam, pp. 468–473, Jul. 2023.

### **3.2. Mô hình hệ thống**

Hệ thống FC–HSTRN được xét trong môi trường có  $Q$  nguồn CCI, trong đó vệ tinh  $S$  truyền dữ liệu tới  $U_n$  thông qua  $R$  (không tồn tại liên kết trực tiếp). Các gói  $p_s$  được truyền theo giao thức DF; tại  $R$  cần thu thập tối thiểu  $G_{\min}$  gói để giải mã, với số lần truyền tối đa  $H_{\max}$ ; tất cả các nút sử dụng đơn ăng ten. Hệ thống gồm hai phương án, trong phương án ConV,  $R$  thực hiện DF từng gói mà không lưu trữ, với quá trình truyền qua hai chặng



**Hình 1:** Mô hình hệ thống HSTRN sử dụng FC dưới tác động của CCI.

$S \rightarrow R$  và  $R \rightarrow U_n$  dưới ảnh hưởng của CCI, phụ thuộc hệ số phân bổ thời gian  $\tau_{\text{ConV}}$ . Với phương án ProP, R được trang bị bộ đệm để tích lũy các gói FC: khe thứ nhất tương tự ConV; khe thứ hai gồm hai trường hợp: (i) nếu chưa đạt  $G_{\min}$ , R vừa lưu trữ vừa chuyển tiếp; (ii) nếu đạt đủ  $G_{\min}$ , R giải mã và chủ động phát các gói FC tới  $U_n$ , không còn phụ thuộc vào phân bổ thời gian.

### 3.3. Phân tích hiệu năng

#### 3.3.1. Xác suất giải mã thành công một gói FC

Phần này trình bày phân tích xác định các biểu thức tường minh của xác suất giải mã thành công một gói FC trong cả hai phương án ConV và ProP.

#### 3.3.2. Xác suất dừng của từng người dùng

OP của  $U_n$  hai phương án được xác định theo công thức 1 và 2.

$$OP_n^{\text{ConV}} = \sum_{L_n^{\text{ConV}}=0}^{G_{\min}-1} \left( \frac{H_{\max}}{L_n^{\text{ConV}}} \right) (\theta_{U_n}^{\text{ConV}})^{L_n^{\text{ConV}}} (1 - \theta_{U_n}^{\text{ConV}})^{H_{\max}-L_n^{\text{ConV}}}. \quad (1)$$

#### 3.3.3. Xác suất dừng của hệ thống

$$\text{OP}_n^{\text{ProP}} = 1 - \sum_{T_S=G_{\min}}^{H_{\max}} \left\{ \begin{aligned} & \left( \frac{T_S - 1}{G_{\min} - 1} \right) (\theta_{\text{SR}}^{\text{ProP}})^{G_{\min}} (1 - \theta_{\text{SR}}^{\text{ProP}})^{T_S - G_{\min}} \\ & \times \sum_{L_{n,\text{Case 1}}^{\text{ProP}}=0}^{G_{\min}} \sum_{\substack{L_{n,\text{Case 2}}^{\text{ProP}}=0 \\ L_{n,\text{Case 1}}^{\text{ProP}} + L_{n,\text{Case 2}}^{\text{ProP}} \geq G_{\min}}}^{H_{\max} - T_S} \\ & \times \left( \frac{G_{\min}}{L_{n,\text{Case 1}}^{\text{ProP}}} \right) (\theta_{\text{RU}_n}^{\text{ProP,Case 1}})^{L_{n,\text{Case 1}}^{\text{ProP}}} \\ & \times \left( 1 - \theta_{\text{RU}_n}^{\text{ProP,Case 1}} \right)^{G_{\min} - L_{n,\text{Case 1}}^{\text{ProP}}} \left( \frac{H_{\max} - T_S}{L_{n,\text{Case 2}}^{\text{ProP}}} \right) \\ & \times \left( \theta_{\text{RU}_n}^{\text{ProP,Case 2}} \right)^{L_{n,\text{Case 2}}^{\text{ProP}}} \left( 1 - \theta_{\text{RU}_n}^{\text{ProP,Case 2}} \right)^{H_{\max} - T_S - L_{n,\text{Case 2}}^{\text{ProP}}} \end{aligned} \right\}. \quad (2)$$

$$\text{SOP}_{\text{ConV}} = 1 - \sum_{L_R^{\text{ConV}}=G_{\min}}^{H_{\max}} \left\{ \begin{aligned} & \left( \frac{H_{\max}}{L_R^{\text{ConV}}} \right) (\theta_{\text{SR}}^{\text{ConV}})^{L_R^{\text{ConV}}} (1 - \theta_{\text{SR}}^{\text{ConV}})^{H_{\max} - L_R^{\text{ConV}}} \\ & \times \prod_{n=1}^N \left[ \sum_{L_n^{\text{ConV}}=G_{\min}}^{L_R^{\text{ConV}}} \left( \frac{L_R^{\text{ConV}}}{L_n^{\text{ConV}}} \right) (\theta_{\text{RU}_n}^{\text{ConV}})^{L_n^{\text{ConV}}} \right. \\ & \left. \times \left( 1 - \theta_{\text{RU}_n}^{\text{ConV}} \right)^{L_R^{\text{ConV}} - L_n^{\text{ConV}}} \right] \end{aligned} \right\}. \quad (3)$$

$$\text{SOP}_{\text{ProP}} = 1 - \sum_{T_S=G_{\min}}^{H_{\max}} \left\{ \begin{aligned} & \left( \frac{T_S - 1}{G_{\min} - 1} \right) (\theta_{\text{SR}}^{\text{ProP}})^{G_{\min}} (1 - \theta_{\text{SR}}^{\text{ProP}})^{T_S - G_{\min}} \\ & \times \prod_{n=1}^N \left[ \sum_{L_{n,\text{Case 1}}^{\text{ProP}}=0}^{G_{\min}} \left( \frac{G_{\min}}{L_{n,\text{Case 1}}^{\text{ProP}}} \right) (\theta_{\text{RU}_n}^{\text{ProP,Case 1}})^{L_{n,\text{Case 1}}^{\text{ProP}}} \right. \\ & \times \left( 1 - \theta_{\text{RU}_n}^{\text{ProP,Case 1}} \right)^{G_{\min} - L_{n,\text{Case 1}}^{\text{ProP}}} \\ & \times \sum_{\substack{L_{n,\text{Case 2}}^{\text{ProP}}=0 \\ L_{n,\text{Case 1}}^{\text{ProP}} + L_{n,\text{Case 2}}^{\text{ProP}} \geq G_{\min}}}^{H_{\max} - T_S} \left( \frac{H_{\max} - T_S}{L_{n,\text{Case 2}}^{\text{ProP}}} \right) \\ & \left. \times \left( \theta_{\text{RU}_n}^{\text{ProP,Case 2}} \right)^{L_{n,\text{Case 2}}^{\text{ProP}}} \left( 1 - \theta_{\text{RU}_n}^{\text{ProP,Case 2}} \right)^{H_{\max} - T_S - L_{n,\text{Case 2}}^{\text{ProP}}} \right] \end{aligned} \right\}. \quad (4)$$

### 3.3.4. Vấn đề kết hợp phân bố công suất và thời gian

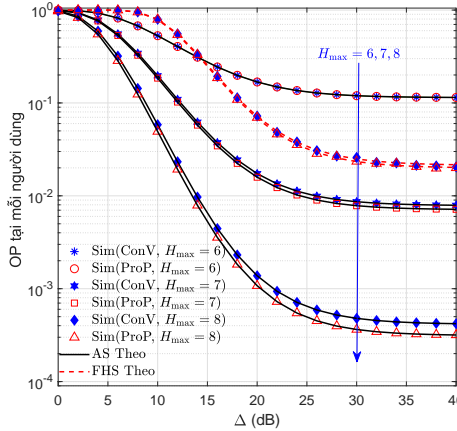
Bài toán tối ưu kết hợp phân bố công suất và thời gian được xác định theo 5 và được trình bày cụ thể trong các Giải thuật 1, 2 và 3.

$$\min_{\substack{0 < \tau_X < 1 \\ 0 < \mu_X < 1}} \text{SOP}_X. \quad (5)$$

### 3.4. Kết quả mô phỏng và thảo luận

Phần này trình bày kết quả mô phỏng nhằm xác thực phân tích và đánh giá ảnh hưởng tham số lên OP, SOP của hai phương án ConV và ProP, đồng thời xác định cấu hình tối ưu.

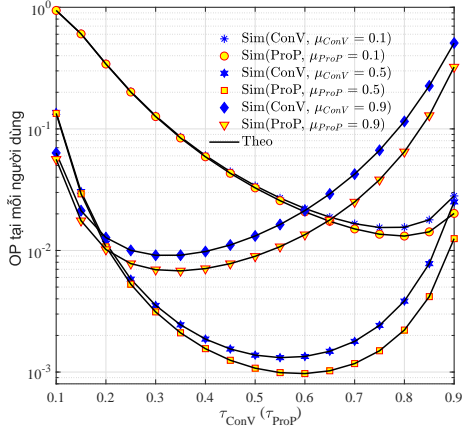
Kết quả Hình 3.2 cho thấy OP bão hòa tại vùng SNR cao, xác nhận CCI là yếu tố giới hạn hiệu năng. Việc tăng  $H_{\max}$  cải thiện đáng kể độ tin cậy (giảm tới 95% trong một số kịch bản), nhưng đánh đổi bằng độ trễ cao hơn. Trong khi ProP luôn vượt trội so với ConV nhờ cơ chế tích lũy gói FC.



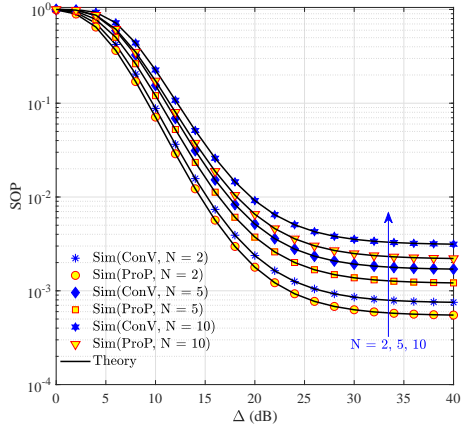
Hình 3.2: OP tại  $U_n$  với  $\Delta$  (dB) khi  $\mu_{\text{ConV}} = \mu_{\text{ProP}} = 0.5$ ,  $\tau_{\text{ConV}} = \tau_{\text{ProP}} = 0.5$ .

Hình 3.3 chỉ ra rằng OP phụ thuộc mạnh vào tham số  $\tau_X$ , và tồn tại một giá trị  $\tau_X$  tối ưu ứng với mỗi  $\mu_X$  nhằm tối thiểu hóa OP. Hiệu năng gần tối ưu đạt được khi  $\mu_X \approx 0.5$ , phản ánh sự cân bằng công suất giữa hai chặng.

Kết quả Hình 3.4 cho thấy SOP giảm theo  $\Delta$  và bão hòa ở vùng SNR cao do CCI chi phối. Phương án ProP luôn đạt SOP thấp hơn ConV, trong khi SOP tăng theo số lượng người dùng  $N$  do xác suất dừng gia tăng.

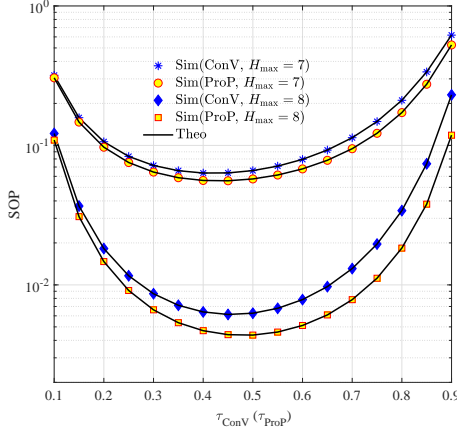


Hình 3.3: OP tại  $U_n$  theo  $\tau_{\text{ConV}}$  và  $\tau_{\text{ProP}}$  khi  $\Delta = 20$  dB và  $H_{\text{max}} = 8$ .

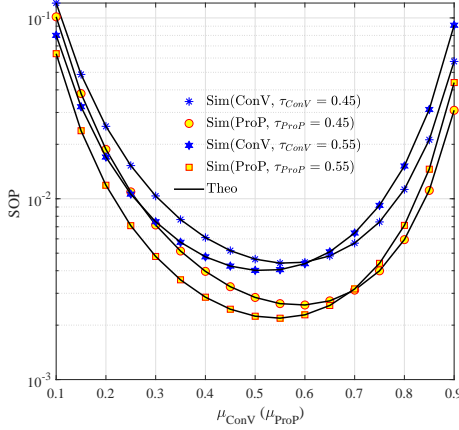


Hình 3.4: SOP theo  $\Delta$  (dB) khi  $\mu_{\text{ConV}} = \mu_{\text{ProP}} = 0.5$ ,  $\tau_{\text{ConV}} = \tau_{\text{ProP}} = 0.5$  và  $H_{\text{max}} = 8$ .

Kết quả Hình 3.5 thể hiện SOP giảm rõ rệt khi  $H_{\text{max}}$  tăng, đồng thời tồn tại giá trị  $\tau_X$  tối ưu giúp tối thiểu hóa SOP. Phương án ProP mang lại mức cải thiện rõ rệt so với phương án truyền thống, qua đó khẳng định hiệu quả của cơ chế tích lũy gói trong nâng cao độ tin cậy.



Hình 3.5: SOP theo  $\tau_{ConV}$  ( $\tau_{ProP}$ ) khi  $\Delta = 20$  dB,  $\mu_{ConV} = \mu_{ProP} = 0.65$ .

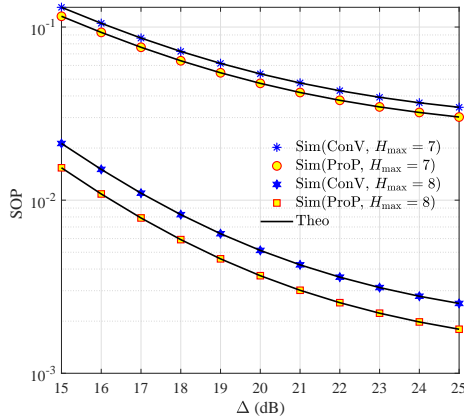


Hình 3.6: SOP theo  $\mu_{ConV}$  và  $\mu_{ProP}$  khi  $\Delta = 15$  dB,  $N = 8$  và  $H_{max} = 9$ .

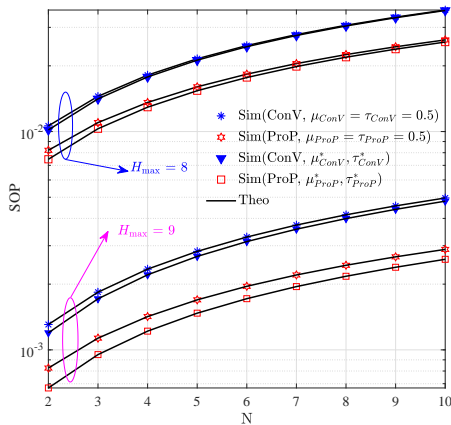
Hình 3.6 cho thấy SOP phụ thuộc mạnh vào  $\mu_X$ , và tồn tại giá trị  $\mu_X$  tối ưu cho từng phương án. Kết hợp với Hình 3.5, cho thấy việc tối ưu đồng thời phân bổ công suất và thời gian là cần thiết để đạt hiệu năng tối ưu.

Hình 3.7 cho thấy SOP giảm đáng kể khi áp dụng các tham số tối ưu ( $\mu_X, \tau_X$ ), đặc biệt trong vùng  $\Delta$  và  $H_{max}$  lớn. Đồng thời, khoảng cách hiệu năng giữa ProP và ConV gia tăng khi  $H_{max}$  tăng, cho thấy việc kết hợp tối ưu

tài nguyên với cơ chế tích lũy gói FC không chỉ cải thiện hiệu năng mà còn mở rộng khoảng cách so với phương án truyền thống.



Hình 3.7: SOP theo  $\Delta$  (dB) với các giá trị tối ưu của  $(\mu_X, \tau_X)$  khi  $N = 5$ .



Hình 3.8: SOP theo số lượng người dùng  $N$  khi  $\Delta = 15$  dB.

Hình 3.8 cho thấy SOP có xu hướng gia tăng theo số lượng người dùng  $N$ , phản ánh sự suy giảm hiệu năng bảo mật trong các kịch bản mật độ cao. Tuy nhiên, phương án ProP luôn đạt hiệu năng vượt trội so với các phương

án còn lại. Đáng chú ý, khi  $H_{\max}$  tăng, hiệu năng của ProP tiếp tục được cải thiện, qua đó khẳng định vai trò quan trọng của cơ chế tích lũy gói, đặc biệt trong các môi trường đa người dùng phức tạp.

### 3.5. Kết luận chương

Chương 3 đề xuất và phân tích mô hình HSTRN sử dụng mã Fountain dưới tác động của CCI, trong đó cơ chế tích lũy gói tại trạm chuyên tiếp giúp cải thiện đáng kể độ tin cậy. Các biểu thức tường minh cho OP và SOP của hai phương án ConV và ProP được xây dựng và kiểm chứng bằng mô phỏng, cho thấy hiệu năng bị giới hạn bởi CCI ở vùng SNR cao, trong khi ProP vượt trội nhờ tích lũy gói, với SOP giảm 20%–50% và OP giảm tới 95% khi tăng  $H_{\max}$ , đánh đổi bằng độ trễ cao hơn. Bài toán tối ưu tài nguyên xác nhận sự tồn tại của cấu hình tối ưu  $(\mu, \tau)$ , nhấn mạnh vai trò của phân bổ tài nguyên trong nâng cao hiệu năng. Tuy nhiên, mô hình hiện tại chưa xét các kịch bản nhiễu R, tối ưu hiệu quả sử dụng phổ và mức độ bảo mật của hệ thống. Các vấn đề này sẽ được mở rộng trong chương tiếp theo thông qua tích hợp NOMA và lựa chọn chuyên tiếp.

## Chương 4: Hệ thống NOMA–HSTRN sử dụng mã Fountain và PRS

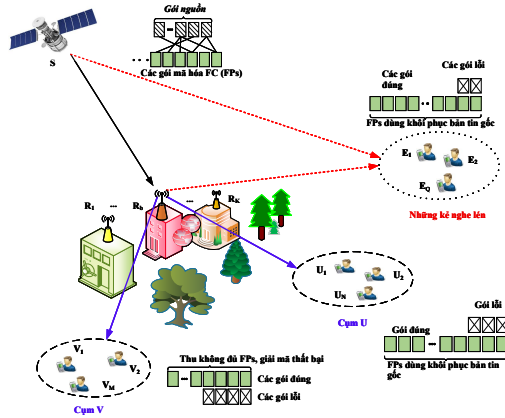
### 4.1. Giới thiệu

Nội dung của Chương 4 được công bố trong các Công trình  $J_1$  và  $C_2$ :  
[ $J_1$ ]. N. V. Toan, T. T. Duy, P. N. Son, P. V. Tuan, and T. L. Thanh, “Security-Reliability analysis of NOMA-assisted hybrid satellite-terrestrial relay multicast transmission networks using Fountain codes and partial relay selection in the presence of multiple eavesdroppers,” *EAI Endorsed Transactions on Industrial Networks and Intelligent Systems*, vol. 12, no. 3, Apr. 2025.

[ $C_2$ ]. N. V. Toan, N. V. Hien, P. X. Minh, and P. N. Son, “Performance Evaluation of Hybrid Satellite–Terrestrial Relaying Broadcast Networks Using Fountain Codes and NOMA,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Consumer Electronics–Asia (ICCE-Asia)*, Danang, Vietnam, Jul. 2024, pp. 1–4, doi: 10.1109/ICCE-Asia63397.2024.10773917.

### 4.2. Mô hình hệ thống

Hệ thống PLS–HSTRN gồm vệ tinh S truyền dữ liệu tới hai cụm người dùng U và V thông qua  $K$  trạm chuyên tiếp do không tồn tại liên kết trực tiếp. Một trạm  $R_b$  được chọn theo cơ chế PRS dựa trên chất lượng kênh tốt nhất. Hệ thống tồn tại  $Q$  thiết bị nghe lén có khả năng thu tín hiệu từ S và  $R_b$ , do đó chiến lược ngẫu nhiên hóa và chuyên tiếp được áp dụng để tăng cường bảo mật. Tất cả các nút sử dụng một ăng-ten và hoạt động ở chế độ bán song công.



Hình 4.1: Mô hình hệ thống HSTRN sử dụng FC.

Trên cơ sở mô hình hệ thống, Luận án xác định được biểu thức tín hiệu thu tại các cụm người dùng và nhóm thiết bị nghe lén. Từ đó xác định SNR, làm cơ sở để phân tích phẩm chất và bảo mật lớp vật lý của hệ thống.

Bảng 4.1: Xử lý tín hiệu tại  $R_b$  và  $E_q$  trong hai khe thời gian

Nút thu	Khe thời gian thứ nhất	Khe thời gian thứ hai
$R_b$	<b>Trường hợp 1:</b> $R_b$ giải mã thành công cả hai gói $p_V$ và $p_U$ từ S	$R_b$ mã hóa lại và chuyển tiếp $p_V$ , $p_U$ đến hai cụm người dùng
	<b>Trường hợp 2:</b> $R_b$ giải mã thành công $p_V$ nhưng không giải mã được $p_U$	$R_b$ mã hóa lại và chỉ chuyển tiếp $p_V$ đến cụm V
$E_q$	<b>TH 3.1:</b> $E_q$ giải mã thành công cả $p_V$ và $p_U$ từ S	Không thực hiện giải mã trong khe thứ hai
	<b>TH 3.2:</b> $E_q$ giải mã được $p_V$ nhưng không giải mã được $p_U$	$E_q$ thực hiện SIC, loại bỏ $p_V$ và giải mã $p_U$ từ $R_b$
	<b>TH 3.3:</b> $E_q$ giải mã được $p_V$ từ S	Không giải mã $p_V$ trong khe thứ hai

### 4.3. Phân tích hiệu năng hệ thống

#### 4.3.1. Xác suất giải mã thành công một gói FC

Thực hiện giải tích toán học rút ra các biểu thức tường minh xác định

xác suất giải mã một gói FC trong các trường hợp được mô tả trong Bảng 4.1.

#### 4.3.2. Đánh giá độ tin cậy của hệ thống

$$\begin{aligned} \text{OP}_U = 1 - \sum_{r=G_{\min}}^{H_{\max}} \binom{H_{\max}}{r} (\theta_{R_b, p_V, p_U})^r (1 - \theta_{R_b, p_V, p_U})^{H_{\max} - r} \\ \times \left[ \sum_{l=G_{\min}}^r C_r^l \chi_{U, p_U}^l (1 - \chi_{U, p_U})^{r-l} \right]^N. \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{OP}_V = 1 - \sum_{t_{\text{tot}}=G_{\min}}^{H_{\max}} \sum_{t_1=0}^{t_{\text{tot}}} \binom{H_{\max}}{t_1} \binom{H_{\max} - t_1}{t_{\text{tot}} - t_1} \\ \times (\theta_{R_b, p_V, p_U})^{t_1} (\theta_{R_b, p_V, \bar{p}_U})^{t_{\text{tot}} - t_1} \times (1 - \theta_{R_b, p_V, p_U} - \theta_{R_b, p_V, \bar{p}_U})^{H_{\max} - t_{\text{tot}}} \\ \times \left[ \sum_{r_1=0}^{t_1} \sum_{r_2=0, r_1+r_2 \geq G_{\min}}^{t_2} \binom{t_1}{r_1} \binom{t_2}{r_2} (\chi_{V, p_V})^{r_1} (1 - \chi_{V, p_V})^{t_1 - r_1} \right]^M \\ \times (\tau_{V, p_V})^{r_2} (1 - \tau_{V, p_V})^{t_2 - r_2} \right]^M. \end{aligned} \quad (7)$$

$$\text{SOP} = 1 - (1 - \text{OP}_U) \times (1 - \text{OP}_V). \quad (8)$$

#### 4.3.3. Đánh giá độ bảo mật của hệ thống

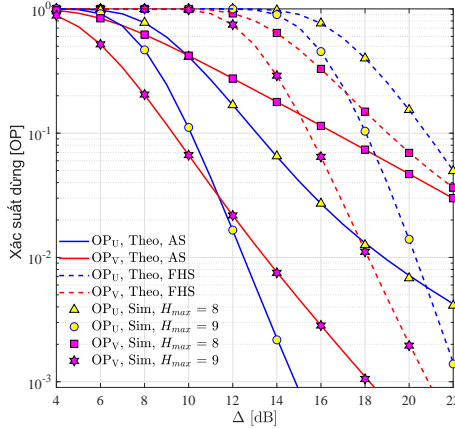
$$\text{IP}_{E_q, p_i} = \sum_{r=G_{\min}}^{H_{\max}} \binom{H_{\max}}{r} (\Lambda_{E_q, p_i})^r (1 - \Lambda_{E_q, p_i})^{H_{\max} - r}, \quad (9)$$

$$\text{IP}_i = 1 - (1 - \text{IP}_{E_q, p_i})^Q. \quad (10)$$

$$\text{SIP} = \text{IP}_U + \text{IP}_V - \text{IP}_U \times \text{IP}_V. \quad (11)$$

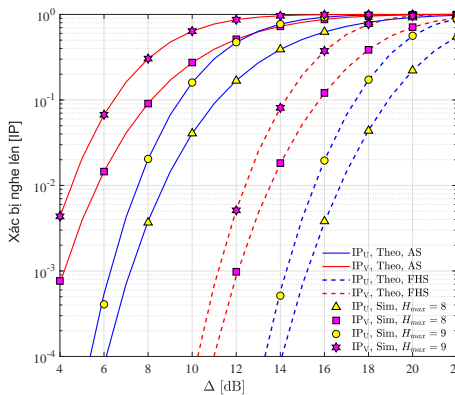
### 4.4. Kết quả và thảo luận

Trong phần này, các kết quả mô phỏng được trình bày nhằm xác thực các biểu thức giải tích và đánh giá ảnh hưởng của các tham số hệ thống.



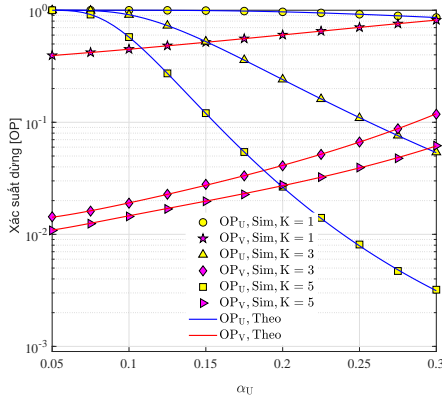
Hình 4.2: OP của các cụm khảo sát theo  $\Delta$  (dB) với  $G_{\min} = 8$  và  $\alpha_U = 0.25$ .

Hình 4.2 cho thấy hiệu năng phụ thuộc mạnh vào điều kiện kênh, trong đó kênh AS vượt trội so với FHS (ví dụ  $OP_V$  giảm từ  $4 \times 10^{-1}$  xuống  $2 \times 10^{-3}$  tại  $\Delta = 16$  dB). Tăng  $H_{\max}$  cải thiện đáng kể hiệu năng trong FHS (giảm tới 93.3%) nhờ cơ chế tích lũy gói FC, nhưng đánh đổi bằng độ trễ. Ngoài ra,  $OP_U$  và  $OP_V$  đều giảm theo  $\Delta$ , trong đó  $OP_U$  suy giảm nhanh hơn ở vùng SNR cao nhờ hiệu quả của SIC.

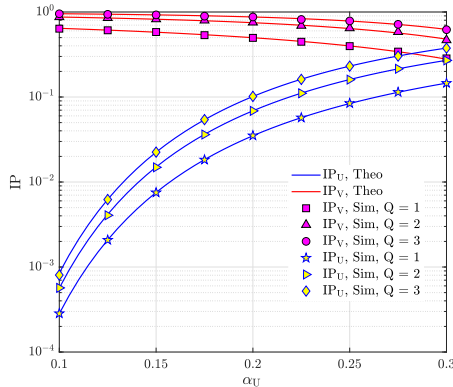


Hình 4.3: IP của các cụm theo  $\Delta$  (dB) với  $G_{\min} = 8$  và  $\alpha_U = 0.25$ .

Hình 4.3 cho thấy  $IP_U$  và  $IP_V$  tăng theo  $H_{\max}$  (ví dụ tại  $\Delta = 18$  dB,  $IP_U$  tăng 5 lần khi  $H_{\max}$  tăng từ 8 lên 9) do số lượng gói FC lớn hơn làm tăng khả năng giải mã của thiết bị nghe lén. Đồng thời,  $IP_i$  tăng theo  $\Delta$  và cao hơn trong kênh AS so với FHS. Kết hợp Hình 4.2 và Hình 4.3 cho thấy rõ sự đánh đổi giữa OP và IP.



Hình 4.4: OP của các cụm theo  $\alpha_U$  với  $\Delta = 10$  dB,  $G_{\min} = 8$  và  $H_{\max} = 9$ .

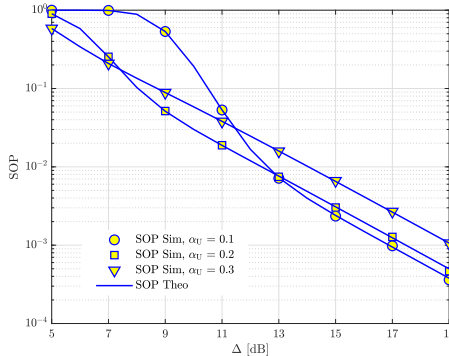


Hình 4.5: IP của các cụm theo  $\alpha_U$  với  $\Delta = 10$  dB,  $G_{\min} = 8$  và  $H_{\max} = 9$ .

Hình 4.4 cho thấy  $OP_U$  và  $OP_V$  biến thiên ngược chiều theo  $\alpha_U$  do ràng buộc phân bổ công suất trong NOMA và giảm mạnh khi  $K$  tăng nhờ PRS; ví dụ  $OP_U$  giảm hơn hai bậc độ lớn khi  $K$  tăng từ 1 lên 5 tại  $\alpha_U = 0.25$ . Ngoài ra, điểm cân bằng giữa hai cụm dịch chuyển khi  $K$  tăng, cho thấy vai trò của phân bổ công suất trong cân bằng độ tin cậy.

Hình 4.5 cho thấy IP tăng theo số lượng thiết bị nghe lén  $Q$  do khả năng thu thập gói FC được cải thiện. Đồng thời,  $IP_U$  tăng theo  $\alpha_U$ , trong khi  $IP_V$  giảm nhẹ, phản ánh cơ chế phân bổ công suất của NOMA. Do đó, việc lựa chọn  $\alpha_U$  phù hợp có thể kiểm soát mức độ bị nghe lén giữa các cụm.

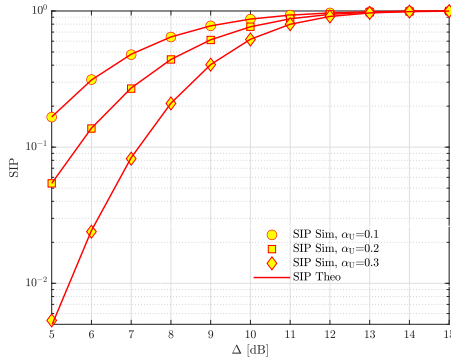
Hình 4.6 cho thấy SOP giảm nhanh theo  $\Delta$ , phản ánh sự cải thiện độ tin cậy hệ thống. Với  $\alpha_U = 0.1$ , SOP cao hơn trong vùng  $\Delta$  thấp nhưng giảm mạnh và trở nên thấp hơn khi  $\Delta$  tăng, do  $OP_U$  chi phối theo (8). Trong khi đó,  $\alpha_U = 0.3$  cho xu hướng giảm ổn định hơn. Do đó, việc lựa chọn phù hợp  $\alpha_U$  và  $\Delta$  cho phép điều chỉnh SOP theo yêu cầu thiết kế.



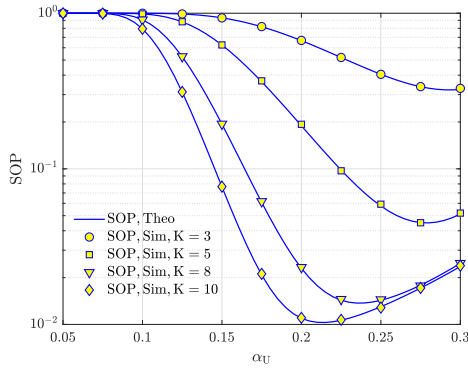
Hình 4.6: SOP theo  $\Delta$  với  $G_{\min} = 8$  và  $H_{\max} = 9$ .

Hình 4.7 cho thấy SIP tăng theo  $\Delta$  do khả năng thu chặn của các thiết bị nghe lén được cải thiện. Đáng chú ý, trong vùng  $\Delta$  thấp, lựa chọn  $\alpha_U = 0.3$  giúp giảm SIP, qua đó nâng cao hiệu năng bảo mật.

Hình 4.8 cho thấy SOP giảm mạnh khi  $K$  tăng nhờ độ lợi phân tập của PRS; ví dụ tại  $\alpha_U = 0.2$ , SOP giảm từ  $6 \times 10^{-1}$  xuống  $1 \times 10^{-2}$  khi  $K$  tăng từ 3 lên 10 (khoảng 60 lần). Ngoài ra, tồn tại giá trị  $\alpha_U$  tối ưu giúp tối thiểu hóa SOP, dịch chuyển theo  $K$ . Kết quả cũng chỉ ra rằng có thể tối ưu hiệu năng hệ thống thông qua phối hợp phân bổ công suất và số lượng K.



Hình 4.7: SIP theo  $\Delta$  với  $G_{\min} = 8$  và  $H_{\max} = 9$ .



Hình 4.8: SOP theo  $\alpha_U$  với  $\Delta = 7.5$  dB,  $G_{\min} = 8$  và  $H_{\max} = 10$ .

#### 4.5. Kết luận Chương 4

Chương 4 đã đề xuất và phân tích mô hình PLS–NOMA–HSTRN đa cụm, kết hợp NOMA, PRS và FC trong môi trường có nhiều thiết bị nghe lén, qua đó cải thiện đáng kể độ tin cậy và bảo mật. Các biểu thức tường minh cho OP, IP, SOP và SIP được xây dựng và kiểm chứng bằng mô phỏng, cho thấy sự phù hợp chặt chẽ. Kết quả chỉ ra rằng việc tăng  $K$  và  $H_{\max}$  giúp giảm mạnh OP và SOP, nhưng đồng thời làm gia tăng IP và SIP, phản ánh rõ rệt mối quan hệ đánh đổi giữa độ tin cậy và bảo mật. Ngoài ra, tồn tại cấu hình tham số tối ưu, đặc biệt là  $\alpha_U$ ,  $H_{\max}$  cho phép cân bằng hiệu năng giữa các

cum và tối ưu hóa hiệu năng hệ thống. Nhìn chung, kết quả khẳng định hiệu quả của mô hình đề xuất và tạo nền tảng cho việc mở rộng sang các kiến trúc nâng cao.

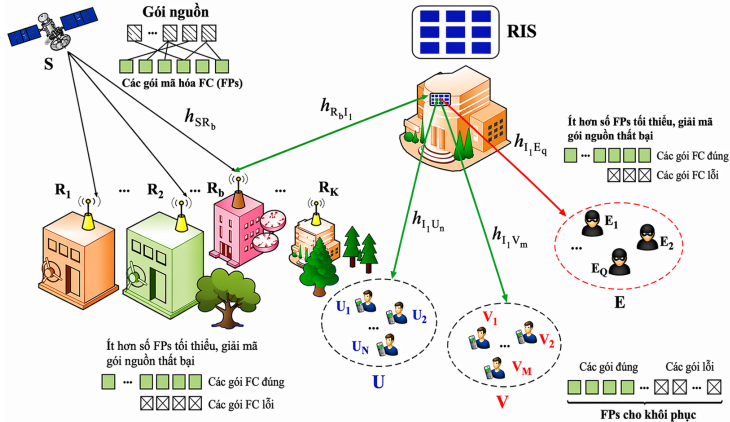
## Chương 5: Hệ thống NOMA–HSTRN sử dụng mã Fountain và RIS

### 5.1. Giới thiệu

Nội dung của Chương 5 được công bố trong các công trình  $J_2$ :

[ $J_2$ ]. Nguyễn Văn Toàn, Phạm Ngọc Sơn, Trần Trung Duy, Từ Lâm Thanh và Tạ Văn Thành, “Đánh giá hiệu năng của mạng chuyển tiếp lai ghép vệ tinh–trạm mặt đất sử dụng mã Fountain, NOMA và RIS,” *Tạp chí Hội Điện tử và Vô tuyến Việt Nam về Điện tử và Truyền thông (REV)*, tập 15, số 3, Jul.–Sep. 2025. DOI: 10.21553/rev-jec.415 (Tạp chí trong nước).

### 5.2. Mô hình hệ thống



Hình 5.1: Mô hình hệ thống.

Hình 5.1 minh họa mô hình PLS–HSTRN đề xuất, trong đó tín hiệu truyền từ vệ tinh S đến các cụm người dùng mặt đất thông qua cơ chế kết hợp FC và NOMA. Để hỗ trợ truyền dẫn, hệ thống sử dụng  $K$  trạm chuyển tiếp DF với chiến lược lựa chọn PRS, kết hợp với RIS gồm  $L$  phần tử nhằm cải thiện chất lượng kênh, giảm nhiễu và tăng cường bảo mật. Tín hiệu sau khi phản xạ được truyền tới hai cụm người dùng gồm cụm U ( $N$  người dùng gần) và cụm V ( $M$  người dùng xa). Đồng thời, hệ thống xét sự hiện diện của  $Q$  thiết bị nghe lén. Tất cả các nút sử dụng một ăng-ten, hoạt động bán song công và quá trình truyền diễn ra trong hai khe thời gian.

### 5.2.1. Mô hình kênh truyền

Phần này trình bày mô hình kênh vệ tinh–mặt đất và mặt đất–mặt đất, làm cơ sở cho quá trình phân tích hệ thống.

### 5.2.2. Mô hình tín hiệu

Xây dựng mô hình tín hiệu và các biểu thức SNR (SINR) cho hệ thống đề xuất có RIS theo hai khe thời gian, đồng thời thiết lập hai mô hình tham chiếu (AF và WoRIS) làm cơ sở so sánh hiệu năng độ tin cậy và bảo mật.

## 5.3. Phân tích hiệu năng hệ thống

### 5.3.1. Xác suất giải mã thành công một gói FC

Phần này xây dựng các biểu thức xác suất giải mã thành công gói FC tại các nút thu mặt đất.

### 5.3.2. Xác suất dừng của cụm và hệ thống

$$\text{OP}_U = 1 - \sum_{r=G_{\min}}^{H_{\max}} \binom{H_{\max}}{r} (\theta_{R_b}^{p_V, p_U})^r (1 - \theta_{R_b}^{p_V, p_U})^{H_{\max} - r} \times \left[ \sum_{p=G_{\min}}^r \binom{r}{p} (\chi_{U_n}^{p_U})^p (1 - \chi_{U_n}^{p_U})^{r-p} \right]^N. \quad (12)$$

$$\text{OP}_V = 1 - \sum_{t_{\text{tot}}=G_{\min}}^{H_{\max}} \sum_{t_1=0}^{t_{\text{tot}}} \left[ \begin{aligned} &\times \binom{H_{\max}}{t_1} \binom{H_{\max}-t_1}{t_{\text{tot}}-t_1} (\theta_{R_b}^{p_V, p_U})^{t_1} \\ &\times (\theta_{R_b}^{p_V, \bar{p}_U})^{t_{\text{tot}}-t_1} (1 - \theta_{R_b}^{p_V, p_U} - \theta_{R_b}^{p_V, \bar{p}_U})^{H_{\max}-t_{\text{tot}}} \end{aligned} \right] \times \left[ \begin{aligned} &\times \sum_{r_1=0}^{t_1} \sum_{\substack{r_2=0 \\ r_1+r_2 \geq G_{\min}}}^{t_2} \binom{t_1}{r_1} \binom{t_2}{r_2} (\chi_{V_m}^{p_V})^{r_1} (1 - \chi_{V_m}^{p_V})^{t_1-r_1} \\ &\times (\tau_{V_m}^{p_V})^{r_2} (1 - \tau_{V_m}^{p_V})^{t_2-r_2} \end{aligned} \right]^M. \quad (13)$$

SOP được định nghĩa là xác suất mà ít nhất một trong hai cụm dừng:

$$\text{SOP} = 1 - (1 - \text{OP}_U) (1 - \text{OP}_V). \quad (14)$$

### 5.3.3. Xác suất bị nghe lén của cụm và hệ thống

Sử dụng phương pháp giải tích và căn cứ vào Bảng 5.1, Xác suất bị nghe lén được xác định theo công thức (15) và (16).

Bảng 5.1. Các kịch bản nghe lén thành công các gói mã Fountain

Gói FC	$R_b$	$E_q$
$PU$	$\gamma_{S,R_b}^{pv} > \gamma_R^{th}, \gamma_{S,R_b}^{pu} > \gamma_R^{th}$	$\gamma_{R_b,E_q}^{pv} > \gamma_E^{th}, \gamma_{R_b,E_q}^{pu} > \gamma_E^{th}$
$PV$	<b>Trường hợp 1:</b> $\gamma_{S,R_b}^{pv} > \gamma_R^{th}, \gamma_{S,R_b}^{pu} > \gamma_R^{th}$	$\gamma_{R_b,E_q}^{pv} > \gamma_E^{th}$
	<b>Trường hợp 2:</b> $\gamma_{S,R_b}^{pv} > \gamma_R^{th}, \gamma_{S,R_b}^{pu} \leq \gamma_R^{th}$	$\psi_{R_b,E_q}^{pv} > \gamma_E^{th}$

$$IP_U = \sum_{r=G_{\min}}^{H_{\max}} \binom{H_{\max}}{r} (\theta_{R_b}^{pv,pu})^r (1 - \theta_{R_b}^{pv,pu})^{H_{\max}-r} \times \left\{ 1 - \left[ \sum_{p=G_{\min}}^r \binom{r}{p} (\chi_{E_q}^{pu})^p (1 - \chi_{E_q}^{pu})^{r-p} \right]^Q \right\}. \quad (15)$$

$$IP_V = \left[ \begin{aligned} &\times \sum_{t_{\text{tot}}=G_{\min}}^{H_{\max}} \sum_{t_1=0}^{t_{\text{tot}}} \binom{H_{\max}}{t_1} \binom{H_{\max}-t_1}{t_{\text{tot}}-t_1} (\theta_{R_b}^{pv,pu})^{t_1} \\ &\times (\theta_{R_b}^{pv,\bar{pu}})^{t_{\text{tot}}-t_1} (1 - \theta_{R_b}^{pv,pu} - \theta_{R_b}^{pv,\bar{pu}})^{H_{\max}-t_{\text{tot}}} \end{aligned} \right] \times \left\{ 1 - \left[ \begin{aligned} &\times \sum_{r_1=0}^{t_1} \sum_{\substack{r_2=0 \\ r_1+r_2 \geq G_{\min}}}^{t_2} \binom{t_1}{r_1} \binom{t_2}{r_2} (\chi_{E_q}^{pv})^{r_1} (1 - \chi_{E_q}^{pv})^{t_1-r_1} \\ &\times (\tau_{E_q}^{pv})^{r_2} (1 - \tau_{E_q}^{pv})^{t_2-r_2} \end{aligned} \right]^Q \right\}. \quad (16)$$

Xác suất bị nghe lén của toàn hệ thống (SIP) được xác định bởi

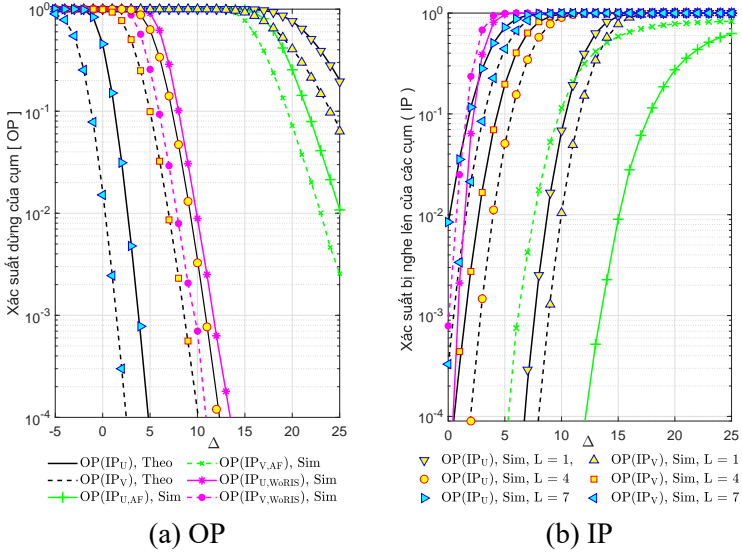
$$SIP = 1 - (1 - IP_U)(1 - IP_V). \quad (17)$$

#### 5.4. Kết quả và thảo luận

Trình bày các kết quả mô phỏng đánh giá hiệu năng hệ thống qua OP, IP, SOP và SIP, so sánh với mô hình tham chiếu làm rõ ưu điểm, sự đánh đổi.

Kết quả hình 5.2 cho thấy OP giảm và IP tăng khi  $\Delta$  hoặc  $L$  tăng, phản

ánh đánh đổi tin cậy–bảo mật; với  $L$  đủ lớn, RIS mang lại độ lợi tương tự như độ lợi phân tập giúp hệ thống vượt trội so với các mô hình tham chiếu, nhưng cần tối ưu  $L$  để cân bằng OP và IP.



Hình 5.2: OP và IP theo  $\Delta$  [dB] với  $L, G_{\min} = 4, H_{\max} = 6$  và  $\alpha_U = 0.25$ .

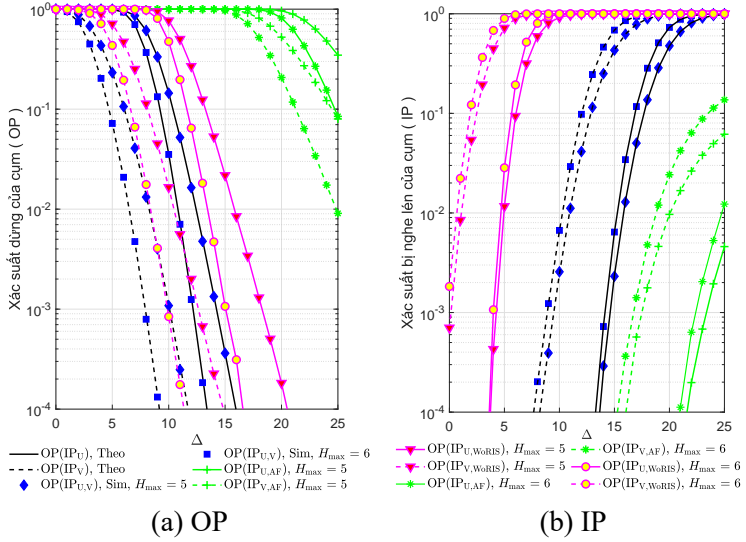
Hình 5.3 cho thấy tăng  $H_{\max}$  cải thiện mạnh độ tin cậy (OP) nhưng làm suy giảm bảo mật (IP), kéo theo đánh đổi ba chiều: độ trễ–tin cậy–bảo mật.

Kết quả từ Hình 5.4 chỉ ra rằng SOP và SIP thể hiện rõ đánh đổi ở mức hệ thống; mô hình đề xuất đạt điểm cân bằng tối ưu thông qua điều chỉnh  $L$  và  $\alpha_U$ , vượt trội về tính linh hoạt so với các mô hình tham chiếu.

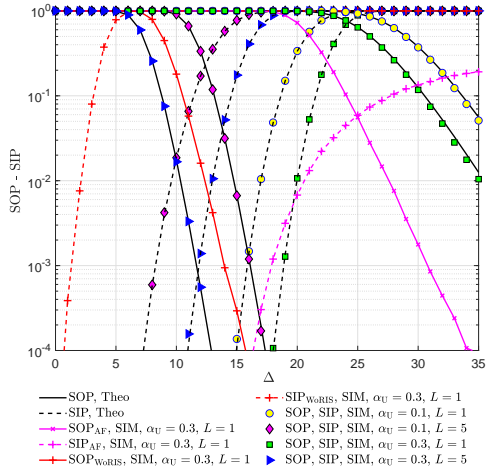
Hình 5.5 cho thấy  $\alpha_U, K$  ảnh hưởng mạnh đến độ tin cậy; PRS kết hợp RIS giúp cải thiện lớn hiệu năng và tồn tại điểm cân bằng tối ưu giữa các cụm.

Kết quả từ Hình 5.6 cho thấy số lượng thiết bị nghe lén  $Q$  làm gia tăng IP và SIP, trong đó SIP bị chi phối bởi cụm có IP lớn hơn; điều chỉnh  $\alpha_U$  cho phép cân bằng mức độ bảo mật giữa các cụm.

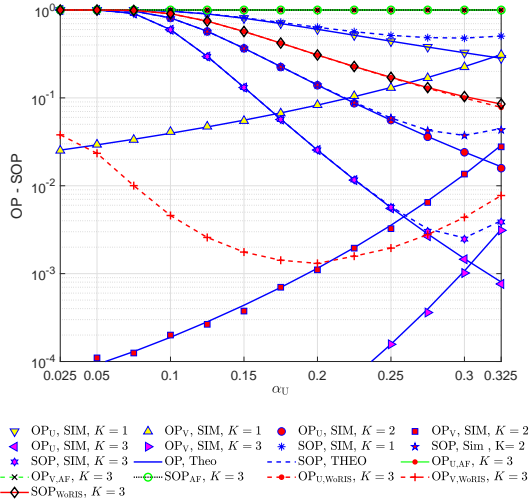
Hình 5.7 chỉ ra rằng việc kết hợp tối ưu  $\alpha_U$  và  $L$  giúp thu hẹp khoảng cách giữa các chỉ tiêu OP/IP và SOP/SIP, qua đó đạt cân bằng đồng thời yêu cầu về tin cậy và bảo mật.



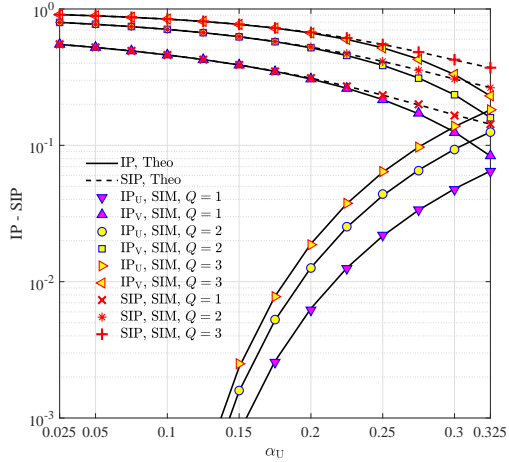
Hình 5.3: OP và IP theo  $\Delta$  [dB] với  $H_{\max}$ ,  $G_{\min} = 4$ ,  $L = 4$  và  $\alpha_U = 0.2$ .



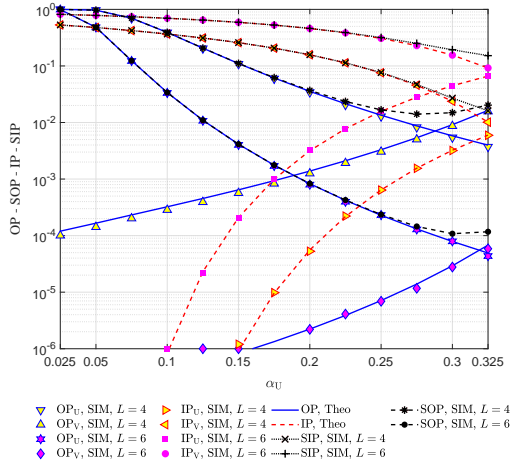
Hình 5.4: SOP và SIP theo  $\Delta$  [dB] với  $\alpha_U$ ,  $L$ ,  $H_{\max} = 6$  và  $G_{\min} = 4$ .



Hình 5.5: SOP theo  $\alpha_U$  với  $\Delta = 10$  dB,  $L = 4$ ,  $G_{\min} = 4$  và  $H_{\max} = 6$ .



Hình 5.6: SOP theo  $\alpha_U$  khi  $\Delta = 18$  dB,  $L = 4$ ,  $N = 4$ ,  $M = 2$



Hình 5.7: OP, IP, SOP và SIP theo  $\alpha_U$  khi  $\Delta = 16$  dB,  $N = 4$ ,  $M = 3$ ,  $K = 3$ .

## 5.5. Kết luận chương 5

Chương này đề xuất và phân tích mô hình PLS–HSTRN tích hợp RIS, kết hợp NOMA, FC và PRS trong kịch bản đa cụm có nghe lén, cho thấy khả năng nâng cao đồng thời độ tin cậy và bảo mật so với các mô hình tham chiếu. Các biểu thức tường minh cho OP, SOP, IP và SIP được xây dựng và kiểm chứng. Kết quả chỉ ra các đánh đổi cốt lõi:  $L$  tăng độ lợi nhưng làm tăng rủi ro nghe lén;  $H_{\max}$  cải thiện giải mã nhưng gia tăng độ trễ và suy giảm bảo mật; trong khi phân bổ công suất NOMA kết hợp PRS–RIS cho phép điều chỉnh linh hoạt hiệu năng. Đồng thời, tồn tại các cấu hình tối ưu nhằm cân bằng yêu cầu hệ thống. Các kết quả này cung cấp cơ sở định lượng quan trọng cho thiết kế và tối ưu HSTRN trong các kịch bản yêu cầu độ tin cậy và bảo mật cao.

## Chương 6: Kết luận và hướng phát triển của Luận án

### 6.1. Một số kết quả đạt được của luận án

1. Đề xuất và phân tích mô hình HSTRN sử dụng FC trong môi trường có CCI, phù hợp với kịch bản mật độ cao và tái sử dụng phổ. Cơ chế tích lũy gói giúp cải thiện rõ rệt hiệu năng so với phương án truyền thống. Các biểu thức tường minh cho OP, SOP được xây dựng, kiểm chứng bằng mô phỏng, đồng thời bài toán tối ưu tài nguyên được thiết lập nhằm cực tiểu hóa SOP.

2. Mở rộng sang kịch bản đa cụm, tích hợp NOMA, PRS và FC trong

môi trường có nghe lén. Hiệu năng được cải thiện nhờ hiệu quả phổ, độ lợi phân tập và khả năng thích nghi của FC. Các biểu thức OP, SOP, IP và SIP cho phép đánh giá định lượng, làm rõ đánh đổi giữa độ tin cậy và bảo mật, khẳng định vai trò của các kỹ thuật tích hợp.

3. Đề xuất mô hình PLS–NOMA–HSTRN tích hợp RIS kết hợp FC và PRS. RIS cho phép tái cấu hình môi trường truyền, tăng độ lợi kênh và điều khiển tín hiệu thu. Kết quả cho thấy số phần tử RIS ảnh hưởng đáng kể đến hiệu năng, đồng thời làm rõ đánh đổi giữa độ tin cậy, bảo mật và độ trễ.

4. Hoàn thiện lý thuyết tích HSTRN sử dụng FC với các biểu thức tường minh, cho phép đánh giá hiệu năng dưới nhiều tham số như kênh truyền, CCI, phân bổ công suất, cấu hình RIS, số lượng relay và quy mô người dùng, qua đó cung cấp cơ sở định lượng cho thiết kế và tối ưu hệ thống.

### *6.2. Hướng phát triển của Luận án*

Trên cơ sở các kết quả đạt được và hướng phát triển của HSTRN trong bối cảnh 6G, một số hướng nghiên cứu tiềm năng được xác định như sau.

1. Mở rộng sang mô hình hai chiều (TWR) nhằm nâng cao hiệu quả phổ và bảo mật.

2. Tích hợp RIS, EH và CR để cải thiện hiệu quả phổ và năng lượng.

3. Phát triển cơ chế bảo mật nâng cao dựa trên CJ kết hợp EH.

4. Xem xét các điều kiện thực tế như SIC/CSI không hoàn hảo và các mô hình kênh tổng quát, cùng các kiến trúc như STAR-RIS.

5. Ứng dụng RSMA và học máy để tối ưu tài nguyên và điều khiển hệ thống thích nghi.

Các hướng này góp phần hoàn thiện cơ sở lý thuyết và định hướng triển khai thực tiễn cho HSTRN, trong đó một số nội dung bước đầu đã có kết quả và đã được công bố trong [J<sub>3</sub>].

## DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ

**J<sub>1</sub>**. Nguyen Van Toan, Tran Trung Duy, Pham Ngoc Son, Pham Viet Tuan and Tu Lam Thanh, “Security-Reliability Analysis of NOMA-Assisted Hybrid Satellite-Terrestrial Relay Multi-Cast Transmission Networks Using Fountain Codes and Partial Relay Selection with Presence of Multiple Eavesdroppers,” *EAI Endorsed Transactions on Industrial Networks and Intelligent Systems*, vol. 12, no. 3, Apr. 2025. DOI: 10.4108/eetinis.v12i3.8604, (Q3, Scopus).

**J<sub>2</sub>**. Nguyễn Văn Toàn, Phạm Ngọc Sơn, Trần Trung Duy, Từ Lâm Thanh và Tạ Văn Thành, “Đánh giá hiệu năng của mạng chuyển tiếp lai ghép vệ tinh–trạm mặt đất sử dụng mã Fountain, NOMA và RIS,” *Tạp chí hội Điện tử và Vô tuyến Việt Nam về Điện tử và Truyền thông (REV)*, tập 15, số 3, Jul.–Sep. 2025. DOI: 10.21553/rev-jec.415 (Tạp chí trong nước).

**J<sub>3</sub>**. Nguyen Van Toan, Nguyen Thi Hau, Pham Minh Nam, Pham Ngoc Son and Tran Trung Duy, “Analysis of Security–Reliability Tradeoff of Two-Way Hybrid Satellite–Terrestrial Relay Schemes Using Fountain Codes, Successive Interference Cancellation, Digital Network Coding, Partial Relay Selection, and Cooperative Jamming,” *Telecom*, vol. 7, no. 1, Art. no. 5, 2026. DOI: 10.3390/telecom7010005 (ESCI, Scopus, Q<sub>2</sub>).

**C<sub>1</sub>**. Nguyen Van Toan, Tran Trung Duy, Pham Ngoc Son, Dang The Hung, Nguyen Quang Sang and Tu Lam Thanh, “Outage Performance Of Hybrid Satellite-Terrestrial Relaying Networks With Rateless Codes In Co-Channel Interference Environment,” in *2023 International Conference on System Science and Engineering*, Ho Chi Minh, Vietnam, pp. 468–473, Jul. 2023. DOI:10.1109/ICSSE58758.2023.10227228.

**C<sub>2</sub>**. Nguyen Van Toan, Nguyen Van Hien, Pham Xuan Minh and Pham Ngoc Son, “Performance Evaluation of Hybrid Satellite-Terrestrial Relaying Broadcast Networks Using Fountain Codes and NOMA,” in *2024 IEEE International Conference on Consumer Electronics-Asia (ICCE-Asia)*, Danang, Vietnam, pp. 1–4, Jul. 2024. DOI: 10.1109/ICCE-Asia63397.2024.10773917