

**BỘ THÔNG TIN VÀ TRUYỀN THÔNG
HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG**



NGUYỄN THỊ THU HIÊN

**NGHIÊN CỨU GIẢI PHÁP THIẾT KẾ VÀ ĐÁNH GIÁ
HIỆU NĂNG MÃ KÊNH CHO HỆ THỐNG THÔNG TIN
HẠP**

Chuyên ngành: Kỹ thuật Viễn thông

Mã số: 9.52.02.08

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

Công trình hoàn thành tại:

HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG

Người hướng dẫn khoa học:

- 1. PGS.TS. Lê Nhật Thăng**
- 2. PGS.TS. Nguyễn Thúy Anh**

Phản biện 1:

Phản biện 2:

Phản biện 3:

Luận án được bảo vệ trước hội đồng chấm luận án cấp Học viện họp tại:

HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG

vào hồi:

Có thể tìm hiểu luận án tại:

- 1. Thư viện Quốc gia Việt Nam**
- 2. Thư viện Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông**

CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ CỦA TÁC GIẢ

BÀI BÁO KHOA HỌC

- [J1] **Hien Nguyen Thu**, Hung Nguyen Viet, Thang Le Nhat, Channel capacity for High Altitude Platform stations employing coherent detection, *Tạp chí nghiên cứu khoa học và công nghệ Quân sự*, Số 46, 12/2016, tr. 36-42.
- [J2] **Nguyen Thu Hien**, Nguyen Viet Hung, Vu Van San, Le Nhat Thang, Design of a near-capacity channel code for High Altitude Platform systems, *Tạp chí nghiên cứu khoa học và công nghệ Quân sự*, Số 52, 12/2017, tr. 52-59.
- [J3] **Hien Thi Thu Nguyen**, Hung Viet Nguyen, Thang Nhat Le, Performance Upper Bounds of High Altitude Platform Systems over a Two-State Switched Channel, *International Journal of Applied Engineering Research*, ISSN 0973-4562, Volume 13, Number 18 (2018), pp. 13932-13939.

HỘI NGHỊ KHOA HỌC

- [C1] **Hien Thi Thu Nguyen**, Hung Viet Nguyen, Thang Nhat Le, Design of Near-Capacity Channel Codes for High Altitude Platform Systems over a Two-State Switched Channel Model, *Hội nghị quốc gia lần thứ 21 về Điện tử, Truyền thông và CNTT (REV-ECIT)*, 2018.

CÁC CÔNG TRÌNH CÓ LIÊN QUAN

- [J1] **Nguyễn Thu Hiền**, Lê Nhật Thăng, Vũ Thúy Hà, Phân tích hiệu năng mã kênh sử dụng kỹ thuật đường biên, *Tạp chí CNTT&TT – số chuyên san Đại học Thái Nguyên*, Tập 116, số 02, 2014, tr. 51-56.
- [J2] **Nguyễn Thu Hiền**, Lê Nhật Thăng, Nguyễn Thúy Anh, Nghiên cứu ứng dụng biểu đồ EXIT trong phân tích và thiết kế các hệ thống giải mã lặp, *Tạp chí nghiên cứu khoa học và công nghệ Quân sự*, Số 41, 10/2015, tr. 50-56.
- [J3] **Nguyen Thu Hien**, Vu Van San, Nguyen Viet Hung, Channel capacity of High Altitude Platform systems: A Case Study, *Journal of Information and Communication: Ministry of Information and Communications*, Vol. E-3, No. 14, p. 54-60, 2017.
- [J4] **Nguyen Thu Hien**, Vu Van San, Nguyen Viet Hung, Channel capacity for High Altitude Platform Systems employing non-coherent detection, *Journal of Science and Technology: Technical Universities*, No. 12/2017, p. 41-47.

MỞ ĐẦU

Trong lĩnh vực thông tin vô tuyến hiện nay, ngoài hai đại diện cơ bản và đã có những ưu thế nhất định là thông tin vô tuyến mặt đất và thông tin vệ tinh, thì trong những năm gần đây một giải pháp thông tin vô tuyến mới đã thu hút sự quan tâm của nhiều nước, nhiều tổ chức trên thế giới trong việc thiết kế, phát triển và triển khai thử nghiệm đó là: giải pháp thông tin sử dụng thiết bị bay. Trong giải pháp thông tin này, thiết bị bay (máy bay không người lái, máy bay nhỏ hoặc tàu bay) sẽ được sử dụng cho nhiều mục đích ứng dụng khác nhau bao gồm thông tin quân sự, theo dõi, giám sát, viễn thông, cung cấp vật tư y tế và các hoạt động cứu hộ. Tùy thuộc vào độ cao hoạt động mà thiết bị bay có thể là hạ tầng trên không tầm cao (HAP) hay hạ tầng trên không tầm thấp (LAP). Các HAP thường hoạt động trên không ở độ cao trên 17 km (độ cao của tầng bình lưu) và gần như cố định. Còn các LAP thường hoạt động trên không ở độ cao vài km, di chuyển nhanh và triển khai linh hoạt.

Khi được triển khai và vận hành đúng cách, HAP sẽ là một giải pháp thông tin vô tuyến hiệu quả và đáng tin cậy cho nhiều ứng dụng thực tế. Cụ thể, HAP có thể được sử dụng để thay thế một trạm gốc ở trên không cung cấp thông tin liên lạc vô tuyến. Mặt khác, HAP có thể hoạt động như thiết bị người dùng ở trên không (UE), được gọi là HAP di động, cùng tồn tại với thiết bị thu phát mặt đất. Hơn nữa, với độ cao có thể điều chỉnh, HAP cho phép thiết lập hiệu quả các đường truyền tín hiệu trực tiếp (LOS), do đó giảm thiểu suy hao và che khuất tín hiệu. Với những lợi thế như vậy, giải pháp thông tin HAP sẽ tạo ra cơ hội sử dụng các ứng dụng thông tin với giá thành hợp lý, thu hẹp khoảng cách về phát triển viễn thông giữa các nước phát triển và các nước đang phát triển, đóng góp vào sự phát triển của cách mạng công nghiệp 4.0.

Cũng như các hệ thống thông tin vô tuyến, hệ thống thông tin HAP vô tuyến (gọi tắt là hệ thống HAP) cũng chịu những ảnh hưởng của môi trường truyền lan vô tuyến làm cho đặc tính của kênh truyền tín hiệu chịu ảnh hưởng của hiện tượng pha-đỉnh, đặc biệt là hiện tượng pha-đỉnh đa đường, ngay cả khi hoạt động ở dải băng tần Ka. Để giảm thiểu ảnh hưởng của pha-đỉnh đa đường, một trong những giải pháp hiệu quả và bền vững là sử dụng mã kênh. Chính vì vậy, đối với hệ thống HAP, một số loại mã kênh như mã chập liên kết song song (PCCC), mã chập liên kết nối tiếp (SCCC), mã kiểm tra chẵn lẻ mật độ thấp (LDPC), mã chập liên kết nối tiếp với mã Reed Solomon, cũng đã được đề xuất sử dụng. Tuy nhiên, trong các nghiên cứu về mã kênh cho hệ thống HAP chỉ tập trung vào việc đánh giá hiệu năng mã kênh qua tham số là tỷ số lỗi bit (*BER*) hoặc tỷ số lỗi khung

(FER) mà không có đánh giá nào về hiệu năng tiếp cận dung lượng kênh. Trong khi đó, hiệu năng tiếp cận dung lượng kênh lại được xem như là một trong những tiêu chí thiết kế và đánh giá hiệu năng mã kênh trong các hệ thống thông tin. Chính vì vậy, đề tài “**Nghiên cứu giải pháp thiết kế và đánh giá hiệu năng mã kênh cho hệ thống thông tin HAP**” là một trong những hướng nghiên cứu có tính thời sự và có ý nghĩa khoa học sâu sắc.

Từ những khảo sát và phân tích ở trên, mục tiêu nghiên cứu của luận án là nghiên cứu thiết kế mã kênh tiếp cận dung lượng kênh cho hệ thống HAP qua một số mô hình kênh truyền HAP điển hình. Từ đó xây dựng mô hình giải tích để đánh giá hiệu năng của mã kênh tiếp cận dung lượng kênh.

Để đạt được mục tiêu nêu trên, các nhiệm vụ cụ thể cần phải giải quyết bao gồm: (1) nghiên cứu thiết lập các đường biên dung lượng kênh của hệ thống HAP qua ba mô hình kênh HAP điển hình; (2) nghiên cứu đề xuất và thiết kế mã kênh tiếp cận dung lượng kênh cho hệ thống HAP; (3) nghiên cứu xây dựng mô hình giải tích xác định đường biên xác suất lỗi để đánh giá hiệu năng mã kênh sử dụng cho hệ thống HAP.

Từ các nhiệm vụ nghiên cứu trên, phương pháp nghiên cứu của luận án là nghiên cứu lý thuyết kết hợp với mô phỏng. Cụ thể là, phương pháp nghiên cứu lý thuyết được sử dụng cho các nghiên cứu về nguyên lý hoạt động của các phần tử trong hệ thống HAP. Phương pháp tính toán số kết hợp với công cụ phần mềm mô phỏng được sử dụng để trong việc thiết lập đường biên dung lượng kênh, thiết kế mã kênh tiếp cận dung lượng kênh và xây dựng mô hình giải tích đánh giá hiệu năng mã kênh cho hệ thống HAP. Cuối cùng là các nhận xét, đánh giá dựa trên các kết quả đạt được, đưa ra các khuyến nghị.

Luận án được bố cục thành bốn chương với nội dung như sau:

- 📌 Chương 1. Tổng quan về vấn đề nghiên cứu
- 📌 Chương 2. Dung lượng kênh của hệ thống HAP
- 📌 Chương 3. Thiết kế mã kênh tiếp cận dung lượng cho hệ thống HAP
- 📌 Chương 4. Xây dựng mô hình giải tích xác định đường biên xác suất lỗi cho hệ thống HAP

CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN VỀ VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU

1.1. HẠ TẦNG TRÊN KHÔNG TẦM CAO

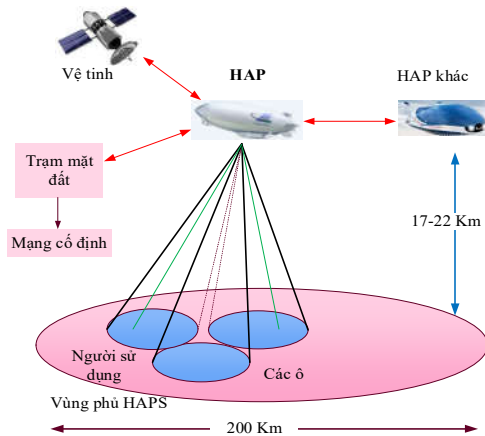
1.1.1. Giới thiệu chung

Theo tổ chức vô tuyến thế giới, HAP được định nghĩa như sau: “*HAP là một trạm được đặt trên một vật thể ở độ cao từ 20 km đến 50 km và tại điểm cố định, danh định, xác định tương đối so với trái đất*”.

Các dịch vụ viễn thông được cung cấp bởi hệ thống HAP bao gồm các dịch vụ băng rộng, các dịch vụ khẩn cấp và các dịch vụ truyền hình. Ngoài ra, HAP có thể cung cấp tốt các dịch vụ có sẵn ở cả hai hệ thống thông tin vô tuyến mặt đất và vệ tinh.

Hình 1.1 cũng thể hiện các kịch bản kết nối hệ thống HAP với hạ tầng viễn thông hiện có như vệ tinh, trạm gốc, trạm mặt đất,... ngoài kết nối liên HAP, để cung cấp các dịch vụ viễn thông.

Hình 1. 1. Hệ thống HAP được triển khai ở độ cao 17~22km



Trong những năm gần đây, một số dự án nghiên cứu triển khai hệ thống HAP tiêu biểu có thể kể đến như: dự án Sky Station ở Bắc Mỹ, dự án HALO-Proteus của Tập đoàn Công nghệ Thiên thần Hoa Kỳ, Dự án CAPANINA của Ủy ban Liên minh châu Âu, dự án Project Loon của Google và dự án máy bay không người lái phát Internet của Facebook,...

Để ứng dụng và triển khai hệ thống HAP thành công trong thực tế, một số thách thức quan trọng đối với hệ thống HAP như vị trí thông tin tối ưu, thời gian bay, vấn đề bảo mật, can nhiễu, kết nối với hạ tầng viễn thông hiện có, năng lượng hoạt động,... cần phải được giải quyết. Đặc biệt là việc đảm bảo thông tin tin cậy giữa HAP và các thiết bị thu phát mặt đất. Trong khi đó điều này cũng phụ thuộc nhiều vào ảnh hưởng của hiện tượng pha-đỉnh (đặc biệt là pha-đỉnh đa đường): liên quan đến môi trường truyền sóng, vị trí của thiết bị mặt đất (góc nâng). Do vậy, khi thiết kế các hệ thống thông tin dựa trên HAP, cần có những giải pháp và đánh giá được những tác động của các tham số thiết kế như: tỷ số tín hiệu trên tạp âm, phương thức điều chế, mức điều chế, mã kênh sử dụng, tỷ lệ mã, ... đến chất lượng của hệ thống như tỷ số lỗi bit (BER), tỷ số lỗi khung (FER),...

1.2. MÃ HÓA KÊNH

Như bàn luận trong phần 1.1, một trong những ảnh hưởng chính của sự suy giảm chất lượng tín hiệu thu trong kênh truyền HAP cũng như chất lượng của hệ thống HAP là hiện tượng pha-đỉnh đa đường. Để giải quyết hiện tượng này, một số giải pháp kỹ thuật có thể kể đến như: điều khiển công suất, phân tập, các phương pháp điều chế mã hóa thích ứng,... Trong số đó, giải pháp kỹ thuật truyền thông linh hoạt và bền vững thường được sử dụng là giải pháp sử dụng mã kênh theo cơ chế sửa lỗi hướng đi (FEC). Mã kênh và cơ chế mã hóa kênh không chỉ cần có các đặc tính mạnh về khả năng phát hiện và sửa lỗi, mà chúng còn phải đảm bảo hiệu năng tiếp cận dung lượng kênh.

Các mã kênh theo cơ chế FEC bao gồm mã dạng sóng và mã chuỗi có cấu trúc. Mã chuỗi có cấu trúc có thể chia thành ba loại: mã khối, mã chập và mã liên kết. Trong đó, các mã liên kết, được xây dựng từ các mã khối và/hoặc mã chập, sử dụng giải mã lặp, cho phép tạo ra các mã có xác suất lỗi giảm theo hàm mũ ở tốc độ nhỏ hơn dung lượng kênh, trong khi độ phức tạp chỉ tăng cấp đại số. Mã Turbo và mã kiểm tra chẵn lẻ mật độ thấp (LDPC) là những mã cho hiệu năng tiếp cận dung lượng kênh. Từ đó, các mã liên kết khác cũng được đề xuất như mã chập liên kết song song (PCCC), mã chập liên kết nối tiếp (SCCC) cũng cho thấy độ lợi mã hóa tương tự. Những mã này có hai đặc điểm chung là: (1) sử dụng bộ đan xen (bộ ngẫu nhiên) trong cấu trúc mã; (2) sử dụng kỹ thuật giải mã lặp đầu vào mềm - đầu ra mềm (SISO) cho hiệu năng BER gần với hiệu năng BER của bộ giải mã tối ưu. Tuy nhiên, SCCC cho hiệu năng BER tốt hơn so với PCCC ở vùng SNR lớn do hiện tượng sàn lỗi thấp hơn, khoảng cách tự do (d_{free}) của SCCC lớn hơn so với PCCC. Để đạt được hiệu năng tiếp cận dung lượng kênh, các mã chập không đều (IrCC) đã được đề xuất sử dụng trong cấu trúc của SCCC.

1.3. CÁC THAM SỐ ĐÁNH GIÁ HIỆU NĂNG MÃ KÊNH

- Tỷ số tín hiệu trên tạp âm (SNR)
- Tỷ số năng lượng bit trên mật độ tạp âm (E_b/N_0)
- Tỷ số lỗi bit (BER)
- Tỷ số lỗi khung (FER)
- Độ lợi mã hóa (G_c)
- Tiếp cận dung lượng kênh (d_{DCMC})

1.4. CÁC CÔNG TRÌNH NGHIÊN CỨU LIÊN QUAN, NHẬN XÉT VÀ HƯỚNG NGHIÊN CỨU CỦA LUẬN ÁN

1.4.1. Các công trình nghiên cứu liên quan và nhận xét

1.4.2. Hướng nghiên cứu của luận án

1.5. KẾT LUẬN CHƯƠNG 1

Nội dung của chương một đã thể hiện khái quát về hệ thống HAP và vai trò của mã hóa kênh nhằm nổi bật các đặc tính riêng biệt của đối tượng quan tâm nghiên cứu. Những yếu tố cơ bản ảnh hưởng đến chất lượng của hệ thống HAP cho thấy hướng tiếp cận mã hóa kênh là hướng đi triển vọng trong giải pháp thông tin dựa trên các hệ thống HAP. Đồng thời, qua khảo sát các nghiên cứu trước đó cho thấy rằng chưa có nghiên cứu nào về mã kênh sử dụng trong hệ thống HAP bàn luận đến hiệu năng tiếp cận dung lượng kênh. Vì vậy, mục tiêu hướng đến của luận án: nghiên cứu giải pháp thiết kế mã kênh tiếp cận dung lượng kênh và đánh giá hiệu năng mã kênh sử dụng cho hệ thống HAP. Nhìn chung, những nội dung được trình bày trong chương này tạo nền tảng lý thuyết cho các nội dung nghiên cứu ở các chương tiếp theo của luận án.

CHƯƠNG 2: DUNG LƯỢNG KÊNH CỦA HỆ THỐNG HAP

2.1. MÔ HÌNH KÊNH HAP

Quá trình thu phát tín hiệu giữa HAP với thiết bị mặt đất sẽ chịu ảnh hưởng của pha-đỉnh đa đường. Thông thường, những ảnh hưởng này thường được đưa về các phân bố thống kê. Vì vậy, các mô hình thống kê đối với kênh HAP có thể phân chia thành hai loại chính là: các mô hình kênh thống kê đơn và các mô hình kênh thống kê hỗn hợp. Trong mô hình kênh thống kê đơn, kênh được đặc tính hóa bởi phân bố thống kê đơn, còn mô hình kênh thống kê hỗn hợp đề cập đến việc kết hợp (tổng có trọng số) của một vài phân bố thống kê. Ngoài ra, các phương pháp tiếp cận trong mô hình kênh HAP còn được phân loại theo mối quan hệ giữa băng thông truyền dẫn và băng thông kênh truyền là băng hẹp và băng rộng. Trong đó, các mô hình kênh HAP băng hẹp đề cập đến hiện tượng pha-đỉnh phẳng, còn các mô hình kênh HAP băng rộng quan tâm đến hiện tượng kênh có tính chất chọn lọc tần số.

Sự thăng giáng ngẫu nhiên của đường bao tín hiệu trong kênh HAP băng hẹp có thể được đưa về hai kiểu pha-đỉnh cơ bản là: pha-đỉnh đa đường và pha-đỉnh che khuất. Trong đó, pha-đỉnh che khuất được chia thành pha-đỉnh che khuất đường tín hiệu trực tiếp (LOS) và pha-đỉnh che khuất kép gây những biến động ngẫu nhiên về công suất tổng của các thành phần đa đường. Kênh HAP pha-đỉnh đa đường là kênh chịu ảnh hưởng của pha-đỉnh đa đường gây ra bởi các thành phần tán xạ qua các đường tín hiệu gián tiếp (NLOS) cùng với thành phần LOS không bị che khuất. Do đó đường bao tín hiệu là biến ngẫu nhiên phân bố Rice, với đại lượng đặc trưng là hệ số Rice K . Hệ số này có sự phụ thuộc vào góc ngẩng θ : $K(\theta)$.

Vì vậy:

- Khi $\theta \rightarrow 90^0 \Rightarrow K(\theta) \rightarrow \infty$: phân bố Gauss.
- Khi $\theta \in [12^0, 90^0]$: phân bố Rice.
- Khi $\theta < 12^0 \Rightarrow K(\theta) \leq 0$: phân bố Rayleigh.

Ngoài ra để mô tả đặc tính động của kênh, các mô hình kênh HAP chuyên mạch trạng thái đã được nghiên cứu như: kênh HAP chuyên mạch hai trạng thái (tốt: G và xấu: B) và ba trạng thái,...

2.2. DUNG LƯỢNG KÊNH CỦA HỆ THỐNG HAP

2.2.1. Dung lượng kênh không nhớ đầu vào rời rạc - đầu ra liên tục

Nền tảng của lý thuyết thông tin cho thông tin vô tuyến được thiết lập bởi Shannon, người đã đưa ra những giới hạn cơ bản về truyền dẫn thông tin tin cậy. Lý thuyết Shannon đã đưa ra khái niệm về dung lượng kênh, C , một tham số hiệu năng *thiết lập giới hạn trên về lượng thông tin lớn nhất có thể truyền dẫn tin cậy qua kênh với xác suất lỗi rất nhỏ*. Tham số dung lượng kênh cho phép xác định tốc độ truyền tối đa của kênh mà độ tin cậy (ở xác suất lỗi bit nhỏ tùy ý) được đảm bảo. Vì vậy, nhiều nghiên cứu về mã hóa kênh chủ yếu tập trung vào việc tìm ra các mã kênh tốt theo hướng tiếp cận càng gần với dung lượng Shannon càng tốt như mã turbo và mã kiểm tra chẵn lẻ mật độ thấp (LDPC).

Chính vì vậy, nghiên cứu về dung lượng kênh của hệ thống HAP khi sử dụng các cơ chế điều chế tách sóng nhất quán nào đó, ngoài việc giúp đánh giá cân đối giữa dung lượng kênh với độ phức tạp yêu cầu của bộ thu, còn tạo cơ sở quan trọng trong việc thiết kế và đánh giá hiệu năng tiếp cận dung lượng kênh của mã kênh cho các hệ thống HAP. Hơn nữa, khi nghiên cứu về mã kênh trong hệ thống thông tin số, một số khối chức năng (như điều chế và giải điều chế) có thể được gộp thành một khối chung tạo thành mô hình kênh kết hợp. Khi mô hình kênh kết hợp có các đầu vào rời rạc, đầu ra liên tục, cùng xác suất chuyển dịch liên quan giữa đầu vào và đầu ra có tính chất không nhớ thì kênh được gọi là kênh không nhớ đầu vào rời rạc, đầu ra liên tục (DCMC). Vì vậy, kênh DCMC và dung lượng DCMC đã được nghiên cứu trong luận án. Với mô hình DCMC, dung lượng DCMC (C_{DCMC}) được xác định như sau:

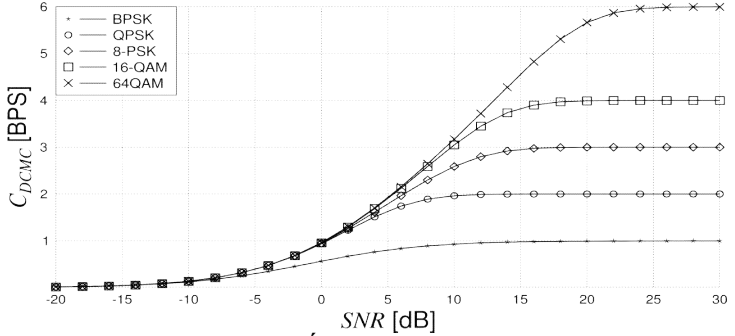
$$C_{DCMC} = \log_2(M) - \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M E \left[\log_2 \sum_{i=1}^M \exp(\psi_{m,i}) \right] \quad [\text{BPS}] \quad (2.1)$$

trong đó, M là số mức điều chế của phương thức điều chế được sử dụng, và $\psi_{m,i}$ được xác định là:

$$\psi_{mi} = \frac{\sum_{j=1}^N -(y_j - ax_{ij})^2 + (y_j - ax_{mj})^2}{N_0} = \frac{\sum_{j=1}^N -(a(x_{mj} - x_{ij}) - n_j)^2 + n_j^2}{N_0} \quad (2.2)$$

cho tín hiệu thu được ở phía thu là: $y = ax_m + n$.

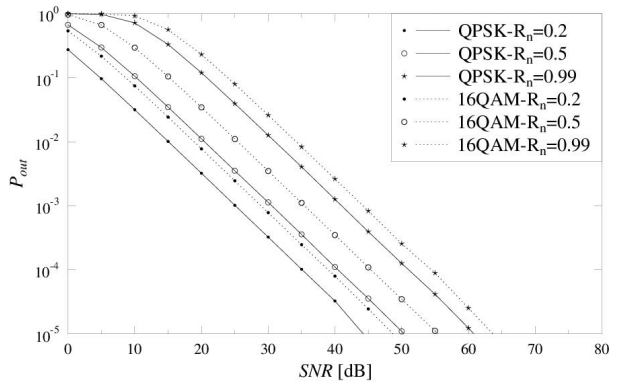
Hình 2.1.
Dung lượng
DCMC của
hệ thống
HAP qua
kênh HAP
pha-đỉnh
Rice,
 $\theta = 45^0$
($K=10$ dB)



Luận án đã đạt được những kết quả dung lượng DCMC của hệ thống HAP qua các kênh HAP pha-đỉnh Rice, Rayleigh, chuyên mạch hai trạng thái. Trong đó, hình 2.1 là một trong số các kết quả đó cho trường hợp kênh HAP pha-đỉnh Rice ($K=10$ dB), góc ngả $\theta = 45^0$. Qua đó cho thấy, khi sử dụng cơ chế điều chế khác nhau sẽ cho C_{DCMC} khác nhau, cụ thể tại $SNR=20$ dB, C_{DCMC} tương ứng với $M=1,2, 3, 4$ và 6 là 1; 2; 2,9; 3,8 và 5 [BPS]. Tuy nhiên, khi M tăng thì xác suất lỗi bit cũng sẽ tăng. Hơn nữa, với cùng C_{DCMC} , M khác nhau yêu cầu SNR khác nhau.

2.2.2. Xác suất tới hạn

Hình 2. 2. Xác suất
tới hạn (P_{out}) của
DCMC của hệ thống
HAP qua kênh HAP
pha-đỉnh Rice,
 $\theta = 45^0$ ($K=10$ dB)



Xác suất tới hạn $P_{out}(\theta)$ được định nghĩa là xác suất xảy ra sự kiện $|a(\theta)|^2 SNR < SNR_r |_R(\theta)$, thì $P_{out}(\theta)$ được biểu diễn như sau:

$$P_{out}^{DCMC}(R, \eta, \theta) = \Pr \left\{ E \left[|a(\theta)|^2 \right] < \frac{SNR_r|_R(\theta)}{SNR} \right\}, \quad (2.3)$$

Một trong số những kết quả xác suất tối hạn P_{out} có được qua kênh HAP pha-đỉnh Rice, sử dụng cơ chế điều chế QPSK và 16QAM được thể hiện ở hình 2.2, trong đó $R_n = R/\eta$, $\eta = \log_2 M$ là tốc độ thông tin chuẩn hóa. Các kết quả cho thấy, tại cùng mức SNR và R_n , thì mức điều chế thấp hơn cho P_{out} thấp hơn. Hơn nữa, với cùng mức điều chế và P_{out} , nhưng khi R_n tăng thì SNR yêu cầu cũng sẽ tăng.

2.2.3. Dung lượng tối hạn

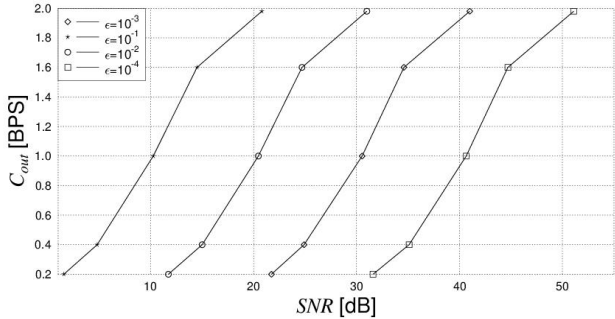
Dung lượng tối hạn được xem xét khi sử dụng HAP cho các ứng dụng, dịch vụ có ràng buộc về trễ. Dung lượng tối hạn $C(\varepsilon, \theta)$ được định nghĩa là tốc độ thông tin R lớn nhất có thể mà vẫn đảm bảo xác suất tối hạn nhỏ hơn ε . Nghĩa là:

$$C_{out}(\varepsilon, \theta) = \max \left\{ R : P_{out}(R, \eta, \theta) < \varepsilon \right\} \quad (2.4)$$

Một trong số các kết quả về $C_{out}(\varepsilon, \theta)$ được thể hiện ở hình 2.3.

Qua đó nhận thấy, với $\varepsilon = 10^{-3}$ và $C_{out}(\varepsilon, \theta) = 1,0$ (BPS), ta có $SNR = 30,54$ dB. Điều này có nghĩa là: nếu giá trị SNR_r nhỏ hơn hoặc bằng 30,54 dB, thì dung lượng tối hạn lớn nhất đạt được là $C_{out} = 1,0$ [BPS], với xác suất tối hạn $\varepsilon = 10^{-3}$ được đảm bảo.

Hình 2.3. Dung lượng tối hạn DCMC của hệ thống HAP, điều chế QPSK qua kênh HAP pha-đỉnh Rice, $\theta = 45^\circ$ ($K=10$ dB)



2.3. KẾT LUẬN CHƯƠNG 2

Chương hai đã phân tích ba mô hình kênh HAP có xét đến ảnh hưởng của góc ngẩng. Từ đó thực hiện thiết lập các đường biên dung lượng DCMC của hệ thống HAP qua các mô hình kênh này. Nhìn chung, các kết quả về dung lượng DCMC của HAP cho thấy, tại cùng mức SNR , dung lượng DCMC tăng khi số mức điều chế tăng; và với cùng mức dung lượng DCMC, số mức điều chế lớn hơn thì SNR yêu cầu thấp hơn. Tuy nhiên, số

mức điều chế tăng sẽ làm cho xác suất lỗi bit cũng tăng vì khoảng cách giữa các điểm tín hiệu sát gần nhau hơn.

Hơn nữa, các kết quả đường biên dung lượng DCMC của hệ thống HAP còn thể hiện rõ sự phụ thuộc vào góc ngẩng, cụ thể: khi góc ngẩng tăng, dung lượng DCMC tăng, và ngược lại, với cùng mức điều chế và SNR. Kết quả đạt được sẽ là cơ sở trong việc xác định vị trí thích hợp cho thiết bị thu phát mặt đất. Đặc biệt, các kết quả đường biên dung lượng DCMC của HAP còn là sở cứ để đánh giá hiệu năng tiếp cận dung lượng kênh của mã kênh thiết kế cho hệ thống HAP trong chương ba.

CHƯƠNG 3: THIẾT KẾ MÃ KÊNH TIẾP CẬN DUNG LƯỢNG CHO HỆ THỐNG HAP

3.1. BIỂU ĐỘ TRUYỀN ĐẠT THÔNG TIN NGOẠI LẠI

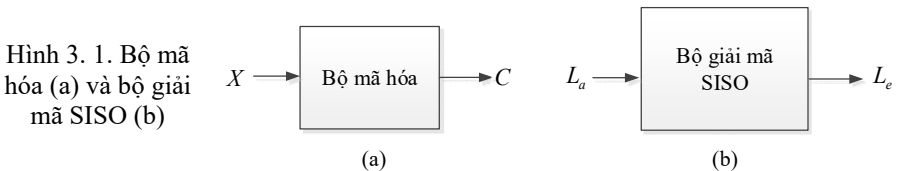
Biểu độ truyền đạt thông tin ngoại lai (EXIT) được đề xuất bởi Stephan ten Brink, là một công cụ bán phân tích mô tả sự tiến triển của quá trình trao đổi thông tin (thông tin tương hỗ) giữa các bộ giải mã thành phần trong bộ giải mã kênh giải mã lặp của hệ thống thông tin. Trong đó, thông tin tương hỗ giữa biến ngẫu nhiên rời rạc X ($X \in \{-1, +1\}$) và biến ngẫu nhiên liên tục Y được xác định là:

$$I(X; Y) = \sum_{x \in X} \int p(x, y) \log_2 \frac{p(x, y)}{p(x)p(y)} dy, \quad (3.1)$$

Nếu mô hình hóa y là biến ngẫu nhiên Gauss trung bình không, phương sai $\sigma^2 = 2\mu$, thì ta được:

$$I(X; Y) = J(\sigma) = 1 - \int \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(\frac{-1}{2\sigma^2} \left(y - \frac{\sigma^2}{2}\right)^2\right) \log_2(1 + e^{-y}) dy. \quad (3.2)$$

trong đó, hàm $J(\sigma)$ đơn điệu tăng và tồn tại hàm ngược. Hơn nữa, hàm $J(\sigma)$ được đặc tính hóa bởi $\lim_{\sigma \rightarrow 0} J(\sigma) = 0$, $\lim_{\sigma \rightarrow \infty} J(\sigma) = 1$, $\sigma > 0$.



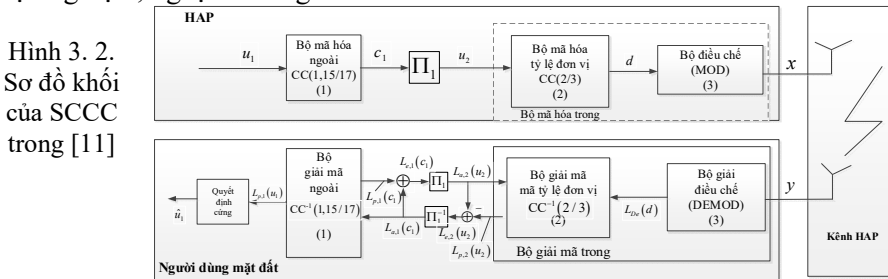
Xét bộ mã hóa và giải mã đầu vào mề - đầu ra mề (SISO) được thể hiện ở hình 3.1. Trong đó, X biểu diễn chuỗi bit thông tin, là đầu vào của bộ mã hóa, có giá trị $\{\pm 1\}$; C biểu diễn chuỗi bit mã hóa, là đầu ra của

bộ mã hóa, có giá trị $\{\pm 1\}$; L_a và L_e tương ứng là chuỗi đầu vào/đầu ra tỷ lệ hợp lệ logarit (LLR) tiên nghiệm/hậu nghiệm của bộ giải mã SISO.

Khi đó, áp dụng (3.2), các thông tin tương hỗ giữa X và L_a là: $I_A = I(X; L_a)$, $0 \leq I_A \leq 1$, và thông tin tương hỗ giữa X và L_e là $I_E = I(X; L_e)$ được xác định. Đường cong biểu diễn quan hệ giữa I_E và I_A được gọi là đường cong EXIT của bộ mã.

3.2. ĐỀ XUẤT SỬ DỤNG MÃ CHẬP KHÔNG ĐỀU TRONG HỆ THỐNG HAP

Xét mã chập liên kết nối tiếp (SCCC) sử dụng trong dự án CAPANINA của Ủy ban Liên minh châu Âu được thể hiện ở hình 3.2. Trong đó, $L(\cdot)$ biểu thị tỷ lệ hợp lệ logarit (LLR) của bit liên quan, với chỉ số 1 thể hiện cho bộ mã hóa vòng ngoài, còn chỉ số 2 thể hiện cho bộ mã hóa vòng trong. Các chỉ số a, p, e, De tương ứng chỉ thông tin tiên nghiệm, hậu nghiệm, ngoại lai và giải điều chế.

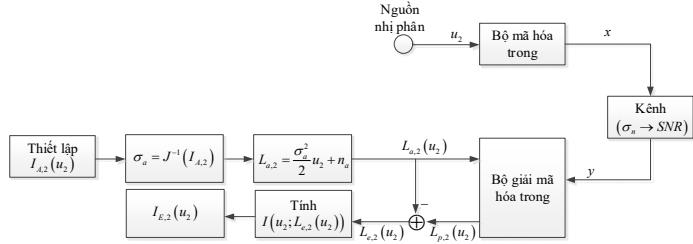


Để khảo sát hiệu năng tiếp cận dung lượng kênh của SCCC, luận án sẽ thiết lập biểu đồ EXIT thể hiện mối quan hệ về đường cong EXIT của các bộ giải mã vòng trong và bộ giải mã vòng ngoài. Trong đó, các bộ giải mã vòng trong và giải mã vòng ngoài sẽ thực hiện thuật toán hậu nghiệm cực đại ở miền logarit (Log-MAP) để tạo ra thông tin LLR ngoại lai trao đổi lẫn nhau tạo thành các vòng lặp giải mã (J vòng lặp).

3.2.1. Đặc tính truyền đạt của bộ giải mã vòng trong

Sơ đồ đánh giá đặc tính truyền đạt của bộ giải mã vòng trong được thể hiện ở hình 3.3. Trong đó, bộ mã hóa vòng trong mã hóa và điều chế các bit đầu vào u_2 thành các tín hiệu phát x , các đầu vào của bộ giải mã vòng trong là các đầu ra y của kênh truyền HAP và thông tin tiên nghiệm $L_{a,2}(u_2)$. Bộ giải mã vòng trong thực hiện giải mã và cho ra thông tin hậu nghiệm $L_{p,2}(u_2)$. Thông tin ngoại lai $L_{e,2}(u_2) = L_{p,2}(u_2) - L_{a,2}(u_2)$ được sử dụng để tính $I_{E,2}(u_2)$.

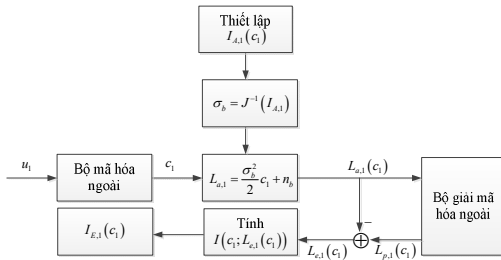
Hình 3. 3. Sơ đồ đánh giá đặc tính truyền đạt của bộ giải mã vòng trong



Khi đó, đường cong EXIT của bộ giải mã vòng trong biểu diễn quan hệ giữa $I_{E,2}(u_2)$ và $I_{A,2}(u_2)$ tại giá trị SNR xác định:

$$I_{E,2}(u_2) = T_2[I_{A,2}(u_2), SNR] \quad (3.3)$$

3.2.2. Đặc tính truyền đạt của bộ giải mã vòng ngoài

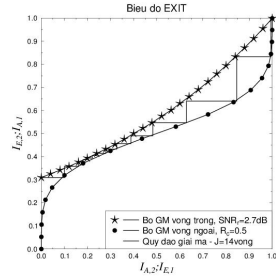


Hình 3. 4. Sơ đồ đánh giá đặc tính truyền đạt của bộ giải mã vòng ngoài

Tương tự, đặc tính truyền đạt của bộ giải mã vòng ngoài được thể hiện ở hình 3.4. Trong đó, bộ mã hóa vòng ngoài mã hóa các bit đầu vào u_1 thành các bit mã hóa c_1 , đầu vào của bộ giải mã vòng ngoài là thông tin tiên nghiệm $L_{a,1}(c_1)$. Bộ giải mã vòng ngoài thực hiện giải mã và cho ra thông tin hậu nghiệm $L_{p,1}(c_1)$.

Thông tin ngoại lai $L_{e,1}(c_1) = L_{p,1}(c_1) - L_{a,1}(c_1)$ được sử dụng để tính $I_{E,1}(c_1)$. Như vậy, đường cong EXIT của bộ giải mã vòng ngoài thể hiện quan hệ giữa $I_{E,1}(c_1)$ và $I_{A,1}(c_1)$: $I_{E,1}(c_1) = T_1[I_{A,1}(c_1)]$.

Kết quả về các đường cong EXIT của bộ giải mã vòng trong và bộ giải mã vòng ngoài của SCCC, tỷ lệ mã $R_c=0,5$, sử dụng điều chế QPSK, qua kênh HAP pha-đỉnh Rice ($K=10$ dB), được thể hiện hình 3.5. Qua đó



Hình 3. 5. Biểu đồ EXIT của cơ chế mã hóa kênh trong [11] qua kênh HAP pha-đỉnh Rice ($K=10$ dB), điều chế QPSK, $R_c=0,5$

nhận thấy, với kích cỡ khung tin đủ lớn cùng 14 vòng lặp giải mã, BER thấp nhất có thể đạt được tại $SNR=2,7$ dB, cách đường biên dung lượng DCMC của HAP sử dụng điều chế QPSK, tỷ lệ mã hóa $R_c=0,5$ ($C_{DCMC}=0,48$ dB) khoảng $d_{DCMC_Rice}=2,22$ dB. Đây là một khoảng cách khá lớn, trong khi mã Turbo cho hiệu năng tiếp cận dung lượng kênh – giới hạn dung lượng Shannon là 0,7 dB. Vì vậy, để nâng cao hiệu năng tiếp cận gần dung lượng kênh của mã kênh sử dụng cho hệ thống HAP, luận án đề xuất sử dụng mã chập không đều (IrCC) ở bộ mã hóa vòng ngoài của mã SCCC trong dự án CAPANINA và thiết kế mã IrCC cho hệ thống HAP.

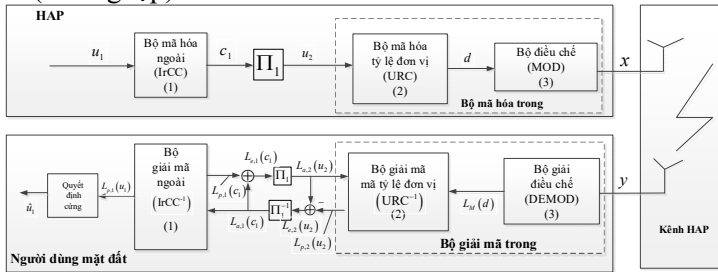
3.3. THIẾT KẾ MÃ KÊNH TIẾP CẬN DUNG LƯỢNG CHO HỆ THỐNG HAP

3.3.1. Cơ chế mã hóa IrCC-URC-MOD

Xét cơ chế mã hóa IrCC-URC-MOD được thể hiện ở hình 3.6. Trong đó, phía phát (trạm HAP), khung tin gồm N bit được mã hóa bởi bộ mã hóa ngoài là bộ mã hóa mã chập không đều (IrCC) có tỉ lệ mã R_c , sẽ tạo ra khung đầu ra có độ dài N/R_c bit. Sau đó khung được đan xen bởi bộ đan xen Π_1 trước khi đưa đến bộ mã hóa trong là bộ mã hóa tỷ lệ đơn vị (URC). Khung tại đầu ra của URC được điều chế bởi bộ điều chế (MOD), tạo ra tín hiệu phát x truyền qua kênh HAP.

Ở phía thu, tín hiệu thu được từ kênh HAP lần lượt được đưa đến bộ giải điều chế (DEMOD), bộ giải mã tỷ lệ đơn vị (URC^{-1}) và bộ giải mã mã chập không đều ($IrCC^{-1}$). Tại các bộ URC^{-1} và $IrCC^{-1}$ sẽ thực hiện thuật toán hậu nghiệm cực đại ở miền logarit (Log-MAP) để tạo ra thông tin ngoại lai (tỷ lệ hợp lệ logarit – LLR) trao đổi lặp với nhau tạo thành các vòng lặp giải mã (J vòng lặp).

Hình 3. 6. Sơ đồ cơ chế mã hóa IrCC-URC-MOD cho hệ thống HAP



3.3.2. Mã chập không đều

Mã chập không đều (IrCC) được định nghĩa là một họ mã gồm nhiều mã chập con thành phần C_k ($1 \leq k \leq P-1$), có tỷ lệ mã R_k : $0 \leq R_k \leq 1$. Các C_k sẽ được xây dựng từ một mã chập mẹ có tỷ lệ mã R_q . Khi đó, quá trình mã hóa và giải mã IrCC sẽ là quá trình mã hóa và giải mã ở các mã chập con thành phần và sẽ được thực hiện trên lưới của

mã chập mẹ. Do vậy, việc sử dụng IrCC sẽ không làm tăng thêm độ phức tạp mã hóa và giải mã.

Xét mã chập không đều gồm các mã chập con thành phần C_k , có tỷ lệ mã R_k , giả thiết khoảng cách tỷ lệ mã của các C_k là 0,05 thì các R_k có thể có 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; ...; 0,9, khi đó số lượng các mã chập con thành phần sẽ được là 17. Nếu khoảng cách giữa tỷ lệ mã hóa của các C_k là 0,1 thì các R_k có thể có 0,2; 0,3; ...; 0,9, khi đó số lượng các mã chập con thành phần sẽ được là 8. Vì vậy, bộ tham số biểu diễn cho các C_k sẽ như sau: $\{R_k, [w_0, w_1, \dots], l_k, [p_0, p_1, \dots]\}$, trong đó, $k=1, 2, \dots, 8$ hoặc 17, $w_j, j=0, 1, 2, 3$ chỉ tần suất xuất hiện của g_j trong ma trận sinh, l_k là chu kỳ đục lỗ và p_j là mô hình đục lỗ có liên quan tới g_j (dạng bát phân).

3.3.3. Thiết kế mã IrCC cho hệ thống HAP

Quá trình thiết kế mã IrCC cho hệ thống HAP được thực hiện như sau:

Bước 1: Áp dụng sơ đồ hình 3.4 để thiết lập 17 đường cong EXIT của các mã chập con thành phần: $I_{E_{CC}} = T_{1,k}(I_{A_{CC}})$, có tỷ lệ mã $R_k = 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; \dots; 0,9$ từ các mã chập mẹ: CC(1,27/31), CC(1,15/17).

Bước 2: Thiết kế mã IrCC tiếp cận dung lượng kênh

Bài toán thiết kế mã IrCC tiếp cận dung lượng kênh cho hệ thống HAP sẽ là bài toán xác định các hệ số trọng lượng $\alpha_k, k=1, \dots, 8/17$ tương ứng của các C_k thỏa mãn điều kiện (3.4) sao cho diện tích đường hàm EXIT đủ mở giữa đường cong EXIT của bộ giải mã vòng trong (URC-MOD) và đường cong EXIT của IrCC là nhỏ nhất. Trong đó, đường cong EXIT của IrCC được xác định bởi:

$$T_{1,IR} = \sum_{k=1}^P \alpha_k T_{1,k}, \quad \text{với } P=8 \text{ hoặc } 17 \quad (3.4)$$

➤ **Bước 2.1:** Thiết lập hàm truyền đạt của bộ giải mã vòng trong tại giá trị SNR xác định: $I_{E_{URC-MOD}}(u_2) = T_2[I_{A_{URC-MOD}}(u_2), SNR]$ (theo sơ đồ hình 3.3).

➤ **Bước 2.2:** Xác định hàm truyền đạt của bộ giải mã vòng ngoài $T_{1,IR}$ hay $I_{E_{IrCC}}(c_1) = T_{1,IR}[I_{A_{IrCC}}(c_1)]$ sao cho $e = T_{1,IR} - T_2^{-1}$, $e \geq 0$ với $\forall I_{A,2}$, cùng các điều kiện ràng buộc (3.5) như sau:

$$J(\alpha_1, \dots, \alpha_P) = \int_0^1 e^2(i) di = \int_0^1 \left(\sum_{k=1}^P \alpha_k T_{1,k} - T_2^{-1} \right)^2 di, \quad e(i) > 0, \forall i \in [0, 1] \quad (3.5)$$

Sử dụng thuật toán tối ưu theo phương pháp giảm bước, bộ 8 hoặc 17 giá trị (tương ứng với IrCC₈ hoặc IrCC₁₇) của các hệ số trọng số tối ưu hóa $\alpha_i, i = 1, \dots, 8/17$ được xác định.

🔧 Bước 3: Xác định số vòng lặp giải mã của cơ chế mã hóa IrCC-URC-MOD.

3.3.4. Kết quả thiết kế mã IrCC

Bộ 28 kết quả thiết kế mã IrCC₁₇(31,27), IrCC₁₇(17,15), IrCC₈(31,27), IrCC₈(17,15) và hiệu năng tiếp cận dung lượng DCMC (d_{DCMC}) của hệ thống HAP qua các kênh HAP pha-đỉnh Rice, Rayleigh và kênh chuyên mạch hai trạng thái được liệt kê ở các bảng 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 và 3.6. Trong đó, ký hiệu IrCC_j(31,27) và IrCC_j(17,15) (với $j = 8$ hoặc 17 tương ứng gồm 8 hoặc 17 mã con chập thành phần).

Bảng 3. 1. Liệt kê kết quả thiết kế mã IrCC₁₇(31,27) và hiệu năng tiếp cận dung lượng DCMC (d_{DCMC}) qua kênh HAP pha-đỉnh Rice, $\theta = 45^\circ$ ($K=10$ dB)

Cơ chế điều chế	R_c	Các hệ số $[\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{17}]$ của mã IrCC ₁₇ (31,27)	d_{DCMC}
BPSK	1/2	[0,044 0(5) 0,264 0,324 0,097 0,025 0 0 0,146 0,054 0,026 0 0,021]	0,7 dB
QPSK	2/3	[0,085 0(8) 0,195 0,091 0,216 0,171 0 0,085 0 0,157]	0,68 dB
QPSK	3/4	[0,051 0(11) 0,363 0,086 0,244 0 0,256]	0,8 dB
QPSK	1/2	[0,037 0(4) 0,369 0,110 0,046 0 0,120 0 0,094 0,105 0 0,044 0,013 0,061]	0,52 dB
8PSK	1/2	[0,014 0 0,169 0 0,209 0 0 0,093 0,152 0 0 0,022 0,172 0 0,022 0,027 0,120]	0,6 dB
16QAM	1/2	[0 0 0,248 0 0,013 0,189 0 0 0,182 0(3) 0,207 0(3) 0,161]	0,5 dB
16QAM	3/4	[0,0511 0(10) 0,282 0,192 0(3) 0,473]	1,0 dB

Bảng 3. 2. Liệt kê kết quả thiết kế mã IrCC₈(17,15) và IrCC₈(31,27) qua kênh HAP chuyên mạch hai trạng thái.

Cơ chế điều chế	$[\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_8]$ của IrCC ₈ (17,15)		$[\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_8]$ của IrCC ₈ (31,27)	
	$R_c=0,5$	$R_c=0,67$	$R_c=0,5$	$R_c=0,67$
QPSK	[0,150 0 0,011 0,703 0 0,022 0,042 0,073]	[0,094 0(3) 0,224 0,487 0 0,195]	[0,084 0 0,547 0 0 0,061 0,238 0,022 0,048]	[0,020 0(3) 0,631 0,133 0 0,216]
16QAM	[0,205 0,120 0,154 0,138 0,057 0,135 0,082 0,109]	[0,052 0 0 0,291 0,068 0,283 0 0,306]	[0,185 0,102 0,237 0,148 0 0,156 0 0,172]	[0,022 0 0 0,375 0,161 0,080 0 0,361]
64QAM	[0,296 0 0,217 0,101 0 0,218 0 0,167]	[0,066 0 0 0,327 0 0,265 0 0,342]	[0,275 0,123 0 0,288 0 0,092 0 0,222]	[0,040 0 0 0,445 0,010 0,103 0 0,401]

Bảng 3. 3. Liệt kê kết quả thiết kế mã IrCC₁₇(31,27), R_c=1/2 và hiệu năng tiếp cận dung lượng DCMC (d_{DCMC}) qua kênh HAP pha-đỉnh Rayleigh, $\theta = 10^0$

Cơ chế điều chế	Các hệ số: $[\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{17}]$ của IrCC ₁₇ (31,27)	d_{DCMC}
QPSK	[0,031 0(4) 0,355 0,142 0,059 0 0,091 0 0,100 0,109 0 0,036 0,015 0,062]	0,7 dB
8PSK	[0,056 0(3) 0,367 0 0 0,022 0,111 0,124 0 0,025 0,109 0 0,073 0,035 0,078]	0,86 dB
16QAM	[0,057 0 0 0,039 0,329 0(3) 0,155 0,095 0 0 0,152 0 0,037 0,039 0,097]	0,82 dB

Bảng 3. 4. Liệt kê d_{DCMC} của cơ chế mã hóa IrCC₈(17,15)-URC-MOD cho hệ thống HAP qua kênh HAP chuyển mạch hai trạng thái.

Cơ chế điều chế	IrCC ₈ (17,15)					
	R _c =0,5	C _{DCMC}	d_{DCMC}	R _c =0,67	C _{DCMC}	d_{DCMC}
QPSK	2,3 dB	1,0 dB	1,3 dB	4,8 dB	3,6 dB	1,2 dB
16QAM	6,8 dB	6,04 dB	0,76 dB	10 dB	9,02 dB	0,98 dB
64QAM	11 dB	10 dB	1 dB	15 dB	13,86 dB	1,14 dB

Bảng 3. 5. Liệt kê d_{DCMC} của cơ chế mã hóa IrCC₈(31,27)-URC-MOD cho hệ thống HAP qua kênh HAP chuyển mạch hai trạng thái.

Cơ chế điều chế	IrCC ₈ (31,27)					
	R _c =0,5	C _{DCMC}	d_{DCMC}	R _c =0,67	C _{DCMC}	d_{DCMC}
QPSK	1,8 dB	1 dB	0,8 dB	4,0 dB	3,6 dB	0,4 dB
16QAM	6,4 dB	5,92 dB	0,48 dB	9,5 dB	9,02 dB	0,48 dB
64QAM	10,5 dB	10 dB	0,5 dB	14,5 dB	13,86 dB	0,64 dB

Bảng 3. 6. Liệt kê kết quả thiết kế mã IrCC(17,15) và hiệu năng tiếp cận dung lượng DCMC (d_{DCMC}) qua kênh HAP, điều chế QPSK, R_c=0,5

Kiểu kênh pha-đỉnh	IrCC ₈ (17,15)		IrCC ₁₇ (17,15)	
	$[\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_8]$	d_{DCMC}	$[\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{17}]$	d_{DCMC}
Rice $\theta = 45^0$, K=10 dB	[0,1434 0(2) 0,7202 0 0,0459 0,0234 0,0671]	1,42 dB	[0,0355 0(4) 0,2626 0(2) 0,5189 0(3) 0,0899 0 0,0163 0 0,0768]	0,92 dB
Rayleigh, $\theta = 10^0$	[0,1399 0 0,0384 0,6952 0(2) 0,0469 0,0796]	1,2 dB	[0,0239 0(4) 0,3250 0(2) 0,4540 0(3) 0,0952 0 0,0147 0 0,0872]	0,9 dB
Chuyển mạch hai trạng thái	[0,150 0 0,011 0,703 0 0,022 0,042 0,073]	1,3 dB	[0(5) 0,420 0(2) 0,353 0(3) 0,135 0(2) 0,015 0,077]	0,9 dB

3.4. ĐÁNH GIÁ HIỆU NĂNG CỦA MÃ CHẬP KHÔNG ĐỀU

Tham số được sử dụng để đánh giá hiệu năng là BER, FER, SNR và d_{DCMC} sẽ phụ thuộc vào trạng thái kênh truyền, kích cỡ khung tin, số vòng lặp giải mã, kiểu đan xen, tỷ lệ mã, phương thức điều chế.

3.4.1. Kết quả 1: Hiệu năng của cơ chế mã hóa IrCC₁₇(31,27)-URC-QPSK, tỷ lệ mã R_c=0,5.

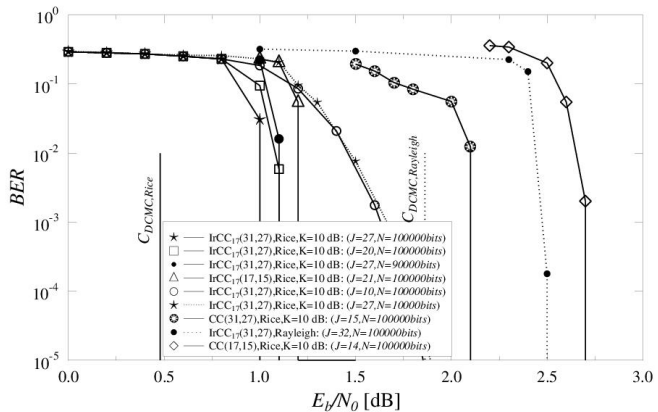
Hình 3.7 thể hiện các tham số sử dụng và kết quả hiệu năng BER đạt được của cơ chế mã hóa IrCC₁₇-URC-QPSK và SCCC của dự án CAPANINA. Kết quả đạt được đã cho thấy IrCC₁₇ (31,27)-URC-QPSK cho hiệu năng tiếp cận dung lượng DCMC cải thiện hơn. Cụ thể:

- ✚ IrCC₁₇ (31,27) cho $d_{DCMC} = 0,52$ dB, cải thiện hiệu năng d_{DCMC} hơn so với CC(31,27) qua kênh pha-đỉnh Rice là 1,2 dB;
- ✚ IrCC₁₇ (17,15) cho $d_{DCMC} = 0,92$ dB, cải thiện hiệu năng d_{DCMC} hơn so với CC(17,15) qua kênh pha-đỉnh Rice là 1,5 dB;
- ✚ IrCC₁₇ (31,27) cho hiệu năng d_{DCMC} cải thiện hơn so với CC(17,15) qua kênh pha-đỉnh Rice là 1,7 dB;

Hơn nữa, với số vòng lặp giải mã ($J=27$ vòng) và kích cỡ khung tin đủ lớn ($N=100000$ bit), IrCC₁₇ (31,27) cho hiệu năng BER đạt được thấp nhất khi vượt qua giá trị SNR hội tụ: $E_b/N_0=1,0$ dB (đối với kênh HAP pha-đỉnh Rice) được xác định qua phân tích biểu đồ EXIT, cho hiệu năng độ lợi mã hóa cải thiện hơn khoảng:

- ✚ 1,2/1,5 dB của IrCC₁₇ (31,27)/ IrCC₁₇ (17,15) so với CC(31,27)/CC(17,15) tương ứng.
- ✚ 1,7 dB của IrCC₁₇ (31,27) so với CC(17,15).
- ✚ 1,0 dB của IrCC₁₇ (17,15) so với CC(31,27).

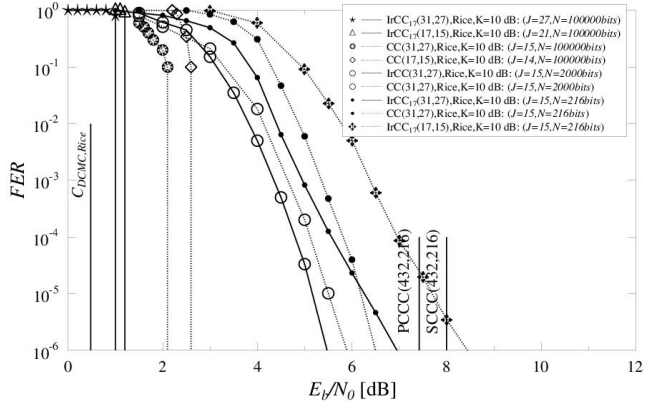
Hình 3. 7.
Hiệu năng BER của IrCC₁₇-URC-QPSK và CC-URC-QPSK, R_c=0,5, qua kênh HAP pha-đỉnh Rice và Rayleigh



Ngoài ra, cơ chế mã hóa IrCC₁₇-URC-QPSK và SCCC, tỷ lệ mã R_c=0,5 qua kênh HAP pha-đỉnh Rayleigh cũng cho thấy giá trị E_b/N_0 hội tụ là 2,5 dB, lớn hơn so với E_b/N_0 hội tụ của kênh HAP pha-đỉnh Rice. Điều này cũng thể hiện đúng bản chất ảnh hưởng của các kênh pha-đỉnh.

3.4.2. Kết quả 2: Hiệu năng FER của cơ chế mã hóa IrCC₁₇-URC-QPSK qua kênh HAP pha-đỉnh Rice.

Hình 3. 8.
Hiệu năng
 FER của
IrCC₁₇(31,27)
-URC-QPSK
và SCCC [11]
tỷ lệ mã
 $R_c=0,5$ qua
kênh HAP
pha-đỉnh
Rice,
 $\theta = 45^\circ$
($K=10\text{dB}$)



Hình 3.8 thể hiện các tham số và kết quả về hiệu năng FER của cơ chế mã hóa IrCC₁₇-URC-QPSK và CC-URC-QPSK, tỷ lệ mã $R_c=0,5$ qua kênh pha-đỉnh Rice. Cũng giống như kết quả thể hiện ở hình 3.8, với số vòng lặp giải mã và kích cỡ khung tin đủ lớn ($N=120000$ bit), tại các giá trị SNR hội tụ, cơ chế IrCC₁₇-URC-QPSK cho hiệu năng FER đạt được thấp nhất, cải thiện hiệu năng về độ lợi mã hóa và tiếp cận dung lượng hơn so với cơ chế CC-URC-QPSK. Tuy nhiên, tại $FER=10^{-6}$, với kích cỡ khung tin nhỏ (khoảng vài trăm bit), IrCC₁₇-URC-QPSK lại không cho hiệu năng cải thiện so với CC-URC-QPSK với cùng loại mã chập mẹ.

3.4.3. Kết quả 3: Hiệu năng FER của cơ chế mã hóa IrCC₈-URC-QPSK qua kênh HAP chuyển mạch hai trạng thái.

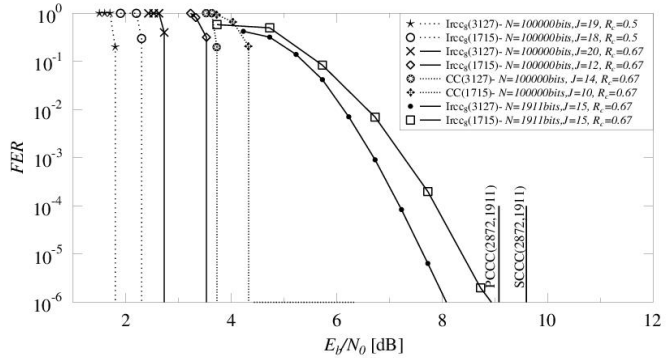
Hình 3.9 thể hiện các tham số sử dụng và các kết quả mô phỏng về hiệu năng FER của cơ chế mã hóa IrCC₈-URC-QPSK cho hệ thống HAP qua kênh HAP chuyển mạch hai trạng thái.

Các kết quả đạt được cho thấy:

- Hiệu năng FER cải thiện khi: (i) tỷ lệ mã thấp hơn trong cùng một mã sử dụng (IrCC₈(31,27) hoặc IrCC₈(17,15)); (ii) sử dụng mã mẹ có độ dài hạn chế lớn hơn (IrCC₈(31,27) hiệu năng tốt hơn IrCC₈(17,15)).
- Tại $FER=10^{-6}$, tỷ lệ mã 0,67, với cùng số vòng lặp và kích cỡ khung tin ($J=15$, $N=1911$ bit), cơ chế IrCC₈-URC-QPSK cho hiệu năng độ lợi mã hóa cải thiện hơn so với SCCC(2872,1911) [11] khoảng 0,77/1,57 dB tương ứng với IrCC₈(17,15) và IrCC₈(31,27).

- Tại $FER=10^{-5}$, tỷ lệ mã 0,67, với cùng số vòng lặp và kích cỡ khung tin ($J=15$, $N=1911$ bit), cơ chế IrCC₈-URC-QPSK cho hiệu năng độ lợi mã hóa cải thiện hơn so với PCCC(2872,1911) [11] khoảng 0,5/1,35 dB tương ứng với IrCC₈(17,15) và IrCC₈(31,27).

Hình 3. 9. Hiệu năng FER của cơ chế mã hóa IrCC₈-URC-QPSK cho hệ thống HAP qua kênh HAP chuyển mạch hai trạng thái



Hơn nữa, cơ chế IrCC₈-URC-QPSK, tỷ lệ mã 0,67: (i) IrCC₈(31,27) cho $d_{DCMC} = 0,4$ dB, cải thiện hiệu năng d_{DCMC} hơn so với CC(31,27) khoảng 1,0 dB; (ii) IrCC₈(17,15) cho $d_{DCMC} = 1,2$ dB, cải thiện hiệu năng d_{DCMC} hơn so với CC(17,15) khoảng 0,8 dB.

Nhìn chung, trên cơ sở ba kết quả chính về hiệu năng của cơ chế mã hóa IrCC-URC-MOD đạt được ở trên, nhận thấy: với số vòng lặp giải mã và kích cỡ khung tin đủ lớn, IrCC đề xuất và thiết kế trong cơ chế mã hóa IrCC-URC-MOD cho hệ thống HAP đã thể hiện được hiệu năng cải thiện về độ lợi mã hóa và tiếp cận dung lượng kênh. Mức độ cải thiện nhiều hay ít phụ thuộc kích cỡ khung tin (kích thước bộ đan xen), số vòng lặp giải mã, mã chập mẹ và số lượng mã chập con thành phần được sử dụng. Tuy nhiên, để đạt được hiệu năng cải thiện như trên thì số vòng lặp giải mã cũng tăng, điều này cũng sẽ làm tăng thêm thời gian giải mã kênh.

3.5. KẾT LUẬN CHƯƠNG 3

Trong chương 3 này đã đạt được những kết quả như sau:

- Thiết kế được 28 bộ kết quả IrCC cho hai trường hợp sử dụng mã chập mẹ: CC(1, 15/17) và CC(1,27/31), và đánh giá hiệu năng của IrCC qua mô phỏng.
- Với đề xuất sử dụng IrCC ở bộ mã hóa vòng ngoài trong cơ chế mã hóa của công trình nghiên cứu [11] đã cho thấy hiệu năng cải thiện hơn so với [11].

Tuy nhiên, để đạt được hiệu năng cải thiện như trên thì số vòng lặp giải mã cũng tăng. Hơn nữa, khi kích cỡ khung ngắn (khoảng vài trăm bit), hiệu năng nâng cao là không đáng kể, thậm chí không đạt được.

CHƯƠNG 4: XÂY DỰNG MÔ HÌNH GIẢI TÍCH XÁC ĐỊNH ĐƯỜNG BIÊN XÁC SUẤT LỖI CHO HỆ THỐNG HAP

4.1. XÂY DỰNG CÔNG THỨC TÍNH XÁC SUẤT LỖI CẶP

Xác suất lỗi cặp được định nghĩa là xác suất giải mã sai chuỗi X thành chuỗi \hat{X} và thường được sử dụng trong phân tích đánh giá hiệu năng mã kênh sử dụng trong các hệ thống thông tin. Khi có thông tin trạng thái kênh, xác suất lỗi cặp có điều kiện (CPEP) cho hệ thống sử dụng mã hóa kênh, điều chế QPSK, tách sóng nhất quán được xác định là:

$$P_{m_1 m_2, QPSK}(X, \hat{X} | \{a_i\}) = Q\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0} \left[\sum_l^m a_l^2 |\hat{x}_l - x_l|^2 + \sum_k^m a_k^2 |\hat{x}_k - x_k|^2 \right]}\right) \quad (4.1)$$

trong đó, $Q(\bullet)$ là hàm Q phân bố Gauss.

Khi kênh HAP chịu ảnh hưởng của pha-đỉnh Rayleigh, (4.1) trở thành:

$$P_{m_1 m_2, QPSK, HAP-Ray}(X, \hat{X}) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \left(\frac{\sin^2 \gamma}{\sin^2 \gamma + E_b/2N_0} \right)^{m_1} \left(\frac{\sin^2 \gamma}{\sin^2 \gamma + E_b/N_0} \right)^{m_2} d\gamma \quad (4.2)$$

Khi kênh HAP chịu ảnh hưởng của pha-đỉnh Rice, ta có:

$$P_{m_1 m_2, QPSK, HAP-Rice}(X, \hat{X}) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \left[\frac{\rho_1 \sin^2 \gamma}{1 + \rho_1 \sin^2 \gamma} \exp\left(\frac{-K(\theta)}{1 + \rho_1 \sin^2 \gamma}\right) \right]^{m_1} \left[\frac{\rho_2 \sin^2 \gamma}{1 + \rho_2 \sin^2 \gamma} \exp\left(\frac{-K(\theta)}{1 + \rho_2 \sin^2 \gamma}\right) \right]^{m_2} d\gamma \quad (4.3)$$

trong đó: $\rho_1 = \frac{1 + K(\theta)}{E_b/2N_0}$; $\rho_2 = \frac{1 + K(\theta)}{E_b/N_0}$.

Trong trường hợp kênh HAP là kênh chuyển mạch hai trạng thái:

$$P_{m_1 m_2, QPSK, HAP-TSS}(X, \hat{X}) = \sum_{m_2} \sum_{m_1} \left(0,565 P_{m_1 m_2, QPSK, HAP-Rice}(X, \hat{X}) + 0,435 P_{m_1 m_2, QPSK, HAP-RL}(X, \hat{X}) \right) \quad (4.4)$$

4.2. XÂY DỰNG MÔ HÌNH GIẢI TÍCH XÁC ĐỊNH ĐƯỜNG BIÊN XÁC SUẤT LỖI BIT CỦA CƠ CHẾ MÃ HÓA IrCC-URC-QPSK

4.2.1. Xây dựng mô hình giải tích xác định đường biên xác suất lỗi bit

Để tính toán xác suất lỗi của hệ thống HAP sử dụng mã kênh C_s theo cơ chế mã hóa IrCC-URC-QPSK (hình 3.6), tỷ lệ mã $R_c = R_o = p/n$, giả thiết rằng các bộ mã thành phần vòng ngoài C_o và vòng trong C_i là tuyến

tính thì C_s được xem là mã khối tuyến tính. Khi đó, thuật toán giải mã lặp trong C_s với số lần lặp đủ lớn có thể xem là thuật toán cận tối ưu có chất lượng hội quy về giải mã ML. Ngoài ra, bộ đan xen Π , có kích thước $L_\pi = N/R_c$ bit (N là kích cỡ khung tin), được giả thiết là bộ đan xen ngẫu nhiên đồng dạng.

Không mất tính tổng quát, giả thiết từ mã phát đi là từ mã toàn “không” thì xác suất lỗi (xác suất lỗi bit P_b) của một sự kiện khác “không” sẽ nhỏ hơn tổng tất cả các sự kiện lỗi có thể xảy ra. Vì vậy, đường biên tổng của cơ chế mã hóa IrCC-URC-QPSK có dạng:

$$P_b \leq \sum_{m_1} \sum_{m_2} \sum_b \frac{b}{L_\pi R_c} W_{b,m_1,m_2}^{C_s} P_{m_1,m_2,QPSK,HAP} (X, \widehat{X}) \quad (4.5)$$

trong đó $W_{b,m_1,m_2}^{C_s}$ là hàm liệt kê trọng số có điều kiện (CWEF), thể hiện số từ mã của mã C_s có trọng số Hamming đầu vào b , và trọng số Hamming đầu ra m_1, m_2 ; $P_{m_1,m_2,QPSK,HAP} (X, \widehat{X})$ là xác suất lỗi cặp sử dụng điều chế QPSK qua kênh HAP.

Xác suất lỗi bit của cơ chế mã hóa IrCC-URC-QPSK được xác định là:

$$P_{b_IrCC-URC-QPSK} = \sum_{k=1}^P \alpha_k P_{b_k}, \quad P=8 \text{ hoặc } 17 \quad (4.6)$$

trong đó, P_{b_k} là xác suất lỗi bit do giải mã sai của mã chập con thành phần thứ k , tỷ lệ mã $R_k = p_k/n_k$ ($R_k=0,1 - 0,9$) và được tính là:

$$P_{b_k} \leq \sum_{m_1} \sum_{m_2} \sum_{b_k} \frac{b_k}{L_{\pi_k} R_k} W_{b_k,m_1,m_2}^{C_s} P_{k,m_1,m_2,QPSK,HAP} (X, \widehat{X}), \quad k=1,2,\dots,P \quad (4.7)$$

trong đó, L_{π_k} là độ dài của khối mã đầu ra của bộ mã con thành phần k ($L_{\pi_k} = \alpha_k L_\pi$); $W_{b_k,m_1,m_2}^{C_s}$ là hàm liệt kê trọng số có điều kiện (CWEF), thể hiện số từ mã của mã C_s có trọng số Hamming đầu vào b_k , và trọng số Hamming đầu ra m_1, m_2 , sử dụng mã chập con thành phần k có tỷ lệ mã R_k ; $P_{k,m_1,m_2,QPSK,HAP} (X, \widehat{X})$ là xác suất lỗi cặp sử dụng điều chế QPSK qua kênh HAP của mã chập con thành phần k .

Để xác định xác suất lỗi bit P_{b_k} , cần xác định được $W_{b_k,m_1,m_2}^{C_s}$. Các hệ số $W_{b_k,m_1,m_2}^{C_s}$ có thể tìm được mỗi khi hàm liệt kê trọng số đầu vào - đầu ra

(IOWEF) của các mã chập con thành phần thứ k : $W^{C_{k,o}}(B, L)$ và IOWEF của mã URC: $W^{C_i}(L, D_1, D_2)$ được xác định.

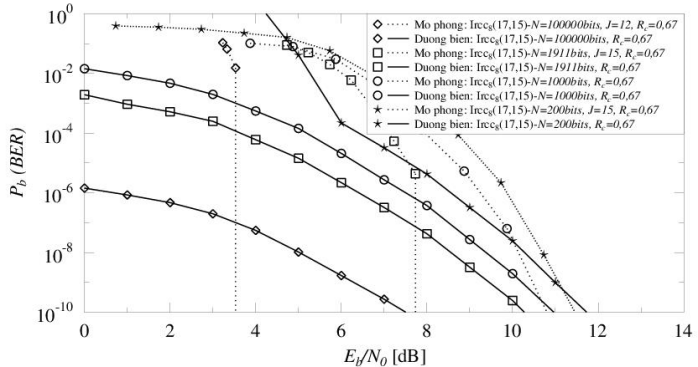
4.2.2. Hàm liệt kê trọng số của mã chập con thành phần

4.2.3. Hàm liệt kê trọng số của mã URC

4.2.4. Kết quả đạt được

Xét cơ chế mã hóa IrCC₈(17,15)-URC-QPSK (C_s), tỷ lệ mã $R_c=0,67$, qua kênh HAP chuyển mạch hai trạng thái có bộ tham số α_k là $[\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_8]=[0,094 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0,224 \ 0,487 \ 0 \ 0,195]$. Trong đó, các mã chập con thành phần có khoảng cách tự do tương ứng là $d_{k,f}^0 = 13,3,2,2$ với $k=1, 5, 6, 8$. Khi đó, áp dụng (4.6) để đánh giá hiệu năng của IrCC₈(17,15)-URC-QPSK. Để đơn giản trong tính toán (4.7), chỉ những thành phần có ảnh hưởng lớn đến tổng (4.7) mới được xét đến. Đó là những thành phần tạo ra trọng số nhỏ tại đầu ra của bộ mã hóa vòng trong.

Hình 4. 1.
Đường biên trên về xác suất lỗi bit của IrCC₈(17,15)-URC-QPSK, qua kênh HAP chuyển mạch hai trạng thái



Hình 4.1 biểu diễn các kết quả đánh giá hiệu năng của cơ chế mã hóa IrCC₈(17,15)-URC-QPSK qua mô hình giải tích xác định đường biên xác suất lỗi bit và mô phỏng. Kết quả cho thấy, với số lần lặp đủ lớn, đường biên xác suất lỗi bit tại vùng E_b/N_o đủ lớn khá sát với kết quả mô phỏng. Với kích cỡ khung tin khác nhau, các đường biên xác suất lỗi bit của cơ chế mã hóa IrCC-URC-QPSK đều cho thấy có cùng độ dốc và thể hiện được độ lợi đan xen khi tăng kích cỡ khung tin. Điều này có nghĩa là với khung tin có kích cỡ từ $N=100$ bit lên $N=1000$ bit thì độ lợi đan xen đạt được khoảng 10^{-2} .

Nhìn chung, mô hình giải tích ở trên cho phép có những đánh giá nhanh hiệu năng của cơ chế mã hóa IrCC-URC-QPSK sử dụng trong hệ

thống HAP, giúp kiểm chứng lại các kết quả thiết kế mã kênh và đánh giá hiệu năng mã kênh qua mô phỏng cho hệ thống HAP.

4.3 KẾT LUẬN CHƯƠNG 4

Với mục tiêu xây dựng mô hình giải tích để đánh giá nhanh hiệu năng của cơ chế mã hóa IrCC-URC-QPSK sử dụng trong hệ thống HAP, chương này đã đạt được một số kết quả nghiên cứu như sau:

- ✚ Xây dựng công thức tính xác suất lỗi cặp cho hệ thống HAP sử dụng điều chế QPSK.
- ✚ Xây dựng mô hình giải tích xác định đường biên xác suất lỗi để đánh giá hiệu năng cơ chế mã hóa IrCC-URC-QPSK sử dụng trong hệ thống HAP. Mô hình được tính toán dựa trên xác suất lỗi bit của các mã chập con thành phần tham gia vào quá trình mã hóa và giải mã IrCC theo các hệ số trọng số tối ưu thiết kế.
- ✚ Xây dựng biểu đồ lưới mở rộng cho mã chập con thành phần được sử dụng trong IrCC.

Các kết quả đạt được cho thấy mô hình giải tích xác định đường biên xác suất lỗi sẽ là công cụ đắc lực trong việc đánh giá nhanh hiệu năng của cơ chế mã hóa IrCC-URC-QPSK sử dụng trong hệ thống HAP.

KẾT LUẬN

Mục tiêu của luận án là tập trung vào ba vấn đề nghiên cứu chính là: (i) Nghiên cứu thiết lập các đường biên dung lượng kênh của hệ thống HAP qua một số phương thức điều chế tách sóng nhất quán như QPSK, 16QAM, 64QAM,...; (ii) Đề xuất sử dụng và thiết kế mã kênh IrCC tiếp cận dung lượng kênh cho hệ thống HAP sử dụng biểu đồ EXIT; (iii) Xây dựng mô hình giải tích xác định đường biên xác suất lỗi để đánh giá hiệu năng của cơ chế mã hóa IrCC-URC-QPSK sử dụng trong hệ thống HAP. Để đạt được mục tiêu đặt ra, luận án đã thực hiện được các đóng góp mới như sau:

1. Thiết lập các đường biên dung lượng kênh cho hệ thống HAP

Dựa trên các khảo sát của các nghiên cứu trước, NCS nhận thấy rằng các nghiên cứu đánh giá hiệu năng mã kênh sử dụng trong hệ thống HAP đều không bàn luận đến hiệu năng tiếp cận dung lượng kênh cũng như dung lượng DCMC. Vì vậy, để thiết kế mã kênh tiếp cận dung lượng kênh, luận án đã thiết lập các đường biên dung lượng DCMC cho hệ thống HAP sử dụng phương thức điều chế tách sóng nhất quán qua một số mô hình kênh HAP tiêu biểu. Dung lượng DCMC còn cho thấy sự phụ thuộc vào góc ngẩng, bởi với mỗi vị trí góc ngẩng cho điều kiện kênh HAP khác nhau. Do vậy, khi triển khai hệ thống HAP trong thực tế, cần xét đến vị trí góc ngẩng sao cho hệ thống đạt được chất lượng thông tin tốt nhất. Đặc biệt, các đường biên dung lượng DCMC sẽ được sử dụng để đánh giá hiệu năng

tiếp cận dung lượng kênh của mã kênh thiết kế cho hệ thống HAP. Ngoài ra, các tham số đánh giá hiệu năng khác như: xác suất tới hạn và dung lượng tới hạn cũng được xem xét. Các kết quả đạt được trong đóng góp này sẽ là nguồn tham khảo tốt trong thiết kế và triển khai hệ thống HAP.

2. Đề xuất và thiết kế 28 bộ tham số mã kênh tiếp cận dung lượng kênh cho hệ thống HAP

Trong nghiên cứu về mã kênh sử dụng cho hệ thống HAP, NCS đã đề xuất sử dụng IrCC với mục tiêu hiệu năng tiếp cận dung lượng kênh. Các đóng góp chính trong nhóm kết quả này là:

- ✚ Thiết kế IrCC cho hai trường hợp mã chập mẹ: CC(1, 15/17) và CC(1,27/31) sử dụng công cụ biểu đồ EXIT, qua: (i) một số mô hình kênh điển hình của hệ thống HAP: kênh HAP pha-đỉnh Rice; Rayleigh và kênh HAP chuyển mạch hai trạng thái; (ii) các cơ chế điều chế: QPSK, 8PSK, 16QAM, 64QAM; (iii) tỷ lệ mã: 0,5; 0,67; 0,75. Cụ thể, luận án đã thiết kế được 28 bộ tham số cho IrCC. Từ đó hoàn toàn có thể thiết kế được IrCC với các kịch bản khác. Đồng thời, luận án cũng đánh giá hiệu năng của IrCC-URC-MOD qua công cụ mô phỏng.
- ✚ Với đề xuất sử dụng IrCC ở bộ mã hóa vòng ngoài trong cơ chế mã hóa của dự án CAPANINA đã cho thấy hiệu năng đạt được tốt hơn so với PCCC và SCCC của dự án CAPANINA. Cụ thể, khi số vòng lặp giải mã và kích cỡ khung tin đủ lớn, cơ chế mã hóa IrCC-URC-QPSK, với $R_c=0,5$ cho hiệu năng tiếp cận dung lượng kênh cũng như độ lợi mã hóa cải thiện hơn khoảng:
 - 1,7 dB/1,5 dB/0,8 dB qua kênh HAP chịu ảnh hưởng của pha-đỉnh Rice ($K=10$ dB) tương ứng đối với IrCC₁₇(31,27)/ IrCC₁₇(17,15)/ IrCC₈(17,15).
 - 1,0 dB/0,8 dB/0,5 dB qua kênh HAP chịu ảnh hưởng của pha-đỉnh Rayleigh tương ứng với IrCC₁₇(31,27)/ IrCC₁₇(17,15)/ IrCC₈(17,15).
 - 1,2 dB/1,1 dB/0,7 dB đối với kênh HAP chuyển mạch hai trạng thái tương ứng với IrCC₈(31,27)/ IrCC₁₇(17,15)/ IrCC₈(17,15).

Tuy nhiên, với những kết quả cải thiện hiệu năng đạt được thì số vòng lặp giải mã cũng tăng. Hơn nữa, ở kích cỡ khung tin ngắn (khoảng vài trăm bit), hiệu năng về độ lợi mã hóa cải thiện không đáng kể, thậm chí không đạt được.

3. Xây dựng mô hình giải tích xác định đường biên hiệu năng xác suất lỗi bit cho hệ thống HAP

Để có những đánh giá nhanh về hiệu năng của cơ chế mã hóa IrCC-URC-QPSK sử dụng trong hệ thống HAP, luận án xây dựng mô hình giải tích xác định đường biên xác suất lỗi bit. Trong mô hình này, luận án đã: (i) xây dựng công thức tính xác suất lỗi cặp cho hệ thống HAP sử dụng điều chế QPSK; (ii) xây dựng mô hình giải tích xác định đường biên xác suất lỗi bit của cơ chế mã hóa IrCC-URC-QPSK; (iii) thiết lập các bước xây dựng sơ đồ lưới mở rộng cho mã chập con thành phần được sử dụng trong IrCC, tạo cơ sở xác định hàm liệt kê trọng số của các mã chập con thành phần.

Tuy nhiên, cùng với những kết quả mới đạt được thì những vấn đề gợi mở dưới đây được xem là hướng nghiên cứu tiếp theo của luận án:

- Nghiên cứu đánh giá hiệu năng mã kênh cho hệ thống HAP qua một số mã kênh khác như: mã kiểm tra chẵn lẻ mật độ thấp (LDPC), mã cực (Polar) ... hoặc cơ chế mã hóa khác.
- Xây dựng kịch bản và mô hình kênh HAP có xem xét đến ảnh hưởng của pha-đỉnh Rice che khuất ở các khu vực đô thị, ngoại thành, nông thôn. Từ đó thiết kế mã kênh tiếp cận dung lượng kênh cho hệ thống HAP qua mô hình kênh này.
- Thiết kế IrCC cho hệ thống HAP-MIMO, và hệ thống HAP sử dụng cơ chế điều chế tách sóng không nhất quán, .
- Nghiên cứu các cơ chế điều chế mã hóa thích ứng để nâng cao chất lượng thông tin cho hệ thống HAP khi HAP không tựa tĩnh và/hoặc thiết bị thu phát mặt đất di động.
- Nghiên cứu thiết kế bộ giải mã cho cơ chế mã hóa IrCC-URC-MOD.