

BỘ QUỐC PHÒNG
HỌC VIỆN KỸ THUẬT QUÂN SỰ

NGHIÊN CỨU ĐÁNH GIÁ VÀ NÂNG CAO PHẨM
CHẤT HỆ THỐNG VÔ TUYẾN CHUYỂN TIẾP SONG
CÔNG TRÊN CÙNG BĂNG TẦN

Chuyên ngành: KỸ THUẬT ĐIỆN TỬ
Mã số: 9 52 02 03

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

Hà Nội - 2020

CÔNG TRÌNH ĐƯỢC HOÀN THÀNH TẠI
HỌC VIỆN KỸ THUẬT QUÂN SỰ - BỘ QUỐC PHÒNG

Người hướng dẫn khoa học: GS.TS Trần Xuân Nam
TS Trần Đình Tấn

Phản biện 1: PGS.TS Hoàng Mạnh Thắng

Phản biện 2: PGS.TS Lê Nhật Thăng

Phản biện 3: PGS.TS Trần Đức Tân

Luận án sẽ được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án cấp Học viện theo Quyết định số 1426/QĐ-HV ngày 13 tháng 5 năm 2020 của Giám đốc Học viện Kỹ thuật Quân sự, họp tại Học viện Kỹ thuật Quân sự vào hồi ... giờ ... ngày ... tháng ... năm ...

Có thể tìm hiểu luận án tại:

- Thư viện Quốc gia Việt Nam
- Thư viện Học viện Kỹ thuật Quân sự.

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH SỬ DỤNG TRONG
LUẬN ÁN

- A₁. "Performance Analysis of In-Band Full-Duplex Amplify-and-Forward Relay System with Direct Link," in *2018 2nd International Conference on Recent Advances in Signal Processing, Telecommunications and Computing (SigTelCom)*, Ho Chi Minh, Vietnam, pp. 192-197, Jan. 2018. DOI: 10.1109/SIGTELCOM.2018.8325789 (Scopus).
- A₂. "Full-Duplex Amplify-and-Forward Relay System with Direct Link: Performance Analysis and Optimization," *Physical Communication*, Elsevier, (ISI). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.phycom.2019.100888>.
- A₃. "Performance Analysis of Full-Duplex Vehicle-to-Vehicle Relay System over Double-Rayleigh Fading Channels," *Mobile Networks and Applications*, Springer, (ISI). DOI: <https://doi.org/10.1007/s11036-019-01291-x>.
- A₄. "Performance Analysis of Full-Duplex Amplify-and-Forward Relay System With Hardware Impairments and Imperfect Self-Interference Cancellation," *Wireless Communications and Mobile Computing*, Hindawi, (ISI). DOI: <https://doi.org/10.1155/2019/4946298>.
- A₅. "Đánh giá phẩm chất mạng chuyển tiếp song công hai chiều trên cùng băng tần dưới tác động của phần cứng không lý tưởng," *Các công trình nghiên cứu, phát triển và ứng dụng Công nghệ Thông tin và Truyền thông*, Bộ Thông tin và Truyền thông, Hà Nội, Việt Nam, Số 39, trang 26-34, tháng 11, 2018. DOI: 10.32913/rd-ict.vol1.no39.728.

Một số kết quả đạt được của luận án

1. Phân tích phẩm chất, đề xuất phân bổ công suất tối ưu cho mạng chuyển tiếp AF-FDR khi có tín hiệu trực tiếp từ nguồn tới đích. Để giảm ảnh hưởng của RSI, đồng thời nâng cao phẩm chất hệ thống, luận án đề xuất thuật toán và tính toán phân bổ công suất tối ưu cho truyền thông FD. Kết quả cho thấy phẩm chất hệ thống được cải thiện đáng kể so với phân bổ công suất ngẫu nhiên.
2. Phân tích phẩm chất mạng chuyển tiếp DF-FDR một chiều qua kênh pha-đỉnh Rayleigh kép. Luận án xem xét hệ thống sát với điều kiện thực tế: nút nguồn có thể cố định hoặc di chuyển trong khi nút chuyển tiếp và nút đích đều di chuyển. Thông qua các biểu thức giải tích, ảnh hưởng của khoảng cách giữa các nút, hệ số suy hao truyền dẫn và RSI đã được phân tích cụ thể.
3. Xây dựng mô hình và phân tích phẩm chất mạng chuyển tiếp AF-FDR một chiều và hai chiều dưới ảnh hưởng của lỗi phần cứng qua kênh pha-đỉnh Rayleigh. Các biểu thức phân tích được tìm ra và đánh giá sự ảnh hưởng của lỗi phần cứng đến phẩm chất hệ thống trong sự so sánh với hệ thống có phần cứng lý tưởng. Mặt khác, luận án đề xuất phân bổ công suất tối ưu cho hệ thống khảo sát.

Hướng phát triển của luận án

1. Phân tích hệ thống truyền thông FD-V2V khi nút chuyển tiếp FDR sử dụng giao thức AF, hay trong kịch bản D2D.
2. Kết hợp kỹ thuật FD với EH, xem xét ảnh hưởng của lỗi phần cứng đến khả năng thu thập năng lượng của thiết bị vô tuyến.
3. Kết hợp chuyển tiếp FDR với hệ thống NOMA, hệ thống sử dụng điều chế không gian.
4. Đề xuất các biện pháp, thuật toán giảm RSI và HI nhằm nâng cao phẩm chất hệ thống.

1. Động lực nghiên cứu:

Công nghiệp viễn thông đang trong giai đoạn bùng nổ về công nghệ vô tuyến, tạo nên sự ra đời và phát triển nhanh chóng của các thiết bị Internet kết nối vạn vật (IoT: Internet of Things). Đồng thời, các thiết bị vô tuyến được nâng cấp cả phần cứng và phần mềm, đáp ứng nhu cầu ngày càng cao của người sử dụng không chỉ trong liên lạc thoại, dữ liệu mà trong tất cả các hoạt động hàng ngày như điều khiển thiết bị, nhà thông minh, xe hơi hiện đại. Số lượng người dùng tăng nhanh, nhu cầu trao đổi dữ liệu lớn trong khi tài nguyên phổ tần hạn chế đòi hỏi các nhà nghiên cứu, thiết kế mạng vô tuyến tìm cách nâng cao hiệu quả sử dụng phổ tần.

Nhiều giải pháp kỹ thuật đã được đề xuất nghiên cứu và thử nghiệm như truyền thông ở tần số ứng với bước sóng cỡ mi-li-mét (mmWave: millimeter wave), MIMO cỡ lớn (massive MIMO), đa truy nhập không trực giao (NOMA: Non-Orthogonal Multiple Access), truyền thông song công trên cùng băng tần (IBFD: In-Band Full-Duplex hoặc FD: Full-Duplex). Trong những kỹ thuật này, truyền thông FD nổi lên là một giải pháp hứa hẹn cho mạng vô tuyến 5G và thế hệ tiếp theo bởi khả năng tăng gấp đôi dung lượng và hiệu quả sử dụng phổ tần do thiết bị FD có thể thu, phát trên cùng một tần số và tại cùng một thời điểm.

Với những ưu điểm nổi trội của kỹ thuật FD so với kỹ thuật HD truyền thống, truyền thông FD được ứng dụng rộng rãi trong các hệ thống khác nhau, chẳng hạn như: thu thập năng lượng (EH: Energy Harvesting), massive MIMO, mạng tế bào nhỏ (small cell), mmWave, trong quân sự, truyền thông thiết bị-thiết bị (D2D: Device-to-Device), mạng chuyển tiếp, mạng cục bộ (localization network), vô tuyến nhận thức (CR: Cognitive Radio), truyền thông hợp tác (Cooperative communications), hệ thống vận tải thông minh (ITS: Intelligent Transportation Systems).

Vì vậy, việc nghiên cứu và phát triển lý thuyết cho mạng chuyển tiếp sử dụng kỹ thuật FD cần tiếp tục được triển khai trong giai đoạn hiện nay, đặc biệt là trong bối cảnh truyền thông FD đang là vấn đề có ý nghĩa thời sự và sẽ được áp dụng cho hệ thống vô tuyến tương lai. Do đó đề tài “**Nghiên cứu đánh giá và nâng cao phẩm chất hệ thống vô tuyến chuyển tiếp song công trên cùng**

băng tần” mang tính cấp thiết, có ý nghĩa khoa học cao và phù hợp với xu thế thời đại. Kết quả nghiên cứu sẽ bổ sung thêm lý thuyết mới về kỹ thuật FD và những ứng dụng của nó. Đồng thời, đó là tài liệu tham khảo quan trọng trong việc nghiên cứu, phát triển và triển khai hệ thống FD trong thực tế.

2. Các đóng góp của luận án:

1. Đề xuất mô hình, đánh giá và nâng cao phẩm chất mạng chuyển tiếp FDR một chiều trong trường hợp phần cứng hệ thống là lý tưởng. Với trường hợp này, luận án có hai đóng góp chính như sau:
 - Đề xuất mô hình và phân tích phẩm chất mạng chuyển tiếp FDR một chiều trong kịch bản truyền thông hợp tác khi nút FDR sử dụng giao thức AF. Để cải thiện phẩm chất hệ thống, luận án đề xuất phân bổ công suất tối ưu cho nút chuyển tiếp FDR. Kết quả tính toán cho thấy rằng, với công suất tối ưu, phẩm chất hệ thống được cải thiện đáng kể so với trường hợp không sử dụng công suất tối ưu.
 - Đề xuất mô hình ứng dụng mạng chuyển tiếp FDR một chiều khi nút chuyển tiếp hoạt động ở chế độ DF trong truyền thông V2V. Trên cơ sở mô hình hệ thống, luận án phân tích phẩm chất hệ thống khi nút chuyển tiếp và nút đích di chuyển, trong khi nút nguồn được khảo sát với hai trường hợp: cố định và di chuyển. Thông qua biến đổi toán học, luận án đã tìm ra biểu thức chính xác về xác suất dừng, xác suất lỗi ký hiệu cho hai trường hợp khảo sát. Từ đó, đánh giá được ảnh hưởng của nhiều yếu tố lên phẩm chất hệ thống.
2. Đề xuất mô hình, đánh giá và nâng cao phẩm chất mạng chuyển tiếp FDR một chiều và hai chiều sử dụng kỹ thuật AF trong trường hợp phần cứng không hoàn hảo (HI: Hardware Impairments) ở tất cả các nút trong hệ thống. Luận án tìm ra biểu thức về xác suất dừng, xác suất lỗi ký hiệu của hệ thống khảo sát qua kênh pha-đỉnh Rayleigh. Để nâng cao phẩm chất hệ thống, giảm sự ảnh hưởng của HI và RSI, luận án tiến hành phân bổ công suất tối ưu cho hệ thống này. Bằng cách sử dụng phân bổ công suất tối ưu, phẩm chất hệ thống được cải thiện so với trường hợp phân bổ ngẫu nhiên. Đặc biệt cho hệ thống AF-FDR một chiều, phẩm chất hệ thống tránh được sà lồi khi sử dụng giá trị công suất tối ưu.

3. Bố cục luận án:

Luận án được tổ chức như sau: Mở đầu; 3 chương nội dung; Kết luận và hướng nghiên cứu tương lai; Phụ lục và Danh mục các công trình nghiên cứu.

truyền dẫn tăng lên ($\mathcal{R} = 3; 4$), hệ thống với phần cứng không lý tưởng không thể đạt tới tiệm cận yêu cầu ngay cả khi SNR đủ lớn.

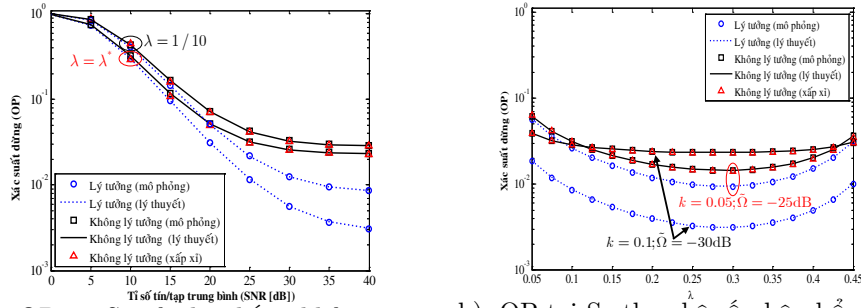
Hình 3.7(b) minh họa phẩm chất lỗi ký hiệu tại S_2 , sử dụng điều chế BPSK với $k = 0.1$, $\tilde{\Omega} = -30$ dB và $\lambda = 1/3$ (tức là $P_1 = P_2 = P_R$). Trong đó, đường lý thuyết thể hiện kết quả ở biểu thức (3.9). Ta thấy rằng, khi SNR thấp (dưới 10 dB) sự sai khác giữa phân tích lý thuyết và kết quả mô phỏng là khá lớn. Nhưng ở vùng SNR cao (trên 10 dB) kết quả tính toán hoàn toàn đúng với kết quả mô phỏng. Đồng thời, với SNR = 40 dB, hệ thống với phần cứng không lý tưởng có SEP cao hơn 10 lần so với hệ thống lý tưởng.

3.3 Kết luận chương 3

HI luôn tồn tại trong thiết bị vô tuyến vì không có thiết bị nào là đảm bảo 100% độ chính xác của các linh kiện và mạch điện tử trong toàn bộ thiết bị. Để đánh giá phẩm chất một hệ thống vô tuyến, nhiều yếu tố khác nhau được khảo sát, trong đó HI là một tham số quan trọng. Trong thực tế, do tính phức tạp tính toán, HI thường được bỏ qua trong các nghiên cứu, đặc biệt là cho truyền thông FDR.

Thông qua phân tích phẩm chất hệ thống AF-FDR một chiều và hai chiều, luận án đã đưa ra các biểu thức chính xác, biểu thức xấp xỉ OP và giá trị tiệm cận khi công suất phát đủ lớn. Mặt khác, biểu thức thông lượng và SEP đã được khảo sát để đánh giá toàn diện hệ thống. Từ đó, luận án đề xuất phân bổ công suất tối ưu để nâng cao phẩm chất hệ thống. Kết quả cho thấy, phẩm chất hệ thống được cải thiện đáng kể so với phân bổ công suất ngẫu nhiên. Đặc biệt với hệ thống AF-FDR một chiều, phân bổ công suất tối ưu giúp tránh được sà lồi ở vùng SNR cao.

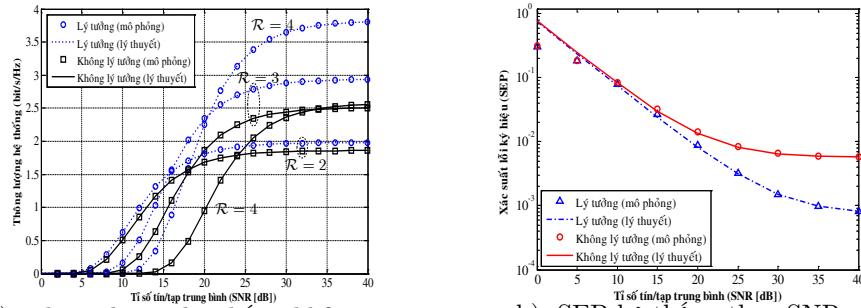
Đồng thời, so với hệ thống lý tưởng, hệ thống có HI có phẩm chất kém hơn nhiều lần, nhất là trong trường hợp hệ số méo dạng lớn. Bên cạnh đó, so với hệ thống HD lý tưởng thì hệ thống FD không lý tưởng có phẩm chất kém hơn nhiều và sớm đạt tới mức bão hòa khi công suất phát đủ lớn. Vì vậy, ngoài việc thực hiện tốt các kỹ thuật để triệt nhiễu tự giao thoa cho truyền thông song công trên cùng băng tần, các nhà sản xuất cần thực hiện tốt việc hạn chế phần cứng không lý tưởng nhằm làm giảm tác động tới phẩm chất hệ thống, từ đó tạo tính khả thi cho truyền thông song công trên cùng băng tần.



a). OP tại S_2 của hệ thống khảo sát. b). OP tại S_2 theo hệ số phân bổ công suất.

Hình 3.6: OP hệ thống AF-FDR hai chiều.

hệ thống lý tưởng. Chú ý rằng, với những tham số đã chọn, phân bổ công suất tối ưu có giá trị từ 0.25 đến 0.3 cho cả hệ thống lý tưởng và không lý tưởng. Hình 3.6(b) thể hiện xác suất dừng tại S_2 theo hệ số phân bổ công suất, với RSI và HI khác nhau. Khi ta tăng mức độ HI (k từ 0.05 ở trường hợp 1 lên 0.1 ở trường hợp 2), OP hệ thống không lý tưởng đạt tới bão hòa, do đó không có sự khác biệt khi λ thay đổi. Từ đó cho thấy sự đúng đắn của kết quả phân tích so với kết quả khảo sát. Đồng thời khi HI lớn, kết hợp với công suất phát đủ lớn, có thể sử dụng phân bổ công suất cố định cho hệ thống để giảm độ phức tạp.



a). Thông lượng hệ thống khảo sát. b). SEP hệ thống theo SNR.

Hình 3.7: OP hệ thống AF-FDR hai chiều.

Hình 3.7(a) cho thấy, với tốc độ truyền dẫn thấp ($R = 2$), ảnh hưởng của phần cứng không lý tưởng đến thông lượng không đáng kể. Nhưng khi tốc độ

Chương 1

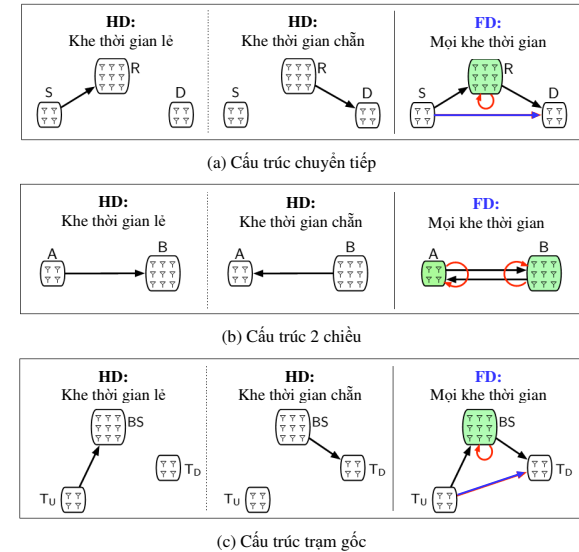
Kỹ thuật truyền dẫn song công trên cùng băng tần

1.1 Tổng quan về truyền dẫn song công trên cùng băng tần

Hầu hết các hệ thống thông tin hiện hành bao gồm các thiết bị đầu cuối hoạt động như các máy thu phát. Thông thường, các máy thu phát này hoạt động ở chế độ bán song công (HD) hoặc song công khác băng tần (phân chia theo tần số) hoặc song công khác thời gian (phân chia theo thời gian). Truyền thông FD cho phép các thiết bị đầu cuối vô tuyến thu và phát đồng thời trên cùng một băng tần và tại cùng một thời điểm, từ đó tạo nên khả năng tăng gấp đôi hiệu quả sử dụng phổ tần.

1.2 Một số mô hình thu phát FD

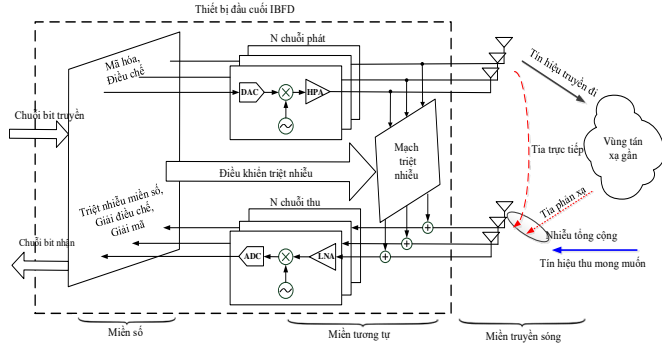
Hình 1.1 là ba cấu trúc cơ bản của hệ thống FD khi so sánh với hệ thống HD bao gồm cấu trúc chuyển tiếp, cấu trúc 2 chiều và cấu trúc trạm gốc.



Hình 1.1: Ba ví dụ về cấu trúc hệ thống FD.

1.3 Các biện pháp triệt nhiễu trong hệ thống FD

Vấn đề sống còn trong hệ thống FD là phải loại bỏ được nhiễu tự giao thoa (SI) từ mạch phát sang mạch thu trên cùng một thiết bị. Nhiệm vụ đặt ra là thiết kế các mạch và thuật toán để trừ khử tín hiệu SI này. Hình 1.2 là cấu trúc thiết bị đầu cuối FD dùng ăng-ten riêng biệt với nhiều ăng-ten phát và nhiều ăng-ten thu. Trường hợp dùng chung ăng-ten thì thay mỗi cặp ăng-ten thu phát bằng bộ dẫn sóng (circulator) rồi gắn với ăng-ten dùng chung.



Hình 1.2: Cấu trúc một thiết bị đầu cuối FD với ăng-ten thu phát riêng.

1.3.1 Triệt nhiễu miền truyền sóng

Công nghệ triệt nhiễu miền truyền sóng (PDSIS: Propagation-Domain Self-Interference Suppression) nhằm mục đích cách ly (isolation) điện từ trường từ chuỗi phát sang chuỗi thu, tức là loại bỏ SI trước khi nó đi vào mạch chuỗi thu. Trong các hệ thống ăng-ten riêng biệt, PDSIS được thực hiện bằng cách kết hợp các biện pháp suy hao đường truyền, phân cực chéo và ăng-ten định hướng. Trong khi đó, các hệ thống ăng-ten dùng chung thì sử dụng bộ dẫn sóng.

1.3.2 Triệt nhiễu miền tương tự

Kỹ thuật triệt nhiễu miền tương tự (ADSIC: Analog-circuit-Domain Self-Interference Cancellation) nhằm khử SI trong phần mạch tương tự, trước mạch ADC. Việc khử này có thể thực hiện trước hoặc sau mạch đổi tần xuống và mạch LNA. Hình 1.2 cho thấy một ví dụ về ADSIC, trong đó tín hiệu phát trên ăng-ten phát được dẫn, xử lý điện tử trong mạch tương tự và trừ đi tín

b. Xác suất lỗi ký hiệu

Định lý 3.5: Biểu thức gần đúng SEP cho hệ thống chuyển tiếp AF-FDR hai chiều có dạng:

$$\begin{aligned} \text{SEP}_{S_2} \approx & \frac{\alpha\sqrt{\beta}}{2\sqrt{2\pi}} \left\{ \sqrt{\frac{2\pi}{\beta}} - \sqrt{\frac{2\pi}{\beta + 2C_2 + 2d}} \text{erf} \left(\sqrt{\frac{\beta + 2C_2 + 2d}{2d}} \right) \right. \\ & - \frac{2A_2 \exp\left(-\frac{\beta + 2C_2}{2d}\right)}{\sqrt{d}(\beta + 2C_2)} + \frac{A_2}{\beta + 2C_2} \sqrt{\frac{2\pi}{\beta + 2C_2}} \text{erf} \left(\sqrt{\frac{\beta + 2C_2}{2d}} \right) \\ & - \frac{2B_2(\beta + 2C_2 + d) \exp\left(-\frac{\beta + 2C_2 - 2d}{2d}\right)}{(\beta + 2C_2 - 2d)^2 \sqrt{d^3}} \\ & \left. + \frac{3B_2}{(\beta + 2C_2 - 2d)^2} \sqrt{\frac{2\pi}{\beta + 2C_2 - 2d}} \text{erf} \left(\sqrt{\frac{\beta + 2C_2 - 2d}{2d}} \right) \right\}, \end{aligned} \quad (3.9)$$

trong đó, erf là hàm lỗi (error function) được xác định bởi $\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$.

3.2.3 Phân bổ công suất tối ưu cho hệ thống AF-FDR hai chiều

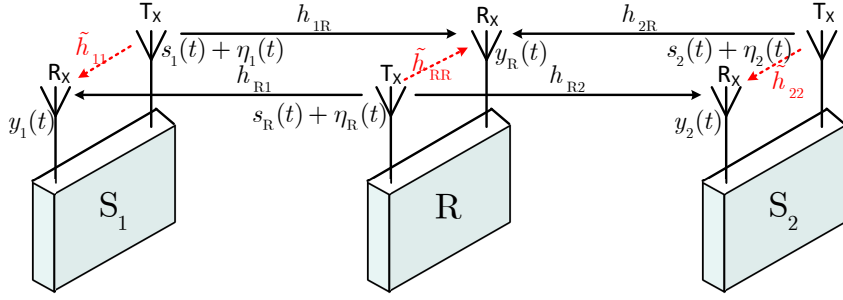
Định lý 3.6: Phân bổ công suất tối ưu cho hệ thống AF-FDR hai chiều được xác định bởi:

$$\lambda^* = \frac{-2d_R(1-xd)(\tilde{\Omega}_R P + \sigma_R^2) + \sqrt{\Delta}}{-4d_R(1-xd)(\tilde{\Omega}_R P + \sigma_R^2) + 2d_1(\tilde{\Omega}_1 P + 2\sigma_1^2)}, \quad (3.10)$$

với $\Delta = 2d_1 d_R (1-xd)(\tilde{\Omega}_R P + \sigma_R^2)(\tilde{\Omega}_1 P + 2\sigma_1^2)$.

3.2.4 Kết quả tính toán số và thảo luận

Hình 3.6(a) minh họa OP khi sử dụng và không sử dụng phân bổ công suất tối ưu theo tỉ số tín/tạp trung bình. Trên Hình 3.6(a), đồ thị biểu diễn kết quả phân tích sử dụng biểu thức (3.7) cho hệ thống không lý tưởng, đường xấp xỉ thể hiện kết quả ở biểu thức (3.8), với HI là $k_1 = k_2 = k_R = 0.1$, và RSI $\tilde{\Omega} = -30$ dB. Hình 3.6(a) cho thấy mức độ ảnh hưởng lớn của phần cứng không lý tưởng đến OP hệ thống, đặc biệt ở vùng SNR cao (trên 30 dB). phần cứng không lý tưởng kết hợp với RSI, làm cho OP sớm đạt mức bão hòa. Trong khi đó, với phần cứng lý tưởng, OP tiếp tục giảm khi tăng SNR. Mặt khác, phân bổ công suất tối ưu cho độ lợi đáng kể so với trường hợp ngẫu nhiên, đặc biệt cho



Hình 3.5: Mô hình hệ thống chuyển tiếp AF-FDR hai chiều với phần cứng không lý tưởng.

3.2.2 Phân tích phẩm chất hệ thống

a. Xác suất dừng

– Biểu thức chính xác OP

Định lý 3.4: Xác suất dừng tại S_2 của hệ thống AF-FDR hai chiều dưới sự ảnh hưởng của cả HI và RSI được xác định theo biểu thức sau:

$$P_{\text{out}}^{S_2} = \begin{cases} 1 - 2 \frac{1-xd}{1+C_2x} \exp\left(-\frac{A_2x}{1-xd} - \frac{B_2x^2}{(1-xd)^2}\right) \sqrt{M_2} K_1(2\sqrt{M_2}), & x < 1/d, \\ 1, & x \geq 1/d. \end{cases} \quad (3.7)$$

Với

$$\begin{aligned} A_2 &\triangleq \frac{t_R d_R}{\Omega_1 P_1} + \frac{t_2(\Omega_2 P_2 d_2 + \Omega_1 P_1 d_1)}{\Omega_1 P_1 \Omega_2 P_R}; B_2 \triangleq \frac{2P_2 t_2 d' d_1}{\Omega_1 P_1 P_R}; C_2 \triangleq \frac{d' \Omega_2 P_2 - d \Omega_1 P_1}{\Omega_1 P_1}; \\ D_2 &\triangleq \frac{P_2 t_2^2 d_1^2 d'}{\Omega_1 P_1 \Omega_2 P_R^2}; E_2 \triangleq \frac{t_2 d_1 (P_R t_R d_R + P_2 t_2 d_2)}{\Omega_1 P_1 \Omega_2 P_R^2}; F_2 \triangleq \frac{t_2 t_R}{\Omega_1 P_1 \Omega_2 P_R}; \\ M_2 &\triangleq \left[\frac{D_2 x^3}{(1-xd)^3} + \frac{E_2 x^2}{(1-xd)^2} + \frac{F_2 x}{1-xd} \right] \frac{1+C_2x}{1-xd}. \end{aligned}$$

– Biểu thức xấp xỉ OP

Để thu được biểu thức dạng đơn giản hơn của OP ở (3.7), trong phần này, luận án đưa ra biểu thức xấp xỉ OP trong trường hợp công suất phát đủ lớn.

$$\begin{aligned} P_{\text{out}}^{S_2-\text{ap}} &\approx 1 - \frac{1-xd}{1+C_2x} \exp\left(-\frac{A_2x}{1-xd} - \frac{B_2x^2}{(1-xd)^2}\right) \\ &\approx 1 - \exp\left(-(d+C_2)x\right) + A_2x \exp(-C_2x) + B_2x^2 \exp(d-C_2)x. \end{aligned} \quad (3.8)$$

hiệu qua ăng-ten thu để khử SI. Việc dẫn tín hiệu phát tới ăng-ten phát theo đường gần nhất có thể mang lại nhiều ưu điểm như hạn chế tạp pha bộ dao động không lý tưởng, méo phi tuyến bộ HPA. Tương tự, việc bố trí điểm SIC gần ăng-ten thu nhất có thể có ưu điểm hạn chế sử dụng nhiều mạch phân cứng trong quá trình xử lý tín hiệu với dải động cao.

1.3.3 Triệt nhiễu miền số

Mục đích của kỹ thuật SIC miền số (DDSIC: Digital-Domain Self - Interference Cancellation) là loại bỏ SI sau mạch ADC bằng cách áp dụng các kỹ thuật DSP hiện đại cho tín hiệu thu. Ưu điểm của việc này là sự xử lý tinh vi tương đối dễ trong thời đại ngày nay. Chẳng hạn khi chùm tín hiệu thu (nơi các tín hiệu thu trên từng ăng-ten được xác định thông qua độ lợi thích ứng riêng rẽ trước khi được kết hợp lại cùng nhau) sẽ được thực hiện trong miền tương tự, nhưng thực tế thì thực hiện trong miền số là phổ biến hơn, do sự ràng buộc về độ phức tạp của mạch và công suất tiêu thụ.

1.4 Kỹ thuật chuyển tiếp

Chuyển tiếp là quá trình sử dụng một thiết bị trung gian để truyền tin từ máy phát đến máy thu nhằm mở rộng vùng phủ sóng, tăng cường độ tin cậy, nâng cao tốc độ truyền tin, khắc phục hiện tượng che khuất, suy hao truyền dẫn. Dựa theo tiêu chí kỹ thuật, tức là kỹ thuật xử lý tại nút chuyển tiếp thì chuyển tiếp được phân thành hai loại: giải mã và chuyển tiếp (DF: Decode-and-Forward) và khuếch đại và chuyển tiếp (AF: Amplify-and-Forward).

1.5 Các tham số phân tích phẩm chất hệ thống

Xác suất dừng (OP: Outage Probability), thông lượng hệ thống (system throughput), xác suất lỗi ký hiệu (SEP: Symbol Error Probability) là những tham số quan trọng sử dụng cho đánh giá phẩm chất hệ thống vô tuyến, làm cơ sở cho những nội dung tiếp theo.

1.6 Kết luận chương 1

Chương 1 trình bày những kiến thức chung về truyền thông FD, một số mô hình thu phát sử dụng thiết bị FD. Đồng thời đề cập các biện pháp SIC cho thiết bị FD nhằm giảm ảnh hưởng của SI đến phẩm chất hệ thống. Bên cạnh đó, những vấn đề chung về kỹ thuật chuyển tiếp DF, AF cũng đã được phân tích để làm rõ hơn hoạt động của nút chuyển tiếp. Mặt khác, một số định nghĩa và biểu thức cho phân tích phẩm chất hệ thống được đề cập. Đó là cơ sở để tính toán, phân tích phẩm chất hệ thống trong những chương tiếp theo.

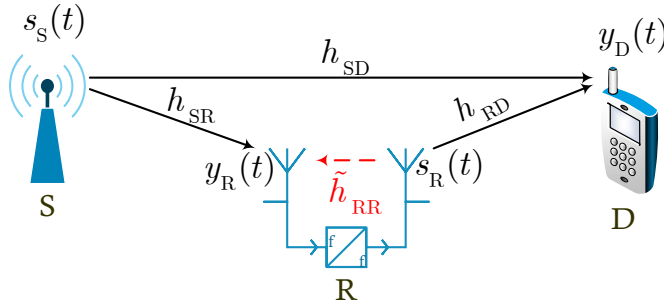
Chương 2

Đánh giá, nâng cao phẩm chất mạng chuyển tiếp FDR với phần cứng lý tưởng

2.1 Đánh giá phẩm chất mạng chuyển tiếp FDR một chiều trong trường hợp có đường liên lạc trực tiếp từ nút nguồn tới nút đích

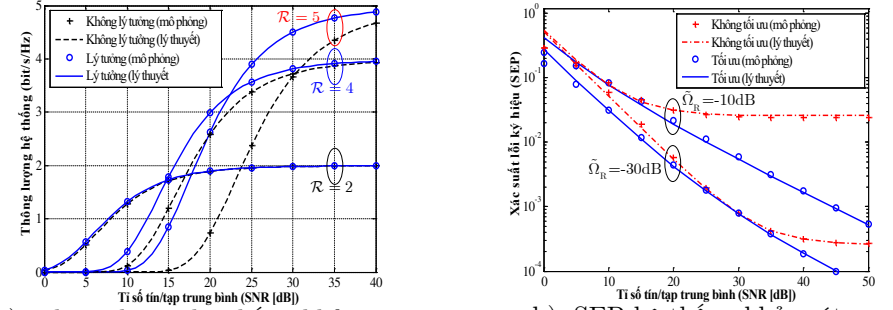
2.1.1 Mô hình hệ thống

Mô hình hệ thống chuyển tiếp AF-FDR khi có đường trực tiếp được minh họa trên Hình 2.1. Nút nguồn S phát tín hiệu tới nút đích D qua hai tuyến: qua nút chuyển tiếp R và qua đường trực tiếp từ S tới D. Trong đó, S và D là những thiết bị chỉ có một ăng-ten sử dụng cho phát hoặc thu và hoạt động ở chế độ HD. Trong khi đó, R có hai ăng-ten, một sử dụng cho thu và một sử dụng cho phát. Chú ý rằng, luận án xem xét trường hợp R có hai ăng-ten để đảm bảo quá trình SIC hiệu quả hơn, trong thực tế, R có thể dùng một ăng-ten chung cho cả thu và phát.



Hình 2.1: Mô hình hệ thống chuyển tiếp AF-FDR khi có đường trực tiếp.

Trên cơ sở mô hình hệ thống, luận án xác định được biểu thức tín hiệu thu tại nút chuyển tiếp và nút đích. Từ đó, tìm ra biểu thức tỉ số tín hiệu trên tạp âm cộng nhiễu (SINR: Signal-to-Interference plus-Noise Ratio) làm cơ sở xác định các biểu thức phân tích phẩm chất hệ thống.



a). Thông lượng hệ thống khảo sát.

b). SEP hệ thống khảo sát.

Hình 3.4: Thông lượng và SEP hệ thống AF-FDR dưới sự ảnh hưởng của HI và RSI.

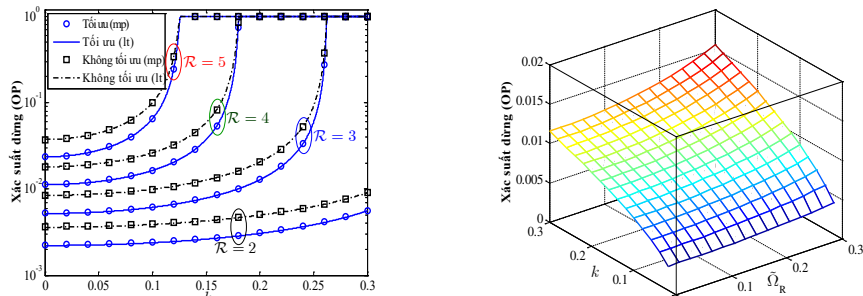
ràng thấy rằng, với hệ thống truyền dẫn tốc độ thấp ($\mathcal{R} = 2$), thông lượng đạt tới đích khi tỉ số SNR khoảng 25 dB. Đối với hệ thống truyền dẫn tốc độ cao hơn, thông lượng đạt tới đích $\mathcal{R} = 4$ khi SNR = 40 dB và $\mathcal{R} = 5$ khi SNR > 40 dB. Hình 3.4(b) minh họa xác suất lỗi ký hiệu SEP của hệ thống với những giá trị khác nhau của RSI, $\tilde{\Omega}_R = -10, -30$ dB, $k_I = k_R = 0.1$, sử dụng điều chế BPSK kết hợp với sử dụng và không sử dụng phân bổ công suất tối ưu. Trong hình này, đường lý thuyết thể hiện kết quả phân tích ở biểu thức (3.5) Định lý 3.2. Chú ý rằng, sai số giữa kết quả phân tích và mô phỏng là rất nhỏ và có thể bỏ qua, đặc biệt là ở vùng SNR cao. Rõ ràng rằng, khi RSI lớn ($\tilde{\Omega}_R = -10$ dB), phẩm chất SEP tiến tới sàn lỗi (khoảng SNR = 20 dB) khi không sử dụng công suất tối ưu. Khi RSI nhỏ hơn ($\tilde{\Omega}_R = -30$ dB), sàn lỗi SEP xuất hiện muộn hơn (khoảng SNR = 35 dB). Vì vậy, để giảm độ phức tạp cho hệ thống truyền thông FD, các nhà thiết kế vô tuyến có thể sử dụng công suất phát tại nút chuyển tiếp phù hợp tùy thuộc vào RSI được đo lường và thử nghiệm sau toàn bộ các kỹ thuật triệt nhiễu SIC.

3.2 Đánh giá phẩm chất mạng chuyển tiếp AF-FDR hai chiều trong trường hợp có HI và RSI

3.2.1 Mô hình hệ thống

Trên cơ sở HI tích hợp đã trình bày trong phần trước, ta xây dựng được mô hình hệ thống chuyển tiếp AF-FDR hai chiều với cả HI và RSI như trên Hình 3.5.

Bởi vì khi SNR > 40 dB, RSI ảnh hưởng rất lớn đến phẩm chất hệ thống, làm cho OP tiến tới khu vực bão hòa khi không sử dụng phân bổ công suất tối ưu. Vì vậy, khi các kỹ thuật hiện hành không thể loại bỏ hoàn toàn SI gây nên bởi chế độ FD, việc phân bổ công suất tối ưu là vô cùng cần thiết cho truyền thông FD. Đồng thời, giá trị công suất tối ưu có thể sử dụng cho hệ thống lý tưởng bằng cách chọn $k_1 = k_R = 0$ trong biểu thức (3.6).



a). Ảnh hưởng của HI lên OP hệ thống khi RSI cố định. b). Ảnh hưởng đồng thời của cả HI và RSI lên OP hệ thống.

Hình 3.3: OP hệ thống AF-FDR dưới sự ảnh hưởng của HI và RSI.

Hình 3.3 khảo sát phẩm chất OP theo HI khi cố định RSI (Hình 3.3(a)) và theo cả HI và RSI (Hình 3.3(b)). Với hệ thống truyền dẫn tốc độ thấp, ($\mathcal{R} = 2, 3$ bit/s/Hz) và hệ số méo dạng nhỏ, ảnh hưởng của phần cứng không lý tưởng là rất nhỏ. Tuy nhiên, khi tốc độ truyền dẫn tăng lên ($\mathcal{R} = 4, 5$ bit/s/Hz), ảnh hưởng của phần cứng không lý tưởng là đáng kể ngay cả khi hệ số méo dạng nhỏ ($k = 0.1$) (Hình 3.3(a)). Với Hình 3.3(b), khi $k = 0$ và $\tilde{\Omega}_R = 0$, phẩm chất hệ thống khảo sát trở thành phẩm chất hệ thống HD với phần cứng lý tưởng. Trong trường hợp này, ta thu được $OP = g(0, 0) = 3.10^{-4}$. Tương tự, khi $k \neq 0$ và $\tilde{\Omega}_R = 0$, hệ thống khảo sát trở thành hệ thống HD với HI. Trong trường hợp $k = 0$ và $\tilde{\Omega}_R \neq 0$, hệ thống khảo sát trở thành hệ thống FD lý tưởng. Thật bất ngờ vì ảnh hưởng của HI là mạnh hơn RSI đến phẩm chất OP hệ thống (Hình 3.3(b)). Chẳng hạn ta có $g(0.02, 0.1) = 0.0031$ trong khi đó $g(0.1, 0.02) = 0.0066$. Ở đây, ta sử dụng công suất tối ưu tại nút chuyển tiếp FDR, do vậy, ảnh hưởng của RSI được giảm đáng kể so với ảnh hưởng của HI đến phẩm chất OP hệ thống.

Hình 3.4(a) so sánh thông lượng hệ thống lý tưởng và không lý tưởng sử dụng công suất tối ưu với $\mathcal{R} = 2, 4, 5$ bit/s/Hz; $k_1 = k_R = 0.1$; $\tilde{\Omega}_R = -30$ dB. Rõ

2.1.2 Phân tích phẩm chất hệ thống

a. Xác suất dừng

Áp dụng các bước biến đổi toán học, luận án đưa ra biểu thức xác suất dừng hệ thống AF-FDR thông qua Định lý 2.1 sau đây.

Định lý 2.1: Biểu thức OP của hệ thống truyền thông hợp tác AF-FDR sử dụng G_f (ký hiệu là P_{out_f}) và G_v (ký hiệu là P_{out_v}) được biểu diễn lần lượt như sau:

$$\begin{aligned} P_{out_f} &= \Pr\{\gamma_f < x\} = \Pr\{\gamma_{SD} + \gamma_{SRD_f} < x\} \\ &= 1 - \exp(-b_f x) - \frac{b_f x}{2} \exp(-b_f x) \sum_{n=1}^N \frac{\pi}{N} \sqrt{1 - \phi_n^2} G(u), \end{aligned} \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned} P_{out_v} &= \Pr\{\gamma_v < x\} = \Pr\{\gamma_{SD} + \gamma_{SRD_v} < x\} \\ &\approx \begin{cases} 1 - \frac{a_v \exp(-b_v x) - b_v \exp(-a_v x)}{a_v - b_v}, & a_v \neq b_v, \\ 1 - b_v x \exp(-a_v x) - \exp(-b_v x), & a_v = b_v, \end{cases} \end{aligned} \quad (2.2)$$

trong đó N là tham số trả giá về độ phức tạp tính toán, $\phi_n = \cos\left(\frac{(2n-1)\pi}{2N}\right)$, $u = \frac{x}{2}(\phi_n + 1)$, $a_f = \frac{\sigma_{RSI}^2 + \sigma_R^2}{\Omega_1 P_S} - \frac{\sigma_D^2}{\Omega_3 P_S}$, $b_f = \frac{\sigma_D^2}{\Omega_3 P_S}$, $a_v = \frac{\sigma_{RSI}^2 + \sigma_R^2}{\Omega_1 P_S} + \frac{\sigma_D^2}{\Omega_2 P_R}$, $b_v = \frac{\sigma_D^2}{\Omega_3 P_S}$,

$$G(u) = 2 \exp(-a_f u) \sqrt{\frac{\sigma_D^2 u}{\Omega_1 \Omega_2 P_S G_f^2}} K_1 \left(2 \sqrt{\frac{\sigma_D^2 u}{\Omega_1 \Omega_2 P_S G_f^2}} \right). \quad (2.3)$$

b. Xác suất lỗi ký hiệu

Biểu thức SEP của hệ thống AF-FDR được xác định qua Định lý 2.2 sau.

Định lý 2.2: Biểu thức SEP của hệ thống hợp tác AF-FDR với hệ số khuếch đại cố định (SEP_f) và hệ số khuếch đại thay đổi (SEP_v) được cho bởi:

$$SEP_f = \frac{\alpha \sqrt{\beta}}{2} \left[\frac{1}{\sqrt{\beta}} - \frac{1}{\sqrt{\beta + 2b_f}} - \frac{b_f}{2N} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \Gamma\left(\frac{5}{2}\right) \Gamma\left(\frac{3}{2}\right) M \right], \quad (2.4)$$

$$SEP_v = \begin{cases} \frac{\alpha \sqrt{\beta}}{2} \left[\frac{1}{\sqrt{\beta}} - \frac{1}{a_v - b_v} \left(\frac{b_v}{\sqrt{\beta + 2a_v}} - \frac{a_v}{\sqrt{\beta + 2b_v}} \right) \right], & a_v \neq b_v, \\ \frac{\alpha \sqrt{\beta}}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{\beta}} - \frac{1}{\sqrt{\beta + 2b_v}} - \frac{b_v}{\sqrt{(\beta + 2a_v)^3}} \right), & a_v = b_v, \end{cases} \quad (2.5)$$

trong đó

$$M = \sum_{n=1}^N \sqrt{1 - \phi_n^2} \exp\left(\frac{\chi^2}{2\varphi}\right) \varphi^{-\frac{3}{2}} W_{-\frac{3}{2}, \frac{1}{2}}\left(\frac{\chi^2}{\varphi}\right), \quad (2.6)$$

$$\chi = \sqrt{\frac{\sigma_D^2(1 + \phi_n)}{2\Omega_1\Omega_2 P_S G_f^2}}; \varphi = a_f \frac{1 + \phi_n}{2} + b_f + \frac{\beta}{2}, \quad (2.7)$$

và W là hàm Whittaker.

2.1.3 Lựa chọn công suất tối ưu cho truyền thông FD

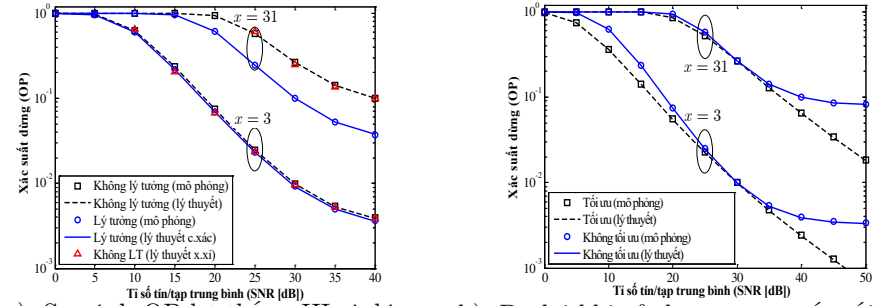
Định lý 2.3: Giá trị công suất tối ưu tại nút chuyển tiếp FDR được cho bởi:

$$P_R^* = P_0 = \sqrt{\frac{\Omega_1 P_S \sigma_D^2}{\Omega_2 \Omega_R}}. \quad (2.8)$$

2.1.4 Kết quả tính toán số và thảo luận

Trong phần này, luận án đánh giá phẩm chất hệ thống thông qua kết quả tính toán số, kết hợp với mô phỏng Monte Carlo để minh chứng sự đúng đắn của kết quả phân tích. Độ lợi trung bình kênh truyền $\Omega_1 = \Omega_2 = 1$ và công suất tạp âm $\sigma_R^2 = \sigma_D^2 = 1$. Tham số trả giá độ phức tạp tính toán $N = 20$. Trong đó tỉ số tín/tạp được định nghĩa là $\text{SNR} = P_S/\sigma_R^2$. Chú ý rằng khi không sử dụng công suất tối ưu, công suất tại nút chuyển tiếp được đặt là $P_R = P_S$. Khi sử dụng công suất tối ưu, công suất tại nút chuyển tiếp thay đổi theo biểu thức tối ưu đã xác định. Mặt khác, ký hiệu “opt” trên hình biểu thị sử dụng công suất tối ưu tại nút chuyển tiếp.

Hình 2.2 mô tả xác suất dừng hệ thống khảo sát theo SNR trung bình, sử dụng các biểu thức trong Định lý 2.1. Tốc độ truyền dẫn hệ thống là $\mathcal{R} = 2$ bit/s/Hz, từ đó ta có $x = 2^{\mathcal{R}} - 1 = 3$. Do khoảng cách từ S tới D là xa hơn so với từ S tới R hay từ R tới D, nên độ lợi trung bình kênh truyền từ S tới D được chọn là $\Omega_3 = 0.1$ nhỏ hơn so với Ω_1 và Ω_2 ($\Omega_1 = \Omega_2 = 1$). Chúng tôi khảo sát công suất RSI với những giá trị khác nhau $\frac{\sigma_{\text{RSI}}^2}{\sigma_R^2} = -5, 5, 15, 25$ dB. Chú ý rằng, trong trường hợp này RSI cố định khi SNR thay đổi. Hình 2.2 cho thấy, khi hệ thống tồn tại đường trực tiếp, phẩm chất hệ thống được cải thiện đáng kể. Ngoài ra, OP không đạt đến sàn lỗi với cùng mức RSI ngưỡng khảo sát. Chẳng hạn, khi RSI lớn ($\frac{\sigma_{\text{RSI}}^2}{\sigma_R^2} = 25$ dB), OP hệ thống tiếp tục giảm khi SNR tăng. Chú ý rằng,



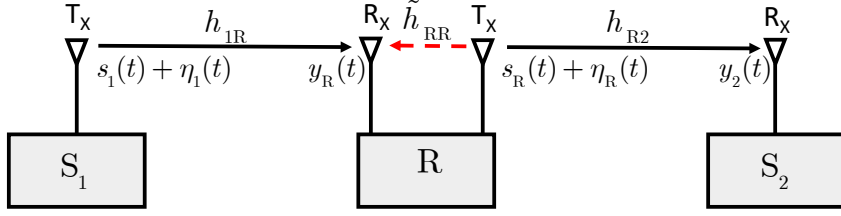
a). So sánh OP hệ thống HI và lý tưởng.

b). Độ lợi khi sử dụng công suất tối ưu.

Hình 3.2: OP hệ thống AF-FDR với HI.

3.1.4 Kết quả tính toán số và thảo luận

Hình 3.2(a) minh họa OP hệ thống theo SNR trung bình với hai tốc độ tối thiểu là $\mathcal{R} = 2$ và $\mathcal{R} = 5$ bit/s/Hz. Do đó, mức ngưỡng khảo sát cho OP tương ứng là $x = 2^2 - 1 = 3$ và $x = 2^5 - 1 = 31$. Trong đó, đường thể hiện kết quả phân tích sử dụng biểu thức (3.3) trong Định lý 3.1, các ký hiệu (marker symbols) thể hiện kết quả mô phỏng. Dễ thấy rằng, với tốc độ truyền dẫn thấp ($\mathcal{R} = 2$ bit/s/Hz), phẩm chất suy hao do phần cứng không lý tưởng rất nhỏ và có thể bỏ qua. Nhưng khi truyền dẫn với tốc độ cao ($\mathcal{R} = 5$ bit/s/Hz) thì phần phẩm chất suy hao là rất lớn và không thể bỏ qua. Đồng thời, do $\sigma_{\text{RSI}}^2 = \tilde{\Omega}_R P_R$, nên khi công suất phát tại nút chuyển tiếp tăng lên, dẫn tới làm tăng RSI, tức là khi SNR tăng kéo theo RSI tăng lên. Do vậy, tùy thuộc vào tốc độ truyền dẫn dữ liệu của hệ thống để lựa chọn các thiết bị vô tuyến phù hợp, nhằm tránh suy hao phẩm chất, đặc biệt cho hệ thống truyền dẫn tốc độ cao. Ngoài ra, ở vùng SNR cao, phẩm chất OP của cả hệ thống lý tưởng và không lý tưởng đạt đến bão hòa. Để giải quyết vấn đề này thì việc sử dụng phân bố công suất tối ưu là hết sức quan trọng trong hệ thống FD. Hình 3.2(b) là phẩm chất OP của hệ thống không lý tưởng trong trường hợp sử dụng và không sử dụng công suất tối ưu tại nút chuyển tiếp. Giá trị công suất tối ưu được xác định theo biểu thức (3.6) trong khi đó giá trị không tối ưu sử dụng $P_R = P_1$. Rõ ràng thấy rằng, khi SNR thấp hơn 35 dB, độ lợi thu được của việc phân bố công suất tối ưu so với không sử dụng là không đáng kể. Nhưng ở vùng SNR cao (trên 35 dB), công suất tối ưu giúp OP hệ thống giảm và tránh được sàn lỗi gây nên bởi RSI.



Hình 3.1: Mô hình hệ thống chuyển tiếp FDR một chiều với phần cứng không lý tưởng.

– Biểu thức xấp xỉ OP

Biểu thức xấp xỉ OP được xác định như sau:

$$P_{\text{out}}^{1,\text{ap}} \approx \begin{cases} 1 - e^{-\frac{A_1 x}{1-xd}}, & x < 1/d, \\ 1, & x \geq 1/d, \end{cases} \approx \begin{cases} \frac{A_1 x}{1-xd}, & x < 1/d, \\ 1, & x \geq 1/d. \end{cases} \quad (3.4)$$

b. Xác suất lỗi ký hiệu

Định lý 3.2: Biểu thức xấp xỉ SEP của hệ thống AF-FDR dưới ảnh hưởng của HI và RSI được cho bởi

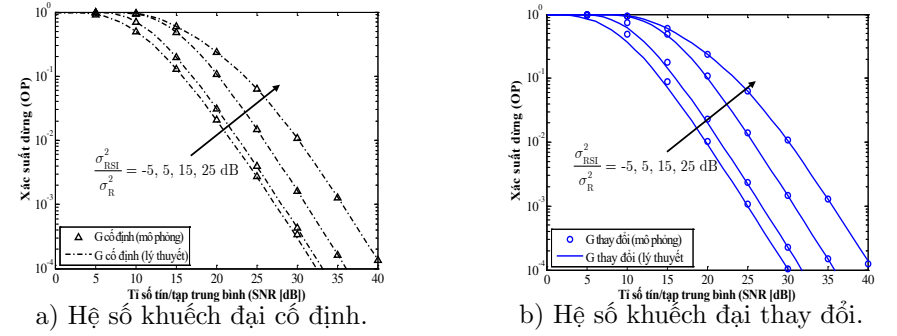
$$\text{SEP} \approx \frac{\alpha\sqrt{\beta}A_1}{2\sqrt{2\pi}(C_1d)^3} \left[\frac{\sqrt{\pi}}{2} \text{erf}(\sqrt{C_1}) - \sqrt{C_1} \exp(-C_1) \right] + \frac{\alpha}{2} [1 - \text{erf}(C_1 + 1)], \quad (3.5)$$

với $C_1 = \frac{\beta}{2d} - 1$; $\text{erf}(\cdot)$ là hàm lỗi (error function) được xác định bằng biểu thức $\text{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-t^2} dt$.

3.1.3 Phân bổ công suất tối ưu cho hệ thống AF-FDR một chiều

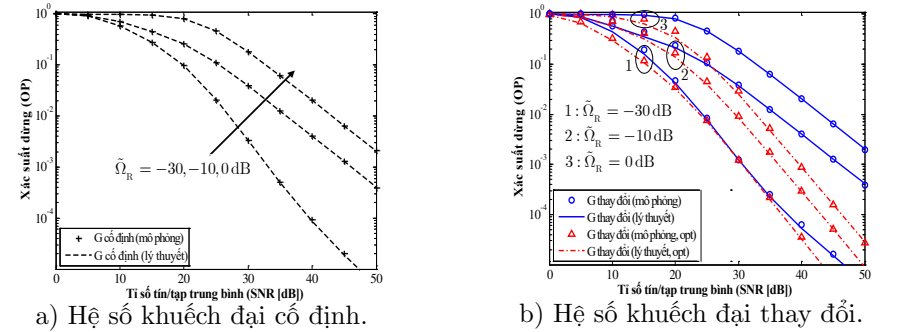
Định lý 3.3: Giá trị công suất tối ưu tại nút chuyển tiếp FDR được cho bởi biểu thức:

$$P_R^* = \sqrt{\frac{\Omega_1 P_1 \sigma_2^2 d_1}{\Omega_2 \tilde{\Omega}_R d_R}} \quad (3.6)$$



Hình 2.2: Phẩm chất hệ thống khảo sát theo SNR

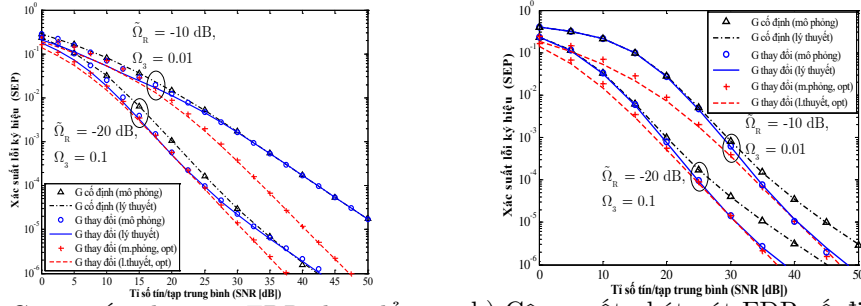
kết quả phân tích lý thuyết là trùng khớp với kết quả mô phỏng trong trường hợp hệ số khuếch đại cố định. Với trường hợp hệ số khuếch đại thay đổi, có sai số nhỏ giữa hai kết quả này, tuy nhiên tại vùng SNR cao thì hoàn toàn phù hợp. Mặt khác, khi RSI nhỏ, chẳng hạn $\frac{\sigma_{\text{RSI}}^2}{\sigma_R^2} = -5, 5$ dB, phẩm chất OP khi sử dụng G_v là tốt hơn đáng kể so với trường hợp sử dụng G_f . Tuy nhiên, khi RSI lớn hơn, chẳng hạn $\frac{\sigma_{\text{RSI}}^2}{\sigma_R^2} = 15, 25$ dB, phẩm chất OP khi sử dụng G_v và G_f là như nhau.



Hình 2.3: OP hệ thống khi RSI thay đổi theo công suất phát

Hình 2.3 cho thấy OP hệ thống AF-FDR trong trường hợp RSI thay đổi theo công suất phát tại nút chuyển tiếp, với $\Omega_3 = 0.01$ và $\tilde{\Omega}_R = -30, -10, 0$ dB. Rõ ràng rằng, sự ảnh hưởng của RSI tăng theo công suất phát bởi vì $\sigma_{\text{RSI}}^2 = \tilde{\Omega}_R P_R$. Vì thế, khi SNR trung bình tăng, tức là công suất phát P_R tại R tăng, gây nên giá trị σ_{RSI}^2 tăng theo tương ứng. Ta thấy rằng khi Ω_3 rất nhỏ, tức là đường

trực tiếp từ S tới D có thể bỏ qua, OP hệ thống sẽ tiến tới sàn lỗi ở vùng SNR cao khi $P_R = P_S$. Để nâng cao phẩm chất hệ thống, tránh hiện tượng sàn lỗi, luận án sử dụng phân bổ công suất tối ưu cho nút chuyển tiếp. Hình 2.3(b) cho thấy, trong trường hợp hệ số khuếch đại thay đổi, bằng việc sử dụng công suất tối ưu cho chế độ FD, phẩm chất OP được cải thiện đáng kể. Mặt khác, khi RSI nhỏ, chẳng hạn $\tilde{\Omega}_R = -30$ dB, độ lợi đạt được khi sử dụng giá trị công suất tối ưu chủ yếu ở vùng SNR cao. Tuy nhiên, khi RSI trở nên mạnh hơn, chẳng hạn $\tilde{\Omega}_R = -10$ dB, phẩm chất OP khi sử dụng giá trị công suất tối ưu là tốt hơn nhiều so với trường hợp không sử dụng giá trị này.



a) Công suất phát nút FDR thay đổi $P_R = P_S$ khi không tối ưu.

b) Công suất phát nút FDR cố định $P_R/\sigma_D^2 = 25$ dB khi không tối ưu.

Hình 2.4: SEP hệ thống khảo sát với những giá trị khác nhau của P_R .

Hình 2.4 biểu diễn SEP của hệ thống AF-FDR theo SNR trung bình tại nút chuyển tiếp, sử dụng điều chế BPSK ($\alpha = 1, \beta = 2$) và phân bổ công suất tối ưu. Đường biểu diễn SEP lý thuyết sử dụng biểu thức (2.4) cho G_f và biểu thức (2.5) cho G_v . Chúng tôi khảo sát hai trường hợp cho độ lợi trung bình đường trực tiếp và RSI với $\tilde{\Omega}_R = -20$ dB, $\Omega_3 = 0.1$ và $\tilde{\Omega}_R = -10$ dB, $\Omega_3 = 0.01$. Ngoài ra, SEP khi sử dụng công suất tối ưu (P_R theo biểu thức (2.8)) được so sánh với SEP khi không sử dụng công suất tối ưu ($P_R = P_S$) để minh chứng về hiệu quả của thuật toán phân bổ công suất đề xuất, đặc biệt là ở vùng SNR cao. Khi xác suất lỗi đích là $SEP = 10^{-4}$ với $\tilde{\Omega}_R = -10$ dB, $\Omega_3 = 0.01$, SEP sử dụng công suất tối ưu có độ lợi gần bằng 12.5 dB so với trường hợp không sử dụng giá trị này. Khi RSI giảm xuống và độ lợi kênh truyền trực tiếp tăng lên, chẳng hạn $\tilde{\Omega}_R = -20$ dB, $\Omega_3 = 0.1$, sử dụng công suất tối ưu chỉ lợi hơn khoảng 5 dB khi $SEP = 10^{-6}$. Mặt khác, trong trường hợp công suất phát nút chuyển tiếp được

Chương 3

Đánh giá, nâng cao phẩm chất mạng chuyển tiếp FDR với phần cứng không lý tưởng

3.1 Đánh giá phẩm chất mạng chuyển tiếp AF-FDR một chiều trong trường hợp có HI và RSI

3.1.1 Mô hình hệ thống

Xét một hệ thống liên lạc điểm – điểm với phần cứng lý tưởng (gọi tắt là hệ thống lý tưởng), trong đó mỗi đầu cuối có một ăng-ten dùng cho thu và phát tín hiệu ở chế độ HD, tín hiệu thu có dạng sau:

$$y = hs + z, \quad (3.1)$$

Trong hệ thống vô tuyến thực tế, máy thu phát luôn chịu ảnh hưởng của phần cứng hệ thống do lỗi sản xuất, đặc biệt là những thiết bị giá thành thấp như nút chuyển tiếp. Do vậy, biểu thức tín hiệu thu cho hệ thống với phần cứng không lý tưởng có dạng sau

$$y = h(s + \eta) + z, \quad (3.2)$$

với η biểu diễn phần cứng không lý tưởng tổng hợp ở cả máy phát và máy thu, $\eta \sim CN(0, k^2 P)$. Trên cơ sở đó, ta xây dựng được mô hình hệ thống chuyển tiếp FDR một chiều với cả HI và RSI như Hình 3.1 sau đây.

3.1.2 Phân tích phẩm chất hệ thống

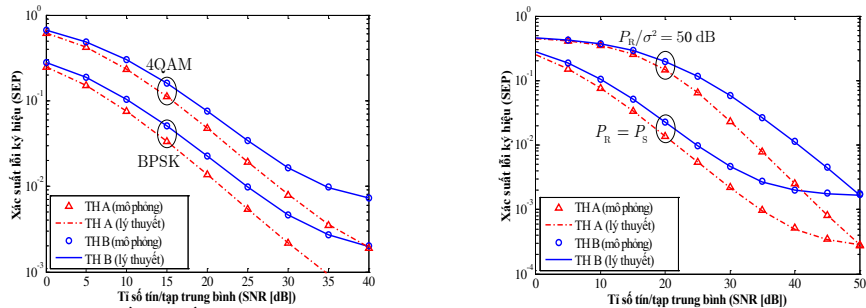
a. Xác suất dừng

– Biểu thức chính xác OP

Định lý 3.1: Biểu thức chính xác OP hệ thống AF-FDR một chiều (ký hiệu là P_{out}^1) dưới ảnh hưởng của HI và RSI được xác định như sau:

$$P_{\text{out}}^1 = \begin{cases} 1 - 2e^{-\frac{A_1 x}{1-xd}} \sqrt{\frac{B_1(x+x^2)}{(1-xd)^2}} K_1(2\sqrt{\frac{B_1(x+x^2)}{(1-xd)^2}}), & x < 1/d, \\ 1, & x \geq 1/d. \end{cases} \quad (3.3)$$

Trong đó $A_1 \triangleq \frac{t_R d_R}{\Omega_1 P_1} + \frac{\sigma_D^2 d_1}{\Omega_2 P_R}$; $B_1 \triangleq \frac{\sigma_D^2 t_R}{\Omega_1 \Omega_2 P_1 P_R}$.



a) SEP khi điều chế BPSK và 4-QAM.

b) So sánh SEP khi $P_R = P_S$ và $P_R/\sigma^2 = 50$ dB.

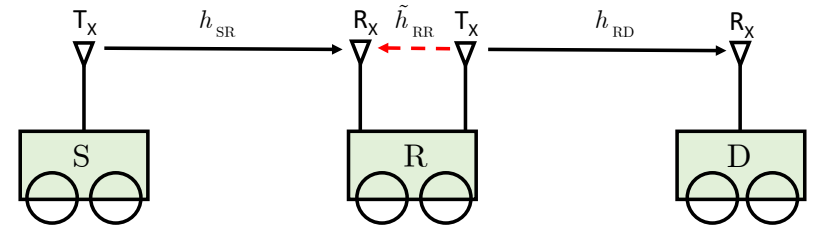
Hình 2.7: SEP hệ thống FD-V2V.

hợp B gần như đạt bão hòa tại $\text{SNR} = 40$ dB trong khi đó SEP trường hợp A vẫn tiếp tục giảm.

Cuối cùng, Hình 2.7(b) so sánh SEP của hệ thống trong trường hợp $P_R = P_S$ với trường hợp công suất phát tại nút chuyển tiếp được cố định $P_R/\sigma^2 = 50$ dB. Kết quả cho thấy rằng, sử dụng công suất phát cao ở nút chuyển tiếp không phải là một giải pháp tốt để nâng cao phẩm chất hệ thống FD-V2V. Bởi vì khi tăng công suất phát tại nút chuyển tiếp FDR, dẫn đến việc tăng RSI do $\sigma_{\text{RSI}}^2 = \Omega P_R$. Vì vậy, để nâng cao phẩm chất hệ thống FD-V2V, các nhà nghiên cứu và thiết kế mạng vô tuyến cần lựa chọn công suất phát phù hợp ở nút chuyển tiếp FDR nhằm giảm ảnh hưởng của RSI đến phẩm chất hệ thống.

2.3 Kết luận chương 2

Chương 2 phân tích phẩm chất hệ thống chuyển tiếp FDR một chiều trong trường hợp phần cứng hệ thống là lý tưởng. Trong đó, luận án tập trung phân tích hai kịch bản: khi có đường liên lạc trực tiếp và khi không có đường liên lạc trực tiếp. Trong kịch bản thứ nhất, phẩm chất hệ thống AF-FDR được đánh giá qua kênh pha-đỉnh Rayleigh. Đồng thời, tác giả đề xuất phân bổ công suất tối ưu cho nút chuyển tiếp FDR nhằm nâng cao phẩm chất hệ thống. Trong kịch bản thứ hai, luận án phân tích phẩm chất mạng chuyển tiếp DF-FDR qua kênh pha-đỉnh Rayleigh kép. Thông qua các biểu thức giải tích về xác suất dừng, xác suất lỗi ký hiệu, luận án đã đánh giá toàn diện phẩm chất hệ thống.



Hình 2.5: Mô hình hệ thống truyền thông FD-V2V.

cố định với $P_R/\sigma_D^2 = 25$ dB, khi $\text{SNR} < 30$ dB, SEP cho cả G_f và G_v ở Hình 2.4(b) là xấu hơn so với ở Hình 2.4(a). Tuy nhiên, khi $\text{SNR} > 30$ dB, SEP ở Hình 2.4(b) trở nên tốt hơn. Mặt khác, đối với trường hợp G_v , độ lợi khi sử dụng công suất tối ưu là không nhiều so với khi không sử dụng giá trị này. Vì vậy, khi trong hệ thống FD tồn tại RSI lớn, việc sử dụng công suất phát tại nút FD phù hợp là rất quan trọng, nhằm cải thiện phẩm chất hệ thống, đồng thời tiết kiệm năng lượng.

2.2 Đánh giá phẩm chất mạng chuyển tiếp FDR một chiều trong trường hợp không có đường liên lạc trực tiếp từ nút nguồn tới nút đích

2.2.1 Mô hình hệ thống

Mô hình hệ thống truyền thông FD-V2V được minh họa trên Hình 2.5. Tín hiệu được truyền từ nút nguồn S tới nút đích D thông qua nút chuyển tiếp R. Do cự ly xa và hiện tượng che khuất, không có đường truyền trực tiếp từ S tới D, đồng thời CSI là hoàn hảo cho tất cả các nút trong hệ thống. Để khảo sát phẩm chất hệ thống sát với điều kiện thực tế, luận án xem xét hai trường hợp: i) kịch bản pha-đỉnh thứ nhất: S là trạm cố định (stationary) chẳng hạn như trạm gốc (BS: Base Station) trong khi R và D là những trạm di động (trường hợp A). Do đó, kênh truyền từ S tới R là kênh pha-đỉnh Rayleigh và kênh truyền từ R tới D là kênh pha-đỉnh Rayleigh kép; ii) kịch bản pha-đỉnh thứ hai: tất cả các nút là trạm di động, do đó tất cả kênh truyền trong mạng là kênh pha-đỉnh Rayleigh kép.

2.2.2 Phân tích phẩm chất hệ thống

a. Xác suất dừng

Định lý 2.4: Xác suất dừng của hệ thống truyền thông FD-V2V dưới sự ảnh hưởng của RSI và kênh pha-đỉnh Rayleigh kép trong trường hợp A (ký hiệu là P_{out}^A) và trường hợp B (ký hiệu là P_{out}^B) được cho bởi:

$$P_{\text{out}}^A = 1 - 2\exp(-X_A x) \sqrt{Y_A x} K_1(2\sqrt{Y_A x}), \quad (2.9)$$

$$P_{\text{out}}^B = 1 - 4\sqrt{X_B Y_B x^2} K_1(2\sqrt{X_B x}) K_1(2\sqrt{Y_B x}), \quad (2.10)$$

trong đó

$$X_A = \frac{d_{\text{SR}}^0 (\sigma_{\text{RSI}}^2 + \sigma^2)}{\Omega_1 P_S}; Y_A = \frac{d_{\text{RD}}^0 \sigma^2}{\Omega_3 \Omega_4 P_R}; X_B = \frac{X_A}{\Omega_2}; Y_B = Y_A; \Omega_i = \mathbb{E}\{|h_i|^2\}$$

là độ lợi trung bình của kênh truyền i , toán tử \mathbb{E} biểu diễn phép lấy kỳ vọng; $K_1(\cdot)$ là hàm Bessel sửa đổi bậc 1 loại 2 (the first order modified Bessel function of the second kind).

b. Xác suất lỗi ký hiệu

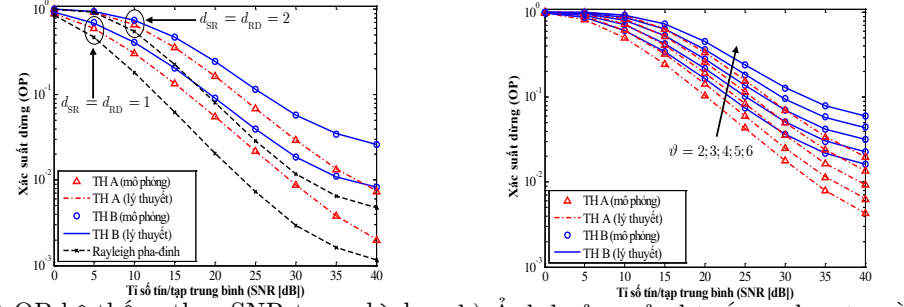
SEP cho hệ thống FD-V2V trong hai trường hợp khảo sát được xác định theo Định lý 2.5 sau đây.

Định lý 2.5: Biểu thức SEP của hệ thống truyền thông FD-V2V trong trường hợp A (ký hiệu là SEP_A) và trường hợp B (ký hiệu là SEP_B) được xác định như sau:

$$\text{SEP}_A = \frac{\alpha\sqrt{\beta}}{2\sqrt{2\pi}} \left[\sqrt{\frac{2\pi}{\beta}} - \frac{\Gamma\left(\frac{3}{2}\right)\Gamma\left(\frac{1}{2}\right)}{\sqrt{X_A + \frac{\beta}{2}}} \exp\left(\frac{Y_A}{2(X_A + \frac{\beta}{2})}\right) W_{-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}}\left(\frac{Y_A}{X_A + \frac{\beta}{2}}\right) \right], \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned} \text{SEP}_B &= \frac{\alpha\sqrt{\beta}}{2\sqrt{2\pi}} \left[\sqrt{\frac{2\pi}{\beta}} - \frac{4\pi}{N\beta} \sum_{n=1}^N \sqrt{1 - \phi_n^2} \sqrt{-\frac{2X_B Y_B \ln y}{\beta}} \right. \\ &\quad \left. \times K_1\left(2\sqrt{-\frac{2X_B \ln y}{\beta}}\right) K_1\left(2\sqrt{-\frac{2Y_B \ln y}{\beta}}\right) \right], \quad (2.12) \end{aligned}$$

trong đó Γ và W lần lượt là hàm Gamma và Whittaker; N là tham số trả giá về độ phức tạp tính toán; $y = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}\phi_n$; $\phi_n = \cos\left(\frac{(2n-1)\pi}{2N}\right)$.



a) OP hệ thống theo SNR trung bình với những khoảng cách khác nhau. b) Ảnh hưởng của hệ số suy hao truyền dẫn đến OP.

Hình 2.6: OP hệ thống FD-V2V.

2.2.3 Kết quả tính toán số và thảo luận

Hình 2.6 minh họa phẩm chất OP của hệ thống FD-V2V theo tỉ số tín/tạp trung bình với những khoảng cách và hệ số suy hao truyền dẫn khác nhau. Hình 2.6 cho thấy rõ ràng rằng, khi tất cả các nút trong hệ thống được bố trí cố định (trường hợp truyền qua kênh pha-đỉnh Rayleigh), phẩm chất hệ thống tốt hơn đáng kể so với kịch bản tất cả các nút đều di chuyển (trường hợp B). Ta thấy rằng, độ lợi về SNR của trường hợp A là 5 dB tại $\text{OP} = 10^{-2}$ so với trường hợp B. Ngoài ra, ảnh hưởng của RSI là mạnh hơn ở vùng SNR cao. Khi $\text{SNR} > 35$ dB, OP của hệ thống khảo sát giảm chậm và đạt tới sàn lỗi. Mặt khác, sự suy giảm phẩm chất hệ thống qua kênh pha-đỉnh Rayleigh kép so với trường hợp truyền thông qua kênh pha-đỉnh Rayleigh trong kết quả này là hoàn toàn phù hợp với những kết quả nghiên cứu trước đây.

Hình 2.7(a) cho thấy xác suất lỗi ký hiệu SEP của hệ thống truyền thông FD-V2V theo SNR trung bình, sử dụng điều chế BPSK ($\alpha = 1, \beta = 2$), và 4QAM ($\alpha = 2, \beta = 1$). Trên Hình 2.7(a), đường biểu diễn kết quả lý thuyết sử dụng biểu thức (2.11) và (2.12) ở Định lý 2.5 cho trường hợp A và B tương ứng, với $d_{\text{SR}} = d_{\text{RD}} = 1$, $\theta = 2$ và $\Omega = -30$ dB. Dễ dàng nhận thấy rằng, tại vùng SNR thấp, phẩm chất SEP trong trường hợp A và B khác nhau không đáng kể. Tuy nhiên, tại vùng SNR cao, sự suy giảm phẩm chất thể hiện qua SEP của trường hợp B so với trường hợp A là rất rõ ràng. Cụ thể, khi $\text{SEP} = 10^{-2}$, độ lợi về mật công suất phát SNR của trường hợp A so với trường hợp B là khoảng 5 dB khi sử dụng điều chế BPSK và 10 dB cho 4QAM. Mặt khác, SEP trong trường