

NGHIÊN CỨU KỸ THUẬT NHẢY TẦN NHẬN THỨC NHẪM NÂNG CAO HIỆU NĂNG CHO HỆ THỐNG THÔNG TIN HÀNG HẢI HF ALE TRONG MÔI TRƯỜNG NHIỀU

RESEARCH ON COGNITIVE FREQUENCY HOPPING TECHNIQUES TO IMPROVE LINK ESTABLISHMENT EFFICIENCY IN HF MARITIME INFORMATION SYSTEMS UNDER JAMMING ENVIRONMENT

NGUYỄN THANH VÂN

Khoa Điện - Điện tử, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

Email liên hệ: vanntb.ddt@vimaru.edu.vn

DOI: <https://doi.org/10.65154/jmst.1041>

Tóm tắt

Thông tin vô tuyến sóng ngắn (HF) giữ vai trò quan trọng trong liên lạc hàng hải tầm xa, tuy nhiên quá trình thiết lập liên kết thường bị suy giảm hiệu năng do nhiễu và biến động kênh truyền theo thời gian. Kỹ thuật nhảy tần cho thiết lập liên kết tự động (FH-ALE - Frequency Hopping Automatic Link Establishment) giúp cải thiện độ tin cậy nhờ tính đa dạng tần số nhưng chưa khai thác được chất lượng liên kết tích lũy theo thời gian. Bài báo đề xuất kỹ thuật nhảy tần nhận thức (Cognitive-FH-ALE) cho phép lựa chọn tần số thích nghi dựa trên đánh giá chất lượng liên kết trực tuyến (LQA - Link Quality Analysis). Phương pháp cho phép hệ thống học mức độ tin cậy của từng kênh từ kết quả truyền dẫn thực tế và điều chỉnh xác suất nhảy tần nhằm tránh các tần số bị nhiễu đồng thời vẫn duy trì tính đa dạng tần số. Kết quả mô phỏng cho thấy phương pháp đề xuất cải thiện xác suất thiết lập liên kết, thông lượng và giảm thời gian thiết lập liên lạc so với ALE truyền thống và FH-ALE ngẫu nhiên.

Từ khóa: Thông tin HF, thiết lập liên kết tự động ALE, nhảy tần, vô tuyến nhận thức, đánh giá chất lượng liên kết, chống nhiễu.

Abstract

High Frequency (HF) radio remains an essential technology for long-range maritime communications, where reliable link establishment is challenged by interference and dynamic channel conditions. Frequency Hopping Automatic Link Establishment (FH-ALE) improves robustness through frequency diversity; however, conventional hopping strategies rely on random channel selection and do not exploit accumulated link-quality information. This paper

proposes a Cognitive Frequency Hopping ALE (Cognitive-FH-ALE) scheme that adaptively adjusts hopping decisions using online Link Quality Analysis (LQA). The method learns channel reliability from transmission outcomes and dynamically reshapes the hopping probability to avoid interfered frequencies while preserving diversity. Monte-Carlo simulations under multiple jamming scenarios demonstrate improved link establishment probability, throughput, and reduced time-to-link compared with traditional ALE and random FH-ALE. The proposed approach provides a practical solution for enhancing reliability in HF maritime communication systems operating in contested spectral environments.

Keywords: HF communication, Automatic Link Establishment (ALE), frequency hopping, cognitive radio, Link Quality Analysis (LQA), Anti-jamming communication.

1. Mở đầu

Trong thông tin hàng hải, hệ thống thông tin vô tuyến sóng ngắn (High Frequency - HF) vẫn giữ vai trò đặc biệt quan trọng nhờ khả năng truyền thông tầm xa ngoài đường chân trời mà không phụ thuộc vào hạ tầng vệ tinh hoặc mạng mặt đất. Các hệ thống thông tin HF được sử dụng rộng rãi trong liên lạc tàu - bờ, điều phối hoạt động trên biển, phát cảnh báo thời tiết cũng như hỗ trợ công tác tìm kiếm cứu nạn trong các tình huống khẩn cấp. Đặc biệt tại các khu vực xa bờ hoặc trong điều kiện thiên tai khi các hệ thống thông tin khác bị gián đoạn, liên lạc HF thường trở thành phương tiện truyền thông chủ yếu đảm bảo duy trì kết nối ổn định [1].

Tuy nhiên, môi trường truyền sóng HF chịu ảnh hưởng mạnh của tầng điện ly, nhiễu ngẫu nhiên và có

ý, dẫn đến chất lượng kênh truyền biến thiên đáng kể theo thời gian và tần số. Để thích nghi với đặc điểm này, hệ thống thiết lập liên kết tự động sóng HF (HF ALE) đã được phát triển nhằm tự động lựa chọn kênh tần số tối ưu và thiết lập liên kết giữa các trạm vô tuyến mà không cần can thiệp thủ công của người vận hành [2]. Các hệ thống HF ALE thế hệ thứ hai và thứ ba (2G ALE và 3G ALE) đã góp phần rút ngắn thời gian thiết lập liên lạc và nâng cao mức độ tự động hóa của hệ thống thông tin HF hiện đại [3].

Mặc dù vậy, một hạn chế quan trọng của hệ thống HF ALE truyền thống là khả năng chống nhiễu còn hạn chế, đặc biệt trong môi trường tồn tại nhiễu băng hẹp, nhiễu cục bộ băng tần hoặc các dạng gây nhiễu thông minh có chủ đích. Khi kênh được lựa chọn bị ảnh hưởng bởi nhiễu, quá trình thiết lập liên kết thường phải thực hiện lại nhiều lần, làm tăng đáng kể thời gian kết nối và làm suy giảm độ tin cậy của hệ thống [4]. Trong các ứng dụng hàng hải, nơi yêu cầu truyền thông nhanh chóng và ổn định có ý nghĩa quan trọng đối với an toàn vận hành, sự gia tăng thời gian thiết lập liên lạc có thể ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu quả điều phối và xử lý tình huống khẩn cấp.

Một hướng tiếp cận nhằm nâng cao khả năng chống nhiễu cho hệ thống HF ALE là kết hợp kỹ thuật nhảy tần (Frequency Hopping - FH). Bằng cách thay đổi tần số truyền theo chuỗi hopping xác định, FH-ALE khai thác đa dạng tần số để giảm xác suất truyền trên các kênh bị nhiễu, từ đó cải thiện xác suất thiết lập liên kết và hiệu suất truyền dẫn. Các nghiên cứu gần đây đã chứng minh FH-ALE đạt hiệu năng vượt trội so với ALE truyền thống trong nhiều môi trường gây nhiễu khác nhau [5].

Tuy nhiên, phần lớn các phương pháp FH-ALE hiện nay vẫn dựa trên cơ chế nhảy tần ngẫu nhiên hoặc phân bố đều trên tập tần số khả dụng. Cách tiếp cận này chưa tận dụng được thông tin chất lượng kênh thu thập được trong quá trình hoạt động của hệ thống. Một số nghiên cứu đã chỉ ra rằng việc khai thác thông tin Link Quality Analysis (LQA) hoặc dự đoán phổ tần có thể giúp cải thiện đáng kể quá trình lựa chọn kênh và giảm thời gian thiết lập liên kết [6], [7], [8]. Gần đây, các phương pháp thích nghi và dựa trên học máy trong lựa chọn kênh và nhảy tần cũng đã được đề xuất nhằm nâng cao khả năng chống nhiễu và tối ưu hóa hiệu năng truyền dẫn trong các hệ thống vô tuyến động [9]-[10]. Điều này cho thấy môi trường HF tồn tại cấu trúc thống kê có thể được khai thác thay vì lựa chọn tần số hoàn toàn ngẫu nhiên. Tuy nhiên, phần lớn các phương pháp hiện nay yêu cầu mô hình học phức tạp hoặc phụ thuộc vào thông tin tiên nghiệm về môi

trường, gây khó khăn cho việc triển khai trong các hệ thống HF-ALE thực tế với tài nguyên hạn chế và yêu cầu thời gian thực.

Xuất phát từ nhận định trên, bài báo này đề xuất phương pháp nhảy tần nhận thức (Cognitive Frequency Hopping) trong hệ thống HF ALE (Cognitive-FH-ALE) nhằm nâng cao hiệu suất hệ thống thông qua cơ chế lựa chọn tần số thích nghi dựa trên đánh giá chất lượng liên kết. Khác với FH-ALE truyền thống, phương pháp đề xuất cho phép hệ thống học và cập nhật mức độ tin cậy của từng kênh tần số trong quá trình truyền, từ đó tự động giảm xác suất lựa chọn các kênh bị nhiễu và ưu tiên các kênh có chất lượng tốt hơn mà không yêu cầu thông tin tiên nghiệm về mô hình gây nhiễu.

Phương pháp được đánh giá thông qua mô phỏng Monte-Carlo trên các kịch bản gây nhiễu điển hình trong thông tin HF, bao gồm nhiễu cục bộ, nhiễu bám theo tần số và nhiễu đa sóng mang thông minh. Hiệu năng hệ thống được đánh giá thông qua các chỉ tiêu xác suất thiết lập liên kết, thông lượng hiệu dụng và thời gian thiết lập liên lạc. Kết quả cho thấy phương pháp Cognitive-FH-ALE không chỉ nâng cao độ tin cậy truyền thông mà còn giảm đáng kể số lần thử lại cần thiết để thiết lập liên kết, góp phần cải thiện khả năng đáp ứng thời gian thực của hệ thống thông tin HF trong môi trường nhiễu phức tạp.

2. Mô hình hệ thống HF ALE và môi trường nhiễu

2.1. Tổng quan hệ thống HF Automatic Link Establishment

Hệ thống Automatic Link Establishment (ALE) được phát triển nhằm tự động hóa quá trình thiết lập liên lạc trong thông tin vô tuyến sóng ngắn (HF), nơi chất lượng kênh truyền thay đổi mạnh theo thời gian và tần số do ảnh hưởng của tầng điện ly. Trong hệ thống ALE, các trạm vô tuyến liên tục quét tập kênh tần số khả dụng và sử dụng thông tin đánh giá chất lượng liên kết (Link Quality Analysis - LQA) để lựa chọn kênh tối ưu trước khi truyền dữ liệu [8].

Quá trình thiết lập liên kết ALE thông thường gồm ba giai đoạn chính: 1. Scanning: Các trạm giám sát nhiều kênh HF để đánh giá chất lượng tín hiệu; 2. Linking: Trao đổi khung tín hiệu ALE nhằm thiết lập kết nối; 3. Data transmission: Truyền dữ liệu sau khi liên kết được thiết lập thành công.

Trong các hệ thống HF ALE thế hệ thứ hai và thứ ba (2G ALE và 3G ALE), quá trình lựa chọn kênh được thực hiện tự động dựa trên thông tin LQA thu thập trước đó. Tuy nhiên, khi môi trường tồn tại nhiễu

manh hoặc gây nhiễu có chủ đích, kênh được lựa chọn có thể trở nên không khả dụng, dẫn đến việc thiết lập liên kết thất bại và phải thực hiện lại nhiều lần.

2.2. Mô hình truyền dẫn FH-ALE

Để cải thiện khả năng chống nhiễu, kỹ thuật nhảy tần (Frequency Hopping - FH) được tích hợp vào quá trình truyền dữ liệu ALE. Trong FH-ALE, thay vì sử dụng một tần số cố định, tín hiệu được truyền qua một chuỗi các tần số khác nhau theo lịch nhảy tần xác định trước [5].

Xét một tập gồm N_c kênh HF khả dụng. Từ tập này, hệ thống lựa chọn một tập nhảy tần (hopping set) gồm N_h kênh để thực hiện truyền dữ liệu. Trong mỗi phiên truyền BW0, dữ liệu được chia thành nhiều đoạn và phát tuần tự trên các tần số khác nhau trong hopping set. Quá trình nhảy tần có thể được biểu diễn bởi chuỗi:

$$\mathcal{H} = \{f_1, f_2, \dots, f_{N_{\text{hop}}}\}$$

với f_i là tần số được sử dụng tại bước nhảy thứ i .

Trong nghiên cứu này, mỗi khung truyền BW0 bao gồm một phần tiền tố (preamble) phục vụ đồng bộ và một phần dữ liệu được truyền qua nhiều bước nhảy tần liên tiếp. Việc sử dụng nhiều tần số trong cùng một phiên truyền giúp khai thác đa dạng tần số (frequency diversity), từ đó giảm xác suất toàn bộ phiên truyền bị ảnh hưởng bởi nhiễu trên một kênh đơn lẻ.

2.3. Mô hình kênh truyền

Kênh truyền HF trong thực tế chịu ảnh hưởng của fading chọn lọc tần số và thời gian do biến động tầng điện ly. Tuy nhiên, để tập trung đánh giá ảnh hưởng của cơ chế lựa chọn tần số và khả năng chống nhiễu, nghiên cứu này giả thiết kênh truyền chịu tác động của nhiễu Gaussian trắng cộng (AWGN), một mô hình thường được sử dụng trong các nghiên cứu ALE nhằm phân tích hiệu năng cơ bản của hệ thống [5]. Tín hiệu thu tại bộ thu có thể được biểu diễn dưới dạng:

$$r(t) = s(t) + n(t),$$

Trong đó, $s(t)$ là tín hiệu phát và $n(t)$ là nhiễu Gaussian trắng với mật độ phổ công suất không đổi. Giả thiết AWGN cho phép cô lập tác động của chiến lược nhảy tần và cơ chế lựa chọn kênh mà không bị chi phối bởi các yếu tố fading phức tạp, qua đó tạo cơ sở so sánh công bằng giữa ALE truyền thống, FH-ALE và phương pháp đề xuất.

2.4. Mô hình gây nhiễu

Để đánh giá khả năng chống nhiễu của hệ thống, ba kịch bản gây nhiễu điển hình trong thông tin HF

được xem xét, dựa trên các mô hình đã được sử dụng trong các nghiên cứu ALE trước đây [5], [8]:

1. Nhiễu cục bộ (Partial-band jammer): Chỉ phát nhiễu trên một phần phổ tần, làm suy giảm chất lượng của một nhóm kênh liên tiếp. Mô hình này phản ánh các nguồn nhiễu băng hẹp hoặc nhiễu công suất cao tập trung.

2. Nhiễu bám theo tần số (Follower jammer): Phát hiện tần số đang được hệ thống sử dụng và phát nhiễu tại tần số tương ứng trong lần truyền tiếp theo. Đây là dạng gây nhiễu thích nghi nhằm làm giảm hiệu quả của hệ thống nhảy tần.

3. Nhiễu đa tần thông minh (Smart multi-tone jammer): Nắm bắt thông tin về tập nhảy tần và đồng thời gây nhiễu trên nhiều tần số trong hopping set. Mô hình này đại diện cho trường hợp gây nhiễu có chủ đích với mức độ hiểu biết cao về hệ thống.

Các mô hình gây nhiễu này cho phép đánh giá toàn diện hiệu năng hệ thống từ các trường hợp nhiễu thụ động đến gây nhiễu thông minh.

2.5. Chỉ tiêu đánh giá hiệu năng

Hiệu năng hệ thống được đánh giá thông qua các chỉ tiêu sau:

1. Xác suất thiết lập liên kết (P-link): xác suất hai phiên truyền liên tiếp thành công, phản ánh độ tin cậy của quá trình thiết lập liên lạc: $P_{\text{link}} = (1 - \text{PER})^2$,

trong đó PER là xác suất lỗi gói tin.

2. Thông lượng hiệu dụng (Throughput): tốc độ truyền dữ liệu trung bình đạt được sau khi tính đến xác suất thành công;

3. Thời gian thiết lập liên kết (Time-to-Link - TTL): Số lần thử cần thiết để thiết lập liên kết thành công.

Các chỉ tiêu này được sử dụng rộng rãi trong đánh giá hệ thống HF ALE và phản ánh trực tiếp khả năng vận hành của hệ thống thông tin HF trong môi trường nhiễu thực tế [5].

3. Đề xuất kỹ thuật Cognitive Frequency Hopping ALE

Kỹ thuật FH-ALE cải thiện đáng kể độ tin cậy truyền thông so với ALE truyền thống thông qua việc khai thác đa dạng tần số. Tuy nhiên, trong FH-ALE thông thường, chuỗi nhảy tần được lựa chọn ngẫu nhiên hoặc phân bố đều trên tập hopping set. Cách tiếp cận này giúp tránh phụ thuộc vào một tần số cố định nhưng chưa tận dụng được thông tin chất lượng kênh thu thập trong quá trình vận hành.

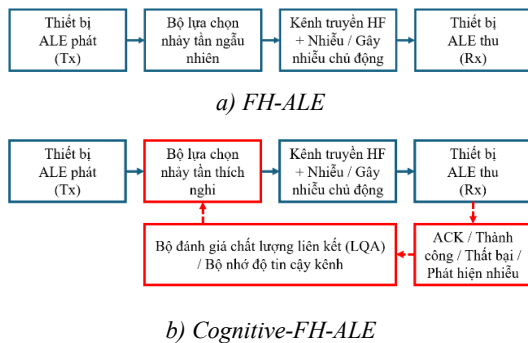
Trong môi trường HF thực tế, các nguồn gây nhiễu thường tồn tại trong các vùng phổ tần xác định và duy

trì trong khoảng thời gian đủ dài để có thể nhận dạng thống kê. Do đó, việc tiếp tục lựa chọn tần số theo cơ chế ngẫu nhiên có thể dẫn đến việc hệ thống lặp lại truyền trên các kênh kém chất lượng, làm giảm hiệu quả thiết lập liên kết và gia tăng số lần thử lại.

Xuất phát từ nhận định này, bài báo đề xuất phương pháp Cognitive-FH-ALE, trong đó hệ thống tự động học và cập nhật mức độ tin cậy của từng kênh tần số dựa trên kết quả truyền trước đó. Mục tiêu là duy trì tính đa dạng tần số của FH-ALE đồng thời giảm xác suất lựa chọn các kênh bị nhiễu.

3.1. Kiến trúc của hệ thống Cognitive-FH-ALE

Sơ đồ cấu trúc của hệ thống FH-ALE và Cognitive-FH-ALE đề xuất được thể hiện trên Hình 1.



Hình 1. Sơ đồ cấu trúc hệ thống FH-ALE và Cognitive-FH-ALE đề xuất

Hình 1 cho thấy đặc điểm nổi bật của cấu trúc đề xuất là khả năng triển khai mà không yêu cầu thay đổi phần cứng mà chỉ can thiệp vào lớp điều khiển lựa chọn tần số, thể hiện ở hoạt động của 3 khối chính: 1. Khối đánh giá chất lượng liên kết (LQA update): thu thập thông tin thành công/thất bại của các lần truyền để cập nhật độ tin cậy của từng kênh; 2. Khối lựa chọn nhảy tần thích nghi: Xây dựng phân bố xác suất lựa chọn tần số dựa trên thông tin LQA; 3. Khối truyền FH-ALE: Thực hiện truyền dữ liệu theo chuỗi nhảy tần đã lựa chọn.

Khác với FH-ALE thông thường, chuỗi nhảy tần trong phương pháp đề xuất không cố định mà được cập nhật động theo trạng thái môi trường truyền.

3.2. Mô hình đánh giá chất lượng kênh (LQA Learning Model)

Xét tập nhảy tần gồm N_h kênh. Với mỗi kênh i , hệ thống duy trì chỉ số chất lượng liên kết q_i , phản ánh độ tin cậy của kênh đó. Sau mỗi phiên truyền, giá trị q_i được cập nhật dựa trên kết quả truyền.

Nếu truyền thành công:

$$q_i \leftarrow (1 - \alpha_s)q_i + \alpha_s \quad (1)$$

Nếu truyền thất bại hoặc phát hiện nhiễu:

$$q_i \leftarrow (1 - \alpha_f)q_i - \alpha_f \quad (2)$$

Trong đó, α_s và α_f lần lượt là hệ số học cho trạng thái thành công và thất bại.

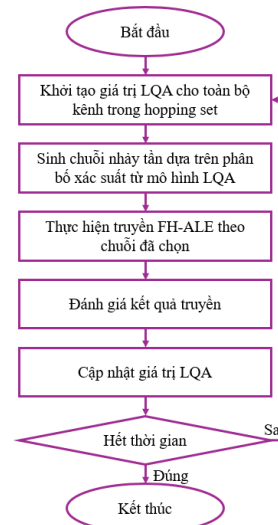
Cơ chế cập nhật này tương đương với một bộ lọc trung bình mũ (exponential moving average), cho phép hệ thống phản ứng nhanh với thay đổi môi trường nhưng vẫn duy trì tính ổn định thống kê. Ngoài ra, khi một kênh liên tục thất bại sẽ được tạm thời đưa vào danh sách hạn chế (blacklist) nhằm giảm xác suất được lựa chọn trong các phiên truyền tiếp theo.

3.3. Cơ chế lựa chọn nhảy tần thích nghi

Dựa trên tập giá trị LQA $\{q_i\}$, xác suất lựa chọn kênh được xây dựng theo hàm softmax:

$$p_i = \frac{\exp(\beta q_i)}{\sum_{j=1}^{N_h} \exp(\beta q_j)} \quad (3)$$

Trong đó, tham số β điều khiển mức độ ưu tiên các kênh có chất lượng cao. Cơ chế này mang lại hai ưu điểm quan trọng: 1. Khai thác (exploitation): ưu tiên các kênh có chất lượng tốt; 2. Khám phá (exploration): Vẫn duy trì xác suất nhỏ cho các kênh khác nhằm tránh hội tụ sai.



Hình 2. Cơ chế lựa chọn nhảy tần thích nghi

Chuỗi nhảy tần cho mỗi phiên truyền được tạo bằng cách lấy mẫu theo phân bố xác suất trên, đồng thời áp dụng ràng buộc tránh lặp lại tần số liên tiếp nhằm hạn chế hiệu quả của nhiễu bám theo tần số.

4. Thiết lập mô phỏng và kết quả đánh giá

4.1. Thiết lập mô phỏng

Thực hiện mô phỏng để đánh giá hiệu năng của hệ thống HF ALE với 3 phương pháp: ALE truyền thống (Traditional ALE) [8], FH-ALE nhảy tần ngẫu nhiên

[5], phương pháp đề xuất Cognitive-FH-ALE. Các tham số hệ thống được lựa chọn dựa trên cấu hình BW0 của hệ thống ALE thế hệ thứ ba. Cụ thể, mỗi khung BW0 gồm 384 ký hiệu tiền tố và 832 ký hiệu dữ liệu. Với tốc độ ký hiệu 2400 symbols/s, thời gian truyền một khung BW0 được tính như sau:

$$T_{BW0} = \frac{384 + 832}{2400} \approx 0.507s.$$

Trong khi đó, thực tế của mỗi phiên truyền chỉ gồm 26 bit dữ liệu. Do đó, thông lượng hiệu dụng lý tưởng của hệ thống có thể được ước tính:

$$R_b = \frac{26}{0.507} \approx 50 \text{ bit/s}$$

Giá trị này phù hợp với đặc tính thiết kế của waveform ALE, trong đó hệ thống ưu tiên độ tin cậy truyền dẫn và khả năng chống nhiễu hơn là tốc độ dữ liệu. Bảng 1 trình bày các tham số chính sử dụng trong mô phỏng. Ba loại gây nhiễu điển hình được xem xét nhằm đánh giá toàn diện khả năng chống nhiễu của hệ thống: Nhiễu cục bộ; Nhiễu bám theo tần số; Nhiễu đa tần thông minh. Ngoài ra, trường hợp không có nhiễu được sử dụng làm chuẩn tham chiếu.

Bảng 1. Tham số mô phỏng hệ thống

Tham số	Giá trị
Điều chế	8-PSK
Số bit dữ liệu	26 bits
Tốc độ mã hóa	1/2 convolutional
Kích thước interleaver	4×13
Số kênh HF khả dụng	128
Kích thước hopping set	64
Số bước nhảy mỗi phiên	13 hops
Tốc độ ký hiệu	2400 symbols/s
Mô hình kênh	AWGN
Số lần lặp Monte-Carlo	≥ 2000 packets

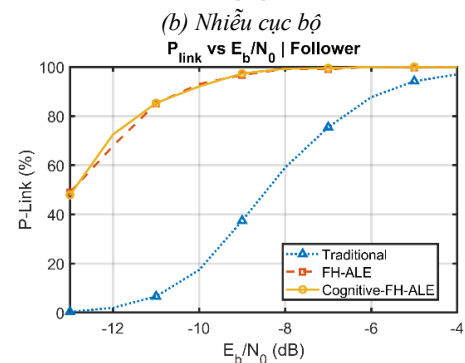
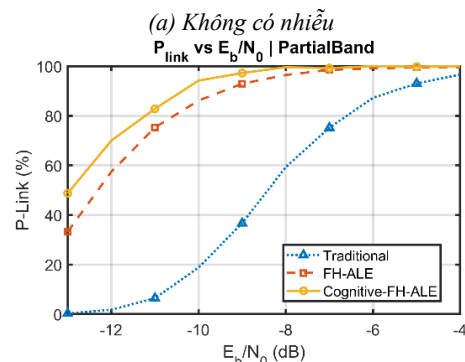
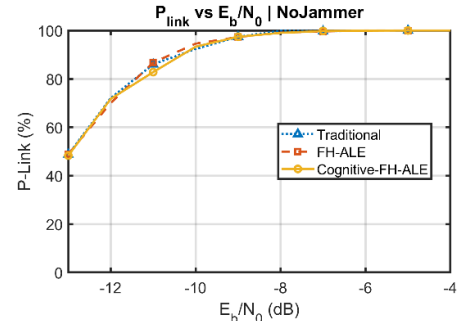
4.2. Xác suất thiết lập liên kết

Hình 3 trình bày xác suất thiết lập liên kết theo E_b/N_0 cho các kịch bản gây nhiễu khác nhau.

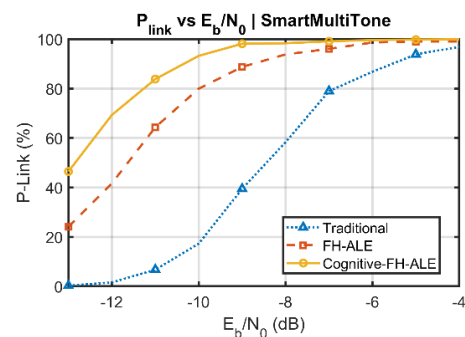
Trong trường hợp không gây nhiễu, ba phương pháp cho hiệu năng gần tương đương, cho thấy cơ chế học thích nghi không gây suy giảm hiệu năng khi môi trường truyền thuận lợi. Với nhiễu cục bộ, FH-ALE cải thiện đáng kể so với ALE truyền thống nhờ khai thác đa dạng tần số. Tuy nhiên, phương pháp Cognitive-FH-ALE đạt xác suất thiết lập liên kết cao hơn rõ rệt trong vùng E_b/N_0 thấp, cho thấy hệ thống đã học được vùng phổ bị nhiễu và giảm xác suất lựa chọn các kênh kém chất lượng. Trong kịch bản nhiễu bám theo tần số, lợi

thế của phương pháp đề xuất tiếp tục được thể hiện khi xác suất thiết lập liên kết tăng nhanh hơn so với FH-ALE nhờ cơ chế lựa chọn tần số thích nghi.

4.3. Thông lượng hiệu dụng



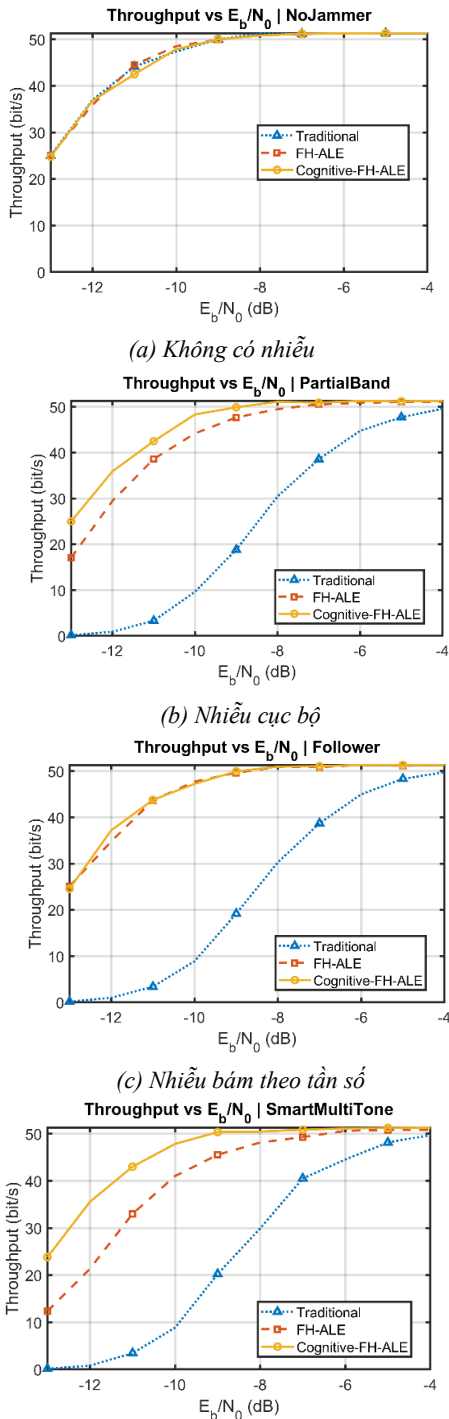
(c) Nhiễu bám theo tần số



(d) Nhiễu đa tần thông minh

Hình 3. P-link (Xác suất thiết lập liên kết)

Hình 4 thể hiện thông lượng hiệu dụng đạt được trong các kịch bản gây nhiễu khác nhau.



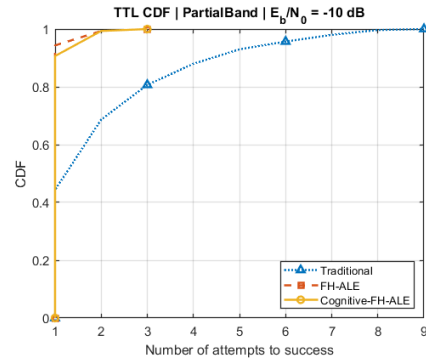
Hình 4. Thông lượng hiệu dụng

Hình 4 cho thấy xu hướng thông lượng tương tự kết quả P_{link} , trong đó Cognitive-FH-ALE đạt mức thông lượng cực đại ở giá trị E_b/N_0 thấp hơn so với FH-ALE truyền thống. Điều này cho thấy việc lựa chọn tần số thích nghi giúp khai thác hiệu quả hơn

các kênh truyền khả dụng trong môi trường nhiễu.

4.4. Phân tích thời gian thiết lập liên kết

Hình 5 biểu diễn hàm phân phối tích lũy (CDF) của thời gian thiết lập liên kết (TTL) trong kịch bản nhiễu băng phần tại $E_b/N_0 = -10$ dB.

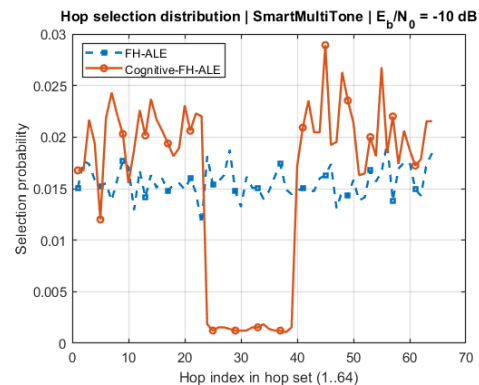


Hình 5. Thời gian thiết lập liên kết

ALE truyền thống yêu cầu nhiều lần thử lại (9 lần) do hoạt động trên các kênh bị nhiễu, dẫn đến phân bố TTL có đuôi dài. FH-ALE đạt xác suất thiết lập liên kết thành công ngay từ lần thử đầu tiên trong phần lớn trường hợp. Kết quả này cho thấy phương pháp đề xuất có khả năng rút ngắn đáng kể thời gian thiết lập liên lạc trong môi trường nhiễu.

4.5. Phân bố lựa chọn tần số

Hình 6 trình bày phân bố xác suất lựa chọn hop trong kịch bản nhiễu đa tần thông minh.



Hình 6. Phân bố lựa chọn tần số

FH-ALE truyền thống cho phân bố gần như đồng đều trên toàn bộ hopping set. Ngược lại, Cognitive-FH-ALE làm giảm đáng kể xác suất lựa chọn các tần số nằm trong vùng bị gây nhiễu (từ 23 đến 41 trong hop set) và ưu tiên các kênh có chất lượng tốt hơn. Kết quả này xác nhận rằng cơ chế học LQA cho phép hệ thống hình thành hành vi tránh phổ một cách tự thích nghi mà không cần thông tin tiên nghiệm về nhiễu.

5. Kết luận

Bài báo đã đề xuất phương pháp Cognitive Frequency Hopping Automatic Link Establishment (Cognitive-FH-ALE) nhằm nâng cao độ tin cậy của hệ thống thông tin HF ALE trong môi trường nhiễu. Phương pháp khai thác cơ chế học thích nghi dựa trên đánh giá chất lượng liên kết (LQA) để điều chỉnh xác suất lựa chọn tần số mà không cần thông tin tiên nghiệm về đối tượng gây nhiễu. Kết quả mô phỏng cho thấy Cognitive-FH-ALE cải thiện rõ rệt xác suất thiết lập liên kết, thông lượng hiệu dụng và thời gian thiết lập liên lạc so với ALE truyền thống và FH-ALE ngẫu nhiên, đặc biệt trong các kịch bản gây nhiễu thông minh. Nhờ khả năng tích hợp trực tiếp vào các hệ thống hiện có mà không cần thay đổi phần cứng, phương pháp đề xuất góp phần nâng cao hiệu quả và độ tin cậy của thông tin HF hàng hải trong môi trường nhiễu phức tạp. Nghiên cứu sẽ được mở rộng theo hướng sử dụng các mô hình kênh HF thực tế hơn, kết hợp các hiệu ứng fading và biến thiên theo thời gian để đánh giá toàn diện hơn hiệu năng của phương pháp đề xuất. Ngoài ra, việc tích hợp các cơ chế dự đoán kênh hoặc học thích nghi nâng cao cũng sẽ được xem xét nhằm cải thiện khả năng thích ứng trong các môi trường nhiễu động mạnh và thay đổi nhanh.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: **DT25-26.75**.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Wang, J., Shi, Y., Yang, C., & Feng, F. (2022), *A review and prospects of operational frequency selecting techniques for HF radio communication*, Advances in Space Research, Vol.69(8), pp.2989-2999.
- [2] Wang, J., Yang, C., & An, W. (2022), *Regional Refined Long-Term Predictions Method of Usable Frequency for HF Communication Based on Machine Learning Over Asia*, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol.70(6), pp.4040-4055.
- [3] Ortega-González, F. J., García, J. A., Patiño-Gómez, M., & Madueño-Pulido, D. (2026), *High-Efficiency Transmitters Operating at HF, VHF, and UHF Frequencies*, IEEE Microwave Magazine, Vol.27(4), pp.35-54.
- [4] Duan, R., Jin, L., & Lan, X. (2025), *Analysis of Anti-Jamming Performance of HF Access Network Based on Asymmetric Frequency Hopping*, Sensors, Vol.25(9), 2950.
- [5] Khodaverdizadeh, M., Haghbin, A., & Razzazi, F. (2022), *Improving the Performance of HF Radio Networks in the Presence of Interference through Automatic Link Establishment with Frequency Hopping Technique*, Wireless Personal Communications, Vol.127, pp.2647-2666.
- [6] Wu, C., Cheng, Y., Gong, Y., Ding, G., Yu, L., & Zhang, Z. (2018), *A Method Based on Frequent Pattern Mining to Predict Spectral Availability of HF*, 2018 IEEE 18th International Conference on Communication Technology (ICCT), pp.1391-1396.
- [7] Yang, X., & Li, Y. (2019), *Analysis on the Performance of Spectrum Prediction in HF Communications*, 2019 IEEE 19th International Conference on Communication Technology (ICCT).
- [8] Qin, Z., et al. (2018), *Link Quality Analysis Based Channel Selection in High-Frequency Asynchronous Automatic Link Establishment: A Matrix Completion Approach*, IEEE Systems Journal, Vol.12(2), pp.1957-1968.
- [9] Qi, J., Zhang, H., Qi, X., & Peng, M. (2024), *Deep Reinforcement Learning Based Hopping Strategy for Wideband Anti-Jamming Wireless Communications*, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol.73(3), pp.3568-3579.
- [10] Zhao, J., Wang, J., Tang, W., & Liu, S. (2022), *Design of Intelligent Frequency Hopping Anti Continuous Change Jamming System Based on Migration Learning*, 2022 IEEE 5th International Conference on Electronics and Communication Engineering (ICECE), pp.21-24.

Ngày nhận bài:	03/03/2026
Ngày nhận bản sửa:	11/03/2026
Ngày duyệt đăng:	30/03/2026