

ĐÁNH GIÁ HIỆU NĂNG CỦA PHƯƠNG THỨC ĐIỀU CHẾ VÀ MÃ HÓA THÍCH NGHI ÁP DỤNG CHO HỆ THỐNG VDES

PERFORMANCE ASSESMENT OF ADAPTIVE MODULATION AND CODING IN VHF DATA EXCHANGE SYSTEM (VDES)

PHẠM VIỆT HÙNG

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

Email liên hệ: phamviethung@vimaru.edu.vn

Tóm tắt

Hệ thống trao đổi dữ liệu trên dải tần VHF (VDES) được coi là hệ thống nâng cấp, cải tiến của hệ thống tự động nhận dạng (AIS). Để đáp ứng được các yêu cầu của VDES, các phương thức ghép kênh, đa truy nhập và điều chế khác nhau đã được áp dụng cho VDES. Tổ chức IALA đã khuyến nghị sử dụng các cơ chế điều chế và mã hóa khác nhau (MCS) cho thành phần mặt đất của hệ thống VDES (VDE-TER). Bài báo này giới thiệu và đánh giá hiệu năng của phương thức điều chế và mã hóa thích nghi khi áp dụng cho thành phần VDE-TER để cải thiện tốc độ và độ chính xác truyền dữ liệu của hệ thống. Kết quả mô phỏng cho thấy, tốc độ và hiệu quả phổ của hệ thống được cải thiện đáng kể.

Từ khóa: VDE-TER, VDES, điều chế và mã hóa, điều chế và mã hóa thích nghi.

Abstract

The VHF Data Exchange System (VDES) is considered as an upgraded and improved system of the Automatic Identification System (AIS). To meet the requirements of VDES, various multiplexing, multiple access and modulation methods have been applied to VDES. IALA has recommended the use of various modulation and coding schemes (MCS) for the terrestrial component of the VDES system (VDE-TER). This paper introduces and evaluates the performance of adaptive modulation and coding when applied to the VDE-TER component to improve the data transmission speed and accuracy of the system. Simulation results show that the speed and spectral efficiency of the system are significantly improved.

Keywords: VDE-TER, VDES, modulation and coding, adaptive modulation and coding.

1. Đặt vấn đề

Hệ thống trao đổi dữ liệu trên dải tần VHF (VDES - VHF Data Exchange System) được tổ chức Quốc tế về hỗ trợ Hàng hải và Hải đăng (IALA) và Liên minh viễn thông quốc tế (ITU - International Telecommunication Union) giới thiệu vào năm 2013 nhằm nâng cao an toàn giao thông hàng hải và đáp ứng nhu cầu trao đổi thông tin hàng hải ngày càng tăng [1]. Hiện nay, các tiêu chuẩn của hệ thống VDES đã chuyển sang giai đoạn thừa nhận trong Tổ chức Hàng hải Quốc tế (IMO - International Maritime Organization). Trong kỳ họp thứ 11 của Tiểu ban IMO về Hàng hải, Truyền thông và Tìm kiếm và Cứu nạn (NCSR11), được tổ chức vào tháng 6 năm 2024, các cuộc thảo luận tập trung vào các sửa đổi được đề xuất đối với Công ước An toàn tính mạng trên biển (SOLAS) liên quan đến VDES và các tiêu chuẩn của công ước này. Sau đó, quá trình thúc đẩy tiếp tục với các sửa đổi đối với Chương V của SOLAS, nhằm mục đích giới thiệu toàn diện VDES như một sự thay thế cho AIS và là sự thay thế có tính pháp lý quốc tế của AIS. Sự phát triển này xác định VDES là cơ sở hạ tầng kỹ thuật số hàng hải nền tảng để thúc đẩy E-navigation toàn cầu [2]. Khi quá trình chuyển đổi từ AIS sang VDES trong Công ước SOLAS diễn ra, các quốc gia trên toàn thế giới dự kiến sẽ nắm bắt cơ hội này để tăng cường các nỗ lực nghiên cứu liên quan đến hiệu suất và sự phát triển có hệ thống của VDES [3].

Trong khuyến nghị G.1139 về tiêu chuẩn kỹ thuật của VDES [4], tổ chức IALA đã đề xuất chín (09) cơ chế điều chế và mã hóa (MCS - Modulation and Coding Schemes) cho hệ thống VDES, trong đó có 3 cơ chế đang được sử dụng, 6 cơ chế còn lại dành cho sử dụng trong tương lai. Việc sử dụng các MCS này phụ thuộc vào quá trình ước lượng kênh, cụ thể là tỷ số tín hiệu - nhiễu (SNR - Signal To Noise Ratio). Đồng thời, áp dụng thuật toán để quyết định chuyển đổi giữa các MCS trong quá trình truyền thông để tối ưu hóa tốc độ truyền dữ liệu. Khi lỗi truyền thông xảy ra, giải pháp điều chế và mã hóa thích nghi (AMC - Adaptive Modulation and Coding) sẽ triển khai để chuyển sang MCS khác để đảm bảo chất lượng truyền

thông (giảm tốc độ, tăng độ chính xác). Ngược lại, khi bên phát và bên thu gần nhau (ví dụ khi tàu gần trạm bờ), giải pháp AMC cần phải thực hiện để tối đa hiệu quả phổ (tăng tốc độ truyền dữ liệu). Trong bài báo này, hiệu năng của các MCS áp dụng trong VDES sẽ được phân tích, đánh giá. Trên cơ sở đó, giải pháp AMC được áp dụng nhằm đạt được hiệu quả truyền thông tối đa. Cấu trúc phần còn lại của bài báo bao gồm: Phần 2 giới thiệu về hệ thống VDES và môi trường truyền thông hàng hải, phân tích về các MCS được trình bày ở phần 3. Phần 4 nêu lên các kết quả đánh giá các giải pháp MCS và phân tích giải pháp AMC. Cuối cùng, kết luận được nêu ra ở Phần 5.

2. Hệ thống VDES và kênh thông tin vô tuyến hàng hải

2.1. Hệ thống VDES

Tuy có thể được coi là hệ thống AIS thế hệ thứ hai, nhưng thực chất hệ thống VDES bao gồm nhiều hệ thống con như minh họa ở Hình 1, một trong số đó là hệ thống AIS. Hệ thống con thứ hai là các kênh ASM (Application Specific Messages), các kênh này cũng có chức năng như các kênh AIS nên hướng tới giảm tải cho các kênh AIS. Tuy nhiên, do AIS được sử dụng để cung cấp các thông tin về vị trí và hướng mũi tàu để thực hiện tránh va nên thường xuyên phụ thuộc vào sự thay đổi tốc độ và sự dịch chuyển của phương tiện. Do đó, ASM hướng đến giảm tải cho kênh AIS bằng cách áp dụng cho các bản tin, thông báo được xác định trước. Thành phần thứ ba trong VDES chính là các kênh trao đổi dữ liệu VHF (VDE) tốc độ cao bao gồm 2 thành phần cùng tồn tại là VDE mặt đất (VDE-TER) và VDE vệ tinh (VDE-SAT).

Việc phân bổ dải tần và băng thông cho các thành phần trong hệ thống VDES được minh họa ở Hình 2. Trong đó, các kênh AIS vẫn hoạt động ở các tần số 161,975MHz (kênh 87B) và 162,025MHz (kênh 88B), 2 kênh ASM được ấn định ở tần số 161,950MHz và 162,000MHz tương ứng với kênh 2027 và 2028. Các kênh AIS, ASM có độ rộng băng thông 25kHz cho mỗi kênh. Trong khi đó, đối với thành phần VDE sẽ



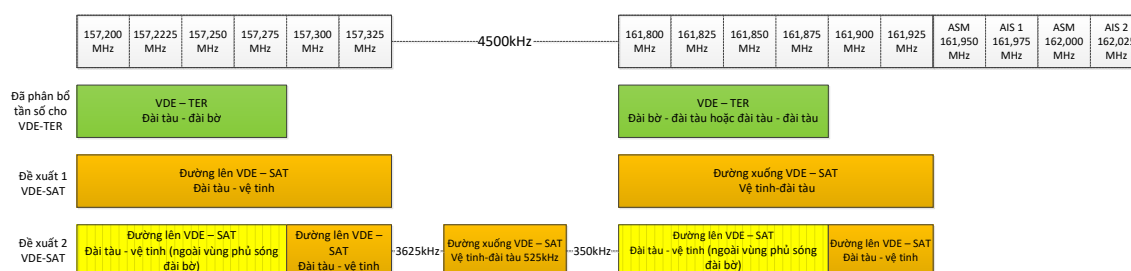
Hình 1. Cấu trúc hệ thống VDES

được phân bổ ở các tần số từ 157,200MHz đến 157,275MHz cho thành phần VDE-TER để liên lạc từ tàu tới bờ. Khoảng tần số từ 161,800MHz đến 161,875MHz cũng cho thành phần VDE-TER để liên lạc từ tàu tới tàu hoặc từ bờ tới tàu. Trong các khoảng tần số này, VDE có các tùy chọn khác nhau về băng thông cho kênh như 25kHz, 50kHz và 100kHz. Đối với thành phần VDE-SAT, do dịch vụ vệ tinh được cung cấp ngoài vùng phủ sóng của các trạm bờ nên phổ tần cho VDE-SAT sẽ trùng với phổ tần cho VDE-TER để liên lạc tàu với vệ tinh và vệ tinh tới tàu. Vì vậy, trong vùng phủ sóng của các trạm bờ sẽ không thể sử dụng thành phần VDE-SAT ngoại trừ 2 khối tần số có độ rộng 50kHz được thiết kế dành riêng cho VDE-SAT.

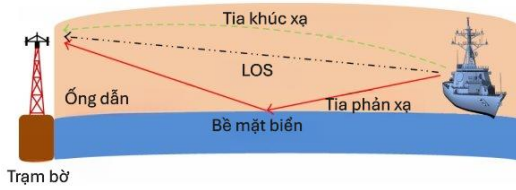
2.2. Kênh thông tin vô tuyến hàng hải trên dải tần VHF

Kênh truyền thông tin vô tuyến hàng hải trên dải tần VHF được phân tích, đánh giá chủ yếu bởi các trạm đầu cuối đặt trên mặt đất. Mô hình suy hao đường truyền được sử dụng thường là các mô hình phổ biến như Okumura - Hata, Longley Rice [5, 6] được cải tiến cho phù hợp với môi trường hàng hải, đồng thời xét đến các môi trường biển khác nhau và trong các điều kiện thời tiết khác nhau. Dựa trên khảo sát các mô hình suy hao này, các yếu tố ảnh hưởng đến công suất tín hiệu tới máy thu bao gồm: Độ cao anten phát, độ cao anten thu, điều kiện mặt biển, nhiệt độ, độ ẩm. Tuy nhiên, các mô hình suy hao đường truyền này chỉ xem xét đến mức công suất trung bình nhận được tại phía thu.

Như minh họa ở Hình 3, cường độ tín hiệu tại phía thu là sự xếp chồng của cường độ tín hiệu các thành phần đa đường như tia truyền thẳng, tia phản xạ từ bề



Hình 2. Phân bổ tần số cho AIS, ASM và VDE trong hệ thống VDES



Hình 3. Các thành phần của kênh truyền sóng trên biển

mặt biển và tia khúc xạ do hiện tượng ống dẫn. Do đó, cường độ tín hiệu tại phía thu còn bị dao động do hiện tượng đồng pha hoặc lệch pha của các thành phần tín hiệu đa đường trên. Vì vậy, để đánh giá hiệu quả kênh thông tin vô tuyến trên biển, các mô hình kênh 2 tia và 3 tia được áp dụng. Trong đó, mô hình kênh 2 tia có suy hao đường truyền được xác định [7]:

$$L(ht, h_r, d) = -10 \log_{10} \left(\left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \left(2 \sin \left(\frac{2\pi h_t h_r}{\lambda d} \right) \right)^2 \right) \quad (1)$$

Trong đó: h_t, h_r lần lượt là độ cao anten của bên phát và bên thu và λ là độ dài bước sóng của sóng mang.

Trong trường hợp mô hình 3 tia, suy hao đường truyền được xác định [7]:

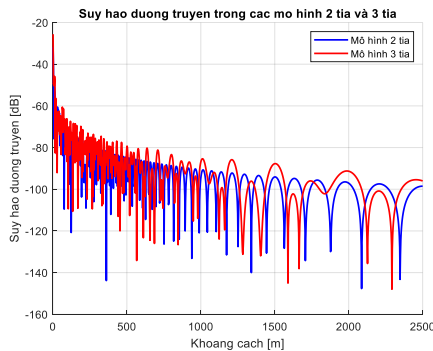
$$L(ht, h_r, d) = -10 \log_{10} \left(\left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 (2(1 + \Delta))^2 \right) \quad (2)$$

Trong đó:

$$\Delta = 2 \sin \left(\frac{2\pi h_t h_r}{\lambda d} \right) \sin \left(\frac{2\pi (h_e - h_t)(h_e - h_r)}{\lambda d} \right);$$

với h_e là độ cao hiệu dụng của ống dẫn.

Như minh họa ở Hình 4, suy hao đường truyền của kênh vô tuyến trên biển thay đổi theo khoảng cách. Rõ ràng, cả mô hình 2 tia và 3 tia đều xảy ra tình huống cường độ tín hiệu giảm đột ngột tạo ra các điểm không sâu (deep nulls).



Hình 4. Suy hao đường truyền của kênh vô tuyến trên biển với mô hình 2 tia và 3 tia

3. Các cơ chế điều chế và mã hóa trong VDES

Trong khuyến nghị G.1139 [4], ITU đã khuyến nghị 31 MCS khác nhau cho các thành phần của hệ thống VDES, bao gồm: 7 MCS cho ASM, 9 MCS cho VDE-TER còn lại 15 MCS cho VDE-SAT với 10 MCS cho đường xuống, và 5 MCS cho đường lên. Các thông số của 9 MCS dành cho thành phần VDE-TER được liệt kê ở Bảng 1.

Bảng 1. Các tham số của MCS cho VDE-TER

Số hiệu MCS	Băng thông (kHz)	Tốc độ symbol (ksps)	Điều chế	Tốc độ mã hóa
11	25	19,2	$\pi/4$ -QPSK	1/2
12	25	19,2	8PSK	3/4
13	25	19,2	16QAM	3/4
14	50	38,4	$\pi/4$ -QPSK	1/2
15	50	38,4	8PSK	3/4
16	50	38,4	16QAM	3/4
17	100	76,8	$\pi/4$ -QPSK	1/2
18	100	76,8	8PSK	3/4
19	100	76,8	16QAM	3/4

Cũng theo khuyến nghị G.1139, hiện nay, chỉ có 3 MCS bao gồm 11, 17 và 19 được sử dụng, các MCS còn lại vẫn đang được tiếp tục nghiên cứu, đánh giá và sử dụng trong tương lai. Các MCS có độ rộng kênh khác nhau (25kHz, 50kHz và 100kHz) nên số lượng bit (byte) được truyền trong một khe thời gian sẽ khác nhau (mặc dù, cả 9 MCS đều có 2250 khe thời gian được truyền mỗi phút, tương ứng với độ rộng 1 khe thời gian cỡ 26,67ms). Như minh họa ở Bảng 1, ba phương thức điều chế được sử dụng trong các MCS là $\pi/4$ -QPSK, 8PSK và 16QAM. Đồng thời, có 2 tốc độ mã hóa được áp dụng là 1/2 (khi dùng điều chế $\pi/4$ -QPSK) và 3/4 (khi dùng điều chế 8PSK hoặc 16QAM). Việc lựa chọn phương thức điều chế và mã hóa sẽ phụ thuộc vào vị trí, khoảng cách giữa bên phát và bên thu. Khi tàu ở xa trạm bờ hoặc 2 tàu xa nhau, chất lượng đường truyền giảm sút, khi đó cần phải lựa chọn phương thức điều chế có hiệu quả phổ thấp, phương thức mã hóa có tốc độ mã thấp (tốc độ mã 1/2) chỉ cho phép truyền dữ liệu thấp ($\pi/4$ -QPSK) để đảm bảo hiệu quả truyền dẫn. Ngược lại, khi tàu ở gần trạm bờ hoặc 2 tàu ở gần nhau, để đảm bảo tốc độ truyền dẫn, phương thức điều chế được lựa chọn cần có hiệu quả phổ cao, phương thức mã hóa có tốc độ mã cao (điều chế 16QAM, tốc độ mã 3/4). Mỗi phương thức điều chế và tốc độ mã có tỉ lệ lỗi symbol

(BER) được xác định:

$\pi/4$ -QPSK:

$$SER_{\pi/4\text{-QPSK}} = Q\left(\sqrt{\frac{2E_s}{N_0}}\right) \quad (3)$$

8PSK:

$$SER_{8\text{PSK}} = 2Q\left(\sqrt{\frac{2E_s}{N_0}} \sin\left(\frac{\pi}{8}\right)\right) \quad (4)$$

16QAM:

$$SER_{16\text{QAM}} = 3Q\left(\sqrt{\frac{4E_s}{5N_0}}\right) \quad (5)$$

Trong đó $Q(\cdot)$ được gọi là hàm Q, là xác suất mà một biến ngẫu nhiên chuẩn Gaussian đạt giá trị lớn nhất và được xác định theo phần bù hàm lỗi (error function):

$$Q(x) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2}\right) \quad (6)$$

Đồ thị minh họa SER của 3 MCS không phụ thuộc vào độ rộng kênh được thể hiện ở Hình 5.

Dựa trên SER của mỗi kênh, sẽ xác định được tỉ lệ lỗi gói tin (PER - Packet Error Rate) của mỗi kênh:

$$PER = 1 - (1 - SER)^{N_{\text{symbol}}} \quad (7)$$

Trong đó: N_{symbol} là số lượng symbol được truyền.

Đồng thời, dung lượng của mỗi kênh cũng sẽ được xác định:

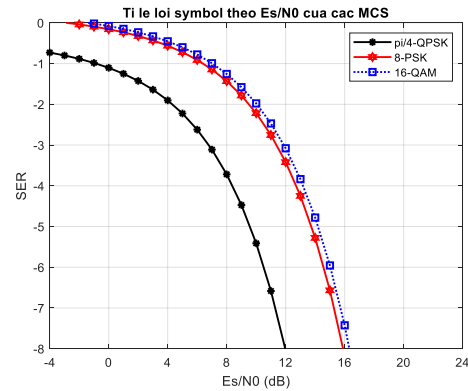
$$C = (1 - PER) \cdot R_s \cdot \log_2 M \cdot r \cdot \frac{L-C}{L} \quad (8)$$

Trong đó: R_s là tốc độ symbol, M là số symbol của mỗi phương thức điều chế (M nhận các giá trị lần lượt 4, 8, 16 ứng với từng phương thức điều chế $\pi/4$ -QPSK, 8PSK và 16QAM), r tương ứng với hiệu quả mã hóa kênh, L là chiều dài của mỗi gói tin và C là chiều dài của phần mào đầu trong mỗi gói tin.

4. Đánh giá các giải pháp MCS của VDE-TER và giải pháp cải tiến

4.1. Đánh giá các MCS của VDE-TER

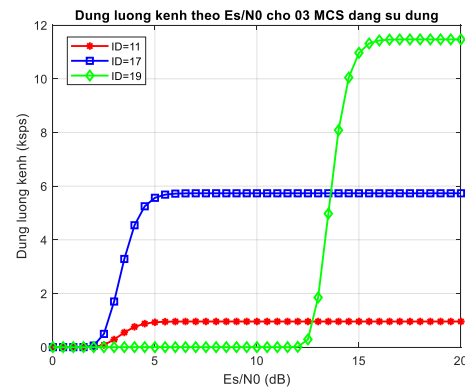
Hình 5 minh họa đồ thị tỉ lệ lỗi symbol (SER) của 3 phương thức điều chế, có kết hợp mã hóa được sử dụng trong các MCS, trong đó bỏ qua độ rộng kênh. Như đã thể hiện ở trong Bảng 1, khi sử dụng phương thức điều chế $\pi/4$ -QPSK sẽ áp dụng tốc độ mã 1/2, còn 2 khi sử dụng phương thức điều chế còn lại cùng áp dụng tốc độ mã 3/4, vì vậy trong Hình 5 sẽ biểu diễn đồ thị của 3 đường đồ thị. Rõ ràng, khi sử dụng phương thức điều chế $\pi/4$ -QPSK, và tốc độ mã 1/2 sẽ cho SER tốt nhất, ngược lại 16-QAM và tốc độ mã 3/4 sẽ cho SER kém nhất. Vì vậy, các MCS có ID 11, 14



Hình 5. SER của 3 MCS không phụ thuộc vào độ rộng kênh

và 17 thường được sử dụng khi tàu cách xa đài bờ hoặc khi 2 đài tàu cách xa nhau, ngược lại các MCS còn lại thường được sử dụng khi các bên phát và bên thu gần nhau.

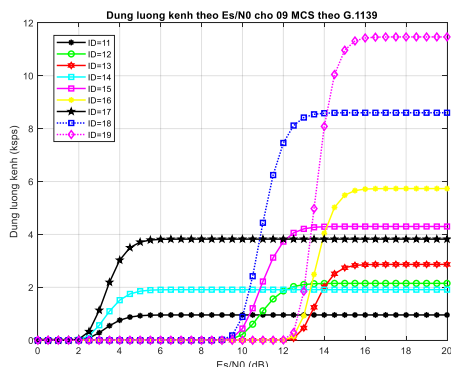
Sau khi đánh giá SER, dung lượng của kênh là tham số tiếp theo được đánh giá. Hình 6 minh họa dung lượng kênh của 3 MCS đang được sử dụng theo khuyến nghị G.1139 là các ID 11, 17 và 19. Rõ ràng, dung lượng kênh của kênh ID=19 đạt giá trị cao nhất do sử dụng phương thức điều chế có hiệu quả phổ cao nhất, tốc độ mã hóa cao nhất và băng thông kênh cao nhất là 100kHz. Ngược lại, kênh với ID=11 sẽ có dung lượng kênh thấp nhất do sử dụng phương thức điều chế có hiệu quả phổ nhỏ nhất, tốc độ mã hóa 1/2 và băng thông kênh nhỏ nhất là 25kHz.



Hình 6. Dung lượng kênh của các ID 11, 17 và 19 (đang được sử dụng theo khuyến nghị G.1139)

Tuy nhiên, dung lượng kênh của kênh ID=19 chỉ lớn hơn dung lượng kênh của ID=11 hoặc ID=17 ứng với tỷ số tín hiệu trên tạp âm (SNR- Signal to Noise Ratio) có giá trị lớn (tương ứng với bên phát và bên thu ở gần nhau). Qua minh họa ở Hình 6, khi SNR nhỏ (tương ứng với cự ly xa giữa bên phát và bên thu) thì dung lượng kênh của kênh ID=11 lại tốt hơn 2 kênh

còn lại. Khi xét đến tất cả các MCS còn lại, kết quả cũng có sự tương đồng như trường hợp trên như minh họa ở Hình 7.



Hình 7. Dung lượng kênh của các MCS theo G.1139

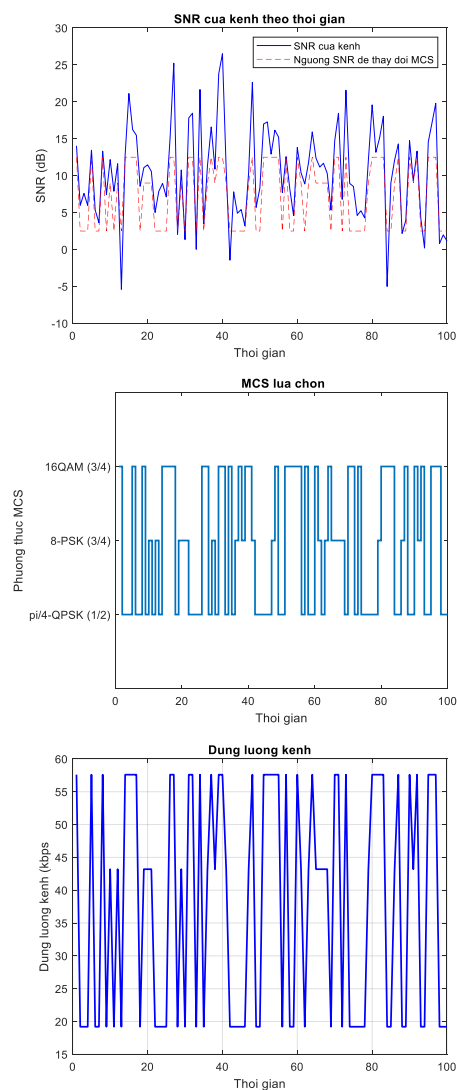
Như vậy, đặc điểm dung lượng kênh của các MCS cũng phù hợp với đặc điểm về tỉ lệ lỗi SER của chúng. Cần thiết lúc này phải có một cơ chế thích nghi để hệ thống có thể điều chỉnh, thay đổi lựa chọn MCS dựa trên đặc tính, trạng thái của kênh truyền.

4.2. Giải pháp cải thiện dung lượng kênh cho VDE-TER

Như đã phân tích ở Hình 4, trong cả 2 mô hình kênh áp dụng cho kênh truyền vô tuyến trên biển đều xảy ra hiện tượng cường độ tín hiệu tại phía thu giảm đột ngột tạo ra các điểm deep-null. Khi đó, kết nối giữa bên phát và bên thu sẽ bị gián đoạn, quá trình truyền tin gặp lỗi. Vì vậy, cần phải có cơ chế để hệ thống chuyển sang MCS thấp hơn, nhưng có độ tin cậy cao hơn nhằm duy trì quá trình truyền dữ liệu. Ngược lại, khi môi trường truyền sóng tốt hơn, cần phải chuyển sang MCS lớn hơn để tăng cường hiệu quả sử dụng đường truyền, tăng dung lượng kênh. Để thực hiện giải pháp điều chế và mã hóa thích nghi, các đài thu (bao gồm cả đài tàu hoặc trạm bờ) cần đo tỷ số SNR của tín hiệu nhận được. Nếu phát hiện ra điểm “deep null”, phía thu phản hồi lại phía phát kèm theo giá trị của SNR vừa đo được. Trong lần truyền dữ liệu kế tiếp, phía phát sẽ thay đổi MCS dựa theo SNR vừa được xác định. Thông tin liên quan đến MCS đã thay đổi được phía phát gắn vào một trường trong phần mào đầu của bản tin phát. Tuy nhiên, do đặc tính của kênh truyền không dây trên biển rất không ổn định nên việc thay đổi MCS ngay lập tức có thể sẽ không đạt hiệu quả.

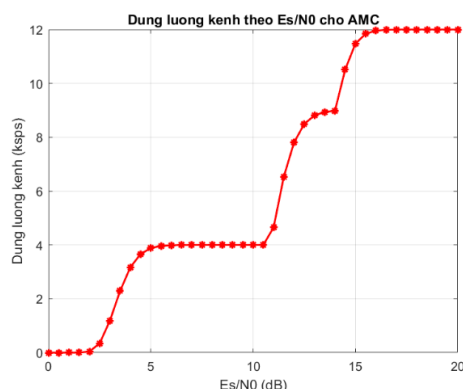
Vì vậy, các dữ liệu mang tính lịch sử, dựa trên các ngưỡng SNR để quyết định thay đổi MCS sẽ hiệu quả hơn việc thay đổi liên tục. Giải thuật thực hiện AMC tương tự như giải thuật được thực hiện trong [9]. Trong đó trạng thái của kênh được xác định và đánh

giá vẫn đạt ngưỡng cho phép khi bản tin phúc đáp (ACK) của gói tin đã truyền vẫn được thu nhận bởi phía phát trong khoảng thời gian cho phép. Nếu ACK của 2 gói tin liên tiếp không được thu nhận bởi bên phát, khi đó hệ thống xác nhận chất lượng kênh đang suy giảm, bên phát quyết định giảm MCS xuống mức thấp hơn về tốc độ và mức điều chế. Đồng thời, một bộ đếm cũng sẽ được kích hoạt. Ngược lại, nếu ACK của 10 gói tin liên tiếp đều được thu nhận bởi bên phát, bên phát xác nhận chất lượng đường truyền đang tốt và quyết định chuyển lên MCS có tốc độ và mức điều chế cao hơn. Đồng thời, bộ đếm sẽ được dừng lại. Ngoài ra, khi bộ đếm đã được kích hoạt, nếu đạt đến giá trị ngưỡng được đặt của bộ đếm, bên phát cũng sẽ quyết định chuyển lên MCS có tốc độ và mức điều chế cao hơn. Kết quả của AMC được minh họa ở Hình 8.



Hình 8. AMC theo SNR

Với các ngưỡng của SNR được tính toán, giả sử nhận các giá trị ngưỡng SNR=2,5; 9; 13,5, hệ thống thực hiện chuyển giữa các ID 11, ID 15 và ID 19 (có các tham số như trong Bảng 1) trong cơ chế AMC. Nếu kênh có băng thông không đổi là 100kHz tương ứng các kênh với ID 17, 18 và 19 được sử dụng. Khi đó, các ngưỡng SNR được thiết lập là 2,5; 9,5 và 14 để thực hiện cơ chế AMC. Kết quả dung lượng kênh khi áp dụng AMC được thể hiện ở Hình 9.



Hình 9. Dung lượng kênh theo AMC

Rõ ràng, khi áp dụng AMC, dung lượng kênh của hệ thống cũng sẽ được tối ưu theo phương thức điều chế và mã hóa đã được thay đổi thích nghi theo trạng thái đường truyền. Điều này làm tăng cường hiệu quả phổ, cũng như giảm nguy cơ gây gián đoạn quá trình dữ liệu.

5. Kết luận

Do đặc tính đường truyền vô tuyến trên biển có sự khác biệt lớn so với truyền dẫn trên đất liền, vì vậy thành phần VDE-TER của hệ thống VDES đã được đề xuất với nhiều phương thức điều chế và mã hóa khác nhau. Giải pháp đó nhằm hướng đến đảm bảo việc cung cấp các tốc độ truyền dữ liệu khác nhau của VDES tương ứng với các dịch vụ khác nhau. Vì vậy, kỹ thuật điều chế và mã hóa thích nghi đóng vai trò quan trọng trong VDE-TER để cải thiện hiệu quả phổ tần và dung lượng truyền dẫn. Tuy nhiên, vấn đề về các điểm không (deep nulls) vẫn chưa được kỹ thuật điều chế và mã hóa thích nghi xử lý một cách tối ưu nên chất lượng đường truyền vẫn bị ảnh hưởng. Đặc tính này sẽ được tiếp tục nghiên cứu và có giải pháp xử lý trong tương lai.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: **DT24-25.70**.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Lázaro, Francisco, et al (2019). *VHF Data Exchange System (VDES): an enabling technology for maritime communications*. CEAS space Journal, Vol.11(1), pp.55-63.
- [2] IMO (2024), *Sub-Committee on Navigation, Communications and Search and Rescue (NCSR)*, 11th Session, 4-13 June 2024 . Available online: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/NCSR-11th-session.aspx>.
- [3] Raulefs, Ronald (2022). *Overview of the VHF Data Exchange System*. OCEANS 2022, Hampton Roads. IEEE.
- [4] IALA (2019), *IALA Guideline G1139, The Technical Specification of VDES*. Edition 3 June 2019.
- [5] Timmins, Ian J., and Siu O'Young (2008). *Marine communications channel modeling using the finite-difference time domain method*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol.58 (6), pp.2626-2637.
- [6] Wang, Han, Wencai Du, and Xing Chen (2015). *Evaluation of Radio over Sea Propagation Based ITU-R Recommendation P. 1546-5*. J. Commun. Vol.10.4 (2015), pp.231-237.
- [7] Wang, Jue, et al (2018). *Wireless channel models for maritime communications*. IEEE Access, pp.68070-68088.
- [8] Simon, Marvin K., and Mohamed-Slim Alouini (2004). *Digital communication over fading channels*. John Wiley & Sons.
- [9] Holland, Gavin, Nitin Vaidya, and Paramvir Bahl (2001). *A rate-adaptive MAC protocol for multi-hop wireless networks*. Proceedings of the 7th annual international conference on Mobile computing and networking.

Ngày nhận bài:	11/03/2025
Ngày nhận bản sửa:	25/03/2025
Ngày duyệt đăng:	25/03/2025