

ĐỀ XUẤT PHƯƠNG PHÁP ÁNH XẠ KẾT HỢP VỚI MÃ POLAR NHẪM CẢI THIỆN CHẤT LƯỢNG HỆ THỐNG TRUYỀN TIN SỐ VÔ TUYẾN

Nguyễn Anh Hào*, Phạm Xuân Nghĩa+, Nguyễn Quách Cơ*

* Trung tâm Kỹ thuật thông tin Công nghệ cao, Binh chủng Thông tin liên lạc

+ Khoa Vô tuyến điện tử, Học viện Kỹ thuật quân sự

Tóm tắt: Trong bài báo này, chúng tôi đề xuất phương pháp ánh xạ kết hợp với mã polar nhằm tăng hiệu quả truyền tin số với các sơ đồ điều chế bậc cao có vai trò các bit trong một ký hiệu không bằng nhau. Phương pháp ánh xạ mới dựa trên nhận xét rằng các kênh phân cực của mã polar có dung lượng không bằng nhau và lỗi thường xảy ra ở các bit thông tin truyền trên các kênh phân cực xấu nhất được chọn, vì vậy ta nâng cao chất lượng truyền tin bằng cách tập trung vào cải thiện độ tin cậy khi truyền các bit này. Kết quả mô phỏng cho thấy, phương pháp ánh xạ mới đạt độ tăng ích khoảng 0,7 dB (ở BER=10⁻⁵) khi kết hợp với mã polar (512,256) và sơ đồ điều chế 16-QAM, khoảng 0,8 dB khi kết hợp với mã polar (1024,512) và sơ đồ điều chế 32-QAM.

Từ khóa: Ánh xạ, bit thông tin, bit đóng băng, dung lượng kênh, điều chế đa mức, mã hệ thống, mã polar

I. MỞ ĐẦU

Mã polar được E. Arikan đề xuất năm 2009 [1] và đã nhận được sự quan tâm rất lớn do khả năng sửa lỗi đạt tới giới hạn kênh truyền trong khi có cấu trúc mã đơn giản và độ phức tạp của quá trình mã hóa, giải mã khá thấp. Trong bài báo của mình, E. Arikan đã đề xuất cấu trúc mã dựa trên ý tưởng tách N kênh độc lập với dung lượng kênh giống nhau thành N kênh tổng hợp với dung lượng kênh phân cực thành 2 nhóm: nhóm thứ nhất là các kênh tốt, có dung lượng gần bằng 1, tức truyền thông tin gần như chính xác hoàn toàn, còn nhóm thứ hai là các kênh xấu, có dung lượng gần bằng 0, tức gần như không truyền được thông tin gì chính xác. Bằng cách truyền các bit thông tin trên các kênh tốt và các bit cố định biết trước (gọi là các bit đóng băng) trên các kênh xấu, mã polar cho phép cải thiện tỷ lệ lỗi cho các bit thông tin. Do cấu trúc mã không đều của mã polar ta có thể dự đoán được vai trò của các kênh đầu ra khi truyền các bit thông tin là không đều nhau. Trong các sơ đồ điều chế bậc cao (QAM) khi mà các bit ở các vị trí khác nhau trong một ký hiệu được bảo vệ ở các mức độ khác nhau, việc ánh xạ các bit đầu ra của mã polar với các vị trí trong các ký hiệu của sơ đồ điều chế sẽ ảnh hưởng đến chất lượng truyền tin.

Một số tác giả cũng đã nhận thấy vai trò không đồng đều của các bit đầu ra mã polar và đề xuất các phương pháp ánh xạ để khai thác đặc tính này. Trong [2], [3], các tác giả đề xuất ánh xạ các bit đầu ra mã polar ứng với vị trí các bit thông tin vào các vị trí được sơ đồ điều chế bảo vệ tốt và các bit đóng băng vào các vị trí được bảo vệ kém. Đây là ý tưởng rất hợp lý và thực tế đã cải thiện được hiệu quả của mã polar khi điều chế QAM bậc cao. Tuy nhiên, phương pháp này ánh xạ cả các đầu ra tương ứng với các bit thông tin đã được mã polar bảo vệ tốt vào các vị trí được sơ đồ điều chế bảo vệ tốt gây lãng phí. Trong [4], [5], [6] các tác giả đề xuất phương pháp ánh xạ kết hợp ánh xạ Gray trong điều chế QAM và thao tác xáo trộn bit, sử dụng thuật toán giải điều chế - giải mã lặp (BICM-ID). Phương pháp này mặc dù cũng mang lại hiệu quả giải mã tuy nhiên độ phức tạp tăng lên nhiều lần do quá trình giải mã lặp và trong một số trường hợp, quá trình giải điều chế - giải mã lặp không hội tụ làm cho kết quả xấu đi. Ý tưởng tương tự áp dụng cho các sơ đồ điều chế khác như ASK, PAM cũng được nghiên cứu trong [7], [8].

Trong [9], E. Arikan tiếp tục đề xuất phương pháp thực hiện mã polar mới ở dạng mã hệ thống. Với mã hệ thống, giá trị các bit thông tin được thể hiện ở dãy bit đầu ra mã hóa. Trong [10], các tác giả Harish Vangala, Yi Hong, và Emanuele Viterbo đã đề xuất các thuật toán hữu hiệu để mã hóa, giải mã mã polar ở dạng mã hệ thống. Kết quả ở các công trình trên cho thấy, mã hệ thống đã cải thiện mối tương quan giữa các bit thông tin và các kênh truyền đi và nâng cao hiệu quả truyền thông tin, cải thiện tỷ lệ lỗi các bit thông tin.

Qua phân tích các công trình trên cộng với nhận xét rằng lỗi sẽ thường xảy ra ở các bit thông tin truyền đi trên các kênh phân cực xấu, chúng tôi đề xuất phương pháp cải thiện chất lượng giải mã các bit này bằng cách sử dụng mã polar hệ thống để giá trị của chúng được bảo toàn ở dãy bit đầu ra mã hóa, ánh xạ các bit này vào các vị trí được bảo vệ tốt của sơ đồ điều chế đa mức và tìm cách ánh xạ các bit còn lại sao cho dung lượng các kênh phân cực xấu nhất được chọn để truyền các bit thông tin là lớn nhất. Kết quả nghiên cứu sẽ được trình bày ở các phần tiếp theo.

II. MÃ POLAR VÀ MÃ POLAR HỆ THỐNG

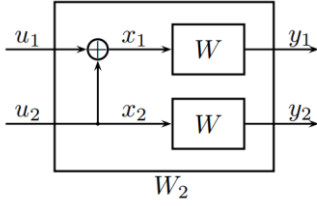
Mã polar là mã được tạo ra dựa trên quá trình gọi là phân cực kênh (channel polarization). Kênh ở đây được hiểu là một cách để truyền đi các bit dữ liệu và nhận về các bit dữ liệu đó, thường là kết hợp của ba quá trình con: mã

Tác giả liên hệ: Nguyễn Anh Hào

Email: haona@mta.edu.vn

Đến tòa soạn: 8/2022, chỉnh sửa: 9/2022, chấp nhận đăng: 10/2022.

hóa các bit dữ liệu để kết hợp chúng lại với nhau tạo ra các từ mã, truyền các từ mã này bằng các kênh truyền vật lý và nhận về các chỉ số (metric), giải mã các metric nhận về để nhận lại các bit dữ liệu. Quá trình phân cực kênh được chia làm hai giai đoạn: gộp kênh là ghép của hai quá trình con đầu và chia kênh là quá trình con sau.

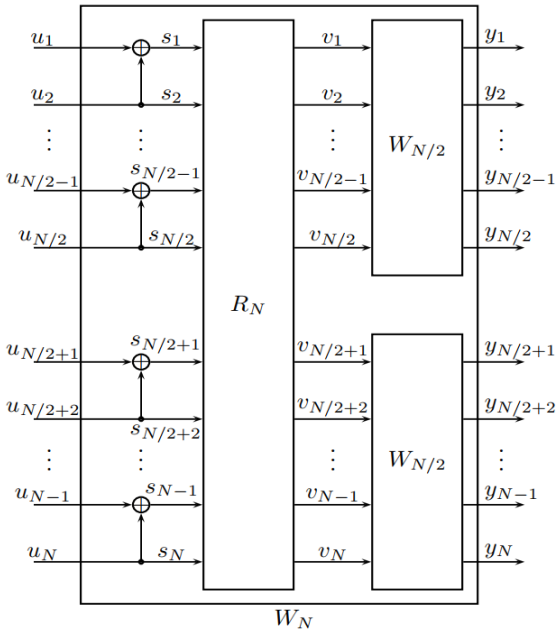


Hình 1. Khối cơ bản để tạo mã polar [1]

Để hiểu giai đoạn gộp kênh, ta hình dung có N kênh vật lý độc lập W truyền đi được N bit và nhận về N metric. Ví dụ ở Hình 1, ta có 2 kênh vật lý W và truyền đi được 2 bit $\{x_1, x_2\}$ và nhận về 2 metric là $\{y_1, y_2\}$. Đây là các kênh gộp bậc 1. Kênh gộp bậc 2 được xây dựng dựa trên 2 kênh gộp bậc 1 bằng cách ghép các bit đầu vào $\{u_1, u_2\}$ theo quy tắc nhất định để được từ mã gồm 2 bit $\{x_1, x_2\}$ và truyền đi trên 2 kênh bậc 1. Các bit $\{u_1, u_2\}$ được ghép dựa trên quy tắc $\mathbf{x} = \mathbf{u} \cdot \mathbf{F}$, trong đó $\mathbf{u} = \{u_1, u_2\}$, $\mathbf{x} = \{x_1, x_2\}$ và $\mathbf{F}$ là ma trận Arikan bậc 2, còn gọi là ma trận nhân Arikan (Arikan kernel matrix) [1].

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Kênh gộp bậc N được xây dựng một cách đệ quy dựa trên 2 kênh gộp bậc $N/2$ như trên Hình 2.



Hình 2. Quá trình xây dựng đệ quy

Các bit đầu vào được chia cặp và biến đổi bằng ma trận nhân Arikan, sau đó dãy các bit nhận được được xáo trộn bằng mảng $\mathbf{R}_N$ (được gọi là xáo trộn đan chéo, sẽ xáo trộn dãy $\{s_1, s_2, \dots, s_N\}$ thành dãy $\{u_1, u_2, \dots, u_N\} = \{s_1, s_3, s_5, \dots, s_{N-1}, s_2, s_4, \dots, s_N\}$) rồi chia thành 2 nửa và cho qua 2 kênh gộp bậc $N/2$.

Về mặt toán học, dãy các bit $\mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ để truyền đi trên các kênh vật lý độc lập có thể tính được từ dãy bit đầu vào $\mathbf{u} = \{u_1, u_2, \dots, u_N\}$ theo công thức [1]:

$$\mathbf{x} = \mathbf{u} \cdot \mathbf{G} \quad (2)$$

Trong đó, $\mathbf{G}$ là ma trận sinh, được tính bằng công thức $\mathbf{G} = \mathbf{B}_N \cdot \mathbf{F}^{\otimes N}$ với $\mathbf{B}_N$ là ma trận đảo ngược bit (bit-reversal), ký hiệu $\mathbf{F}^{\otimes N}$ là lũy thừa Kronecker của ma trận $\mathbf{F}$.

Giai đoạn tách kênh có thể hình dung là giai đoạn giải mã từ dãy N metric nhận được từ N kênh vật lý $\mathbf{y} = \{y_1, y_2, \dots, y_N\}$ để nhận được giá trị của dãy bit đã truyền đi một cách tuần tự từ bit 1 đến bit N , trong đó kết quả giải mã bit sau dựa trên dãy các metric nhận về và kết quả giải mã trước đó. Quá trình giải mã bit thứ i được tiến hành bằng cách tính logarithm tỷ lệ độ hợp lý (log-likelihood ratio) làm căn cứ để quyết định [1]:

$$\log \frac{P\{u_i = 0 | \tilde{u}_1, \tilde{u}_2, \dots, \tilde{u}_{i-1}, y_1, y_2, \dots, y_N\}}{P\{u_i = 1 | \tilde{u}_1, \tilde{u}_2, \dots, \tilde{u}_{i-1}, y_1, y_2, \dots, y_N\}} \quad (3)$$

Trong đó, ký hiệu $\tilde{u}_i$ là giá trị quyết định của bit u_i .

Bằng cách này, có thể hình dung dãy các bit đầu vào $\{u_1, u_2, \dots, u_N\}$ được truyền đến đầu ra thành $\{\tilde{u}_1, \tilde{u}_2, \dots, \tilde{u}_N\}$ theo N kênh. Trong [1], E. Arikan chứng minh được rằng N kênh này sẽ bị phân cực theo nghĩa sẽ có những kênh thực sự tốt, tức giá trị bit tương ứng được truyền đi với độ chính xác cao và những kênh rất xấu và bit truyền đi tương ứng có độ chính xác thấp.

Mã polar ứng dụng quá trình phân cực kênh ở trên bằng cách truyền các bit thông tin (information bits) theo các kênh tốt và truyền các bit có giá trị cố định biết trước (gọi là các bit đóng băng – frozen bits) theo các kênh xấu.

Mã polar được tạo ra bằng cách như trên của E. Arikan [1] không phải là mã hệ thống (systematic code) bởi vì dãy các bit truyền đi trên các kênh vật lý $\mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ không chứa dãy bit đầu vào $\mathbf{u} = \{u_1, u_2, \dots, u_N\}$ một cách tường minh (ở đây ta chỉ quan tâm các bit thông tin ở dãy bit đầu vào vì các bit đóng băng đã cố định và biết trước). Trong [9], E. Arikan đề xuất mã polar hệ thống bằng cách giải ma trận.

Mã polar thông thường tính toán dãy các bit truyền đi $\mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ từ dãy các bit đầu vào $\mathbf{u} = \{u_1, u_2, \dots, u_N\}$ theo công thức (2) với $\mathbf{G}$ là ma trận sinh. Dãy bit đầu vào $\mathbf{u}$ chứa hai loại bit là các bit thông tin và các bit đóng băng. Ta ký hiệu dãy các bit thông tin được tách ra từ $\mathbf{u}$ là $\mathbf{u}_I$ và dãy các bit đóng băng được tách ra là $\mathbf{u}_F$, và ký hiệu $(\mathbf{u}_I, \mathbf{u}_F)$ là ghép các bit của $\mathbf{u}_I$ và $\mathbf{u}_F$ lại theo đúng vị trí của chúng trong dãy $\mathbf{u}$ ban đầu. Như vậy ta có $\mathbf{u} = (\mathbf{u}_I, \mathbf{u}_F)$. Ta cũng ký hiệu $\mathbf{G}_I$ là các ma trận con tạo ra bằng cách ghép các hàng tương ứng với các bit thông tin của ma trận $\mathbf{G}$ và tương tự với $\mathbf{G}_F$. Như vậy từ (2) ta có:

$$\mathbf{x} = \mathbf{u}_I \cdot \mathbf{G}_I + \mathbf{u}_F \cdot \mathbf{G}_F \quad (4)$$

Tương tự, ta cũng tách dãy bit đầu ra $\mathbf{x}$ thành 2 dãy con $\mathbf{x}_I$ và $\mathbf{x}_F$ và các ma trận $\mathbf{G}_I$ và $\mathbf{G}_F$ thành các ma trận con $\mathbf{G}_{II}, \mathbf{G}_{IF}, \mathbf{G}_{FI}, \mathbf{G}_{FF}$ trong đó ma trận con $\mathbf{G}_{II}$ được tạo thành bằng cách ghép các cột của ma trận $\mathbf{G}_I$ tương ứng với các bit thông tin, tương tự với các ma trận con khác. Như vậy, ta có:

$$\mathbf{x}_I = \mathbf{u}_I \cdot \mathbf{G}_{II} + \mathbf{u}_F \cdot \mathbf{G}_{FI} \quad (5)$$

$$\mathbf{x}_F = \mathbf{u}_I \cdot \mathbf{G}_{IF} + \mathbf{u}_F \cdot \mathbf{G}_{FF} \quad (6)$$

Trong đa số trường hợp, $\mathbf{x}_I$ và $\mathbf{u}_I$ sẽ khác nhau nên mã polar thông thường không phải là mã hệ thống. Để tạo được mã hệ thống, ta tiến hành biến đổi các bit thông tin $\mathbf{u}_I$ thành dãy bit trung gian $\mathbf{\mu}_I$ rồi mới ghép với các bit đóng băng $\mathbf{u}_F$ (các bit đóng băng thường được giữ nguyên) và tiến hành mã hóa polar theo công thức (5) và (6) sao cho dãy bit sau mã hóa có $\mathbf{x}_I = \mathbf{u}_I$. Các công thức (5), (6) trở thành:

$$\mathbf{u}_I = \mathbf{\mu}_I \cdot \mathbf{G}_{II} + \mathbf{u}_F \cdot \mathbf{G}_{FI} \quad (7)$$

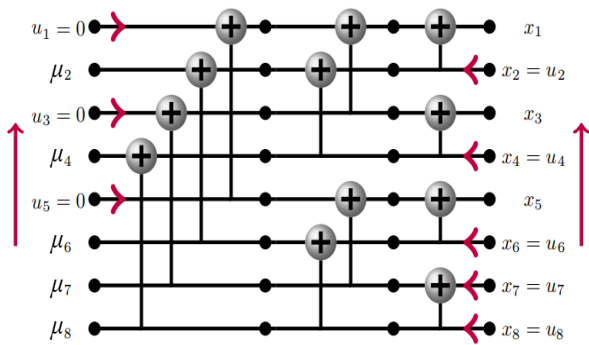
$$\mathbf{x}_F = \mathbf{\mu}_I \cdot \mathbf{G}_{IF} + \mathbf{u}_F \cdot \mathbf{G}_{FF} \quad (8)$$

Từ công thức (7) suy ra:

$$\mathbf{\mu}_I = (\mathbf{u}_I - \mathbf{u}_F \cdot \mathbf{G}_{FI}) \cdot \mathbf{G}_{II}^{-1} \quad (9)$$

Sau khi có $\mathbf{\mu}_I$ ta thay vào công thức (8) để có $\mathbf{x}_F$ và ghép với $\mathbf{u}_I$ để được dãy bit mã hóa polar hệ thống $\mathbf{x} = (\mathbf{u}_I, \mathbf{x}_F)$.

Trong [10], các tác giả Harish Vangala, Yi Hong, và Emanuele Viterbo đề xuất phương pháp mã hóa polar hệ thống bằng phép thế từ cuối.



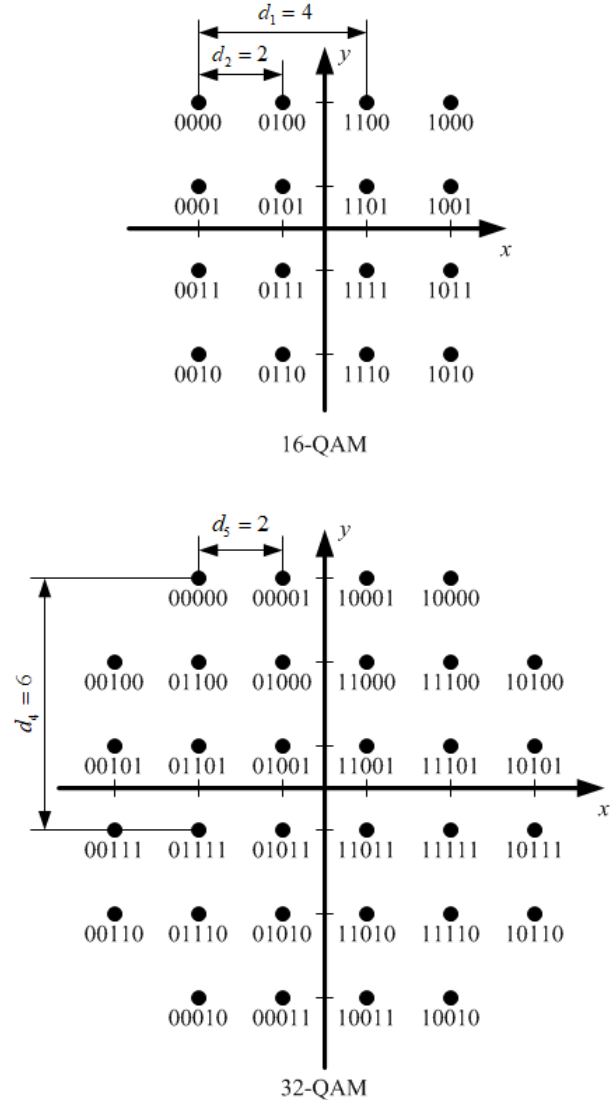
Hình 3. Tạo mã polar hệ thống bằng phép thế từ cuối [10]

Để đơn giản hóa quá trình mã hóa, ta không thực hiện quá trình xáo trộn dữ liệu vào bằng ma trận đảo ngược bit mà coi như các dữ liệu đầu vào ban đầu đã bị xáo trộn bằng ma trận đảo ngược bit và vị trí các bit thông tin, các bit đóng băng và cả thứ tự các bit trong quá trình giải mã sau đó cũng bị xáo trộn theo. Quá trình thực hiện được thể hiện như Hình 3, giả sử rằng vị trí các bit đóng băng trước khi xáo trộn là 1, 3, 5 và các vị trí còn lại là các bit thông tin. Quá trình mã hóa polar hệ thống cũng được thực hiện bằng cách biến đổi dãy bit thông tin đầu vào chưa xáo trộn $\mathbf{u}_I$ thành dãy bit trung gian $\mathbf{\mu}_I$ rồi ghép với các bit đóng băng (giữ nguyên) và thực hiện mã hóa polar. Phép thế từ cuối sẽ căn cứ vào cấu trúc của mã polar và các bit biết trước (gồm các bit thông tin ở đầu ra và đóng băng ở đầu vào) và tiến hành tính dần các bit chưa biết (gồm các bit thông tin trung gian ở đầu vào và đóng băng ở đầu ra) từ dưới lên trên.

III. KỸ THUẬT ÁNH XẠ

Để truyền đi trên các kênh vật lý, dãy các bit đầu ra sau khi mã hóa polar thường được biến đổi thành các tín hiệu vật lý dưới dạng các loại sóng với các thuộc tính của tín hiệu như tần số, biên độ và pha phản ánh giá trị của các bit. Mỗi bit hoặc nhóm bit được truyền bằng một đoạn tín hiệu có thuộc tính cho trước, gọi là một ký hiệu (symbol). Trong các sơ đồ điều chế pha biên độ đa mức (M-PSK hay QAM), mỗi ký hiệu được biểu diễn bằng cặp giá trị (x, y) hay (I, Q) trong đó x hay I là độ lớn thành phần thực (hay cùng pha) còn y hay Q là phần ảo (hay vuông pha). Mỗi giá trị

tương ứng của bit hay nhóm bit được ánh xạ với một điểm (x, y) cho trước. Biểu diễn các điểm (x, y) tương ứng với các giá trị khác nhau của bit hay nhóm bit trên mặt phẳng tọa độ ta được giản đồ chòm sao (constellation). Giản đồ chòm sao tương ứng với sơ đồ điều chế 16-QAM và 32-QAM được sử dụng phổ biến như trên Hình 4. Giản đồ chòm sao chuẩn hóa là giản đồ chòm sao được co lại sao cho trung bình bình phương khoảng cách từ các điểm biểu diễn ứng với các giá trị khác nhau của bit hay nhóm bit đến gốc tọa độ bằng 1.



Hình 4. Giản đồ chòm sao của sơ đồ điều chế 16-QAM và 32-QAM

Khi truyền trên kênh truyền vật lý, dưới tác động của nhiễu, ký hiệu nhận được có thể không còn là điểm (x, y) biểu diễn giá trị ban đầu của bit hay nhóm bit nữa mà sẽ lệch quanh điểm đó với độ lệch tùy thuộc vào độ lớn của nhiễu. Khi đó, giá trị các bit dữ liệu nhận được có thể bị sai do điểm biểu diễn tín hiệu nhận về bị lệch và trở nên gần với điểm biểu diễn giá trị khác hơn giá trị ban đầu. Trong sơ đồ điều chế đa mức, mỗi ký hiệu tương ứng với một nhóm bit. Tùy vào phương pháp ánh xạ, mỗi vị trí trong nhóm bit có thể có khả năng chống nhiễu (tức khả năng chịu tác động của nhiễu mà không làm bit ở vị trí đó bị quyết định sai) khác nhau. Ta gọi khoảng cách bảo vệ của mỗi điểm biểu diễn trên giản đồ chòm sao ở mỗi vị trí bit là khoảng cách Euclid của điểm đó đến điểm gần nhất mà

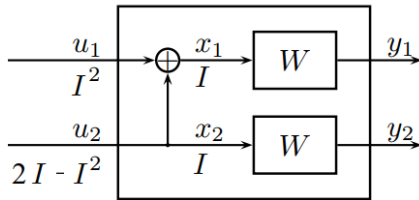
làm cho bit ở vị trí đó bị quyết định sai. Ví dụ như ở giản đồ chòm sao 16-QAM ở Hình 4, khoảng cách bảo vệ của điểm 0000 đối với bit đầu tiên là $d_1 = 4$ (chuẩn hóa là 1,26), là khoảng cách Euclid đến điểm 1100. Tương tự, khoảng cách bảo vệ của điểm 0000 đối với bit thứ 2 là $d_2 = 2$ (chuẩn hóa là 0,63), là khoảng cách Euclid đến điểm 0100. Đối với sơ đồ điều chế bậc cao, khoảng cách bảo vệ đối với các vị trí bit có thể có sự khác biệt lớn. Trong sơ đồ điều chế 32-QAM ở Hình 4, khoảng cách bảo vệ của điểm 00000 đối với bit thứ 4 là $d_4 = 6$ (chuẩn hóa là 1,34), trong khi bit thứ 5 chỉ có $d_5 = 2$ (chuẩn hóa là 0,45). Khoảng cách bảo vệ trung bình của mỗi bit là tổng trung bình khoảng cách bảo vệ của tất cả các điểm biểu diễn. Ta dễ dàng tính ra được khoảng cách bảo vệ trung bình của các sơ đồ điều chế ứng với các vị trí bit khác nhau như Bảng 1.

Bảng 1. Khoảng cách bảo vệ trung bình

Vị trí bit	16-QAM	32-QAM
1	0,95	0,84
2	0,63	0,50
3	0,95	0,55
4	0,63	0,84
5	-	0,45

IV. ĐỀ XUẤT PHƯƠNG PHÁP ÁNH XẠ MỚI

Để phân loại dãy bit đầu vào mã hóa polar thành các loại bit thông tin và bit đóng băng, ta tiến hành tính toán dung lượng các kênh phân cực theo sơ đồ minh họa trên Hình 5.

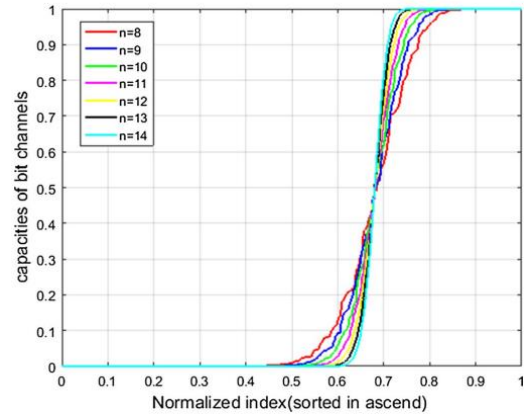


Hình 5. Tính toán dung lượng kênh phân cực [1]

Giả sử ta có hai kênh vật lý độc lập W , dung lượng mỗi kênh là I và truyền đi các bit mã hóa polar $\{x_1, x_2\}$. Các bit mã hóa này là kết quả mã hóa polar của dãy bit đầu vào $\{u_1, u_2\}$. Dung lượng các kênh phân cực dùng để truyền các bit đầu vào u_1 và u_2 sẽ là I^2 và $2I - I^2$ [1]. Quá trình tính toán được lặp lại một cách tương tự cho các kênh bậc cao hơn. Kết quả tính toán là một số kênh phân cực có dung lượng kênh gần bằng 1 (tức kênh rất tốt) và một số kênh thì dung lượng gần bằng 0 (kênh rất xấu). Dung lượng các kênh phân cực sau khi sắp xếp tăng dần như thể hiện trên Hình 6. Trong Hình 6, tham số n là bậc của kích thước mã polar, tức là $n = \log_2 N$, trực tiếp là dung lượng kênh phân cực, còn trực hoành là chỉ số của kênh phân cực sau khi sắp xếp và chuẩn hóa (tức là chia cho N). Từ Hình 6 ta thấy rằng đa số các kênh phân cực có dung lượng gần bằng 0 hoặc gần bằng 1, điều này càng thể hiện rõ khi N lớn.

Căn cứ vào kết quả tính toán được ta lựa chọn ra các kênh có dung lượng lớn nhất để truyền các bit thông tin. Tuy nhiên thực tế, để đảm bảo truyền thông tin với tốc độ yêu cầu, ta vẫn buộc phải lựa chọn một số kênh có dung lượng vừa phải để truyền các bit thông tin (nhưng đã là các kênh tốt nhất trong số các kênh có thể lựa chọn). Khi truyền tin, các bit ở vị trí này sẽ có khả năng bị lỗi cao nhất và ta

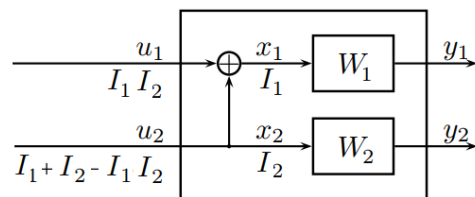
tiến hành các biện pháp để tăng cường khả năng chống lỗi cho các bit này.



Hình 6. Dung lượng các kênh phân cực sắp xếp tăng dần [11]

Trước hết, giá trị của các bit này sẽ được xuất hiện ở dãy bit đầu ra mã hóa của mã polar hệ thống nên ta sẽ sử dụng mã polar hệ thống để truyền tin. Trong các sơ đồ điều chế đa mức có khả năng bảo vệ các bit ở các vị trí không đều nhau, ta sẽ ánh xạ các bit này vào các vị trí được bảo vệ tốt. Chẳng hạn trong sơ đồ điều chế 16-QAM với giản đồ chòm sao như Hình 4, các bit ở vị trí thứ nhất và thứ ba được bảo vệ tốt hơn vì có khoảng cách bảo vệ trung bình là 0,95 trong khi hai bit còn lại có khoảng cách bảo vệ trung bình chỉ là 0,63 và có khả năng bảo vệ thấp hơn. Như vậy, ta sẽ ưu tiên các vị trí tốt này để truyền các bit thông tin có các kênh phân cực được chọn có dung lượng thấp.

Sau khi lựa chọn các vị trí tốt cho các bit thông tin “yếu” nhất, ta phân bổ dần các kênh tốt cho các bit khác. Trong quá trình phân bổ cần lựa chọn các bit để phân bổ sao cho dung lượng nhỏ nhất của các kênh phân cực được lựa chọn để truyền các bit thông tin là lớn nhất.



Hình 7. Tính toán lại dung lượng kênh phân cực theo phương pháp mới

Phương pháp tính toán minh họa trên Hình 5 được E. Arikan chứng minh trong [1] và áp dụng cho kênh BEC. Hiện nay chưa có phương pháp để tính toán chính xác dung lượng các kênh phân cực trong trường hợp tổng quát. Trong bài báo này, chúng tôi sử dụng phương pháp tính toán lại dung lượng các kênh phân cực như sơ đồ minh họa trên Hình 7. Ý nghĩa các tham số trong hình tương tự như trong Hình 5 nhưng ở đây ta có các kênh truyền W_1 và W_2 với dung lượng I_1 và I_2 có thể khác nhau. Khi đó, dung lượng các kênh phân cực để truyền u_1 và u_2 sẽ là $I_1 I_2$ và $I_1 + I_2 - I_1 I_2$.

Quá trình thực hiện ánh xạ theo phương pháp đề xuất được thể hiện trong thuật toán dưới đây.

Algorithm Ánh xạ
Input: $(N=2^n, K)$: kích thước mã polar; W : số bit thông tin “yếu” cần tăng cường bảo vệ; Mảng $I[1..N]$: Dung lượng các kênh vật lý.
Output: Mảng $P[1..N]$: ánh xạ các bit đầu ra vào các kênh vật lý.
Bước 1: Thiết kế mã polar hệ thống như đã giới thiệu trong [9] hoặc [10];
Bước 2: Sắp xếp các kênh phân cực theo thứ tự xấu dần; Lấy ra K kênh phân cực tốt nhất để truyền các bit thông tin, lưu chỉ số các kênh phân cực đã lấy vào mảng $info_chan[1..K]$;
Bước 3: Sắp xếp các kênh vật lý theo thứ tự xấu dần (tức sắp xếp mảng $I[1..N]$ giảm dần); Ánh xạ W kênh vật lý tốt nhất đầu tiên cho W bit đầu ra tương ứng với W kênh phân cực kém nhất trong mảng $info_chan[1..K]$.
Bước 4: Ánh xạ các kênh vật lý tốt tiếp theo cho các bit còn lại. Ứng với mỗi kênh vật lý phy_chan , ta xét tất cả các bit bit chưa được ánh xạ và thực hiện các thao tác sau:
Bước 4.1: Khởi tạo mảng $I[1..N]$ lưu dung lượng các kênh phân cực theo quy tắc: Nếu bit i đã được ánh xạ thì khởi tạo $I[i]$ bằng dung lượng kênh vật lý đã được ánh xạ cho nó; Ngược lại thì khởi tạo $I[i]$ bằng dung lượng kênh vật lý xấu nhất; Khởi tạo $I[bit]$ bằng dung lượng kênh vật lý phy_chan .
Bước 4.2: Tính toán lại dung lượng các kênh phân cực theo phương pháp mới, minh họa ở Hình 7. Hàm tính toán lại như được nêu ở dưới.
Bước 4.3: Tìm kênh phân cực có dung lượng nhỏ nhất trong các kênh đã được chọn để truyền các bit thông tin (tức là các kênh $info_chan[1..K]$). Lưu dung lượng của nó vào biến I_info_worst .
Bước 4.4: Sau khi xét hết các bit chưa ánh xạ, ánh xạ bit có I_info_worst tốt nhất cho kênh vật lý phy_chan .
Bước 5: Điều chỉnh lại vị trí các bit thông tin (nếu cần):
Bước 5.1 Khởi tạo mảng $I[1..N]$ bằng dung lượng các kênh vật lý đã ánh xạ.
Bước 5.2 Tính toán lại dung lượng các kênh phân cực như ở Bước 4.2.
Bước 5.3 Điều chỉnh lại vị trí các bit thông tin nếu có

kênh phân cực khác tốt hơn và bit đầu ra tương ứng được ánh xạ vào kênh vật lý đủ tốt.

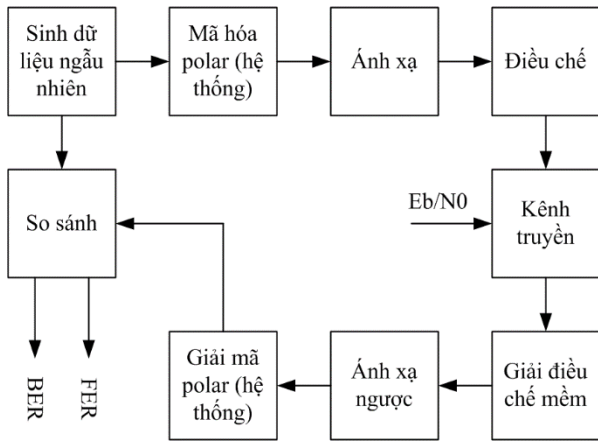
Hàm thực hiện tính toán lại dung lượng các kênh phân cực theo phương pháp mới đã được minh họa trong Hình 7, thực hiện như đoạn giả mã dưới đây.

Function Tính toán lại dung lượng các kênh phân cực
Input: $(N=2^n, K)$: kích thước mã polar; Mảng $I[1..N]$: Khởi tạo bằng dung lượng các kênh vật lý.
Output: Mảng $I[1..N]$: Dung lượng các kênh phân cực đã tính toán lại.
Begin for stage = 1..n do distance = $2^{(stage-1)}$; offset = 0; while offset < N do for bit_pos = 1.. distance do $I1 = I[offset + bit_pos]$; $I2 = I[offset + bit_pos + distance]$; $I[offset + bit_pos] = I1 * I2$; $I[offset + bit_pos + distance] =$ $I1 + I2 - I1 * I2$; end for offset = offset + distance * 2; end while end for End

Một ưu điểm của phương pháp ánh xạ đề xuất là không làm tăng độ phức tạp của các quá trình mã hóa/giải mã polar. Dây bit đầu ra mã hóa polar sẽ được ánh xạ vào các vị trí trước khi tiến hành điều chế đa mức để truyền đi. Ở tuyến thu, quá trình giải điều chế sẽ cho ra các metric và được ánh xạ ngược lại các bit trước khi giải mã polar. Do không yêu cầu bổ sung thêm các vòng giải mã lặp nên quá trình giải mã sẽ đơn giản hơn và ổn định hơn so với các phương pháp sử dụng kỹ thuật BICM-ID. Tuy nhiên, để tìm ra ánh xạ tối ưu cần thực hiện thuật toán tìm kiếm và có thể mất thời gian tính toán, đặc biệt là khi kích thước mã polar lớn. Rất may là các tính toán này chỉ cần thực hiện một lần trong giai đoạn thiết kế.

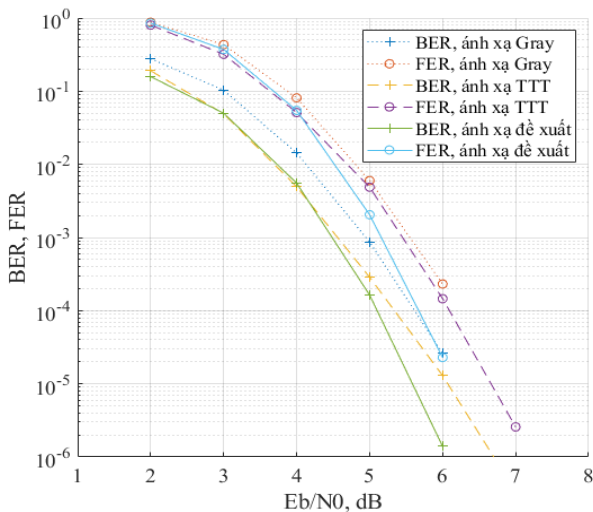
V. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Quá trình mô phỏng được thực hiện như sơ đồ Hình 8. Dây bit dữ liệu đầu vào được sinh một cách ngẫu nhiên, sau đó đưa vào mã hóa polar (đối với phương pháp đề xuất thì sử dụng mã polar hệ thống). Các bit đầu ra mã hóa polar sẽ được ánh xạ theo các phương pháp ánh xạ khác nhau, bao gồm phương pháp truyền thống (ánh xạ Gray lần lượt từng nhóm bit), ánh xạ các bit thông tin vào vị trí tốt (như giới thiệu trong các tài liệu [2],[3], ta ký hiệu là TTT), và ánh xạ theo phương pháp được đề xuất. Dữ liệu sau khi điều chế được cho qua kênh truyền mô phỏng với chất lượng khác nhau (tỷ lệ E_b/N_0 khác nhau) rồi sau đó được giải điều chế mềm, ánh xạ ngược và giải mã polar. Kết quả giải mã được so sánh với dây bit được tạo ra ban đầu để tính tỷ lệ lỗi bit (BER), tỷ lệ lỗi khung (FER).



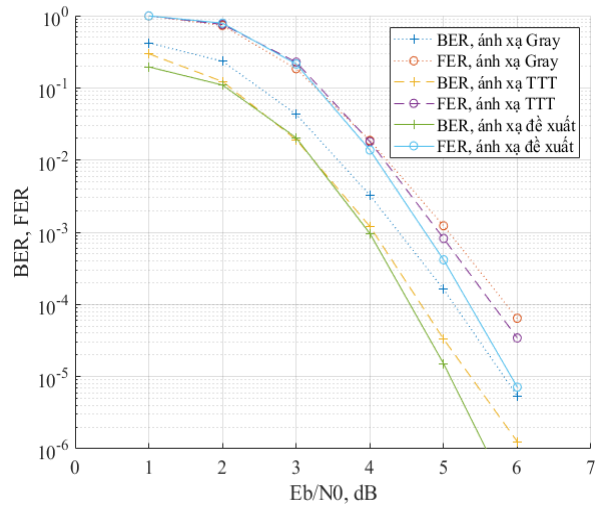
Hình 8. Sơ đồ quá trình mô phỏng

Kết quả mô phỏng sử dụng mã polar (512, 256) với điều chế 16-QAM và mã polar (1024, 512) với điều chế 32-QAM trên kênh AWGN như Hình 9 và Hình 10. Từ Hình 9 có thể thấy rằng, ở tỷ lệ E_b/N_0 thấp (dưới 5 dB), phương pháp đề xuất cho kết quả tương đương phương pháp TTT, cả hai đều vượt trội hơn phương pháp Gray truyền thống nhưng nói chung, cả ba phương pháp đều cho tỷ lệ lỗi khá cao. Sở dĩ như vậy là vì ở dải E_b/N_0 này, các kênh truyền vật lý chất lượng khá xấu và ảnh hưởng đến nhiều bit thông tin trong khi phương pháp đề xuất tập trung vào cải thiện độ tin cậy của các bit thông tin “yếu” nhất, số lượng các bit thông tin được cải thiện có thể chưa đủ. Khi tăng tỷ lệ E_b/N_0 , phương pháp đề xuất bắt đầu thể hiện tính vượt trội so với các phương pháp khác. Ở E_b/N_0 cỡ 5 dB, tỷ lệ lỗi bit (BER) của phương pháp đề xuất chỉ cỡ 1/2 so với phương pháp TTT và 1/5 so với phương pháp Gray. Ở E_b/N_0 cỡ 6 dB, tỷ lệ này đã giảm xuống tương ứng là 1/10 và 1/30. Kết quả tương tự với FER.



Hình 9. Kết quả mô phỏng mã polar (512,256) với điều chế 16-QAM

Còn khi xét ở cùng tỷ lệ lỗi, phương pháp đề xuất tương đương với phương pháp TTT ở các tỷ lệ lỗi lớn (BER cỡ 1% và FER cỡ 3%), cả hai đều vượt trội so với phương pháp Gray. Ở các tỷ lệ lỗi nhỏ hơn, giữa các phương pháp có sự khác biệt. Ở tỷ lệ lỗi bit $BER = 10^{-5}$, phương pháp đề xuất cải thiện tỷ lệ E_b/N_0 khoảng 0,7 dB so với phương pháp Gray và khoảng 0,3 dB so với phương pháp TTT. Với mã polar (1024, 512) và điều chế 32-QAM, phương pháp đề xuất đạt tăng ích khoảng 0,8 dB so với phương pháp Gray và khoảng 0,3 dB so với phương pháp TTT.



Hình 10. Kết quả mô phỏng mã polar (1024, 512) với điều chế 32-QAM

Sự cải thiện trên trong khi mã polar đã là mã kênh rất tốt, đạt tới gần tiệm cận giới hạn kênh truyền (giới hạn Shannon) [1] là mức cải thiện tương đối đáng kể. Sự cải thiện này là do độ tin cậy của các bit thông tin ở vị trí “yếu” đã được tăng lên nhờ sử dụng mã polar hệ thống để giá trị của chúng được truyền đi một cách tường minh trên các kênh vật lý tốt nhất (do giá trị của chúng được truyền đi một cách tường minh nên chúng sẽ chiếm trọn toàn bộ dung lượng của các kênh này mà không phải chia sẻ với các bit khác) và cách lựa chọn ánh xạ trên cơ sở tập trung vào cực đại hóa dung lượng các kênh phân cực dùng để truyền các bit “yếu” này. Mức độ cải thiện sẽ càng rõ nét hơn khi tăng bậc điều chế vì khi đó, sự phân biệt giữa mức độ bảo vệ của sơ đồ điều chế đối với các vị trí bit càng tăng, việc bố trí các vị trí được bảo vệ tốt để truyền bit nào càng trở nên quan trọng.

VI. KẾT LUẬN

Trong bài báo này, chúng tôi đã đề xuất phương pháp ánh xạ mới kết hợp với mã polar để nâng cao chất lượng truyền tin số. Bài báo đã trình bày tổng quan về mã polar, mã polar hệ thống và khái niệm ánh xạ trong điều chế bậc cao làm cơ sở hình thành đề xuất, đồng thời giới thiệu chi tiết thực hiện phương pháp ánh xạ đề xuất và các kết quả mô phỏng. Phương pháp ánh xạ được đề xuất trong bài báo dễ thực hiện, không làm phức tạp thêm quá trình mã hóa/giải mã và cải thiện đáng kể chất lượng truyền tin.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Erdal Arıkan, “Channel Polarization - A Method for Constructing Capacity-Achieving Codes for Symmetric Binary-Input Memoryless Channels”, 2008 IEEE International Symposium on Information Theory, July 2008.
- [2] Qingping Yu, Zhiping Shi, et al., “Mapping Design for 2m-ary Bit-interleaved Polar Coded Modulation”, IEEE Access, vol. 7, pp. 774-784, Aug 2019.
- [3] Dong-Min Shin, Seung-Chan Lim, Kyeongcheol Yang, “Mapping Selection and Code Construction for 2m-ary Polar-Coded Modulation”, IEEE Communications Letters, vol. 16, no. 6, pp. 905-908, April 2012.
- [4] Huseyin Afser, Nazli Tirpan et al., “Bit-Interleaved Polar-Coded Modulation”, 2014 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, April 2014.

- [5] Ubaid U. Fayyaz, "Symbol Mapping Design for Bit-Interleaved Polar-Coded Modulation with Iterative Decoding", IEEE Communications Letters, vol. 23, pp.32-35, Oct 2018.
- [6] Kuangda Tian, Rongke Liu, Runxin Wang, "Joint Successive Cancellation Decoding for Bit-Interleaved Polar Coded Modulation", IEEE Communications Letters, vol. 20, no. 2, pp. 224-227, Jan 2016.
- [7] Sana Javed, Ubaid U. Fayyaz et al., "Polar Code and Symbol Mapping Design for Multi-Level Cell Spin-Torque Transfer Magnetic Random Access Memory", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 58, no. 2, May 2021.
- [8] Saurabha R. Tavildar, "Bit-permuted Coded Modulation for Polar Codes", 2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops, May 2017.
- [9] Erdal Arikan, "Systematic Polar Coding", IEEE Communications Letters, vol. 15, no. 8, pp. 860-862, June 2011.
- [10] Harish Vangala, Yi Hong, Emanuele Viterbo, "Efficient Algorithms for Systematic Polar Encoding", IEEE Communications Letters, vol. 20, no. 1, pp. 17-20, Nov 2015.
- [11] Kun Zhao, Yong Liu, Haiquing Du, Baoku Yuan - Performance Analysis of Bit-Interleaved Polar Coded Modulation - Wireless Personal Communications, vol. 109, pp. 1285-1309, 2019.



Phạm Xuân Nghĩa hiện là giảng viên tại Khoa Vô tuyến điện tử - Học viện Kỹ thuật quân sự, tốt nghiệp đại học và cao học chuyên ngành Thông tin tại Học viện Kỹ thuật quân sự, tiến sĩ chuyên ngành kỹ thuật điện tử tại Liên bang Nga. Lĩnh vực nghiên cứu bao gồm: lý thuyết thông tin, xử lý tín hiệu và thông tin vô tuyến.

Email: nghiapx@mta.edu.vn



Nguyễn Quách Cơ công tác tại Trung tâm Kỹ thuật thông tin Công nghệ cao, Bình chủng Thông tin liên lạc, tốt nghiệp đại học hệ kỹ sư chuyên gia tại trường Đại học Tổng hợp Kỹ thuật quốc gia mang tên Bauman – Liên bang Nga ngành thiết kế và công nghệ các phương tiện vô tuyến điện tử.

Email: nguyenquachco@gmail.com

A COMBINATION OF MAPPING METHOD AND POLAR CODE TO ENHANCE THE PERFORMANCE OF DIGITAL COMMUNICATION SYSTEM

Abstract: This paper proposes a combination of mapping method and polar code to enhance the performance of digital communication system in high level modulation schemes, in these the role of bits for one symbol are not equal. The novel mapping method is based on the note that the channel capabilities of polarized channels are not equal and errors often occur in those bits belong to poor quality polarized channels. Therefore, the performance of communication can be enhanced by improving the reliability of communication those bits. The simulation results show that the novel mapping method can gain 0,7 dB (at BER= 10^{-5}) when combining with the polar code (512,256) and 16-QAM modulation scheme. With the polar code (1024,512) and 32-QAM modulation scheme, the gain is about 0,8 dB.

Keywords: Mapping, information bit, frozen bit, channel capacity, high level modulation, systematic code, polar code



Nguyễn Anh Hào công tác tại Trung tâm Kỹ thuật thông tin Công nghệ cao, Bình chủng Thông tin liên lạc, tốt nghiệp đại học, thạc sĩ chuyên ngành điện tử viễn thông tại Học viện Kỹ thuật Quân sự. Hiện nay đang làm nghiên cứu sinh về lĩnh vực mã kênh (mã Polar).

Email: haona@mta.edu.vn