ĐỀ XUẤT MÃ KÊNH MỚI ĐÁP ỨNG CÁC HỆ THỐNG TRUYỀN TIN CƠ ĐỘNG

PROPOSAL FOR A NEW CHANNEL CODE TO MEET DYNAMIC COMMUNICATION SYSTEMS

Nguyễn Thị Hồng Nhung, Phạm Văn Nam

Khoa Điện tử và Kỹ thuật máy tính, Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp

Đến Tòa soạn ngày 11/06/2024, chấp nhận đăng ngày 05/10/2024

Tóm tắt: Từ các mô hình liên kết các mã khối, mô hình kết hợp mã hóa/điều chế và giải mã/ giải điều chế có hoán vị, bài báo đề xuất hệ thống mã kênh mới, gọi là mã khối liên kết mới. Các mã kênh này có cấu trúc: mã ngoài là một mã Hamming mở rộng, mã trong là một mã chẵn lẻ, liên kết nối tiếp thông qua một bộ hoán vị khối. Mã kênh mới với hai mã thành phần có chiều dài ngắn là mã Hamming mở rộng (16,11,4) và mã kiểm tra chẵn lẻ bít đơn (9,8) đã đạt được tỉ lệ lỗi bít (BER) 6.10-9 với tỉ lệ công suất tín hiệu trên tạp âm (SNR) là 6 dB. Tăng ích của hệ thống truyền dẫn sử dụng mã khối liên kết mới đạt từ 2 dB công suất so với các mô hình điều chế mã khối có hoán vị bít và giải mã lặp (BIBCM-ID). Mô hình mã kênh này có thể đạt được tiêu chí mã hóa/giải mã đơn giản, kiểm soát lỗi tốt cho các gói tin ngắn, phù hợp với các hệ thống truyền tin cơ động.

Từ khóa: NCBC, mã liên kết, mã khối liên kết, mã kênh.

Abstract: From the models linking block codes, models combining encoder/modulator and decoder/demodulator with interlever, the article proposes new channel codes called New Concatenated Block Codes. These channel codes have the structure as following: outer codes are Extended Hamming Codes, inner code is a Single Parity-Check Bit, connecting sequentially through a block interleaver. New channel codes with two short codeword component codes of of extended hamming (16,11,4) and Single Parity-Check Bit (9,8) achieved a bit error ration (BER) of 6.10-9 with a signal-to-noise ratio (SNR) of 6 dB. The transmission system using New Concatenated Block Codes achieved a gain of 2 dB in power compared to Bit-Interleaved Block-Coded Modulation with Iterative Decoding (BIBCM-ID) models. This channel code mode could meet the criteria of simple encoding/decoding and good error control for short messages, hence be suitable for dynamic communication systems.

Keywords: NCBC, concatenated codes, concatenated block codes, channel codes.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hệ thống truyền tin cơ động ngày càng được sử dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực như quân sự, cứu hộ, báo chí,... Tín hiệu truyền của các hệ thống truyền tin cơ động thường bị ảnh hưởng bởi các yếu tố như nhiễu điện từ, địa hình, thời tiết. Ngoài ra, do tính di động nên các hệ thống truyền tin cơ động thường gặp khó khăn trong việc cung cấp dịch vụ dữ liệu tốc độ cao, khó đáp ứng thời gian thực do băng tần sẵn có hạn chế. Các mã kênh tốt với các gói tin ngắn là giải pháp hiệu quả đối với các hệ thống truyền tin này. Mã kênh tốt cần đáp ứng các yêu cầu về khả năng chống nhiễu, hiệu quả truyền dẫn, độ phức tạp và độ trễ.

Phương pháp xây dựng các từ mã dài từ các từ

mã ngắn hơn bằng cách lên kết các mã nhằm giải quyết vấn đề về độ phức tạp giải mã, đã được Forney đưa ra và chứng minh vào năm 1966 [2]. Việc liên kết này sẽ khai thác được các ưu điểm của các loại mã khác nhau nhằm đạt được chất lượng sửa lỗi tối ưu. Các kỹ thuật liên kết mã đều dựa trên hai cấu trúc là: Liên kết nối tiếp và liên kết song song. Dù là kiến trúc dạng nào, đích hướng tới của các kỹ thuật liên kết mã là đảm bảo truyền dữ liệu tin cậy ở tốc độ gần đạt tới dung lượng kênh. Tất nhiên, cần phải đánh đổi bằng sự gia tăng độ phức tạp. Một số cấu trúc liên kết mã phổ biến trong kỹ thuật truyền dẫn số có thể kể tên như: Liên kết mã Reed-Solomon và mã chập, liên kết mã LDPC và mã chập, liên kết hai mã chập (chính là mã Turbo), liên kết các mã Polar,… [3], [4]. Nhìn chung, các cấu trúc liên kết mã kể trên cho thấy, còn tồn tại sự phức tạp trong việc tạo mã hoặc giải mã.

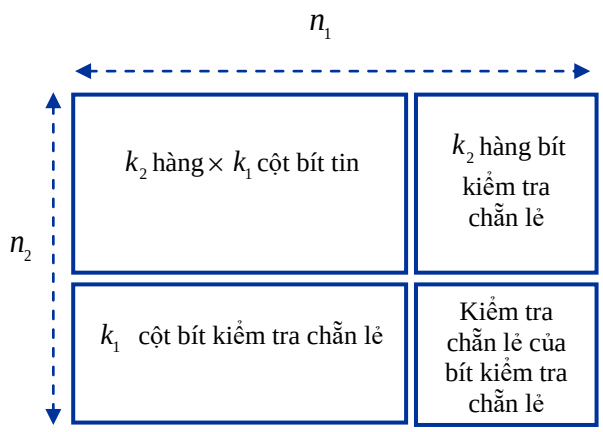
Mặt khác, trước kia, trong hệ thống thông tin số, bộ mã hoá kênh và bộ điều chế là các thành phần tách biệt và hoạt động một cách độc lập. Năm 1974, Masey nghiên cứu và đề xuất sơ đồ hệ thống kết hợp giữa sử dụng mã kênh với điều chế nhiều mức cho phép tối ưu hóa cả bộ mã kênh và bộ điều chế, qua đó cải thiện hiệu quả của hệ thống [5]. Một số sơ đồ kết hợp mã hóa với điều chế truyền thống hiện nay có thể kể tên: điều chế mã khối, điều chế mã lưới, điều chế mã có hoán vị bít và điều chế mã có hoán vị bít và giải mã lặp. Trừ điều chế mã khối, các sơ đồ khác hầu như đều đề xuất sử dụng mã chập nhị phân hoặc mã khối LDPC làm cơ sở cho phần mã hóa [6], [7]. Điều này làm tăng tính phức tạp hệ thống và giảm tỉ lệ mã hóa dẫn đến độ trễ truyền dẫn cao. Một số nghiên cứu sử dụng mã khối là mã Reed Solomon trong trường GF (27) hay mã LDPC với giải mã Viterbi,… các mã tốt là các mã có độ dài lớn nên độ phức tạp hệ thống lớn, thời gian giải mã lâu.

Tiếp nối hướng nghiên cứu về liên kết mã, thừa hưởng ý tưởng kết hợp mã hóa/điều chế và giải mã/ giải điều chế, tại đây, nhóm tác giả đề xuất một cấu trúc liên kết mã khối mới gọi là "Mã khối liên kết mới (New Concatenated Block Codes- NCBC)". Các mã khối liên kết qua bộ hoán vị khối, cấu trúc này trong trường hợp đặc biệt chính là mã tích (Product Codes) [8]. Cụ thể, sử dụng các mã khối đơn giản, gồm một mã ngoài C_1 là mã Hamming mở rộng (Extended Hamming Codes) liên kết một mã trong C_2 là mã khối có chiều dài ngắn, kết hợp với điều chế pha nhị phân (Binary Phase Shift Keying - BPSK), sử dụng bộ hoán vị khối, với một góc nhìn khác, hi vọng sẽ đạt được các bước tiến khả quan.

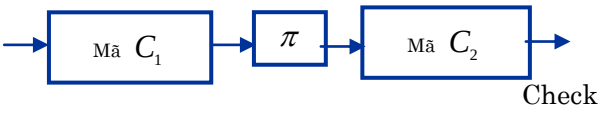
Phần tiếp theo sẽ được bố cục như sau: Mục 2, trình bày cấu trúc các mã khối liên kết, và đề xuất mô hình hệ thống mã khối liên kết mới. Mục 3, trình bày về bộ hoán vị và vai trò bộ hoán vị trong mô hình mã kênh đề xuất. Mục 4, đánh giá chất lượng hệ thống truyền dẫn sử dụng mã kênh mới bằng phương pháp mô phỏng và nhận xét về mã đề xuất. Cuối cùng, kết luận được đưa ra ở Mục 5.

2. MÔ HÌNH HỆ THỐNG MÃ KHỐI LIÊN KẾT

Cho các mã khối tuyến tính $C_1(n_1,k_1,d_1)$ và $C_2(n_2,k_2,d_2)$ và bộ hoán vị π. Trường hợp đơn giản nhất của liên kết mã khối là mã tích (Product Codes), khi bộ hoán vị π là hoán vị khối, theo cách "Ghi vào theo hàng – Đọc ra theo cột." Đầu tiên k_2 các khối k_1 bít tin được mã hóa bởi G_1 thành k_2 từ mã n_1 bít được xếp thành k_2 hàng. Tiếp theo, mỗi cột gồm k_2 bít được mã hóa bởi G_2 thành các từ mã n_2 bít. Tổng thể chúng ta có k_1k_2 bít tin được mã hóa kiểu "hàng-cột" như trên thành n_1n_2 bít mã. Lúc này, ta được hệ thống mã khối liên kết nối tiếp. Cấu trúc và sơ đồ khối của mã liên kết nối tiếp này được thể hiện trong hình 1 và hình 2.

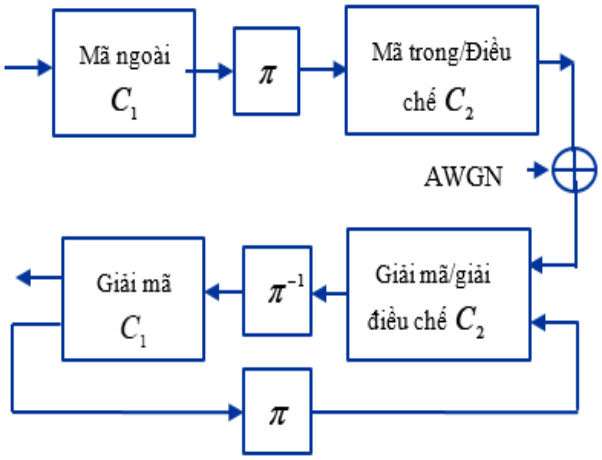


Hình 1. Cấu trúc mã khối liên kết nối tiếp



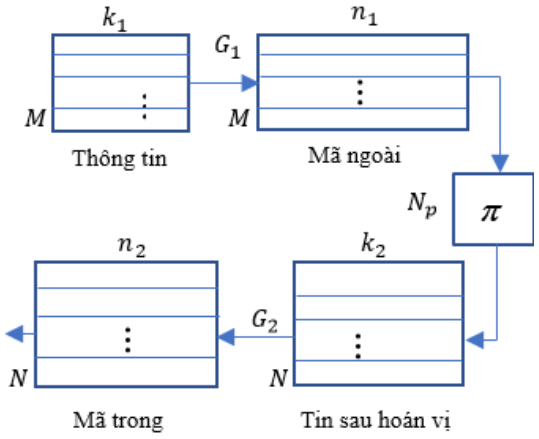
Hình 2. Sơ đồ khối mã khối liên kết nối tiếp

Như đã trình bày trong Mục I, liên kết mã có hai cấu trúc là liên kết nối tiếp và liên kết song song. Phạm vi nghiên cứu của bài báo này chỉ đề cập đến cấu trúc nối tiếp của các mã khối [9]. Không mất tính tổng quát, giả sử mã trong C_2 có $G_2 = I_{k_2}$, mã C_2 được kết hợp với điều chế pha nhị phân (BPSK), sử dụng bộ hoán vị khối, cho mô hình tổng thể hệ thống truyền dẫn số sử dụng NCBC tương tự như một hệ thống BIBCM-ID [7], thể hiện trên Hình 3.



Hình 3. Sơ đồ khối hệ thống sử dụng mã NCBC

+) Mã hóa mã NCBC



Hình 4. Mô hình mã hóa mã đề xuất (NCBC)

Xét hai mã khối nhị phân tuyến tính $C_1(n_1,k_1,d_1)$ và $C_2(n_2,k_2,d_2)$ trong sơ đồ liên kết nối tiếp. Với một số tự nhiên M, chuỗi Mk_1 bít được chia thành M khối, mỗi khối gồm k_1 bít. Từng khối k_1 bít được mã hóa bởi ma trận sinh G_1 của C_1, thành từ mã gồm n_1 bít. Chuỗi Mn_1 bít được hoán vị bởi bộ hoán vị π chiều dài N_p, sau đó được chia thành N khối, mỗi khối gồm k_2 bít. Đặt điều kiện là $N_p = Mn_1 = Nk_2$. Từng khối k_2 bít trên đầu ra hoán vị được mã hóa bởi ma trận sinh G_2 của mã C_2 thành từ mã gồm n_2 bít. Từng khung $N=N_p/n_2$ tín hiệu *BPSK* được truyền đi qua kênh Gauss. Mô hình mã hóa mã NCBC được thể hiện trên hình 4.

Việc giải mã đối với mã khối liên kết nối tiếp được thực hiện theo sơ đồ giải mã lặp trên cơ sở hai bộ giải mã đầu vào mềm - đầu ra mềm (SISO - Soft Input Soft Output) trao đổi thông tin ngoại lai (Extrinsic Information) thông qua giải hoán vị (π^{-1}) và hoán vị (π).

3. BỘ HOÁN VỊ

Hoán vị là một quá trình sắp xếp lại thứ tự bít tương ứng một – một của chuỗi dữ liệu. Quá trình ngược lại được gọi là giải hoán vị để khôi phục chuỗi dữ liệu về thứ tự ban đầu.

Hoán vị là một kỹ thuật thực tế nhằm tăng khả

năng sửa lỗi, được sử dụng rộng rãi cùng mã sửa lỗi cho các kênh có đặc điểm lỗi chùm. Một biện pháp hữu ích để đối phó với các lỗi chùm là chèn bộ hoán vị giữa bộ mã kênh và kênh. Dữ liệu sau khi mã hóa được đổi trật tự bởi bộ hoán vị và được truyền qua kênh. Tại máy thu, bộ giải hoán vị thực hiện động tác ngược lại nhằm khôi phục dữ liệu về trật tự ban đầu của nó. Do có hoán vị và giải hoán vị mà các lỗi chùm được trải ra về mặt thời gian sao cho các lỗi trong một từ mã xuất hiện một cách độc lập. Vì vậy, kênh có lỗi chùm được chuyển thành kênh có lỗi ngẫu nhiên tại đầu vào của bộ giải mã và mã được thiết kế cho các kênh có lỗi độc lập có thể dùng cho các kênh có lỗi chùm.

Chủng loại và chiều dài của bộ hoán vị bít ảnh hưởng đến độ trễ giải mã và độ phức tạp của hệ thống. Trong nghiên cứu, thường sử dụng bộ hoán vị ngẫu nhiên. Tuy nhiên, trong thực tế, cần sử dụng các bộ hoán vị theo quy luật toán học để đảm bảo đồng bộ trong hệ thống và đơn giản hóa thiết bị. Bộ hoán vị đơn giản nhất là hoán vị khối (Block Interleaving). Trong phương pháp này, các từ mã của mã khối được hoán vị theo dòng bằng cách ghi vào theo hàng, đọc ra theo cột, rồi ánh xạ vào tập tín hiệu.

Một ví dụ về hoán vị khối được chỉ ra như sau:

Ví dụ 1: Đầu vào bộ hoán vị khối là dãy bít có số thứ tự 0,1,2,…23.

Bộ hoán vị khối có chiều dài N_p = 24, n=6, m=4;

$\pi = [0,7,14,20,1,6,15,19,2,11,16,18,3,10,17,23,4,9,12,22,5,8,13,21]$

Khi đó đầu ra bộ hoán vị là dãy bít có số thứ tự:

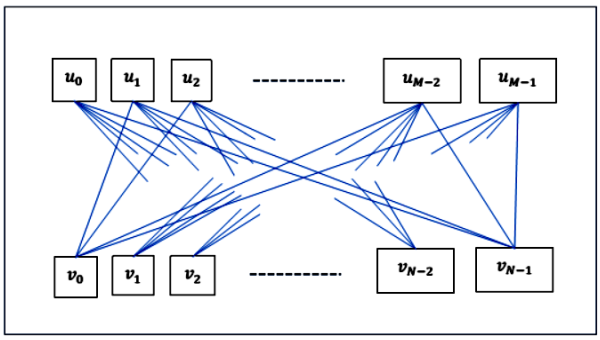
[0,4,8,12,16,20,5,1,21,17,13,9,18,22,2,6,10,14,11,7,3,23,19,15],

và được biểu diễn dưới dạng ma trận (hình 5):

0	5	18	11
4	1	22	7
8	21	2	3
12	17	6	23
16	13	10	19
20	9	14	15

Hình 5. Biểu diễn khối tin có số thứ tự bít tin sau hoán vị khối

Trong hệ thống sử dụng mã NCBC, mối quan hệ giữa các số thứ tự của các bít sau khi được mã hóa (bởi ma trận sinh G_1 của C_1) và số thứ tự của các bít sau bộ hoán vị khối, được thể hiện trên Đồ hình hai bên (hay Đồ hình hai cạnh - Bipartite Graph) [1], như hình 6.



Hình 6. Đồ hình hai bên biểu thị quan hệ giữa các nút mã và nút tín hiệu sau hoán vị khối

Gọi các nút bên trên là nút mã, ký hiệu là u_i, $0 \le i \le M-1$, là tập con các số thứ tự của các bít cùng một từ mã trong khung dữ liệu dài N_p bít. Gọi các nút bên dưới là nút tín hiệu, ký hiệu là v_j, $0 \le j \le N-1$, là tập con các số thứ tự của các bít trong khung dữ liệu dài N_p bít, sau hoán vị trở thành nhãn nhị phân của cùng một tín hiệu. Mỗi nút đều có đường tự nối kín, thể hiện quá trình giải điều chế (đối với tín hiệu) và giải mã (đối với từ mã). Khi đó, $N_p=Mn_1=Nk_2$.

Chúng ta có thuật toán tìm bộ hoán vị khối cho NCBC như sau:

Thuật toán tạo Bộ hoán vị khối cho NCBC

1. Xác định N_p,n_1,k_2 *sao cho* $n_1k_2 \; n_1k_2 \vdots N_p$

2. Đặt $M=N_p/n_1$, $N=N_p/k_2$.

3. Với $0 \le k \le n_1-1$, tạo π_k là hoán vị trên tập số tự nhiên $\{0,1,\cdots,M-1\}$

4. Với $0 \le i \le M-1$, tính
$\pi(in_1+k)=\pi_k(i)+kM$

Bộ hoán vị khối tốt khi mỗi bít mã có nhiều liên kết với các ký hiệu trong đồ hình hai bên và ngược lại. Trong thiết kế đơn giản nhất, các từ mã được sắp xếp thành hàng và đọc ra theo cột, đảm bảo mỗi nhãn nhị phân chứa không quá 1 bít của cùng một từ mã. Tuy nhiên, nếu hai nhãn nhị phân chứa 1 bít của hai từ mã khác nhau, có thể xuất hiện "Vòng lỗi 4 bước" hoặc "Mẫu lỗi hình chữ nhật". Tương tự, nếu ba từ mã giao nhau theo cách mỗi từ mã đóng góp hai bít vào nhãn nhị phân của ba tín hiệu, sẽ xuất hiện "Vòng lỗi 6 bước".

Việc giảm thiểu số lượng các vòng lỗi này là một hướng cần nghiên cứu trong tương lai nhằm nâng cao chất lượng mã NCBC.

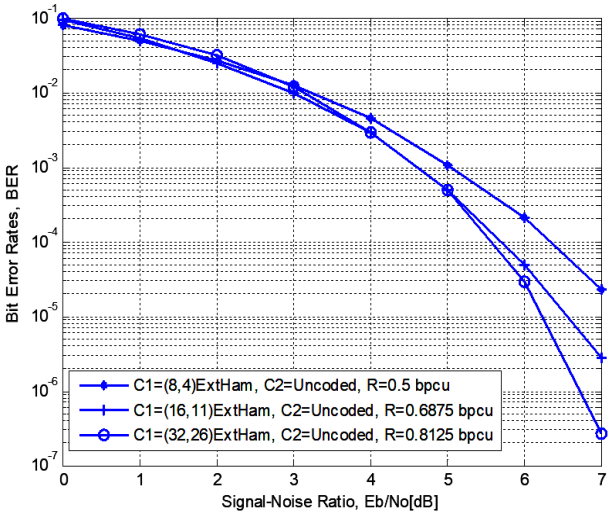
4. PHÂN TÍCH CHẤT LƯỢNG HỆ THỐNG TRUYỀN DẪN SỐ SỬ DỤNG NCBC

Xét kênh điều chế dịch pha nhị phân (BPSK - Binary Phase Shift Keying), một loại điều chế đối xứng nhị phân, và giả thiết kênh đối xứng nhị phân (Binary Symmetric Channel). Xem xét tổ hợp của bộ Mã hóa trong với bộ Điều chế BPSK dưới tác động của Tạp âm trắng Gao-xơ cộng tính (AWGN - Additive White Gassian Noise) như là một bộ điều chế dùng để ánh xạ từng tổ hợp k_2 bít vào vectơ gồm n_2 tín hiệu BPSK.

Để đánh giá, sử dụng kỹ thuật mô phỏng MonteCarlo, chúng tôi tiến hành mô phỏng cho các trường hợp mã trong và mã ngoài khác nhau của NCBC.

Đặt $R=R_1R_2$ là tỷ lệ mã hóa của NCBC, với R_1 là tỉ lệ mã ngoài C_1 và R_2 là tỉ lệ mã trong C_2.

Do sử dụng điều chế BPSK nên R cũng chính là số bít truyền đi trong mỗi lần sử dụng kênh bpcu (Bit Per Channel Use). Sử dụng bộ hoán vị khối chiều dài N_p, với các tham số thiết kế là $n = n_1$ (chiều dài từ mã ngoài C_1) và $m = k_2$ (chiều dài khối bít tin đầu vào mã trong C_2). Số lần giải mã lặp bằng 10. Với mã ngoài C_1, lựa chọn là các mã Hamming mở rộng (ExtH), tiến hành mô phỏng với 2 trường hợp của mã trong:



Hình 7. Kết quả mô phỏng chất lượng hệ thống BIBCM-ID với các mã Hamming mở rộng

1) Không mã hóa, C_2 = uncoded, $G_2=I_{k2}$, đây chính là mô hình hệ thống BIBCM-ID, kết quả trong hình 7.

2) Là các mã kiểm tra chẵn lẻ bít đơn SPC (Single Parity-Check Bit), $G_2=[I_{k2}|1]$, kết quả trong hình 8.

Với cấu trúc đơn giản và tỉ lệ mã cao nên các mã SPC được lựa chọn làm mã trong cho NCBC. Khi liên kết với mã Hamming mở rộng sẽ cho tỉ lệ mã của hệ thống liên kết cao, tỉ lệ NCBC thể hiện trong bảng 1.

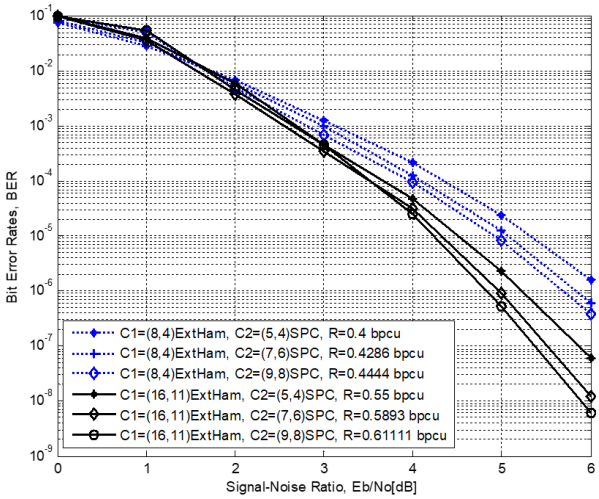
Bảng 1. Tỉ lệ mã NCBC và các mã thành phần

Mã ngoài $C_1(n_1,k_1,d_1)$	Mã trong $C_2(n_2,k_2,d_2)$	R_1	R_2	R
(8,4,4) ExtH	Không mã	0,5	1	0,5

Mã ngoài $C_1(n_1,k_1,d_1)$	Mã trong $C_2(n_2,k_2,d_2)$	R_1	R_2	R
(16,11,4)ExtH	Không mã	0,6875	1	0,6875
(32,26,4)ExtH	Không mã	0.8125	1	0.8125
(8,4,4) ExtH	(5,4)SPC	0,5	0,8	0,4
(8,4,4) ExtH	(7,6)SPC	0,5	0,8571	0,4286
(8,4,4) ExtH	(9,8)SPC	0,5	0,8889	0,4444
(16,11,4)ExtH	(5,4)SPC	0,6875	0,8	0,55
(16,11,4)ExtH	(7,6)SPC	0,6875	0,8571	0,5893
(16,11,4)ExtH	(9,8)SPC	0,6875	0,8889	0,6111

Từ kết quả mô phỏng trên hình 7, hình 8, cho thấy, chất lượng NCBC (có mã hóa mã trong) cho tăng ích từ 2 dB so với hệ thống BIBCM-ID truyền thống tại tỉ lệ lỗi bít 10^{-5} [7]. Sự trả giá cho độ lợi về công suất này là tỉ lệ mã giảm. Tuy nhiên, khi chiều dài các mã trong càng tăng, tỉ lệ NCBC càng tiệm cận với tỉ lệ mã của BIBCM-ID và độ lợi công suất càng cao. Như vậy việc lựa chọn mã trong có ảnh hưởng rất lớn đến chất lượng của các mã có cấu trúc liên kết mã khối nối tiếp.

Mặt khác, kết quả mô phỏng trên hình 8 cho thấy, mã liên kết đề xuất, với hai mã thành phần có chiều dài ngắn là mã Hamming mở rộng (16,11,4) và mã SPC (9,8) đã cho chất lượng kiểm soát lỗi cao. Chỉ cần tỉ lệ công suất tín hiệu trên tạp âm (SNR) 6 dB đã đạt được tỉ lệ lỗi bít 6.10^{-9}.



Hình 8. Kết quả mô phỏng chất lượng các NCBC

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã đề xuất một mô hình mã hóa mã kênh mới NCBC, là mô hình liên kết nối tiếp hai mã khối với mã ngoài là các mã Hamming mở rộng và mã trong là các mã chẵn lẻ, liên kết qua bộ hoán vị khối. Với các mã liên kết thành phần là các mã khối ngắn, đơn giản, nhưng mã kênh mới NCBC đã cho thấy hiệu quả kiểm soát lỗi cao, đạt tăng ích từ 2 dB tại tỉ lệ lỗi bít 10^{-5} so với mô hình BIBCM-ID. Kết quả này mở ra hướng nghiên cứu tiếp theo về việc xây dựng, tìm kiếm các mã thành phần phù hợp cho mô hình liên kết nối tiếp các mã khối ngắn, đáp ứng truyền tin cho các hệ thống truyền tin cơ động, yêu cầu kiểm soát lỗi tốt, xử lý thông tin nhanh.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Nguyễn Thị Thắng, Phạm Xuân Nghĩa, “Hệ thống điều chế mã có hoán vị bít sử dụng mã khối với giải mã lặp”, Tạp chí Khoa học công nghệ Thông tin và truyền thông, Số 01 (CS01) 2023, trang 106-116, (2023).

[2] G.D. Forney, Jr., “Concatenated Codes”, pp. 1-25, 51-75, Cambridge, MA: MIT Press, Technical report 440, 1965.

[3] M. Mensouri and M. Eddahibi, “New structure of channel coding: serial concatenation of polar codes”, International Journal of Wireless & Mobile Networks (I)WMN, Vol. 5, No.5, (2023).

[4] Sina Vafi, “Parallel concatenated block codes constructed by convolutional interleavers” IEEE Access, vol. 9, pp. 41218-41226, (2021).

[5] Massey J. L., “Coding and modulation in digital communications”, in Proc. of international Zurich Seminal on digital communications, Zurich -Switzerland, 1974, pp. 1-4.

[6] X. Li, A. Chindapol, and J. A. Ritcey, “Bit-interleaved coded modulation with iterative decoding and 8 PSK signaling,” IEEE Transactions on Communications, vol. 50, no. 8, pp. 1250–1257, (2002).

[7] Nguyen Thi Thang, Pham Xuan Nghia, Lai Tien De, “Design of interleaver for BIBCM-ID system”, The 12th International Conference on Control, Automation and Informatin Scienes (ICCAIS 2023), Hanoi City-Vietnam, 2023, pp. 578- 583,

[8] P. Elias, “Error-free coding,” IRE Trans. Inform Theory, vol. IT-4, pp. 29–37, (1954).

[9] S. Benedetto, D. Divsalar, G. Montorsi, and F. Pollara, “Serial Concatenation of Interleaved Codes: Performance Analysis, Design, and Iterative Decoding,” IEEE Transactions on Information Theory, vol. 44, no. 3, pp. 909–926, Sep., (1998).

Thông tin liên hệ: **Nguyễn Thị Hồng Nhung**

Điện thoại: 0945 616 629 - Email: nthnhung@uneti.edu.vn

Khoa Điện tử và Kỹ thuật máy tính, Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp.