

# GIẢI PHÁP MÃ KÊNH HIỆU QUẢ CHO CÁC MẠNG CẢM BIẾN KHÔNG DÂY

EFFICIENT CHANNEL CODING SOLUTIONS FOR WIRELESS SENSOR NETWORKS

Nguyễn Thị Hồng Nhung<sup>1,\*</sup>

DOI: <http://doi.org/10.57001/huih5804.2024.263>

## TÓM TẮT

Bài báo nghiên cứu việc sử dụng mã Hamming liên kết (CHC) trong mạng cảm biến không dây (WSNs), tập trung vào khả năng sửa lỗi và tối ưu hóa năng lượng. CHC, bao gồm các cấu trúc nối tiếp và song song, cho thấy khả năng cải thiện độ tin cậy truyền dẫn và tiết kiệm năng lượng đáng kể so với sử dụng mã Hamming đơn lẻ, đạt BER =  $10^{-6}$  chỉ cần tỷ lệ Eb/No = 4,6dB. Kết quả mô phỏng chứng minh rằng cấu trúc liên kết song song của CHC hiệu quả hơn trong việc phát hiện và sửa lỗi, đồng thời giảm thiểu tiêu thụ năng lượng, phù hợp cho các ứng dụng WSN yêu cầu độ tin cậy cao và hạn chế năng lượng.

**Từ khóa:** WSNs, mã Hamming, CHC, ECC, mã liên kết.

## ABSTRACT

The paper investigates the use of Concatenated Hamming Codes (CHC) in Wireless Sensor Networks (WSNs), focusing on error correction capabilities and energy optimization. CHC, including both serial and parallel structures, demonstrates a significant improvement in transmission reliability and energy savings compared to using standalone Hamming codes, achieving a BER of  $10^{-6}$  with an Eb/No ratio of only 4.6dB. Simulation results show that the parallel concatenation structure of CHC is more effective in error detection and correction, while also minimizing energy consumption, making it suitable for WSN applications that require high reliability and low energy usage.

**Keywords:** WSNs, Hamming codes, CHC, ECC, concatenated codes.

<sup>1</sup>Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp

\*Email: [nthnhung@uneti.edu.vn](mailto:nthnhung@uneti.edu.vn)

Ngày nhận bài: 15/5/2024

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 28/6/2024

Ngày chấp nhận đăng: 27/8/2024

## 1. GIỚI THIỆU

Trong các mạng cảm biến không dây (WSNs: Wireless Sensor Networks), việc đảm bảo truyền tin chính xác và

hiệu quả năng lượng là một thách thức quan trọng, đặc biệt khi phải đối mặt với các yêu cầu về truyền tin thời gian thực. Các nút cảm biến nhỏ gọn, sử dụng nguồn năng lượng hạn chế, thực hiện việc thu thập, xử lý dữ liệu và truyền tải dữ liệu trực tiếp tới trạm trung tâm hoặc thông qua các nút cảm biến trung gian cho đến khi dữ liệu đến được trạm đích. Khả năng truyền thông tin chính xác, tin cậy trong các mạng cảm biến không dây bị ảnh hưởng đáng kể bởi các yếu tố như nhiễu, mất gói tin, và hạn chế về năng lượng [1].

Tìm kiếm các mã kênh phù hợp để kiểm soát lỗi trong WSNs là cần thiết để cải thiện hiệu suất truyền tin, đặc biệt trong các ứng dụng yêu cầu thời gian thực. Rất nhiều nghiên cứu đã tập trung vào việc áp dụng mã LDPC (Low-Density Parity-Check) và mã Turbo nhờ vào khả năng phát hiện và sửa lỗi mạnh, giúp cải thiện độ tin cậy trong các mạng cảm biến vô tuyến [2].

Mã LDPC, với cấu trúc ma trận thưa, cho phép thực hiện các thuật toán giải mã hiệu quả, giúp giảm thiểu yêu cầu về bộ nhớ và tài nguyên tính toán, đồng thời vẫn duy trì hiệu suất sửa lỗi cao. Tuy nhiên, quá trình mã hóa và giải mã LDPC vẫn tiêu thụ nhiều năng lượng do tính phức tạp của kỹ thuật mã hóa và thuật toán giải mã lặp cho các mã có chiều dài lớn. Điều này có thể không phù hợp với các nút cảm biến có nguồn năng lượng hạn chế.

Mã Turbo với cấu trúc mã hóa và giải mã phức tạp hơn, mang lại khả năng sửa lỗi vượt trội và đặc biệt hữu ích trong các ứng dụng yêu cầu độ tin cậy cao. Tuy nhiên, giải mã Turbo cũng tiêu thụ năng lượng cao và yêu cầu nhiều tài nguyên tính toán, đồng thời gây ra độ trễ lớn do tỉ lệ mã hóa thấp, điều này làm cho mã Turbo ít phù hợp hơn trong các mạng cảm biến có giới hạn về năng lượng và thời gian.

Do đó, mặc dù mã LDPC và mã Turbo cung cấp hiệu suất sửa lỗi ấn tượng, việc áp dụng chúng trong mạng cảm biến vô tuyến gặp phải nhiều hạn chế như tiêu thụ năng lượng cao, độ trễ lớn, yêu cầu bộ nhớ và tài nguyên tính toán cao, cùng với sự phức tạp trong triển khai và duy trì độ tin cậy trong môi trường nhiễu lớn.

Trong khi đó, các mã BCH (Bose-Chaudhuri-Hocquenghem) và RS (Reed-Solomon) thường được sử dụng trong các ứng dụng đa chặng (multi-hop) của WSNs. Mã BCH được biết đến với khả năng sửa lỗi mạnh mẽ, còn mã RS nổi bật nhờ tính linh hoạt trong việc xử lý các lỗi tập trung và phân tán. Tuy nhiên, cả hai loại mã này đều có nhược điểm về tiêu thụ năng lượng, đặc biệt là trong các mạng có mật độ cao và yêu cầu thời gian thực [2, 3].

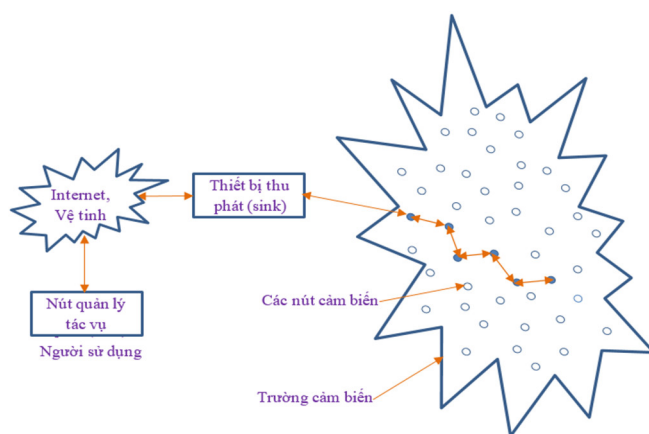
Như vậy, cần lựa chọn các giải pháp mã hóa kênh đơn giản hơn nhưng vẫn đảm bảo khả năng sửa lỗi để đáp ứng yêu cầu của các mạng cảm biến không dây.

Mã Hamming với cấu trúc đơn giản, chiều dài từ mã ngắn, tiết kiệm năng lượng, rất phù hợp cho các nút cảm biến với nguồn năng lượng hạn chế [4]. Nhưng, do khả năng sửa lỗi và hiệu suất kém hơn so với các họ mã phức tạp khác như mã LDPC, Turbo, BCH hay RS,... nên mã Hamming ít được ứng dụng trong các WSNs [2, 5]. Bài báo này đề xuất sử dụng mã Hamming với cấu trúc liên kết [6], khai thác kỹ thuật giải mã đối ngẫu trong [7, 8], nhằm đạt được sự cân bằng giữa hiệu suất, độ tin cậy và tiêu thụ năng lượng, đáp ứng tốt hơn các yêu cầu của mạng cảm biến không dây. Phần tiếp theo sẽ được bố cục như sau: Mục 2, trình bày tóm tắt về WSNs và thách thức cần giải quyết. Mục 3, giới thiệu về cấu trúc liên kết cho mã Hamming, tại đây cũng giới thiệu phương pháp mã hóa và giải mã cho mã liên kết mới này. Mục 4, đánh giá chất lượng mã liên kết đề xuất. Cuối cùng, kết luận được đưa ra ở Mục 5.

## 2. MẠNG CẢM BIẾN VÔ TUYẾN

Mạng cảm biến không dây gồm các thiết bị cảm biến kết nối không dây (sóng radio, hồng ngoại hoặc quang học) để thu thập dữ liệu phân tán trên diện rộng trong bất kỳ điều kiện môi trường và ở bất kỳ vùng địa lý nào [9]. Chúng liên kết với nút quản lý qua điểm thu phát (Sink) và mạng công cộng như Internet hay vệ tinh (hình 1). Từ năm 2001, WSNs đã thu hút sự quan tâm đáng kể trong công nghiệp và được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực như sản xuất, giao thông, thiết bị di động, kiểm soát khí thải công nghiệp, và giám sát môi trường,... WSNs bao gồm các nút cảm biến nhỏ gọn, giá rẻ, tiêu thụ ít năng lượng, tích hợp bộ xử lý, bộ phát sóng vô tuyến và

cảm biến trên một chip duy nhất (System on Chip - SoC). Các nút cảm biến trong WSNs liên kết với nhau để cảm nhận và kiểm soát môi trường, cho phép tương tác giữa người dùng và môi trường xung quanh. WSNs nổi bật với khả năng tự tổ chức, thích ứng và giao tiếp hiệu quả về năng lượng, giải quyết các thách thức về xử lý tín hiệu, quản lý dữ liệu và các giao thức truyền thông trong các hệ thống đa lớp. Việc tích hợp các ứng dụng WSNs vào cơ sở hạ tầng hiện có không chỉ hỗ trợ phát triển các ứng dụng mới mà còn đáp ứng các xu hướng công nghệ và thị trường trong tương lai.



Hình 1. Mạng cảm biến vô tuyến

Nút cảm biến là thành phần cốt lõi trong mạng cảm biến không dây, do đó, việc thiết kế các nút cảm biến nhỏ gọn và tiết kiệm năng lượng là yếu tố quan trọng hàng đầu.

WSN dễ bị ảnh hưởng bởi các vấn đề như mất điện, lỗi hệ thống và tấn công mạng. Năng lượng của các nút cảm biến liên tục cạn kiệt trong quá trình hoạt động và tốc độ suy giảm năng lượng này phụ thuộc vào nhiều yếu tố, không đồng đều ở mỗi nút. Khi công suất của các nút cảm biến giảm xuống dưới một ngưỡng nhất định, các nút có thể hoạt động không chính xác hoặc không thể truyền thông tin đúng đến các nút kế tiếp. Ngoài ra, một số nút có thể chết sớm và ngừng hoạt động trong vòng đời mạng. Việc sửa chữa và bảo trì các nút cảm biến sau khi triển khai thường không khả thi. Các cảm biến bị lỗi thường cung cấp kết quả đọc sai. Để đảm bảo WSN duy trì kết nối và hoạt động ngay cả khi một số nút bị lỗi hoặc ngừng hoạt động, mạng cần có cơ chế kiểm soát lỗi để đảm bảo hoạt động tin cậy và liên tục. Kiểm soát lỗi trong mạng truyền thông có thể sử dụng hai phương thức: yêu cầu lặp lại tự động (Automatic Repeat request: ARQ) và sửa lỗi hướng tới (Forward Error Correction: FEC).

Mặc dù cơ chế ARQ giúp đảm bảo tính toàn vẹn của dữ liệu thông qua việc yêu cầu truyền lại các gói tin bị lỗi, nhưng nó cũng có thể gây ra tác động tiêu cực đến hiệu

suất truyền tải, bao gồm việc tiêu tốn thời gian chờ và băng thông sử dụng, đặc biệt là trong môi trường mạng có độ trễ cao hoặc đường truyền không ổn định.

Kỹ thuật sửa lỗi hướng tới đóng vai trò then chốt trong việc đảm bảo truyền tải dữ liệu chính xác và đáng tin cậy, cho phép phát hiện và sửa chữa lỗi tại chỗ mà không cần yêu cầu truyền lại dữ liệu. FEC đạt được điều này bằng cách sử dụng mã kiểm soát lỗi (Error Correction Codes: ECC), bổ sung các bit kiểm tra (bit dư) vào dữ liệu gốc trước khi truyền. Khi nhận được dữ liệu, đầu thu sử dụng các bit kiểm tra này để phát hiện và sửa lỗi phát sinh trong quá trình truyền tải. Hiệu quả của FEC được thể hiện rõ rệt nhất trong các hệ thống truyền thông có yêu cầu cao về độ tin cậy và băng thông, nơi mà việc truyền lại dữ liệu có thể dẫn đến tình trạng tắc nghẽn mạng và lãng phí tài nguyên.

Trong WSN, các nút cảm biến tiêu thụ năng lượng chủ yếu ở ba hoạt động: cảm biến, giao tiếp và xử lý, trong đó giao tiếp dữ liệu tiêu thụ nhiều năng lượng nhất. Như vậy, áp dụng ECC là giải pháp hiệu quả hơn so với sử dụng ARQ, do số lần truyền lại cần thiết trong ARQ thường rất cao.

*Các mã kiểm soát lỗi này cần đáp ứng các tiêu chí:*

- Chiều dài gói tin ngắn, mã hóa và giải mã đơn giản, khả năng sửa lỗi tốt, nhằm tích hợp dễ dàng vào các thiết bị cảm biến nhỏ gọn với nguồn năng lượng hạn chế.

- Tỷ lệ mã hóa cao và khả năng kiểm soát lỗi hiệu quả là yếu tố then chốt để đảm bảo truyền tin nhanh, chính xác và giảm thiểu tái truyền dữ liệu, từ đó tiết kiệm năng lượng và nâng cao hiệu suất mạng.

- Thuật toán mã hóa và giải mã phải đơn giản để giảm thiểu khối lượng tính toán và tiêu thụ năng lượng.

Đáp ứng những tiêu chí này sẽ cải thiện đáng kể độ tin cậy và hiệu quả của WSNs, đặc biệt trong các ứng dụng yêu cầu thời gian thực, mở ra khả năng ứng dụng rộng rãi hơn trong các lĩnh vực như giám sát môi trường, y tế, công nghiệp và quân sự. Tuy nhiên, hiện nay, chưa có ECC nào đáp ứng được tất cả các tiêu chí trên. Do đó, nghiên cứu, phát triển, cải tiến và tìm kiếm các mã kiểm soát lỗi với ý tưởng mới là cần thiết để vượt qua các thách thức hiện tại và thúc đẩy sự phát triển của WSNs trong tương lai.

Phần tiếp theo của bài báo sẽ trình bày ý tưởng sử dụng các ECC đơn giản, với cấu trúc liên kết, mang lại ưu điểm về độ đơn giản và có thể đạt hiệu quả cao cho mạng cảm biến không dây.

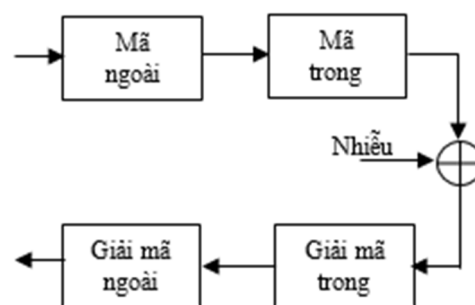
### 3. ĐỀ XUẤT CẤU TRÚC LIÊN KẾT MÃ ÁP DỤNG CHO WSNs

#### 3.1. Liên kết mã

Mã liên kết (Concatenated Codes) là một phương pháp mã hóa được phát triển để cải thiện hiệu suất của

các hệ thống mã hóa và giải mã thông tin. Phương pháp này được giới thiệu và phân tích chi tiết bởi G. David Forney, Jr. trong cuốn sách "Concatenated Codes" xuất bản bởi MIT Press vào năm 1966 [7].

Mã liên kết là sự kết hợp của hai hoặc nhiều mã đơn giản để tạo thành một hệ thống mã hóa phức tạp hơn nhưng lại dễ quản lý và hiệu quả. Mã liên kết bao gồm hai lớp mã hóa chính: mã ngoài (outer code) và mã trong (inner code). Một trong những lợi ích lớn nhất của mã liên kết là khả năng đạt được hiệu suất gần với giới hạn lý thuyết Shannon với độ phức tạp tính toán hợp lý. Điều này có nghĩa là mã liên kết có thể cung cấp sự cân bằng tốt giữa hiệu suất sửa lỗi và tài nguyên tính toán cần thiết cho quá trình mã hóa và giải mã. Kỹ thuật liên kết mã dựa trên hai cấu trúc chính: liên kết nối tiếp và liên kết song song. Một số cấu trúc liên kết mã phổ biến hiện nay sử dụng bộ hoán vị như: Liên kết mã Reed-Solomon và mã chập, liên kết LDPC và mã chập, liên kết hai mã chập, liên kết các mã Polar... [10, 11]. Các cấu trúc này đều rất phức tạp, không phù hợp cho WSNs. Từ ý tưởng khai thác lợi thế của các mã liên kết, nhưng vẫn phải đảm bảo sự đơn giản, cấu trúc liên kết các mã khối là các mã Hamming sẽ được trình bày tiếp theo.



Hình 2. Mã liên kết

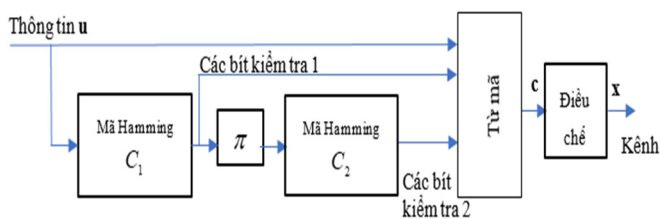
Mã Hamming, được giới thiệu lần đầu bởi Richard Hamming tại [4], là một loại mã kiểm soát lỗi thuộc họ mã khối, với khoảng cách Hamming tối thiểu là 3, cho phép sửa lỗi gây ra bởi một bit sai và cũng có khả năng phát hiện các lỗi kép. Phương pháp này đơn giản trong việc mã hóa và giải mã. Mặc dù số bit kiểm tra tăng cùng với số bit dữ liệu, tốc độ tăng của số bit dữ liệu nhanh hơn nhiều so với số bit kiểm tra, do đó, khi số bit dữ liệu lớn, hiệu suất mã hóa cũng tăng lên. Hiện nay, mã Hamming vẫn được sử dụng rộng rãi trong các hệ thống truyền thông số. Tuy nhiên, do khả năng sửa lỗi hạn chế, mã Hamming không thích hợp cho các ứng dụng yêu cầu độ tin cậy dữ liệu rất cao trong WSNs. Vì khi lỗi nhiều hơn một bit xuất hiện trong một từ mã, mã Hamming không thể sửa hết tất cả các lỗi này, dẫn đến việc cần thiết phải sử dụng các

phương pháp xử lý lỗi phức tạp hơn hoặc phải truyền lại dữ liệu, điều này làm tăng chi phí xử lý và tiêu thụ năng lượng. Đây là lý do các nghiên cứu gần đây ít đề cập và đề xuất mã Hamming trong các ứng dụng truyền tin hiện đại như WSNs [2]. Nội dung tiếp theo sẽ đưa ra giải pháp nâng cao khả năng kiểm soát lỗi cho mã Hamming bằng cách liên kết các mã.

### 3.2. Mã Hamming liên kết (Concatenated Hamming Codes: CHC)

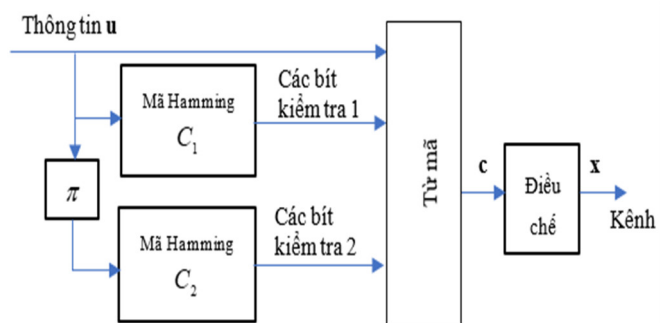
Xét các mã Hamming tuyến tính  $C_1(n_1, k_1, d_1)$  và  $C_2(n_2, k_2, d_2)$ , bộ hoán vị  $\pi$ . Thông tin đầu vào  $\mathbf{u}$  gồm  $Xk_1$  bit tin, đưa vào bộ mã hóa, được chia thành  $X$  khối, với  $X$  là một số tự nhiên, mỗi khối gồm  $k_1$  bit.

1) Trường hợp cấu trúc liên kết nối tiếp: Từng khối  $k_1$  bit được mã hóa bởi ma trận sinh  $G_1$  của  $C_1$ , thành từ mã  $n_1$  bit. Chuỗi  $Xn_1$  bit được hoán vị bởi bộ hoán vị  $\pi$  chiều dài  $N_1$ . Chuỗi bit sau bộ hoán vị được chia thành  $Y$  khối, mỗi khối gồm  $k_2$  bit. Với điều kiện  $N_1 = Xn_1 = Yk_2$ . Từng khối  $k_2$  bit trên đầu ra hoán vị được mã hóa bởi ma trận sinh  $G_2$  của mã  $C_2$  thành từ mã dài  $n_2$  bit. Bộ mã hóa sử dụng mã Hamming liên kết nối tiếp được mô tả trên hình 3.



Hình 3. Mã hóa mã Hamming liên kết nối tiếp

2) Trường hợp cấu trúc liên kết song song: Từng khối  $k_1$  bit được mã hóa bởi ma trận sinh  $G_1$  của  $C_1$ , thành từ mã  $n_1$  bit. Đồng thời,  $X'$  khối  $k_1$  bit được hoán vị bởi bộ hoán vị  $\pi$  chiều dài  $N'_1$ . Chuỗi bit sau bộ hoán vị được chia thành  $Y'$  khối, mỗi khối gồm  $k_2$  bit. Với điều kiện  $N'_1 = Xk_1 = Yk_2$ . Khối  $k_2$  bit trên đầu ra hoán vị được mã hóa bởi ma trận sinh  $G_2$  của mã  $C_2$  thành từ mã gồm  $n_2$  bit. Bộ mã hóa sử dụng mã Hamming liên kết song song được mô tả trên hình 4.



Hình 4. Mã hóa mã Hamming liên kết song song

Để đảm bảo tính đơn giản của mã để xuất, bộ hoán vị được lựa chọn là bộ hoán vị khối hoạt động theo quy tắc: Ghi vào theo hàng và đọc ra theo cột. Với các mã  $C_1, C_2$  có kích thước giống nhau là mã Hamming (7, 4, 3). Ma trận kiểm tra và ma trận sinh là:

$$G_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{và } H_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Khi đó, nếu tin

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

thì từ mã tương ứng khi được mã hóa bởi mã Hamming liên kết được thể hiện trên hình 5.

$$\mathbf{c} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

a) Từ mã Hamming liên kết nối tiếp

$$\mathbf{c} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & x & x & x \\ 1 & 1 & 0 & 1 & x & x & x \\ 0 & 1 & 1 & 1 & x & x & x \end{bmatrix}$$

b) Từ mã Hamming liên kết song song

Hình 5. Từ mã Hamming liên kết

Kí hiệu "x" trong hình vẽ thể hiện không chứa bit tin (khuyết).

Thông tin  $\mathbf{u}$  sau khi được mã hóa thành từ mã  $\mathbf{c}$  có chiều dài  $n$ . Từ mã  $\mathbf{c}$  được điều chế BPSK, giả sử từ mã này được điều chế thành tín hiệu nhị phân  $\pm 1$  theo qui tắc  $\mathbf{x} = 1 - 2\mathbf{c}$ , và được truyền qua kênh rời rạc không nhớ tạp âm Gauss với mật độ phổ công suất  $2\sigma^2$ . Tín hiệu thu được là :

$$\mathbf{y} = \mathbf{x} + \mathbf{w} \tag{1}$$

trong đó,  $\mathbf{w} = (w_1, w_2, \dots, w_n)$  là véc-tơ tạp âm và  $y_m = x_m + w_m, 1 \leq m \leq n$ .

Tại phía thu, sau khi nhận được chuỗi dữ liệu  $\mathbf{y}$ , thực hiện giải điều chế và đưa dữ liệu thu được qua bộ giải mã. Bộ giải mã lựa chọn áp dụng cho các mã CHC là bộ giải mã mềm sử dụng mã đối ngẫu [8], một biến thể được cải

tiến cho đơn giản hơn của phương pháp được trình bày trong [7].

### 3.3. Giải mã CHC

Xét mã CHC được tạo bởi hai mã Hamming  $C_1(n_1, k_1, d_1)$  và  $C_2(n_2, k_2, d_2)$ . Dù là cấu trúc bộ mã hóa CHC dạng nối tiếp hay song song, tại đầu thu đều sử dụng chung một kỹ thuật giải mã. Ký hiệu ma trận tín hiệu thu là  $y = [y_{ij}, 1 \leq i \leq n_1, 1 \leq j \leq n_2]$ . Tính ma trận giá trị tỉ lệ hợp lệ đầu vào giải mã cho từng bit mã,  $\varphi = [\varphi_{ij}, 1 \leq j \leq n_1, 1 \leq i \leq n_2]$ ,  $\varphi_{ij} = \exp(-2y_{ij}/\sigma^2)$  trong CHC nối tiếp. Đối với CHC song song, trong  $\varphi$  chèn thêm các giá trị  $\varphi_{uv} = 1, k_2 + 1 \leq u \leq n_2, k_1 + 1 \leq v \leq n_1$  cho các vị trí bit khuyết không được truyền qua kênh. Cho  $C'_1$  và  $C'_2$  lần lượt là mã đối ngẫu của mã  $C_1$  và  $C_2$ . Để xuất thuật toán giải mã mềm cho mã CHC như sau:

Khi nhận được tin  $y$ , bộ giải mã thực hiện các bước giải mã:

Tính  $\varphi$  của từng bit trong tin nhận được.

Vòng lặp một

**Bước 1:** Giải mã  $C_2$  bằng  $C'_2$ .

- + Cập nhật  $\varphi_i$  tương ứng cho từng bit của  $C_2$ .
- + Thực hiện hoán vị

**Bước 2:** Giải mã  $C_1$  bằng  $C'_1$ .

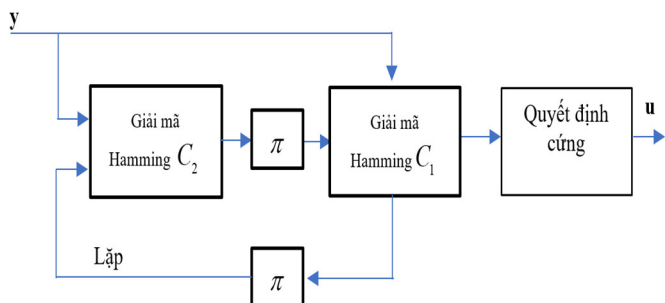
- + Cập nhật  $\varphi_i$  tương ứng cho từng bit của  $C_1$ .
- + Thực hiện hoán vị

Quay trở lại bước 1 thực hiện vòng lặp tiếp theo.

**Bước 3:** Quyết định cứng từ mã đầu ra.

Bộ giải mã quyết định từ mã đầu ra dựa vào giá trị  $\varphi_{ij}$  nhận được của từng bit trong từ mã  $c$  theo quy tắc:  $c_{ij} = 1$  khi  $\varphi_{ij} > 1$ ;  $c_{ij} = 0$  trong trường hợp còn lại.

Sơ đồ bộ giải mã CHC được thể hiện trên hình 6.

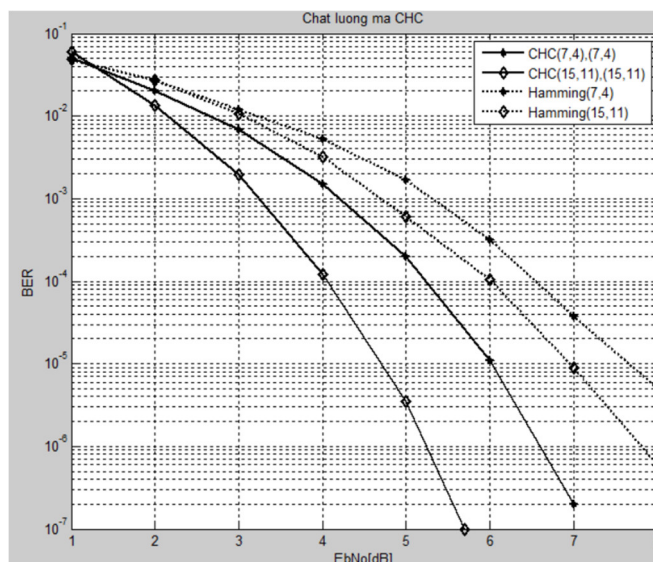


Hình 6. Giải mã CHC

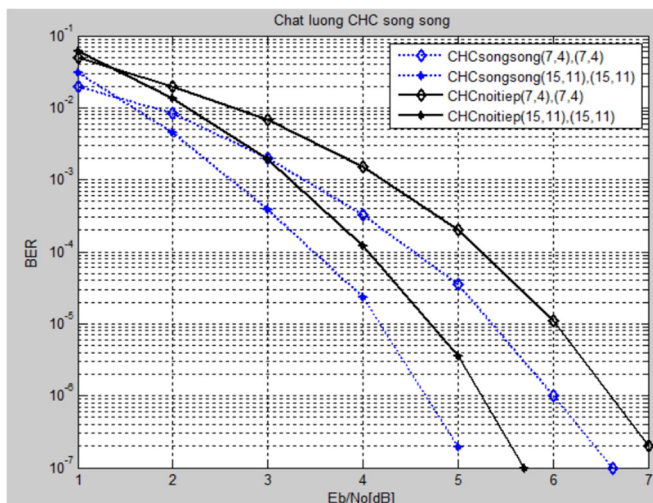
### 4. ĐÁNH GIÁ KHẢ NĂNG KIỂM SOÁT LỖI CỦA MÃ HAMMING LIÊN KẾT

Trong Mục 2, bài báo đã phân tích và đưa ra nhận định: cần tìm kiếm các mã kiểm soát lỗi thúc đẩy sự phát triển

WSNs trong tương lai. Các mã này cần đạt được các tiêu chí: Chiều dài gói tin ngắn, đơn giản, tỉ lệ mã hóa cao, kiểm soát lỗi tốt. Với nhu cầu tìm kiếm, sử dụng các mã ngắn, hai mã Hamming (7,4) và Hamming (15,11) được lựa chọn nghiên cứu, đánh giá cho các cấu trúc liên kết này. Bằng kỹ thuật mô phỏng MonteCarlo, khảo sát chất lượng CHC để xuất trên kênh Gauss. Sử dụng các mã Hamming (7,4), Hamming (15,11), khả năng kiểm soát lỗi của CHC thu được kết quả như trên hình 7, 8.



Hình 7. Chất lượng CHC nối tiếp



Hình 8. Chất lượng CHC song song

Kết quả mô phỏng cho thấy, khi sử dụng mã Hamming sửa lỗi với thuật toán giải mã đối ngẫu cho chất lượng kém hơn rất nhiều so với mã CHC. Việc liên kết các mã Hamming mang lại độ lợi về công suất từ 1,6dB tại tỷ lệ lỗi bit  $10^{-5}$  so với khi không thực hiện liên kết.

Mã CHC có cấu trúc song song đạt độ lợi mã hóa khoảng 0,4dB tại tỷ lệ lỗi bit  $10^{-5}$  so với cấu trúc nối tiếp. Điều này có thể được giải thích như sau: Sơ đồ CHC song

song chỉ mã hóa hàng và mã hóa cột cho khối bit tin, không mã hóa các bit kiểm tra chẵn lẻ nên tỷ lệ mã hóa cao hơn. Khi tính vào tỷ lệ tín hiệu trên tạp âm, điều này sẽ mang lại tăng ích mã hóa tốt hơn, thể hiện qua việc BER của CHC song song thấp hơn trong cùng một điều kiện Eb/No. Tỷ lệ mã hóa của mã Hamming và các mã CHC được xác định theo công thức trong bảng 1.

Bảng 1. Tỷ lệ mã hóa

Mã	Tỷ lệ mã hóa
Hamming $C_1(n_1, k_1, d_1)$	$k_1/n_1$
Hamming $C_2(n_2, k_2, d_2)$	$k_2/n_2$
CHC ( $C_1, C_2$ ) nối tiếp	$k_1 k_2 / n_1 n_2$
CHC ( $C_1, C_2$ ) song song	$k_1 k_2 / [n_1 \cdot n_2 - (n_1 - k_1)(n_2 - k_2)]$

Như vậy, CHC song song cho chất lượng kiểm soát lỗi và tỷ lệ mã hóa tốt hơn so với CHC nối tiếp. Với chiều dài 225 bit và tỷ lệ mã hóa 0,579, mã Hamming liên kết song song đạt tỷ lệ lỗi bit  $10^{-6}$  khi chỉ cần tiêu tốn năng lượng tín hiệu trên tạp âm là 4,6dB. Kết quả này khá ấn tượng và cho thấy khả năng kiểm soát lỗi tốt hơn của mã Hamming so với các công bố gần đây [8, 12]. Do đó, CHC song song có thể là giải pháp hiệu quả cho WSNs, đặc biệt là các hệ thống yêu cầu truyền tin thời gian thực và hạn chế về năng lượng.

**5. KẾT LUẬN**

Bài báo đã đề xuất mã Hamming với cấu trúc liên kết là một giải pháp mã kênh hiệu quả cho mạng cảm biến không dây. Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng, mã CHC song song mang lại hiệu suất mã hóa vượt trội và khả năng kiểm soát lỗi tốt hơn so với cấu trúc nối tiếp. Kết quả nghiên cứu cho thấy mã CHC song song đạt hiệu suất cao hơn với độ lợi mã hóa 0,4dB tại tỷ lệ lỗi bit  $10^{-5}$  so với cấu trúc nối tiếp. Đặc biệt, mã Hamming liên kết song song đạt tỷ lệ lỗi bit  $10^{-6}$  với mức tiêu thụ năng lượng tín hiệu trên tạp âm chỉ 4,6dB và tiết kiệm năng lượng đáng kể do tính đơn giản trong cấu trúc và thuật toán giải mã. Với khả năng giảm tỷ lệ lỗi bit và tiêu thụ ít năng lượng, mã Hamming liên kết đặc biệt phù hợp cho các ứng dụng WSNs yêu cầu thời gian thực với nguồn năng lượng hạn chế, mở ra hướng đi mới cho việc cải thiện hiệu suất và độ tin cậy của WSNs trong tương lai.

[2]. M. Bettayeb, S. Ghunaim, N. Mohamed, Q. Nasir, "Error Correction Codes in Wireless Sensor Networks: A Systematic Literature Review," in *2019 International Conference on Communications, Signal Processing, and their Applications (ICCSIPA)*, 2019.

[3]. N. A. Alrajeh, U. Marwat, B. Shams, S. S. H. Shah, "Error Correcting Codes in Wireless Sensor Networks: An Energy Perspective," *Appl. Math. Inf. Sci.*, 9, 2, 809-818, 2015.

[4]. R.W. Hamming, "Error detecting and error correcting codes," *Bell System Tech. J.*, 29, 147-160, 1950.

[5]. M. R. Islam, "Selection of error control/correction codes in wireless sensor network," in *ICECE 2010 - 6th Int. Conf. Electr. Comput. Eng.*, 674-677, 2010.

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

[7]. C. R. P. Hartmann, L. D. Rudolph, *An Optimum Symbol-by-Symbol decoding rule for linear codes*. Electrical Engineering and Computer Science Technical Reports, 8, 1975.

[8]. Pham Khắc Hoan, Nguyen Thanh Trung, Nguyen Thi Hong Nhung, Nguyen Anh Tuan, "An algorithm for decoding product codes based on Soft-Decision Decoding of the component codes," *Universal University Journal of Informatics and Radioelectronics*, Republic of Belarus, Minsk, 30-36, 2019.

[9]. IEC Market Strategy Board, *Internet of Things: Wireless Sensor Networks*. White paper, 2014.

[10]. M. Mensouri, M. Eddahibi, "New structure of channel coding: serial concatenation of polar codes," *International Journal of Wireless & Mobile Networks*, 5, 5, 2023

[11]. Sina Vafi, "Parallel concatenated block codes constructed by convolutional interleavers," *IEEE Access*, 9, 41218 - 41226, 2021.

[12]. B. Müller, M. Holters, U. Zölzer, "Low complexity soft-input soft-output hamming decoder," *IEEE Trans. Inform. Theory*, 1, 1-5, 2012.

**AUTHOR INFORMATION**

**Nguyen Thi Hong Nhung**

University of Economics - Technology for Industries, Vietnam

**TÀI LIỆU THAM KHẢO**

[1]. M. Soyuturk, H. Cicibas, O. Unal, "Real-Time Data Acquisition in Wireless Sensor Networks," *Intechopen Journals*, 63-84, 2014.