

JTST - JOURNAL OF TRANSPORTATION SCIENCE & TECHNOLOGY

MANUSCRIPT ID: JIST-2022-0008

KHẢO SÁT CÁC GIẢI THUẬT CHO BỘ GIẢI MÃ LDPC ỨNG DỤNG TRONG MẠNG 5G

Manuscript ID	JIST-2022-0008
Full title	Khảo Sát Các Giải Thuật Cho Bộ Giải Mã LDPC Ứng Dụng Trong Mạng 5G
Summary	<p>Mạng viễn thông được xem là lý tưởng nếu dữ liệu truyền tới thiết bị đầu cuối đáng tin cậy có nghĩa không bị lỗi. Nhưng thực tế dữ liệu truyền qua hệ thống thông tin có thể xảy ra lỗi bởi sự tồn tại nhiễu trong kênh truyền. Để tăng độ tin cậy khi truyền dữ liệu ta phải ứng dụng phương thức điều chỉnh lỗi. Mã sửa sai mật độ thấp (LDPC) đã được lựa chọn sử dụng cho nhiều chuẩn viễn thông và mạng 5G vì khả năng tốc độ xử lý cao, hiệu suất về diện tích và năng lượng cao. Trong bài báo này, những đặc tính cơ bản của ma trận LDPC được giới thiệu và kết quả khảo sát các thuật toán của bộ giải mã LDPC được mô phỏng nhằm chứng minh khả năng đáp ứng với yêu cầu ứng dụng chiều dài khối lớn trong mạng 5G. Kết quả mô phỏng cho thấy thuật toán, chiều dài mã và số vòng lặp sẽ ảnh hưởng đến kết quả sửa lỗi của mã.</p>
Research Topic	Viễn thông
Keywords	LDPC; giải thuật min-sum (MS); mạng 5G; bộ giải mã; BP
Authors	<ul style="list-style-type: none">- Ngọc Trần Thị Bích , Email: ngoc.tran@ut.edu.vn, School: Trường Đại học Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh, Faculty: .- Hòa Nguyễn Hồng, Email: , School: Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh, Faculty: .- Trang Hoàng, Email: , School: Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh, Faculty: .- Trường Nguyễn Lý Thiên, Email: , School: Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh, Faculty: .
Corresponding author	Ngọc Trần Thị Bích , Email: ngoc.tran@ut.edu.vn, School: Trường Đại học Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh, Faculty: .
Funding	NO

Khảo sát các giải thuật cho bộ giải mã LDPC ứng dụng trong mạng 5G

Review of low-density parity check codes for 5G new radio

Trần Thị Bích Ngọc^{1,*}, Nguyễn Hồng Hòa², Hoàng Trang², Nguyễn Lý Thiên Trường²

¹Trường Đại học Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh

²Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

*Email liên hệ: ngoc.tran@ut.edu.vn

Tóm tắt:

Mạng viễn thông được xem là lý tưởng nếu dữ liệu truyền tới thiết bị đầu cuối đáng tin cậy có nghĩa không bị lỗi. Nhưng thực tế dữ liệu truyền qua hệ thống thông tin có thể xảy ra lỗi bởi sự tồn tại nhiễu trong kênh truyền. Để tăng độ tin cậy khi truyền dữ liệu ta phải ứng dụng phương thức điều chỉnh lỗi. Mã sửa sai mật độ thấp (LDPC) đã được lựa chọn sử dụng cho nhiều chuẩn viễn thông và mạng 5G vì khả năng tốc độ xử lý cao, hiệu suất về diện tích và năng lượng cao. Trong bài báo này, những đặc tính cơ bản của ma trận LDPC được giới thiệu và kết quả khảo sát các thuật toán của bộ giải mã LDPC được mô phỏng nhằm chứng minh khả năng đáp ứng với yêu cầu ứng dụng chiều dài khối lớn trong mạng 5G. Kết quả mô phỏng cho thấy thuật toán, chiều dài mã và số vòng lặp sẽ ảnh hưởng đến kết quả sửa lỗi của mã.

Từ khóa: LDPC; giải thuật min-sum (MS); mạng 5G; bộ giải mã, BP.

Abstract: Low-Density Parity-Check Codes (LDPC) as the codes for forwarding error correction have already been adopted into many other wireless standards. Due to the capacity-approaching performance, higher coding gains, and impressive throughput, Low-Density Parity-Check Codes have been adopted in the 5th generation mobile communications (5G). In this paper, LDPC matrix structural features and algorithms for LDPC decoder are presented in use for large blocklength in 5G. The simulations show that algorithm, blocklength, and number of iteration influence the decoding error correction performance.

Keywords: LDPC; Min-Sum algorithm; 5G, decoder, BP.

1. Giới thiệu

Vào khoảng đầu năm 1962 Robert. G. Gallager đã đề xuất mã sửa sai chẵn lẻ mật độ thấp (Low-density parity-check - LDPC) [1]. Nhưng công trình nghiên cứu của Gallager đã nhanh chóng bị lãng quên vì khả năng tính toán của máy tính còn khá hạn chế nên các kết quả mô phỏng không phản ánh được khả năng kiểm soát lỗi cao của mã này. Năm 1995, MacKay và Neal một lần nữa tái phát minh mã này [2]. Nhờ tính chất mật độ thấp của các ma trận sửa sai chẵn lẻ, các mã LDPC có thể đạt được kết quả mong muốn bằng cách giải mã lặp với độ phức tạp

tuyến tính với độ dài khối của mã. Nhờ đặc tính ưu việt ấy, đã có nhiều nghiên cứu về thiết kế phần cứng cho bộ giải mã [3]-[5] và sử dụng mã LDPC vào các ứng dụng rộng rãi trong các chuẩn viễn thông khác nhau như IEEE 802.6, IEEE 802.20, IEEE 802.3, DVB-RS2, ngoài ra còn dùng trong việc lưu trữ của bộ nhớ. LDPC có tốc độ xử lý cao, hiệu suất về diện tích, năng lượng cao và được dùng cho chuẩn 3GPP 5G New Radio (NR). Mã LDPC thực hiện đối với các chiều dài khối dài. Do đó, trong chuẩn 3GPP NR mã LDPC được dùng trong khối xử lý dữ liệu (eMBB data). Với phương thức phát

hiện và tự sửa lỗi (FEC), mạng 3G và 4G đã sử dụng các mã turbo nhưng mạng 5G được thay thế bởi mã LDPC. Ưu điểm của các mã NR LDPC là tốc độ cao hơn và độ trễ thấp hơn so với các mã LTE turbo bởi kiến trúc phần cứng cho bộ giải mã LDPC được thực hiện song song toàn phần. Tỷ lệ mã thấp nhất của ma trận cơ sở 5G là $1/5$ – thấp hơn nhiều so với tỷ lệ mã sử dụng cho mã LTE turbo ($1/3$) [6]. Các mã 5G LDPC còn đạt mức tăng mã hóa (coding gain) ở những tỷ lệ mã thấp, cho nên chúng có thể sử dụng cho các trường hợp yêu cầu độ tin cậy cao. Tuy nhiên, các mã LDPC có thể cần thiết sở hữu các ma trận sửa sai chẵn lẻ phù hợp hơn cho ứng dụng những kết nối siêu tin cậy. Ví dụ, nếu yêu cầu tỷ lệ lỗi khối bit (BLER) là dưới 10^{-7} cho cơ sở hạ tầng của hệ thống giao thông thông minh, trong khi đó với các ma trận sửa sai chẵn lẻ hiện có chỉ đạt là 10^{-4} tới 10^{-5} [6].

Các bộ giải mã LDPC được thực hiện dựa trên thuật toán giải mã lặp. Thuật toán này được gọi là giải thuật truyền độ tin cậy (belief-propagation (BP) decoding) hay giải thuật truyền thông tin qua lại (message-passing (MP) decoding) [7]. Mặc dù thuật toán BP cho kết quả sửa lỗi tiến tới giới hạn Shannon [8], nhưng các phép toán dùng trong giải thuật này khá phức tạp, không phù hợp thực thi trên phần cứng. Để giảm bớt độ phức tạp của giải thuật BP khi thực thi trên phần cứng, các tác giả trong [9] đã đề xuất thuật toán xấp xỉ, được gọi là thuật toán Min-Sum (MS). Tuy nhiên, do sử dụng các phép toán xấp xỉ nên nhược điểm của thuật toán MS là khả năng sửa lỗi bị giảm so với thuật toán BP. Các tác giả trong [9] chỉ ra rằng, trong trường hợp chiều dài mã ngắn hai thuật toán MS và BP cho các kết quả chênh lệch không nhiều, nhưng với chiều dài mã dài sự sai lệch này có thể bằng một phần mười decibel hoặc thậm chí lên đến một decibel (dB). Nhằm cải thiện khả năng sửa lỗi cho giải thuật MS, các tác giả trong [10] đã đề xuất hai thuật toán là Normalized Min-sum (NMS) hay Offset Min-

sum (OMS). Qua đó các tác giả cũng chỉ ra rằng cả hai thuật toán NMS và OMS đều cho tỷ lệ lỗi bit (Bit-Error-Rate, BER) ứng với các giá trị tín hiệu trên nhiễu (Signal-to-Noise ratio, SNR) thấp tốt hơn so với thuật toán MS.

Các tác giả trong [11] đã đề xuất các thuật toán Threshold Attenuated MS (TAMS) và Threshold OMS (TOMS) cho bộ giải mã LDPC. Bản chất của các thuật toán TAMS (hay TOMS) là giá trị của check-node sẽ được hiệu chỉnh (giảm bớt hay bù thêm) tùy thuộc vào giá trị variable-node so với mức ngưỡng cho trước. Các tác giả này đã chứng minh thuật toán đề xuất này cho kết quả tốt hơn một cách đáng kể so với các kết quả của OMS và NMS. Các tác giả trong bài báo [12] đã đề xuất thuật toán Enhanced Offset Min-Sum (EOMS) với mục đích cải thiện phương thức sửa lỗi cho mã LDPC dùng trong mạng 5G. Vì các variable-nodes có bậc 1 rất dễ xảy ra lỗi, các tác giả đã đề xuất nguyên tắc xử lý các check-nodes. Kết quả mô phỏng chỉ ra rằng bộ giải mã EOMS cho khả năng sửa lỗi tốt hơn so với thuật toán OMS. Tuy nhiên, kiến trúc phần cứng của giải thuật EOMS có phần phức tạp hơn so với của giải thuật OMS. Trong hầu hết các nghiên cứu về thuật toán giải mã cho mã LDPC, các tác giả tập trung vào các giải thuật BP, MS, NMS, OMS, vì vậy trong bài báo này chúng tôi sẽ khảo sát sự ảnh hưởng của các giải thuật giải mã đến khả năng sửa lỗi của mã LDPC dùng trong mạng 5G. Phần tiếp theo của bài báo được cấu trúc như sau: Phần 2 trình bày về các bước tạo ma trận kiểm tra chẵn lẻ ứng dụng cho mạng 5G và về các thuật toán cho bộ giải mã LDPC. Phần 3, chúng tôi sẽ kiểm chứng phần phân tích bằng các kết quả mô phỏng trên phần mềm MatLab và một số kết luận được trình bày ở phần 4.

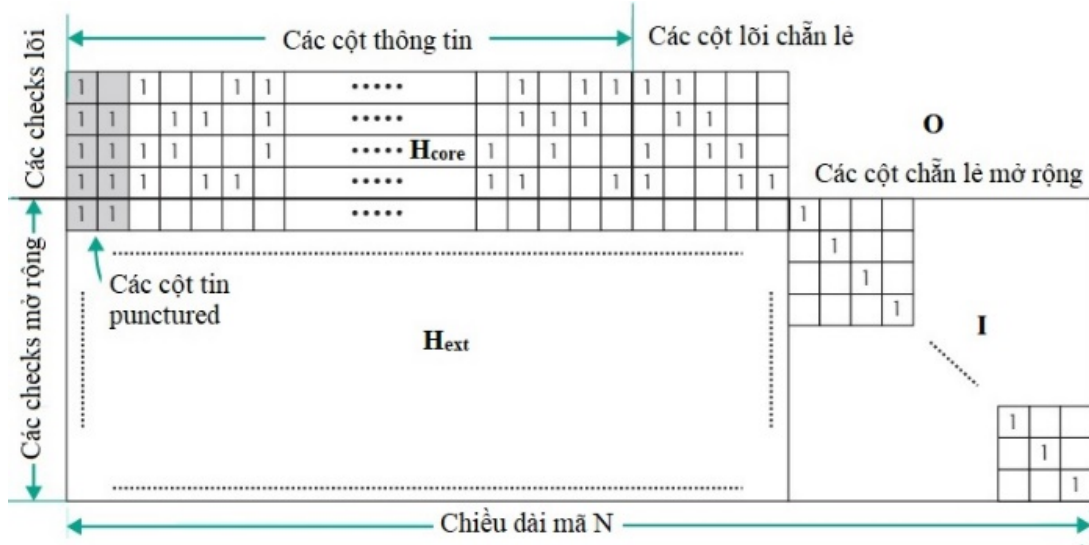
2. Các khái niệm và lý thuyết

2.1. Các bước tạo ma trận kiểm tra chẵn lẻ

Các mã Quasi-Cyclic (QC) LDPC [13] là một dạng của mã LDPC được ứng dụng rộng rãi

trong thực tế. Các mã QC-LDPC được nghiên cứu và ứng dụng trong các hệ thống khác nhau bởi chúng dễ thực hiện phần cứng, giải mã nhanh, có error-floor thấp và hỗ trợ các chiều dài khối một cách linh hoạt. Các mã QC-LDPC với cấu trúc các khối song song được ứng dụng trong các hệ thống thông tin không dây khác nhau như WiFi [14] và WiMAX [15].

Và gần đây các mã LDPC hay QC-LDPC đã được lựa chọn sử dụng cho mạng 5G [16], [17]. Trong mạng 5G, các mã LDPC được mô tả một ma trận cơ sở (base matrix) B có kích thước $R \times C$ với R và C lần lượt là số hàng và số cột của ma trận B . Các phần tử của ma trận là các số nguyên lớn hơn -1. Ma trận kiểm tra chẵn lẻ H được mở rộng từ ma trận B nhờ hệ số mở rộng Z .



Hình 1. Cấu trúc ma trận cơ sở cho mạng 5G [18].

Sơ đồ mã LDPC trong 5G NR [16], [17] được mô tả bằng hai ma trận cơ sở (BG1 và BG2) với cấu trúc gần giống nhau và được minh họa như hình 1. Ma trận cơ sở BG1 và BG2 gồm bốn phần: Ma trận lõi H_{core} , ma trận mở rộng H_{ext} , ma trận đơn vị I và ma trận không O . Đối với ma trận cơ sở BG1, hai cột ngoài cùng tương ứng $2 * Z$ punctured bit trước khi truyền. Mỗi phần tử trong ma trận cơ sở được mở rộng bằng ma trận hoán vị kích thước $Z \times Z$.

Một trong những ưu điểm của thiết kế ma trận cơ sở mạng 5G là chỉ sử dụng một ma trận cơ sở với nhiều giá trị mở rộng Z có thể cho nhiều chiều dài khối mã khác nhau. Các giá trị của Z được cho bởi công thức:

$Z = A \times 2^j$ với $A = \{2,3,5,6,9,11,13,15\}$ và $j = \{0,1,2,3,4,5,6,7\}$. Kết quả của hệ số Z được chỉ ra ở bảng 1.

Bảng 1. Các giá trị của hệ số mở rộng Z [16].

Z	j								
	0	1	2	3	4	5	6	7	
	2	2	3	8	16	32	64	128	256
	3	3	6	12	24	48	96	192	384
	5	5	10	20	40	80	160	320	
A	7	7	14	28	56	112	224		
	9	9	18	36	72	144	288		
	11	11	22	44	88	176	352		
	13	13	26	52	104	208			
	15	15	30	60	120	240			

Các bước cơ bản để tạo ma trận kiểm tra chẵn lẻ QC-LDPC (N, K) với N là chiều dài khối mã, K

kích thước khối tin: $K = Z \times k_b$ với k_b là số lượng cột tuần hoàn tin và tỉ lệ mã $R = \frac{K}{N}$.

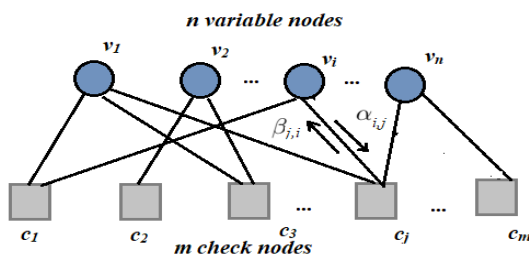
Xác định ma trận BG1 hay BG2 và xác định giá trị k_b khi biết K và R . Với BG1: $k_b = 22$. Và BG2:

- Nếu $K > 640$ thì $k_b = 10$;
- Nếu $560 < K < 640$ thì $k_b = 9$;
- Nếu $192 < K < 560$ thì $k_b = 8$;
- Nếu $K < 192$ thì $k_b = 6$.

Hệ số mở rộng Z được xác định bằng cách chọn giá trị nhỏ nhất của Z trong bảng 1 sao cho: $k_b \times Z \geq K$, giá trị này được gọi là Z_C . Khi đó, với BG1 ta có $K = 22 \cdot Z_C$ và BG2: $K = 10 \cdot Z_C$. Sau khi xác định được hệ số mở rộng Z , ta có thể dễ dàng xây dựng được ma trận chẵn lẻ H . Ma trận BG1 có kích thước 46×68 , còn BG2-42 \times 52. BG1 sử dụng cho chiều dài khối lớn $500 \leq K \leq 8448$ và tỉ lệ mã cao hơn $1/3 \leq R \leq 8/9$, còn BG2 dành cho chiều dài khối ngắn hơn $40 \leq K \leq 2560$ và tỉ lệ mã thấp hơn $1/5 \leq R \leq 2/3$. Khoảng giá trị $k_b = [19,22]$ cho BG1 và $k_b = [6,10]$ cho BG2. Giá trị cực đại của Z của BG2 tiến tới 256 còn với BG1 là 384.

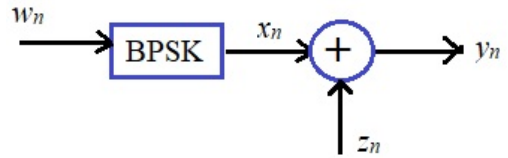
2.2. Các giải thuật cho bộ giải mã LDPC

Trong phần này, nhóm nghiên cứu sẽ mô tả một số thuật toán dùng để giải mã cho mã LDPC: Thuật toán MS và các thuật toán cải tiến của nó. Các thuật toán giải mã này được gọi chung là giải thuật truyền thông tin qua lại (Message Passing-5MP). Thuật toán giải mã MP [7] thực hiện gửi tin qua lại giữa variable-nodes và check-nodes lặp đi lặp lại như minh họa bằng Tanner graph ở hình 2.



Hình 2. Minh họa Tanner graph cho thuật toán MP.

Giả sử chiều dài khối mã và bit thông tin lần lượt là N và K . Ma trận sửa sai chẵn lẻ cho mã LDPC là H có kích thước $M \times N$. Trong ma trận H ký hiệu cột thứ n (variable node) và dòng thứ m (check node) lần lượt là v_n và c_m ; ρ_m - bậc của check node. Từ mã $w = [w_1, w_2, \dots, w_N]$ được điều chế BPSK sang chuỗi nhị phân $x = [x_1, x_2, \dots, x_N]$, theo công thức $x_n = 1 - 2w_n$, $n = [1, N]$. Sau đó được qua kênh nhiễu trắng AWGN, tại ngõ ra tín hiệu nhận được có dạng $y = [y_1, y_2, \dots, y_N]$ do $y_n = x_n + z_n$, $n = [1, N]$ với z_n phân bố Gauss với trung bình (mean) bằng 0 và phương sai là $\sigma^2 = N\sigma_z^2$ minh họa như hình 3.



Hình 3. Sơ đồ khối hệ thống thông tin.

Các bước cơ bản của thuật toán MP được mô tả như sau:

Khởi tạo: Thông tin ban đầu γ_n được xác định cho các giá trị variable-node v_n . Từ đó, có thể tính được tin khởi tạo từ variable-to-check $\alpha_{m,n}$.

Vòng lặp: Mỗi vòng lặp giải mã được thiết lập theo trình tự sau:

- Xử lý check-node (CN): Các tin chuyển từ check node tới variable node $\beta_{m,n}$ được cập nhật từ các tin hiện thời $\alpha_{m,n'}$ với $v_{n'} \in H(c_m) \setminus \{v_n\}$.
- Xử lý variable-node (VN): Các tin chuyển từ variable-node tới check-node $\alpha_{m,n}$ được cập nhật từ các giá trị γ_n và $\beta_{m',n}$ với $c_{m'} \in H(v_n) \setminus \{c_m\}$.
- Cập nhật thông tin variable-node sau mỗi vòng lặp: $\tilde{\gamma}_n$ được cập nhật từ các tin γ_n và $\beta_{m,n}$ với $c_m \in H(v_n) \setminus \{c_m\}$.

Các bước tính toán chi tiết và thứ tự thực hiện của thuật toán được viết cụ thể như trong Algorithm 1.

Algorithm 1 Thuật toán giải mã: MS, OMS và NMS.

```

1: Ngõ vào :  $\mathbf{y} = (y_0, y_1, \dots, y_{N-1}) \in Y^N$  (Y ký tự
   ngõ ra của kênh truyền)
2: Ngõ ra :  $\hat{\mathbf{x}} = (\hat{x}_1, \dots, \hat{x}_N) \in \{0, 1\}^N$ 
3: Initialization
4: for all  $(v_n)_{n=1,2,\dots,N}$  do
5:    $\gamma_n = \log \frac{Pr(x_n=0|y_n)}{Pr(x_n=1|y_n)}$ 
6: end for
7: for all  $(v_n)_{n=1,2,\dots,N}$  and  $c_m \in H(v_n)$  do
8:    $\alpha_{m,n} = \gamma_n$ 
9: end for
10: Iteration loop
11: for all  $\{c_m\}_{m=1,2,\dots,N}$  and  $v_n \in H(c_m)$  do
12:
13:   where
14:    $A = \max\{(\min_{v'_n \in H(c_m) \setminus \{v_n\}} a_{m,n'}) - \delta, 0\}$ 
15:    $s_{m,n'} = \text{sign}(\gamma_{m,n'})$  and  $a_{m,n'} = |\alpha_{m,n'}|$ 
16: end for
17: for all  $\{v_n\}_{n=1,2,\dots,N}$  and  $c_m \in H(v_n)$  do
18:    $\alpha_{m,n} = \gamma_n + \sum_{c'_m \in H(v_n) \setminus \{c_m\}} \beta_{m',n}$ 
19: end for
20: for all  $\{v_n\}_{n=1,2,\dots,N}$  do
21:    $\tilde{\gamma}_n = \gamma_n + \sum_{c'_m \in H(v_n)} \beta_{m,n}$ 
22: end for
23: for all  $\{v_n\}_{n=1,2,\dots,N}$  do
24:    $\hat{x}_n = (1 - \text{sign}(\tilde{\gamma}_n))/2$ 
25: end for
26: if  $\hat{\mathbf{x}}$  là từ mã then
27:   thoát vòng lặp
28: end if
29: For MS decoder:  $v = 1; \delta = 0$ 
30: For OMS decoder:  $v = 1; \delta > 0$ 
31: For NMS decoder:  $v \in [0, 1], \delta = 0$ 
    
```

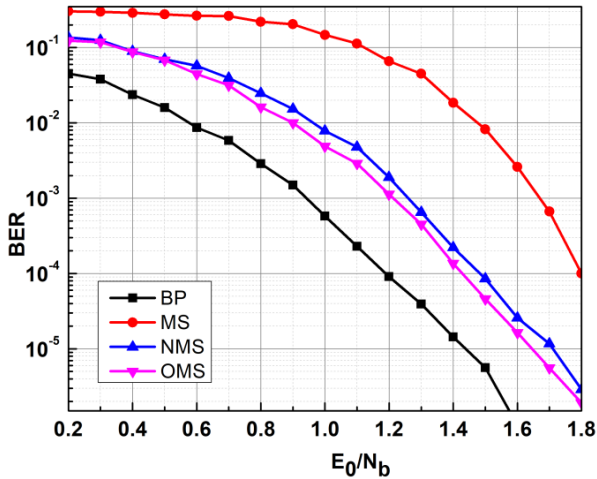
$$\beta_{m,n} = v \cdot \left(\prod_{v'_n \in H(c_m) \setminus \{v_n\}} s_{m,n'} \right) \cdot A$$

13: where

14: $A = \max\{(\min_{v'_n \in H(c_m) \setminus \{v_n\}} a_{m,n'}) - \delta, 0\}$

3. Kết quả mô phỏng

Trong phần này, nhóm mô phỏng bộ giải mã LDPC sử dụng phần mềm MatLab với mục đích kiểm chứng các thuật toán đã nêu ở phần trên. Ma trận BG2 sẽ được sử dụng với chiều dài thông tin $K = 2080$ tỉ lệ mã $R = 1/4$ với và ma trận BG1- $K = 8448$ với tỉ lệ mã $R = 3/4$.

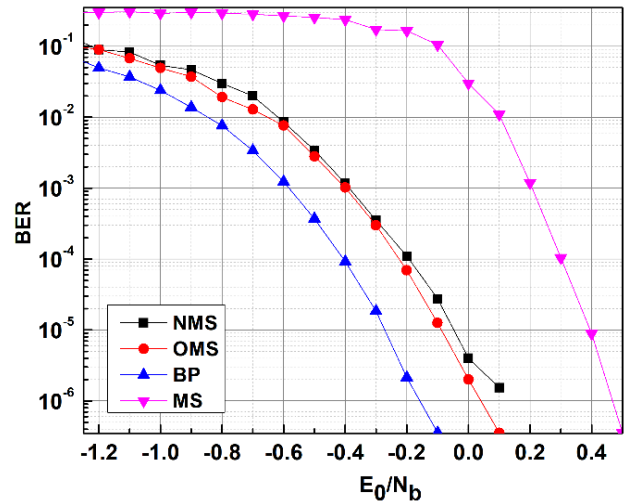


Hình 4. Tỷ lệ lỗi bit (BER) ứng với các giá trị tín hiệu trên nhiễu của bộ giải mã LDPC

$K = 2080, R = \frac{1}{4}$ với các thuật toán khác nhau.

Hình 4 trình bày về kết quả mô phỏng bộ giải mã LDPC với ma trận BG2 với các thuật toán khác nhau BP, NMS ($\varepsilon = 0.7, \delta = 1$), OMS ($\varepsilon = 0, \delta = 0.4$) và MS với số vòng lặp là 10.

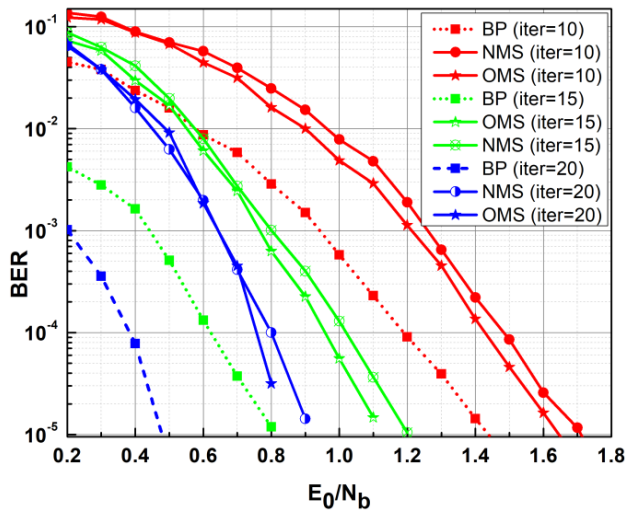
Từ hình 4 ta thấy, tại BER bằng 10^{-5} thuật toán đạt độ lợi khoảng 0.23dB so với thuật toán OMS, và thuật toán OMS đạt khoảng 0.37dB so với thuật toán MS. Thuật toán OMS và NMS cũng cải thiện hơn so với MS khi sử dụng cho mã LDPC có ma trận BG1 với chiều dài mã 8448 như kết quả mô phỏng ở hình 5.



Hình 5. Tỷ lệ lỗi bit (BER) ứng với các giá trị tín hiệu trên nhiễu của bộ giải mã LDPC

$K = 8448, R = 3/4$ với các thuật toán khác nhau.

Từ các hình 4 và 5 ta thấy để có cùng BER 10^{-5} thì phải cùng thuật toán giải mã, chiều dài khối mã lớn hơn sẽ cho giá trị SNR thấp hơn.



Hình 6. Tỷ lệ lỗi bit (BER) ứng với số vòng lặp khác nhau của bộ giải mã LDPC

$K=2080, R = \frac{1}{4}$ với thuật toán BP.

Hình 6 trình bày sự phụ thuộc của BER so với số vòng lặp sử dụng cho bộ giải mã LDPC áp dụng cho thuật toán BP với điều kiện giá trị $SNR = 0.1dB$. Kết quả mô phỏng chỉ ra rằng khi càng tăng số vòng lặp bộ giải mã cho kết quả sửa lỗi tốt hơn. Cụ thể tại BER bằng 10^{-5} giá trị coding gain giữa vòng lặp thứ 10 và vòng lặp thứ 15 của thuật toán NMS, OMS đạt khoảng $0.45dB$, giữa vòng lặp thứ 15 và 20 giá trị coding gain của hai thuật toán này đạt khoảng $0.3dB$. Như vậy, số vòng lặp cũng ảnh hưởng khá lớn tới quá trình hoạt động của bộ giải mã LDPC.

4. Kết luận

Trong bài báo này, nhóm đã mô phỏng các thuật toán BP, MS, NMS, OMS sử dụng cho mã LDPC của mạng 5G. Kết quả mô phỏng cho thấy khả năng sửa lỗi của các thuật toán OMS và NMS tốt hơn so với thuật toán MS. Và kết quả nhận được các thuật toán NMS và OMS tiến gần với kết quả nhận được từ thuật toán BP. Ngoài ra, các kết quả mô phỏng chỉ ra rằng chiều dài khối mã, số các vòng lặp khi sử dụng cũng ảnh hưởng đáng kể đến khả năng sửa lỗi của các thuật toán sử dụng trong bộ giải mã LDPC.

Tài liệu tham khảo

- [1] R. Gallager; “Low-density parity-check codes”. IRE Transactions on information theory. 1962; 8(1):21-28. DOI: 10.1109/TIT.1962.1057683
- [2] D. J. C. MacKay; “Good error-correcting codes based on very sparse matrices”. IEEE International Symposium on Information Theory. 1999; 45(2):399 – 431. DOI: 10.1109/18.748992.
- [3] H. Peter et al.; “A survey of FPGA-based LDPC decoders”. IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2015; 18(2):1098-1122. DOI: 10.1109/COMST.2015.2510381.
- [4] M. Guido; Q. Federico; V. Fabrizio; “Implementation of a flexible LDPC decoder”. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs. 2007; 54(6):542-546. DOI: 10.1109/TCSII.2007.894409.
- [5] N. L. T. Truong et al., “Analysis and design of cost-effective, high-throughput LDPC decoders”. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems. 2018; 26(3):508-521. DOI: 10.1109/TVLSI.2017.2776561.
- [6] D. Hui et al.; “Channel coding in 5G new radio: A tutorial overview and performance comparison with 4g LTE”. IEEE Vehicular Technology Magazine. 2018; 13(4):60–69.
- [7] J. Pearl; “Probabilistic reasoning in intelligent systems: Networks of plausible inference”. USA: Morgan Kaufmann. 1988.
- [8] C. E. Shannon; “The mathematical theory of communication”. The Bell System Technical Journal. 1948; 27(4):623-656. DOI: 10.1002/j.1538-7305.1948.tb00917.x.
- [9] J. Chen et al.; “Improved min-sum decoding algorithms for irregular LDPC codes”. In Proc. International Symposium on Information Theory 2005 (ISIT 2005) ; 4-9 September, 2005; Adelaide, SA, Australia. IEEE; 2005. pp. 449-453. DOI: 10.1109/ISIT.2005.1523374.
- [10] C. Jinghu et al.; “Near optimal reduced-complexity decoding algorithms for LDPC codes”. In Proc. IEEE International Symposium

- on Information Theory; 30 June-5 July, 2002; Lausanne, Switzerland. IEEE; 2002. DOI: 10.1109/ISIT.2002.1023727.
- [11] H. Hatami et al.; “A Threshold-Based Min-Sum Algorithm to Lower the Error Floors of Quantized LDPC Decoders”. IEEE Transactions on Communications. 2020; 68(4):2005-2015. DOI: 10.1109/TCOMM.2020.2969902.
- [12] H.Cui et al.; “An Enhanced Offset Min-Sum decoder for 5G LDPC Codes”. In Proc. 2019 25th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC); 6-8 November, 2019; Ho Chi Minh City, Vietnam. IEEE. 2019. pp. 490-495. DOI: 10.1109/APCC47188.2019.9026399.
- [13] M. Fossorier.; “Quasicyclic low-density parity-check codes from circulant permutation matrices”. In Proc. : IEEE International Symposium on Information Theory 2003; 29 June-4 July, 2003; Yokohama, Japan. IEEE. 2003. DOI: 10.1109/ISIT.2003.1228164.
- [14] Z. Chen et al.; “A high parallelism LDPC decoder with an early stopping criterion for WiMax and WiFi application”. IPSJ Transactions on System LSI Design Methodology. 2010; 3:292-302. DOI: 10.2197/ipsjtsldm.3.292.
- [15] B. Xiang, et al.; “An 847–955 Mb/s 342–397 mW Dual-Path Fully-Overlapped QC-LDPC Decoder for WiMAX System in 0.13 μ m CMOS”. IEEE Journal of Solid-State Circuits. 2011; 46(6):1416-1432. DOI: 10.1109/JSSC.2011.2125030.
- [16] 5G; NR; Multiplexing and channel coding (3GPP TS 38.212 version 15.2.0 Release 15); ETSI; 2018. pp.18-25.
- [17] NR; “Multiplexing and channel coding”; 38.212; 2017. <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3214>
- [18] T. Richardson, S. Kudekar; “Design of low-density parity check codes for 5G new radio”. IEEE Communications Magazine. 2018; 56(3):28-34. DOI: 10.1109/MCOM.2018.1700839

Ngày nhận bài: 07/06/2021
Ngày chuyển phản biện: 10/06/2021
Ngày hoàn thành sửa bài: 01/07/2021
Ngày chấp nhận đăng: 08/07/2021