

5G NR LDPC 부호화 기술 소개

안현태, 김인기, 김상효*
성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

iamshkim@skku.edu

A Study on LDPC Coding in 5G New Radio

Hyun Tae Ahn, Ingi Kim, Sang-Hyo Kim*

Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University

요약

LDPC 부호는 채널 용량에 근접하는 성능을 달성하며, 5G New Radio 표준의 데이터 채널을 위한 채널 부호로 채택되었다. 본 논문에서는 5G 표준의 LDPC 부호화 과정에 대해 소개하고, 각 블록들의 세부 기능들에 대해 상술한다.

I. 서론

Robert Gallager의 저밀도 패리티 검사 (Low-Density Parity-Check: LDPC) 부호의 패리티 검사 행렬(Parity Check Matrix: PCM)은 1의 개수가 매우 적기 때문에 연산량이 적어 매우 큰 블록 크기에서도 효율적으로 오류를 검출하고 정정할 수 있다[1][2]. LDPC 부호는 이러한 특성을 이용하여 5G-NR에서 요구하는 초고신뢰, 저지연을 달성할 수 있어 기존 4G LTE에 사용되던 터보코드를 대체해 데이터 채널의 다운 링크와 업 링크의 채널 코딩에 사용된다[3].

본 논문에서는 3GPP TS 38.212 표준문서[4]에서 설명하는 5G-NR LDPC를 소개하며 부호화 과정을 단계별로 설명한다.

II. 본론

5G-NR에는 [5]에서 설명하는 준순회 LDPC (Quasi-Cyclic LDPC: QC LDPC) 부호가 사용된다. 준순회 LDPC 부호에서 기본 그래프(Base Graph: BG)는 QC LDPC의 기초가 되는 작은 PCM으로, 기본 그래프의 각 원소가 $Z_c \times Z_c$ 크기의 행렬로 확장된다. 여기서 Z_c 는 확장 계수 (lifting size)이다. 기본 그래프의 값은 $-1, 0$, 양의 정수가 사용된다. 기본 그래프의 값이 -1 이면 크기가 $Z_c \times Z_c$ 인 영행렬로 확장되고, 기본 그래프의 값이 0 이면 $Z_c \times Z_c$ 크기의 항등 행렬(identity matrix)로 확장된다. 기본 그래프의 값이 양의 정수이면 순환 시프트(cyclic-shift)의 값으로 $Z_c \times Z_c$ 크기의 항등 행렬을 명시된 양의 정수만큼 오른쪽으로 순환 이동시킨 행렬로 확장된다. Z_c 의 크기를 결정하는 기준은 [4]에 명시되어 있다.

본론에서는 5G-NR LDPC의 부호화 과정을 단계별로 구분하여 설명한다. 그림 1과 같이 5G-NR LDPC의 부호화는 전송 블록 순환 중복 검사(Transport block Cyclic Redundancy Check: CRC), 부호 블록 분할(Code block Segmentation), LDPC 부호화(LDPC Encoding), 부호율

정합(Rate Matching), 부호 블록 연결(Code Block Concatenation)으로 이루어진다.

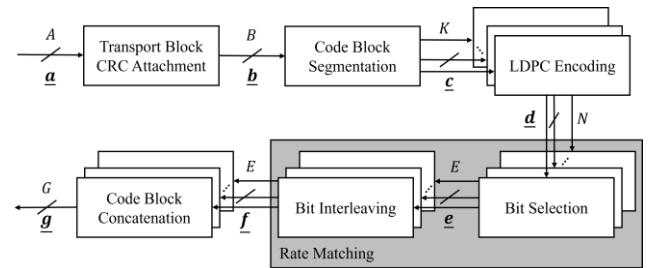


그림 1. 5G-NR LDPC의 부호화 체인

그림 1과 같이 부호 블록 분할이 이루어진 후 단계는 각 부호 블록마다 각각 적용된다. 부호 블록으로 분할된 블록이 LDPC 부호화와 부호율 정합을 거친 후 부호 블록 연결에서 다시 하나의 블록으로 합쳐진다.

2.1 전송 블록 순환 중복 검사

순환 중복 검사의 입력은 길이가 A 인 $\mathbf{a} = (a_0, a_1, a_2, \dots, a_{A-1})$ 벡터이고, 출력은 길이가 B 인 벡터 \mathbf{b} 이다. 전송 블록의 크기 A 가 3824 보다 작거나 같을 경우 순환 중복 검사 다항식은 길이(L)가 16인 $g_{CRC16}(D) = [D^{16} + D^{12} + D^5 + 1]$ 을 사용하고, 3824보다 클 경우 순환 중복 검사 다항식은 길이가 24인 $g_{CRC24A}(D) = [D^{24} + D^{23} + D^{18} + D^{17} + D^{14} + D^{11} + D^{10} + D^7 + D^6 + D^5 + D^4 + D^3 + D + 1]$ 을 사용한다[3]. 순환 중복 검사의 입력 비트를 $a_0D^{A+L-1} + a_1D^{A+L-2} + \dots + a_{A-1}D^L$ 과 같은 다항식 표현하고 순환 중복 검사 다항식으로 나누면 나머지 $p_0D^{L-1} + p_1D^{L-2} + \dots + p_{L-2}D^1 + p_{L-1}$ 가 나온다. 이를 통해 구한 패리티 비트 $p_0, p_1, p_2, \dots, p_{L-1}$ 벡터를 순환 중복 검사의 입력 벡터 뒤에 추가하여 출력 벡터를 만든다.

2.2 부호 블록 분할

부호 블록 분할의 입력은 길이가 B 인 벡터 \mathbf{b} 이고, 출력은 길이가 K_r 인 벡터 \mathbf{c} 이다. 여기서 K_r 은 r 번째 부호 블록의 비트 수, r 의 크기는 $0 \leq r < C$ 이고, C 는 부호 블록의 수이다. 부호 블록 분할의 입력의 크기인 B 가 부

호 블록의 최대 크기인 K_{cb} 보다 작을 때 부호 블록이 분할이 되지 않고, B 가 K_{cb} 보다 클 때 부호 블록이 분할된다. 전송 블록의 크기와 부호율에 의해 LDPC 부호화에 사용할 기본 그래프가 결정되고, 기본 그래프에 따라 K_{cb} 가 달라진다. LDPC의 BG 1의 K_{cb} 는 8448이고, BG 2의 K_{cb} 는 3840이다.

부호 블록 분할 후 각 블록마다 $L=24$ 인 부호 블록 순환 중복 검사($g_{CRC24B}(D) = [D^{24} + D^{23} + D^6 + D^5 + D + 1]$)가 연결된다. 부호 블록 분할이 발생하는 경우, 분할되는 블록의 수(C)는 $C = \lfloor \frac{B}{K_{cb}-L} \rfloor$ 을 통해 구할 수 있다. 분할된 부호 블록 단위로 LDPC 부호화 및 부호율 정합이 개별적으로 적용되고 부호 블록 연결에서 하나로 합쳐진다.

2.3 LDPC 부호화

LDPC 부호화의 입력은 길이가 K 인 벡터 \mathbf{c} 이고, 출력은 길이가 N 인 벡터 \mathbf{d} 이다. 여기서 K 는 정보비트 수, N 은 모부호 길이이다. 5G-NR LDPC의 기본 그래프는 2개로, BG 1의 크기는 46×68 이고, BG 2의 크기는 42×52 이다. BG 1의 정보 비트의 수는 $22 \times Z_c$ 이고, 패리티 비트의 수는 $46 \times Z_c$ 이다. BG 2의 정보 비트의 수는 $10 \times Z_c$ 이고, 패리티 비트의 수는 $42 \times Z_c$ 이다. Z_c 의 값을 조정하여 부호의 크기를 조정할 수 있다.

5G-NR LDPC에서 기본 그래프의 차수가 높은 가장 왼쪽 두 열에 해당하는 $2 \times Z_c$ 의 정보 비트를 친공하여 LDPC의 부호 및 복호 복잡도를 줄이고 성능을 향상시킨다[6]. 친공에 의해 부호화 후 전송하는 비트는 BG 1의 경우 $66 \times Z_c$, BG 2의 경우 $50 \times Z_c$ 이므로 부호율은 각각 $22 \times Z_c / 66 \times Z_c = 1/3$, $10 \times Z_c / 50 \times Z_c = 1/5$ 이다. 추가로 패리티 비트를 친공하거나 정보 비트를 단축하여 부호율을 조정할 수 있다. 부호율이 높고, 정보 블록의 크기가 클 경우 BG 1을 사용하고, 부호율이 작고 정보 블록의 크기가 작을 경우 BG 2를 사용한다. 부호율과 정보 블록의 크기에 따라 어떤 기본 그래프로 부호화 하는지에 대한 기준이 문서 [3]에 명시되어 있다.

2.4 부호율 정합

부호율 정합은 비트 선택(Bit selection)과 비트 인터리빙(Bit Interleaving)으로 구성된다.

2.4.1 비트 선택

비트 선택의 입력은 길이가 N 인 벡터 \mathbf{d} 이고, 출력은 길이가 E 인 벡터 \mathbf{e} 이다. 비트 선택의 입력 비트열을 이용하여 길이 N_{cb} 의 원형 버퍼(circular buffer)를 생성한다[3][4]. rv_{id} 는 중복 버전(Redundancy Version)으로 0, 1, 2, 3의 값을 가지는데 중복 버전의 값에 따라 원형 버퍼에서 시작 인덱스(k_0)의 값이 정해진다. 중복 버전에 따른 시작 인덱스의 값은 [4]의 Table 5.4.2.1-2에 명시되어 있다. 시작 인덱스에 해당하는 원형 버퍼의 값부터 길이 E 의 비트열을 출력한다.

2.4.2 비트 인터리빙

비트 인터리빙의 입력은 길이가 E 인 벡터 \mathbf{e} 이고, 출력은 길이가 E 인 벡터 \mathbf{f} 이다. 비트 인터리빙은 전송하는

비트의 순서를 변경하여 연속적인 오류를 분산시켜 오류 정정의 성능을 높인다[3]. 직사각형 형태의 인터리버는 행의 개수는 변조 차수와 같고, 열의 수는 부호화 된 비트의 수를 변조차수로 나눈 값과 같다. 최상위 비트(MSB: most significant bit)부터 최하위 비트(LSB: least significant bit) 순서로 인터리버의 왼쪽 상단부터 시작하여 행 단위로 기록하고, 인터리버의 왼쪽 상단부터 열 단위로 읽어 인터리빙의 출력으로 설정된다.

2.5 부호 블록 연결

부호 블록 연결의 입력은 길이가 E_r 인 벡터 \mathbf{f} 이고, 출력은 길이가 G 인 벡터 \mathbf{g} 이다. 여기서 E_r 은 r 번째 부호 블록에서 부호율 정합된 비트의 수이다. 첫 번째 블록의 비트열부터 마지막 C 번째 블록의 비트열까지 일렬로 나열한 비트열을 출력한다.

III. 결론

본 논문에서는 5G-NR 표준의 LDPC 부호화 기법에 대해 소개하고, 각 단계의 동작을 설명하였다. 순환 중복 검사를 통해 오류를 정정할 수 있고, 부호 블록 분할을 통해 적절한 크기의 부호 블록으로 분할한다. 5G-NR LDPC의 BG 1 또는 BG 2를 선택한 후, 친공과 단축을 적용하면 다양한 부호율을 가지는 비트열을 부호화 할 수 있다. 또한 확장 계수 크기로 기본 그래프를 확장하면 다양한 크기의 전송 블록의 정보비트에 적용할 수 있다. LDPC 부호화 후 원형 버퍼를 이용하여 비트 선택을 하고, 비트 인터리빙을 통해 연속적인 오류를 분산시킨다. 5G 통신에 이어 향후 6G 통신 표준에서도 LDPC 부호의 적용 가능성을 높이기 위해서 개별 모듈의 최적화 등을 통한 복호 성능 개선 방안을 모색할 필요가 있다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원(RS-2024-00398449, RS-2024-00397216) 및 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(RS-2024-00343913)

참고 문헌

- [1] R. Gallager, "Low-density parity-check codes," in *IRE Trans. on Inf. Theory*, vol. 8, no. 1, pp. 21-28, Jan. 1962.
- [2] 이문호, 박주용. (2001). 특집/기술해설4세대 이동통신을 위한 LDPC 원리 및 응용. *텔레콤*, 17(2), 14-26.
- [3] D. C. Larsson, "Channel Coding in NR," in *5G and Beyond: Fundamentals and Standards*. Springer, 2021, p. 303-316.
- [4] 3GPP, NR; Multiplexing and channel coding, TS 38.212, v 18.3.0, Jul. 2024.
- [5] G. Liva, W. E. Ryan and M. Chiani, "Quasi-cyclic generalized ldpc codes with low error floors," in *IEEE Trans. on Commun.*, vol. 56, no. 1, pp. 49-57, Jan. 2008.
- [6] T. Richardson and S. Kudekar, "Design of Low-Density Parity Check Codes for 5G New Radio," in *IEEE Commun. Magazine*, vol. 56, no. 3, pp. 28-34, March 2018.