

비균일 LDPC부호의 계층 신뢰전파 복호 스케줄링 성능 분석

조은영, 김상호*

성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

*iamshkim@skku.edu

On the performance of layered belief propagation decoding scheduling for irregular LDPC codes

Eunyoung Cho, Sang-Hyo Kim*

Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan Univ.

요약

본 논문에서는 저밀도 패리티 검사(low-density parity check: LDPC) 부호의 계층적 신뢰전파(belief propagation: BP) 복호 성능을 분석한다. 각 계층의 연산 순서에 따라 복호 성능은 달라질 수 있는데, 특히 계층적 BP복호는 BP 복호 대비 매우 적은 최대 반복복호 횟수 내에서 복호가 완료되므로 효과적인 계층 스케줄링을 통한 우수한 성능 확보가 필요하다. 이에 다양한 길이의 LDPC부호에서 검사노드 차수(degree) 크기의 오류차순으로 스케줄링하는 계층적 BP복호의 성능을 확인 및 분석한다.

I. 서론

6세대(6th generation: 6G) 통신의 다양한 시나리오 실현을 위해서는 Tbps 급의 높은 스루풋(throughput)과 저지연 통신 요구사항이 필수적이다 [1]. 자율주행 자동차, 가상현실(virtual reality) 등의 어플리케이션(application)을 지원하기 위해서는 각 요소기술들의 최대 성능 확보를 통해 전송률, 지연시간, 신뢰도 요구사항이 동시에 만족되어야 한다. 이에 엄격하고 다양한 통신 요구조건을 달성하기 위해 물리계층의 채널 부/복호 기술도 활발히 연구되고 있다.

5G NR (new radio) 데이터 채널에 채택된 저밀도 패리티 검사(low-density parity check: LDPC) 부호는 신뢰전파(belief propagation: BP) 복호와 함께 Shannon 한계에 근접할 수 있음이 입증되어 지금도 활발히 연구되고 있다 [2]. 병렬화 기반의 복호기 구현을 위한 신뢰전파와 복호 연구의 일환으로 계층적 신뢰전파(layered belief propagation: LBP) 복호가 연구되었는데 특히, 기존의 BP복호 대비 적은 최대반복복호 횟수로 복호가 수행된다는 점과 함께 대용량 및 저지연 통신을 위해 경쟁력이 있는 복호 방식이라 판단할 수 있어 주목받고 있다 [3-4].

LBP 복호는 계층 별로 연산을 수행하는데, 계층의 순서 설정에 따라 그 복호 성능이 개선될 수 있다. 이에 [5]에서는 계층 스케줄링(scheduling) 기준을 LDPC부호의 검사노드 차수(degree)로 하는 방식을 제안하고 있다. 차수가 낮은 계층부터 높은 계층 순으로 스케줄링하여 매 반복의 후반에 더 많은 메시지들이 효과적으로 전달될 수 있도록 하는 방법이다. 이 스케줄링 방법은 검사노드의 비정규성(irregularity)이 전제되어야 효과적이는데, 다양한 LDPC부호에서 그 복호 성능을 확인해 검증할 필요가 있다. 이에 본 논문에서는 비정규적인 검사노드를 갖는 5G LDPC부호와 WiGig LDPC부호에 대해 다양한 길이에서 차수에 따른 스케줄링 방법을 적용해 복호 성능을 확인하였다.

II. 시스템 모델 및 계층 신뢰전파 복호

본 논문에서는 가산 백색 가우시안 잡음(additive white Gaussian noise: AWGN) 채널을 가정한다. 길이가 k 인 전송 메시지 시퀀스는 $\mathbf{m}=(m_1, m_2, \dots, m_k)$ 는 길이가 n 인 LDPC부호에 $\mathbf{c}=(c_1, c_2, \dots, c_n)$ 로 부호화된 후 이진 위상 천이 변조(binary phase shift keying: BPSK)되어 송신신호 $\mathbf{s}=(s_1, s_2, \dots, s_n)$ 가 된다. AWGN 채널 통과 후 길이가 n 이고 크기 평균이 0, 분산이 σ^2 인 잡음 $\mathbf{z}=(z_1, z_2, \dots, z_n)$ 가 더해진 수신신호 $\mathbf{y}=\mathbf{s}+\mathbf{z}=(y_1, y_2, \dots, y_n)$ 는 복조(demodulation) 및 복호(decoding)를 통해 추정 수신신호인 $\hat{\mathbf{c}}=(\hat{c}_1, \hat{c}_2, \dots, \hat{c}_n)$ 가 된다. 이때, 수신신호의 로그 우도비(log likelihood ratio: LLR)은 $\mathbf{l}=(l_1, l_2, \dots, l_n)$ 으로 표기한다.

신뢰전파(belief propagation: BP) 복호는 LDPC부호의 대표적인 복호 방법으로,

LDPC부호를 정의하는 이진 회소행렬 H 와 그 이진 그래프 형태인 테너(Tanner) 그래프 내 변수노드(variable node: VN) $V_i (i=1, \dots, n)$ 와 검사노드(check node: CN) $C_j (j=1, \dots, m)$ ($m=n-k$) 간 메시지 교환 과정으로 설명할 수 있다. VN에서 CN으로 전달되는 메시지는 $m_{i,j}^{V2C}$ 와 CN에서 VN으로 전달되는 메시지는 $m_{j,i}^{C2V}$ 는 다음과 같이 연산될 수 있으며 이때 l^{ch} 는 채널로부터의 LLR이다.

$$m_{i,j}^{V2C} = l^{ch} + \sum_{j' \in N(V_i)/j} m_{j',i}^{C2V} \quad (1)$$

$$m_{j,i}^{C2V} = \prod_{i' \in N(V_j)/i} \text{sgn}(m_{i',j}^{V2C}) \cdot 2 \tanh^{-1} \left(\prod_{i' \in N(V_j)/i} \tanh \frac{m_{i',j}^{V2C}}{2} \right)$$

이때 $N(\cdot)$ 는 각 VN 혹은 CN과 연결된 CN 혹은 VN의 인덱스 집합이다. 또 각 복호 반복(iteration) 마다 얻어지는 VN 별 posteriori LLR 메시지 L_i 는 다음과 같이 덧셈으로 연산된다.

$$L_i = l^{ch} + \sum_{j \in N(V_i)} m_{j,i}^{C2V}$$

계층적 신뢰전파(layered BP: LBP) 복호는 BP복호와 달리, 계층별로 노드 연산을 진행하며 posteriori 메시지 L_i 와 C2V 메시지 $m_{j,i}^{C2V}$ 만을 저장해 V2C 메시지 $m_{i,j}^{V2C}$ 는 수식 (1)과 달리 아래 수식 (2)와 같이 연산하여 그때그때(on-the-fly) 얻는 복호 방식이다. 그림 1에서 두 복호 방식의 VN 연산 차이를 확인할 수 있다.

$$m_{i,j}^{V2C} = L_i - m_{j,i}^{C2V} \quad (2)$$

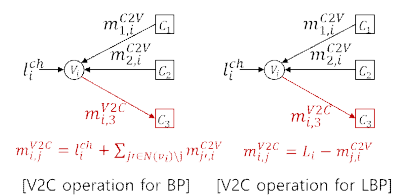


그림 1. BP와 LBP의 V2C 연산 차이

III. 검사 노드 연결성 크기에 따른 계층 스케줄링 방법

LBP 복호 시 메시지 교환에 따른 신뢰전파가 계층 별로 이루어지는데, LDPC부호의 각 계층은 그 연결성이 서로 다르므로 어떤 순서로 계층 연산을 수행하는 지에 따라 복호 성능이 달라진다. 각 CN에 연결된 VN의 개수 혹은 엣지(edge) 수를 차수(degree)라고 하는데, 차수는 메시지 전파의 정도를 의미한다. 즉, 더 큰 차수를 갖는 CN은 더 작은 차수를 갖는 CN보다 더 많은 변수노드에 메시지를 전파할 수

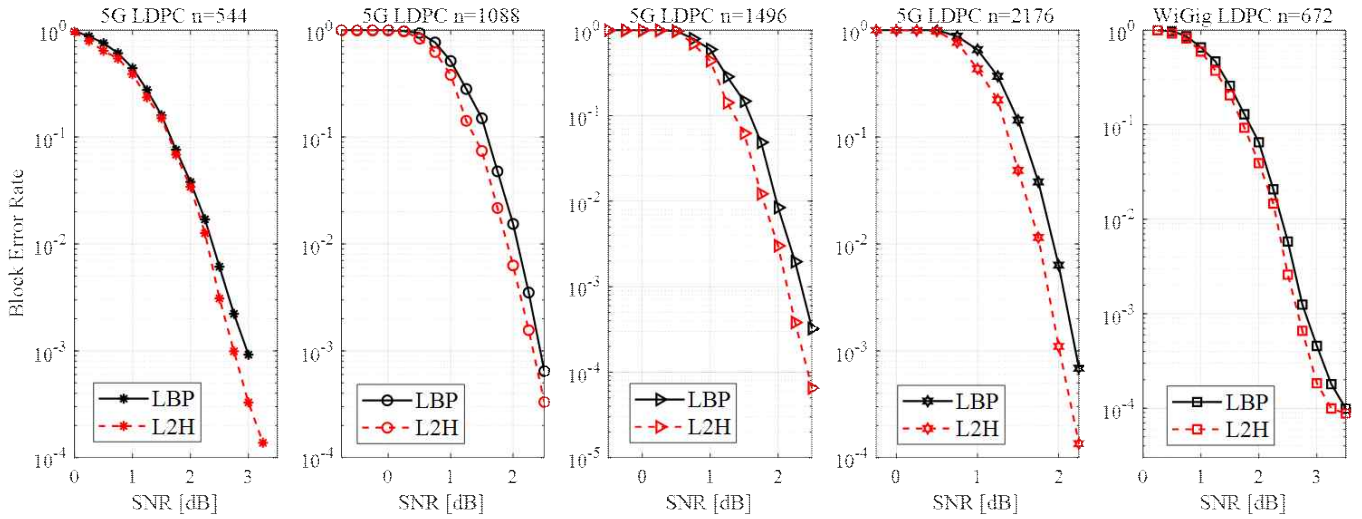


그림 3. 5G LDPC부호 및 WiGig LDPC부호에 L2H 스케줄링을 적용한 LBP 복호 성능 비교

있다. 또한 LBP 복호 시 BP복호 대비 적은 최대 반복복호 횟수 내에서 복호가 수행되므로, 적은 반복복호 횟수동안 효과적으로 메시지를 전달할 수 있어야 한다. 이에 Frenzel은 [5]에서 차수가 작은 계층(혹은 CN)에서 차수가 큰 계층 순서로 스케줄링하는 방식을 사용하여 각 반복의 후반에 더 많은 VN에 메시지를 전달하고 있다. 이 방식을 low-to-high(L2H) 스케줄링이라 한다. 아래 그림 2와 같이 차수의 크기가 낮은 CN부터 높은 CN 순으로 연산하는 과정이다.

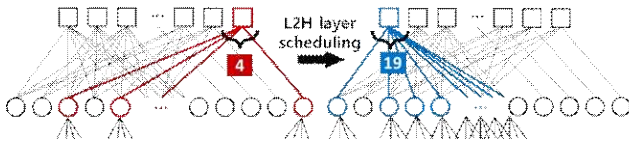


그림 2. 차수(degree) 오름차순의 계층 스케줄링 방법

기존의 LBP복호에서는 LDPC부호의 PCM H 내 계층 순서 그대로 스케줄링 되므로 L2H 스케줄링 시 CN 차수가 비정규(irregular)적인 LDPC부호들에서는 개선된 복호 성능을 예상할 수 있다. 예를 들면 5G LDPC부호 등이 있다.

IV. 모의 실험 결과 및 분석

본 절에서는 L2H 스케줄링을 적용한 LBP 복호 성능을 확인 및 분석한다. 우선, L2H 스케줄링은 CN 차수가 비정규적인 LDPC부호에 적용하여야 한다. 따라서 5G BG1(base graph) LDPC부호와 WiGig 부호의 LBP 복호 시 L2H 부호를 적용해 그 효과를 확인하였다. 최대 반복복호 횟수는 5회로 설정하였고, 부호율이 $R=0.324$, 부호 길이는 $n=544, 1088, 1496, 2176$ 인 5G LDPC부호, 그리고 부호율이 $R=0.5$ 이고 부호 길이가 $n=672$ 인 WiGig LDPC부호를 사용하였다. 그림 3에서 확인할 수 있듯 5G LDPC부호와 WiGig LDPC부호의 다양한 길이에서 기존의 PCM 그대로의 스케줄링이 아닌 L2H 스케줄링을 적용한 복호에서 더 우수한 성능을 가진다.

표 1. 5G LDPC부호와 WiGig LDPC부호의 차수 별 CN 개수

CN degree	3	4	5	6	7	8	9	10	19	Tot
5G BG1	1	5	18	3	5	2	2	1	4	46
WiGig	-	-	42	126	126	42	-	-	-	336

특히 5G BG1 LDPC부호에서는 L2H 스케줄링 적용 시 BLER = 10^{-3} 에서 최대 0.2 dB까지 개선되는데 이는 WiGig LDPC부호에서보다 큰 성능 개선이며 그 이유

를 표 1에서 유추할 수 있다. 표 1은 5G LDPC부호와 WiGig LDPC부호의 차수 별 CN 개수를 보이는데, 5G LDPC부호의 경우, 3, 4와 같은 작은 차수부터 10, 19와 같이 큰 차수가 다양하게 있다. L2H 스케줄링을 적용하지 않으면, 대체로 내림차순의 스케줄링이 기본 셋팅이므로 L2H 스케줄링 적용 시 그 효과가 크게 나타난다고 해석할 수 있다. WiGig LDPC부호의 경우에도 LBP 복호 시 차수의 내림차순으로 연산 되는 것이 해당 부호의 고유의 모양이나, L2H 스케줄링을 적용하면 5G LDPC부호에서의 효과보다는 적은 성능 개선을 보이나, 여전히 복호 성능이 개선됨을 확인하였다.

V. 결론

본 논문에서는 검사노드 연결성의 기본인 차수를 기준으로 오름차순한 계층 스케줄링 적용 시 복호 성능을 확인하였다. 5G LDPC부호와 WiGig LDPC부호에서 매 반복 초에 더 적은 메시지들을 우선 전달하고, 반복 후반에 더 많은 메시지들을 전달하는 것이 더 효과적인 복호 방법임을 확인하였다. 이에, 검사노드의 연결성을 추가적으로 고려하는 방법도 기대할 수 있다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2021년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원(No. 2021-0-00794, 3차원 공간 이동통신 기술 개발)과 한국연구재단(NRF-2021R1A2A2C1008913) 및 한국전자통신연구원(Tbps급 무선통신 기술 개발 사업의 위탁연구개발과제)의 지원의 받아 수행된 연구임

참 고 문 헌

- [1] ITU, IMT vision - framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond, ITU-R Rec. M.2083-0, Sept. 2015
- [2] D. J. Mackay and R. M. Neal, "Near Shannon limit performance of low density parity check codes," *Elec. Lett.*, vol. 33, no. 6, pp. 1645-1646, Jul. 1996
- [3] E. Yeo, P. Pakzad, B. Nikolic, and V. Anantharam, "High throughput low-density parity-check decoder architectures," in *Proc. IEEE GLOBECOM*, San Antonio, TX, USA, Nov. 2001, pp. 3019 - 3024.
- [4] M. Jang, K. Kim, S. Myung, H. Jeong, K. J. Kim, and S. H. Kim, "Design of layered decoding for QC-LDPC codes based on reciprocal channel approximation," in *Proc. IEEE ISIT*, pp. 554-559, June, 2022
- [5] J. Frenzel, S. Mueller, J. B. Huber, and R. R. Muller, "Static layered schedules and core-only parity check for the 5G New Radio LDPC codes," in *Proc. 12th Int. ITG Conf. Sys., Comm. and Coding*, pp. 1- 5, Mar., 1999.