

패리티 검사 극 부호와 CRC 연접 극 부호의 복호 성능 분석

주효상, 박지상, 김상호*

성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

{ johoo1120, js.p, iamshkim* }@skku.edu

On the Performance of Parity-Check Polar Codes and CRC-aided Polar Codes

Hyosang Ju, Jisang Park, Sang-Hyo Kim*

Department of Electronic, Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University

요약

5G 통신 시나리오 중 하나인 초고신뢰 저지연 통신(Ultra-Reliable Low-Latency Communications: URLLC)은 높은 신뢰도를 보장하기 위해 짧은 패킷의 저부호율 채널부호를 통한 데이터 전송을 고려한다. 극 부호는 짧은 길이에서의 우수한 복호 성능을 기반으로 URLLC용 채널 부호 후보로 주목받고 있다. 그 중에서도 CRC 연접 극 부호와 패리티 검사 극 부호가 대표적인데, 기존 연구에서는 URLLC 환경에 맞는 두 부호의 복호 성능 분석이 부재하다. 따라서 본 논문에서는 짧은 길이 및 저부호율에서 fine granularity 시뮬레이션을 통해 두 부호의 복호 성능을 비교 및 분석한다.

I. 서론

5G 통신 시나리오 중 하나인 고신뢰 저지연(Ultra-Reliable Low Latency Communication: URLLC) 시나리오는 긴급한 메시지들을 빠르게 송수신하기 위해 짧은 패킷의 데이터 전송, 그리고 고신뢰 전송을 위해 1/2 이하 저부호율의 채널부호를 통한 데이터 전송을 고려한다. 논문 [1]에서 처음 소개된 극 부호(polar codes)는 최근 5G 통신 eMBB (enhanced Mobile BroadBand) 시나리오를 위한 제어용 채널 부호로 채택됨과 동시에 짧은 길이에서의 우수한 오율 성능을 기반으로 URLLC용 채널부호 후보로도 주목받고 있다. 특히, 순환중복검사(cyclic redundancy check: CRC) 부호의 연접(CRC-aided: CA)을 통한 [3] 연속제거 리스트(successive cancellation list: SCL) 복호 [2]를 통해 짧은 정보블록 길이($K < 1000$)에서 저밀도 패리티 검사(low density parity check: LDPC) 부호 및 터보(turbo) 부호에 비해 최대 1dB까지의 성능 이득을 가진다 [4].

하지만, 기존의 CA-polar 부호는 CRC 부호가 정보블록 끝에 연접됨에 따라 복호 중간과정에서 올바른 복호경로를 선택하도록 돕는 역할을 수행할 수 없다. 이에 논문 [4]에서는 복호 중간 과정에 패리티 비트들을 추가하여 올바른 복호경로를 선택하도록 도움과 동시에 거리 스펙트럼을 개선하는 패리티 검사(parity-check: PC) 극 부호를 제안하였다. 이를 통해 $L=8$ 에서 CA-polar 부호 대비 0.2dB에서 1dB까지의 성능이득을 가짐을 확인하였다. 하지만 기존 연구의 경우 URLLC 시나리오 환경에 맞는 저부호율 영역에서의 성능 분석 및 다양한 리스트 크기에서의 PC-polar 및 CA-Polar 부호의 복호 성능에 대한 분석이 부재하다. 이에 본 논문에서는 fine-granularity 시뮬레이션을 통해 짧은 길이 및 저부호율 영역에서 다양한 리스트 크기에 대해 두 부호의 복호 성능을 비교 및 분석한다.

II. CRC 연접 극 부호와 패리티 검사 극 부호 소개

(1) 극 부호 소개

극 부호는 낮은 부, 복호 복잡도로 채널용량을 달성하는 것이 증명된 최초의 오류정정부호이다. 채널 양극화(channel polarization)에 기반하여 채널용량 관점에서 매우 통신하기에 적합한 비트채널들과 그렇지 못한 채널들을 얻어내며, 전체 N 개의 비트채널들 중 신뢰도가 높은 K 개를 선택하는 과정을 ‘부호 설계(code construction)’라 한다. 대표적 부호 설계

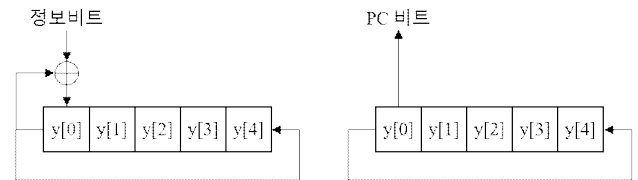


그림 1. CSR 기반의 PC 프리코딩 (좌: 정보비트, 우: PC비트)

방법으로 밀도 진화(density evolution), 가우시안 근사(Gaussian approximation), 양극화 가중치(polarization weight: PW) [5] 등이 존재하며, 본 논문에서는 PW 방법 기반의 부호율 호환(rate-compatible) 시퀀스를 사용한다 [5].

(2) CRC 연접(CRC-aided: CA) 극 부호

논문 [1]에서 제안된 극 부호는 $O(M \log N)$ 의 비교적 낮은 복잡도를 가지는 SC 복호를 사용하였으나, 짧은 길이에서 LDPC나 터보 부호에 비해 매우 저하된 복호 성능을 가졌다. 이에 논문 [2]에서는 각 비트의 복호 시 L 개의 복호 경로들을 고려하는 SCL 복호를 제안하여 오율 성능을 개선하였다. 이 때 경로 메트릭(path metric: PM)이 복호 경로를 선택하는 신뢰도 메트릭으로 활용된다. 더 나아가 [3]에서는 극 부호에 CRC 부호를 외부부호로 연접하여 부호화한 후, 복호 시에 SCL 복호 및 CRC 검사를 통해 가장 낮은 PM을 가지는 복호 경로를 선택하는 방법을 제안하였다. 이를 통해 기존 SCL 복호의 오류마루(error floor) 문제를 해결하고, 최소 거리 확장효과를 통해 복호성능을 더욱 개선하였다.

(3) 패리티 검사(parity-check: PC) 극 부호

PC 극 부호는 논문 [4]에서 제시한 프레임워크로, 순환 쉬프트 레지스터(cyclic shift register: CSR) 기반의 간단한 PC 프리코딩(pre-coding)을 통해 PC비트들을 정보블록 사이에 배치하고, 복호 중간과정에서 올바른 경로를 선택할 수 있도록 도와주는 방법이다. 이 때 PC 프리코딩의 입력인 소스벡터는 고정비트, PC비트, 정보비트로 구성되며, 상태(state)에 따라 그림 1의 CSR 기반 프리코딩이 이루어진다 (길이 $p=5$). PC 비트들은 p 값에 따라 각 비트 인덱스의 modulo- p 에 해당하는 모든 이전 정보비트들의 조합으로 결정되며, 해당 비트들이 복호 중간 과정에서 PM을 조정해 주는 효과를 통해 $L=8$ 의 경우 기존 CA 극 부호 대비 약 0.2-1.0dB

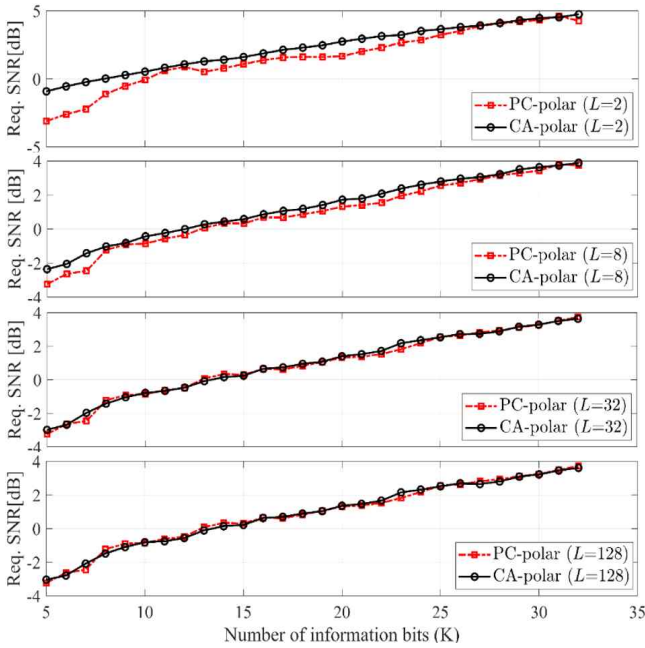


그림 2. 리스트 크기에 따른 PC 극 부호와 CA 극 부호의 복호성능 비교 ($N=64$)

의 성능 이득을 가진다 [4].

III. 모의실험

기존 연구에서는 URLLC 시나리오의 요구사항인 짧은 길이 저부호율 영역에서의 PC 극 부호 및 CA 극 부호의 복호 성능 분석이 분석된 바 없다. 더 나아가 $L=8$ 에 대한 기존의 실험결과 이외에 고신뢰 통신을 보장하기 위한 큰 크기의 L 에 대한 실험결과와 역시 제시되지 않았다. 이에 본 연구에서는 $1/2$ 이하의 저부호율 영역에서 다양한 리스트 크기에 따른 두 부호의 복호 성능을 비교, 분석한다.

모의실험에는 QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) 변조 및 AWGN (Additive White Gaussian Noise) 채널을 가정하였고, $N=64, 128$ 과 $1/2$ 이하의 부호율 영역을 고려하였다. 또한, 리스트 크기 $L=2, 8, 32, 128$ 을 적용하여 오율 성능 경향성을 확인하고, CA 극 부호는 CRC-6을, PC 극 부호는 CRC를 적용하지 않았다. 부호설계는 5G 표준 부호로 채택된 PW 기반 부호 시퀀스를 사용하였다 [5]. 그림 2와 3은 리스트 크기에 따라 블록오율(block error rate: BLER) 10^{-3} 을 달성하는 부호 별 요구 SNR[dB]를 나타낸 것으로, 값이 낮을수록 복호 성능이 우수하다.

그림 2는 $N=64$ 에서 다양한 리스트 크기에 대해 CA 극 부호와 PC 극 부호의 복호 성능을 나타낸 것이다. 비교적 작은 리스트 크기($L=2, 8$)의 경우 낮은 부호율 영역에서 CRC 부호로 인한 부호율 손실(rate-loss)로 말미암아 PC 극 부호 대비 복호 성능이 매우 저하됨을 확인할 수 있다. 하지만 리스트 크기가 커짐에 따라 ($L=32, 128$) CRC 부호가 연결되지 않은 PC 극 부호는 성능 포화가 일어나게 되는 반면, CA 극 부호는 CRC 부호의 도움을 통해 복호 성능 이득을 더 얻게 된다. 이에 따라 전체 28개의 실험 파라미터 중 $L=32$ 의 경우 12개, $L=128$ 의 경우 17개에서 PC 극 부호보다 우수한 복호 성능을 가진다.

그림 3은 $N=128$ 에서 리스트 크기에 따른 복호 성능을 나타낸 것이다. 그림 2의 결과와 유사하게, CA 극 부호는 저부호율에서 부호율 손실로 인한 성능 손실이 $L=2, 8$ 에서 뚜렷하게 나타남을 알 수 있다. 하지만 L 이 커짐에 따라 PC 극 부호 대비 상대적으로 CA 극 부호의 복호성능 개선 폭이 더 커 일부 부호 파라미터에서 우수한 성능을 가진다.

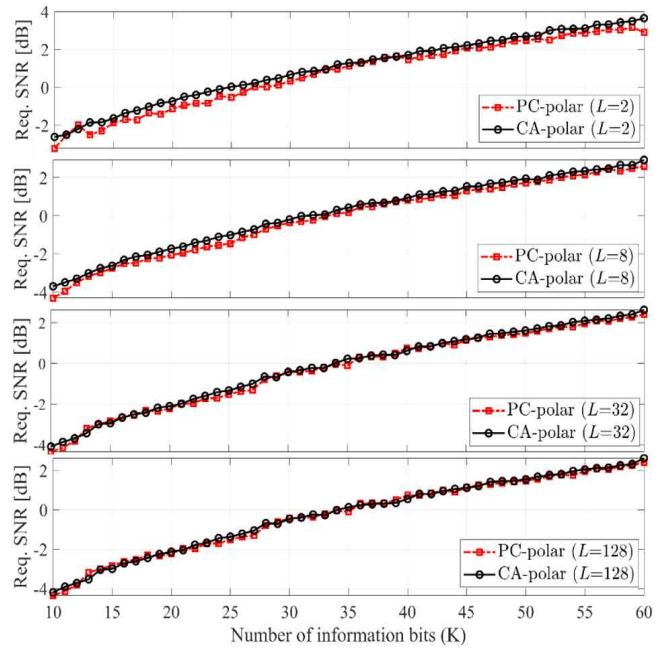


그림 3. 리스트 크기에 따른 PC 극 부호와 CA 극 부호의 복호성능 비교 ($N=128$)

IV. 결론

본 논문에서는 저부호율 영역에서 다양한 리스트 크기에 대해 CA 극 부호와 PC 극 부호의 복호 성능을 비교하였다. PC 극 부호는 복호 중간과정에서 이전 몇몇 정보비트들의 조합으로 구성된 PC 고정비트들이 거리스펙트럼을 개선하고, 올바른 복호 경로를 포함할 수 있도록 도와주는 효과를 말미암아 전반적인 영역에서 CA 극 부호에 비해 우수한 복호 성능을 가짐을 확인하였다. 하지만, CRC 부호가 연결되지 않은 PC 극 부호는 리스트 크기가 증가함에 따라 복호 성능 포화(saturation)가 일어나게 되고, 비교적 낮은 리스트 크기($L=2, 8$)에서의 성능 이득이 비교적 큰 리스트 크기($L=32, 128$)에서는 확연히 줄어들음을 알 수 있다. 따라서, 추후 연구로는 CRC 부호와 패리티 부호의 연결 부호 최적화 설계를 통한 큰 크기 리스트에서의 성능 이득 추구 및 덤핑 기반의 패리티 부호 위치 최적화를 통한 성능 개선 등을 고려해볼 수 있다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 글로벌박사양성사업임 (NRF-2018H1A2A1062163)

참고 문헌

- [1] E. Arıkan, "Channel Polarization: A method for Constructing Capacity-Achieving Codes for Symmetric Binary-Input Memoryless Channels," *IEEE Trans. Inf. Theory*, July 2009.
- [2] I. Tal, A. Vardy, "List Decoding of Polar Codes," in *Proc. IEEE Int. Symp. Inf. Theory (ISIT)*, pp. 1-5, 2011.
- [3] K. Niu and K. Chen, "CRC-Aided Decoding of Polar Codes," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 16, issues: 10, Oct. 2012, pp. 1668-1671.
- [4] H. Zhang et al, "Parity-Check Polar Coding for 5G and Beyond," in *Proc. 2018 IEEE Int. Conf. on Commun. (ICC)*, May 2018.
- [5] 3GPP, NR: Multiplexing and channel coding, 3GPP TS 38.212, v 15.5.0, Mar. 2019.