

# 저전력 통신을 위한 양자화 극부호 복호 기술 동향 조사

이상윤, 주효상, 김상호\*  
성균관대학교

iamshkim@skku.edu\*

## A survey on Quantized Polar Decoders for Low-Power 6G Communications

Sang-Yoon Lee, Hyosang Ju, Sang-Hyo Kim  
Sungkyunkwan Univ.

### 요약

데이터 송수신량이 폭증함에 따라 기존 5G가 감당할 수 없는 처리량에 도달했으며, 데이터의 포화상태에 이르렀다. 따라서, 높은 주파수 대역에서의 통신을 통해 향상된 데이터 처리량을 달성할 수 있는 기술 개발이 필수적이지만, 초고주파 대역에서는 전력 소비량, 하드웨어 복잡도, 시스템 구축 비용의 증가가 불가피하다. 본 논문에서는 전력 소비 증가에 대한 해결 방안인 초고주파 대역 통신을 위한 저전력 극 부호 설계 및 복호 기술에 대해 소개하고, 해당 기술의 연구 동향과 추후 연구 방향에 대해 살펴본다.

### I. 서론

Arikan에 의해 제안된 극 부호(polar codes)는 낮은 복잡도로 부호길이가 길어짐에 따라 증명적으로 채널 용량을 달성할 수 있는 최초의 오류정정부호이다[1]. 그러나, 중간 혹은 짧은 부호 길이를 가질 때의 연속 제거(successive cancellation: SC) 복호 성능은 LDPC(Low-density parity check) 부호나 터보 부호에 비해 떨어졌지만, 이후 개발된 연속 제거 리스트(successive cancellation list: SCL) 복호 방법으로 복호 성능을 개선 방법을 제시하기도 했다[2]. 이러한 특징을 가진 극 부호는 2016년 11월, 5G 표준의 상향링크 제어 채널을 위한 오류정정부호로 채택되었으며, 신뢰도 높은 통신을 가능케 했다.

한편, 2019년 5G 통신이 상용화된 이래로, 폭증하는 데이터 전송량을 충족시키기 위해 기존 5G의 밀리미터파 대역(3GHz ~ 30GHz)을 넘어 6G 통신의 실현을 위한 필수적 기술인 테라헤르츠 대역(30GHz ~ 3THz)의 초고주파 통신 기술이 최근 주목받고 있다. 초고주파 통신 기술 실현 시 6G 기술의 필수 요구 조건인 초고속(최대 전송률: 1Tbps), 초저지연(무선구간지연: ~ 1ms, 유선구간지연: ~ 수 ms), 초저전력 통신을 달성할 수 있다. 극 부호는 높은 처리량 달성이 가능하고, 양자화 환경에서도 어느 정도 복호 성능의 강건성이 입증되어 차세대 초고주파 통신을 위한 적합한 오류정정부호 중 하나가 될 수 있다[3].

그러나, 초고주파 대역 통신 시 전력 소비량, 하드웨어 복잡도, 시스템 구축 비용 등이 크게 증가한다[4]. 특히, ADC(Analog to Digital Converter), DAC(Digital to Analog Converter)에서 전력 소모가 두드러진다. 이에, 초고주파 대역에서 초고속, 초저지연, 초저전력 통신을 위한 채널 양자화 기법이 고려되었고, 이와 동시에 양자화를 위한 부호 설계 기술이 필요하다[5-8]. 하지만, 양자화를 겪은 LLR이 복호기로 전달되어 비트 추정과 리스트 관리 성능 저하로 이어졌으며 이는 곧 복호 성능의 저하로 이어졌다. 본 논문에서는 이러한 성능 저하를 방지하고, 초고주파 대역에서 저전력 통신이 가능케 하는 기술의 동향을 소개하고, 추후 이뤄질 연구 방향에 대

해 살펴보고자 한다.

### II. 극부호를 위한 양자화 복호 기술 소개[5-8]

초고주파 대역 통신을 달성하기 위해서는 기존의 부호 설계 방법을 채택할 경우 높은 전력 소비를 피하기 어렵다. 특히, 상향링크에서의 ADC의 전력 소모량은 해상도 비트(resolution bits) 수 증가에 따라 기하급수적으로 증가하며, 최신의 컨버터로도 일정 수준 이상의 전력 소모는 불가피한 상황이다[4]. 따라서, 초저전력 통신을 위해선 양자화 기술의 적용이 필수적이며, 본 절에서는 제안된 몇 가지 양자화 복호 기술을 소개하고자 한다. 첫 번째로는 SC 복호에서 서로 다른 양자화 비트 수에 따른 복호 기술이다[5]. SC 복호기가 계산한 모든 LLR 값에 대해 절단 임계 값( $M = \frac{L\Delta}{2}$ ,  $L$ : 양자화 레벨,  $\Delta$ : 양자화 스텝 크기) 범위 내에 정의된 양자화 함수  $Q(x)$ 를 적용시켜 양자화 함으로써 저전력 복호를 위한 양자화 방법을 제시했으며, 6비트 양자화 시 부동 소수점(floating-point) 기반으로 LLR 업데이트를 수행하는 SC 복호기에 근접하는 성능을 도출했다[5].

$$Q(x) = \begin{cases} \left(\frac{x}{\Delta} + \frac{1}{2}\right)\Delta, & x \in [-M, M] \\ \text{sign}(x)\left(M - \frac{\Delta}{2}\right), & \text{otherwise} \end{cases}$$

한편, 논문 [6]에서는 SC 복호 시 계산된 로그 우도 비(LLR)를 3 단계의 특정 값으로 균일하게 양자화 하는 매우 성긴(coarse) 수준의 양자화 환경을 고려하였다. 양자화 임계 값을 설정하고 임계 값을 기준으로 로그 우도 비 값( $\lambda_{ch}$ )을  $\{-1, 0, 1\}$  중 하나로 양자화 한다. 밀도진화(density evolution) 방법[9]을 이용해 설계한 극 부호를 기준으로 이진 입력 백색 가우시안(BiAWGN) 채널에서 부호 길이  $N \in \{128, 256\}$ 일 때 로그 우도 비 값의 양자화 유무에 따른 성능 저하 정도를 관찰했고, 부동소수점 구현 대비 FER= $10^{-3}$  달성을 위한 요구 SNR[dB] 기준 약 1.2dB의 큰 성능 저하가 발생하였다.

한편, SCL 복호의 경우에도 양자화에 따른 성능 저하가 관찰되었으며, 부호 길이  $N = 256$ , 리스트 크기  $L = 32$ 일 때 약 1.1dB 성능 저하가 발생한다. 또한 RM(Reed-Muller) 기반의

다른 부호 설계 방법에 대해서도 성긴 양자화에 따른 성능 저하가 관찰되며, 부호 길이  $N = 256$ , 리스트 크기  $L = 128$  일 때 약 1.9dB 성능 저하가 발생한다. 이에 논문 [6]에서는 SCL 복호기의 후보 경로 선택을 위한 개선된 2가지 종류의 메트릭을 새롭게 제안하였으나, 여전히 균일한 양자화 환경에서의 성능 저하가 뚜렷했다. 이를 극복하기 위해 비균일 양자화 방법이 제시되었으며[7], 앞서 제시된 균일 양자화 방법에 압축 함수  $f(x)$ 를 도입해 비선형적으로 압축하고, 압축 함수를 균일 양자화에서 정의된 양자화 함수  $Q(x)$ 의 입력으로 전달받아 균일 양자화를 수행한다. 이를 통해 요구 양자화 비트 수를 줄이며 성능 향상에 기여했다. 또한 극 부호의 CRC(cyclic redundancy check) aided SCL 복호기를 통해 로그 우도 비값 계산을 위한 메모리 자원 절약에도 기여했다. 마지막으로, 계산된 LLR 값을 수 개의 빈(bin)으로 나뉘, 각 빈에 서로 다른 양자화 비트를 할당하는 가변적 양자화 기반의 복호기도 제안되었다[8].

### III. 결론

본 논문에서는 초고주파 대역에서의 저전력 통신을 위한 다양한 기술을 제시하고, 각 기술의 연구 동향에 대해 소개하였다. 또한, 제안된 기술들이 직면한 다양한 한계점과 이를 극복할 대안책과 연구 방안을 제시하였다. 제시된 기술 및 한계들을 기반으로 추가적인 연구를 통해 발전시킬 필요가 있으며 특히, 테라헤르츠 대역에서의 초저전력 통신 관련 기술들은 가까운 미래에 차세대 통신 표준 연구 및 부호 설계 기반 기술로 활용될 수 있을 것이다. 추후 연구 방안으로는 다양한 부호 길이 및 부호율에 대해 우수한 성능을 갖는 저전력 복호기 연구, 기계학습 기반의 저전력 복호 알고리즘 연구 등이 있을 것이다.

### ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2021년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2021R1A2C1008913) 및 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2022R1A4A1033830).

### 참고 문헌

- [1] E. Arikan, "Channel Polarization: A Method for Constructing Capacity-Achieving Codes for Symmetric Binary-Input Memoryless Channels," in *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 55, no. 7, pp. 3051-3073, July 2009
- [2] I. Tal and A. Vardy, "List decoding of polar codes," 2011 *IEEE International Symposium on Information Theory Proceedings*, St. Petersburg, Russia, 2011, pp. 1-5
- [3] S.H. Hassani, R. Urbanke, "Polar Codes: Robustness of the Successive Cancellation Decoder of Polar Codes," in *Proc. 2014 IEEE 25th Annual Int. Symp. On Personal, Indoor, and Mobile Radio Communication (PIMRC)*, Sep. 2014.
- [4] H. Saeed, M. -S. Alouini and T. Y. Al-Naffouri, "An Overview of Signal Processing Techniques for Terahertz Communications," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 109, no. 10, pp. 1628-1665, Oct. 2021
- [5] Z. Shi and K. Niu, "On uniform quantization for successive cancellation decoder of polar codes," 2014 *IEEE 25th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communication (PIMRC)*, Washington, DC, USA, 2014, pp. 545-549
- [6] J. Neu, M. C. Coşkun and G. Liva, "Ternary Quantized Polar Code Decoders: Analysis and Design," 2019 *53rd Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers*, Pacific Grove, CA, USA, 2019, pp. 1724-1728
- [7] Y. Dong, K. Niu and C. Dong, "Non-Uniform Quantization of Successive Cancellation List Decoder for Polar Codes," 2020 *IEEE 31st Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, London, UK, 2020
- [8] M. Farooq, H. Hameed, M. Usman and U. U. Fayyaz, "Variable Quantization for Memory-Efficient Successive Cancellation Decoding of Polar Codes - A Heuristic Approach," 2020 *IEEE 31st Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, London, UK, 2020
- [9] R. Mori and T. Tanaka, "Performance and construction of polar codes on symmetric binary-input memoryless channels," 2009 *IEEE International Symposium on Information Theory*, Seoul, Korea (South), 2009, pp. 1496-1500