

극 부호를 위한 효율적인 조기 중단 기법

박지상, 주효상, 조은영, 김상호*

성균관대학교 전기전자컴퓨터공학과

{ js.p, johoo1120, airis1994, iamshkim* }@skku.edu

An Efficient Early Termination Scheme for Polar Codes

Jisang Park, Hyosang Ju, Eunyoung Cho and Sang-Hyo Kim*

Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University

요약

본 논문에서는 채널 부호가 적용된 무선 통신 환경에서, 잡음을 수신 신호로 오인 및 복호에 성공하는 오경보(false alarm: FA) 발생을 줄이기 위한 조기 중단(early termination) 기법을 제안한다. 그 중에서도 극 부호 복호 과정에서 얻어지는 경로 메트릭들로 구성된 중단 메트릭 기반의 조기 중단 기법을 고려한다. 실험 결과, 제안하는 중단 메트릭이 기존 기법에 비해 더 낮은 오류 손실을 가지고 효과적으로 FA를 제거함을 확인하였다.

I. 서론

무선 통신 uplink 시나리오에서 기지국(base station)이 사용자 단말(user equipment)에 신호 전송을 요청 시, 사용자 단말은 응답 신호를 보낸다. 이에 대해 기지국은 응답 신호를 수신하였는지 잡음을 수신하였는지 구분하는 가설 검정(hypothesis test)을 진행한다. 만일 잡음을 수신한 상황에서 신호 수신으로 오인 시 시스템 오동작이 발생할 수 있다. 특히 채널 부호를 활용한 통신에서 신호로 오인한 잡음에 대해 복호 성공하는 경우 오경보(false alarm: FA)가 발생한다.

채널 부호의 한 종류인 극 부호는 5G 초광대역 통신(enhanced mobile broadband: eMBB) 시나리오를 위한 컨트롤 채널 부호로 채택됨에 따라 더욱 주목받고 있다. 복호 방법으로 연속 제거(successive cancellation: SC) 복호가 가장 먼저 제안되었으며 [1], 이후 성능을 개선한 SC-list (SCL) 복호 [2] 및 순환중복검사(cyclic redundancy check: CRC) 부호가 연결된 SCL (CRC-aided SCL: CA-SCL) 복호 [3]가 제안되었다. SC 및 SCL 복호의 경우 복호 특성 상 수신 부호어의 추정 결과가 유효한지 확인할 수 없어 FA rate (FAR) 저감이 불가능하다. 반면 복호 마지막 단계에서 CRC 검사를 통해 추정 부호어의 유효성을 검증하는 CA-SCL 복호 적용 시 FAR을 저감할 수는 있으나, 여전히 제한적인 길이의 CRC 사용으로 인해 잔여 FA가 존재한다.

3GPP (3rd Generation Partnership Project) 기술 보고서 [4]에서는 CA-SCL 복호 기반의 수신기에서 신호로 오인한 잡음의 복호 시, 복호 중간 단계에서 중단 메트릭(pruning metric)이 미리 결정된 임계값보다 낮은 경우 복호를 조기 중단(early termination)하여 복호 실패로 판단하는 기법을 제안하였다. 중단 메트릭은 각 비트의 복호 시 얻어지는 L 개의 경로 메트릭(path metric: PM)들 중 일부로 구성되는 메트릭이다. 조기 중단 적용 시 FAR을 저감할 수 있으며, 중단 메트릭에 대한 임계값이 커짐에 따라 FAR 감소율이 증가한다. 하지만 조기 중단 적용 전 복호에 성공했던 신호 중 일부가 복호 실패로 판단되면서 블록 오류(block error rate: BLER) 성능이 저하될 수 있다. 이를 missed detection으로 정의하며, FAR과 missed detection ratio는 상호 절충(trade-off) 관계에 있다. 본 논문에서는 조기 중단 시 FAR과 FAR 개선에 요구되는 SNR의 관점에서, 제안하는 중단 메트릭이 기존의 중단 메트릭 [4]에 비해 전반적으로 적은 성능 손실을 가지며 높은 FA 제거율을 가짐을 확인하였다.

II. 극 부호 소개 및 극 부호를 위한 조기 중단 기법

A. 극 부호

극 부호는 채널 합성 및 분리로 구성된 채널 양극화(channel polarization) 과정을 이용하여 설계된 채널 부호이다 [1]. 동일한 N 개 채널에 대해 채널 양극화 시 서로 다른 채널용량을 가지는 N 개의 비트 채널이 얻어진다. 이 때 채널용량이 높은 K 개의 비트채널에 메시지를, 나머지는 고정비트(frozen bit)를 전송하며 이를 (N, K) 극 부호라 한다. SC 복호는 소스 벡터 $u_1^N = (u_1, u_2, \dots, u_N)$ 의 각 비트를 u_1 부터 u_N 까지 순차적으로 추정하며, i 번째 비트 추정 시 수신 벡터 $y_1^N = (y_1, y_2, \dots, y_N)$ 과 전송 부호의 첫 번째부터 $(i-1)$ 번째 비트까지의 추정 벡터 $\hat{u}_1^{i-1} = (\hat{u}_1, \hat{u}_2, \dots, \hat{u}_{i-1})$ 을 참고한다. 이 때 고정비트는 일반적으로 0, 메시지 비트는 0과 1의 경로 중 우도(likelihood)가 높은 경로를 고른다. SCL 복호는 SC 복호와 달리 i 번째 비트 추정 단계에서 추정 가능한 모든 복호 경로를 확보하여, 가장 신뢰도가 높은 것부터 L 개를 추려낸다 [2]. 각 복호 경로는 경로 인덱스 $l \in \{1, 2, \dots, L\}$ 로 구분하며, 최종 복호 결과는 마지막 N 번째 비트의 복호 시 생존한 L 개 경로 중에서 가장 신뢰도가 높은 것으로 한다. 이 때, 복호 후보들의 신뢰도 판단을 위해 PM을 활용한다 [5]. PM은 각 복호 경로들에 대한 누적 페널티로 식 (1)과 같이 표현되며, 이 때 $\hat{u}_i[l]$ 와 $\alpha_i[l]$ 은 각각 i 번째 비트의 복호 시 l 번째 복호 경로에 대한 추정 비트값과 로그 우도 비(log-likelihood ratio: LLR)를 의미한다. 높은 신뢰도를 가지는 복호 경로일수록 PM이 낮다.

$$PM_l^{(i)} = \sum_{j=1}^i \ln(1 + e^{-(1-2\hat{u}_j[l])\alpha_j[l]}) \quad (1)$$

CA-SCL 복호는 CRC와 연결한 극 부호를 복호하기 위한 기법이며, SCL 복호의 최종 L 개 후보들에 대해 신뢰도가 높은 것부터 CRC 검사를 진행하여 가장 먼저 통과한 후보를 복호 결과로 선택한다 [3].

B. 중단 메트릭 기반의 조기 중단 기법

극 부호 복호의 조기 중단 기법은 CA-SCL 복호의 중간 단계에서 확보한 L 개 후보들에 대해, L 개의 PM으로부터 계산된 중단 메트릭이 임계값보다 작은 경우 복호를 중단한다. 즉, 매 중간 복호과정에서 중단 메트릭

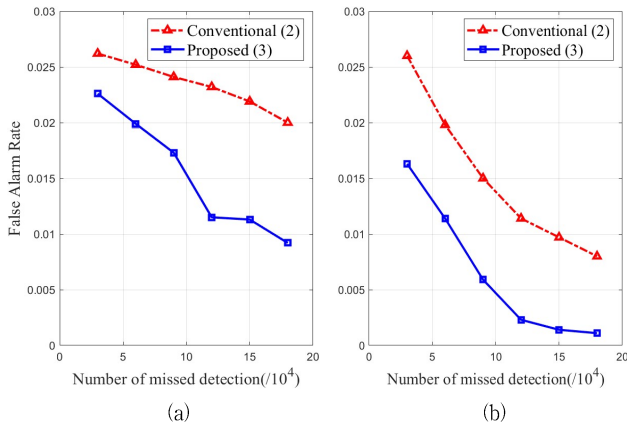


그림 1. (a) (128,43), (b) (128,64) 극 부호에서 중단 메트릭 별 missed detection 수에 따른 FAR

표 1. 목표 BLER= 10^{-3} 에서 missed detection 수에 따른 중단 메트릭의 임계값

복호 실패 신호 수 (10^4)	$K=43$		$K=64$	
	metric (2)	metric (3)	metric (2)	metric (3)
3	0.0504	0.3999	0.0675	0.3083
6	0.0527	0.4563	0.0848	0.3536
9	0.0571	0.4845	0.0950	0.4276
12	0.0603	0.5657	0.1053	0.5047
15	0.0647	0.5678	0.1109	0.5529
18	0.0679	0.5980	0.1155	0.5715

$$\text{Metric [4]} : \frac{\max\{PM_l^{(i)}\} - \min\{PM_l^{(i)}\}}{\min\{PM_l^{(i)}\}}, l \in \{1, \dots, L\} \quad (2)$$

$$\text{Proposed} : \max\left\{\frac{PM_l^{(i)} - PM_{l-1}^{(i)}}{\sqrt{SNR}}\right\}, l \in \{2, \dots, L\} \quad (3)$$

값과 임계값을 비교하는 작업을 수행한다. 본 논문에서 제안한 중단 메트릭은 L 개 후보들을 PM의 크기 오름차순으로 정렬 후, 식 (3)을 계산한 결과로 정의한다. PM은 각 복호 경로에 누적된 LLR 기반의 페널티이므로, 신호 전력 크기에 영향을 받는다. 따라서 (2), (3)에서와 같이 \sqrt{SNR} 에 비례하는 값으로 나누어 SNR 변화에도 값이 일정하게 한다.

III. 모의실험

본 논문에서는 $N=128$, 부호율 $1/3$ ($K=43$), $1/2$ ($K=64$)의 경우에 대해 중단 메트릭 (2), (3) 적용 시 FAR 및 FAR 개선에 따른 SNR 손실을 관찰하였다. Additive white Gaussian noise 채널 환경에서 quadratic phase shift keying 변조를 적용하였고, CRC-8과 연결한 극 부호를 $L=8$ 에서 CA-SCL 복호하였다. 조기 중단을 위한 임계값은 표 1과 같이 목표 BLER= 10^{-3} 근처에서 조기 중단으로 복호 실패한 신호의 비율에 따라 경험적으로 결정하였다. 또한, 빨강색 점선과 파랑색 실선은 각각 (2), (3)의 중단 메트릭을 적용한 경우의 성능을 나타낸다.

그림 1은 (2), (3)의 중단 메트릭 기반의 조기 중단 적용 시 FAR을 나타내었다. (128,43) 및 (128,64) 부호 모두 제안 기법이 기존 기법에 비해 개선된 FAR을 얻을 수 있다. x 축은 목표 BLER에서의 missed detection 수이며, 복호 실패로 판단되는 횟수가 늘어남에 따라 성능 손실이 발생한다. 제안 기법의 중단 메트릭 적용 시, 기존 pruning metric에 비해 FA 제거 비율이 전반적으로 높음을 확인할 수 있다.

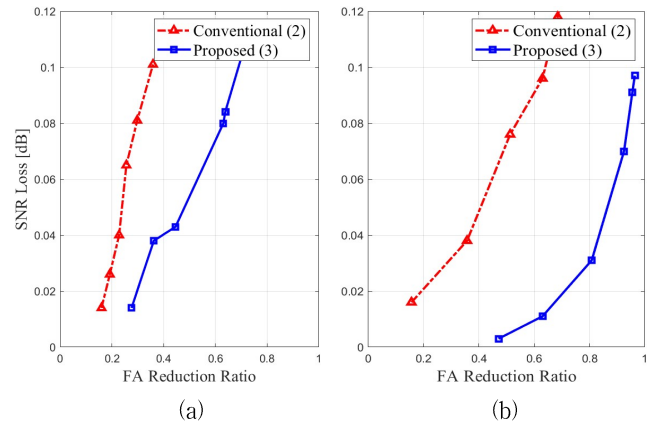


그림 2. 중단 메트릭에 따른 (a) (128,43), (b) (128,64) 극 부호에서 기준 성능 대비 오율 손실 및 FA 저감 비율

그림 2에서는 표 1에 나열된 임계값 순으로 FA 감소율과 그에 요구되는 SNR의 증가량을 나타내었다. 목표 BLER= 10^{-3} 에 도달하기 위해 SNR 손실을 0.05dB까지 허용 시, 제안한 기법이 기존 기법에 비해 (128,43), (128,64) 부호에서 각각 약 25%p, 45%p만큼 더 높은 FAR 저감율을 가질 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 채널 부호가 적용된 무선통신 환경에서 발생할 수 있는 오정보 문제를 소개하고, 이를 해결하기 위한 효율적인 조기 중단 기법을 제시하였다. 이 때, 조기 중단을 결정하기 위해 사용되는 중단 메트릭은 극 부호의 복호 과정에서 얻어지는 경로 메트릭들을 기반으로 구성된다. 실험 결과, 제안하는 중단 메트릭이 기존 기법에 비해 더 낮은 오율 손실로 높은 FAR 저감율을 가짐을 확인하였다. 하지만 제안 기법이 채널의 SNR 정보를 이용하므로, 향후 연구로는 채널 추정 오차가 발생하는 환경에서 제안 중단 메트릭의 강건성(robustness)을 분석할 필요가 있다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2018R1A2B6004195) 및 글로벌 박사양성사업임(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*, vol. 55, no. 7, pp. 3051-3073, Jun. 2009.
- [2] I. Tal and A. Vardy, "List Decoding of Polar Codes," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 61, no. 5, pp. 2213-2226, Mar. 2015.
- [3] K. Niu, and K. Chen, "CRC-Aided Decoding of Polar Codes," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 16, no. 10, pp. 1668-1671, Sep. 2012.
- [4] R1-1709176, Qualcomm Incorporated, "Early Termination for Polar codes," *3GPP TSG RAN WGI #89*, Hangzhou, China, 15-19th, May 2017.
- [5] A. B. Stimming, M. B. Parizi, and A. Burg, "LLR-Based Successive Cancellation List Decoding of Polar Codes," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 63, no. 19, pp. 5165-5179, Jun. 2015.