

# 낮은 복잡도의 극 부호 연속 제거 리스트 플립 복호기

고영준, 백성열, 김서영, 오왕록

충남대학교

koy565900@o.cnu.ac.kr, syback@o.cnu.ac.kr, sky2622@o.cnu.ac.kr, kingrock@cnu.ac.kr

## Low Complexity Successive Cancellation List Flip Decoder for Polar Codes

Ko Youngjun, Sungyeol Back, Seoyoung Kim and Wangrok Oh

Chungnam National Univ.

### 요약

극 부호는 이진 입력 이산 무기억 채널에서 연속 제거 복호를 통해 샤넌 채널 용량을 달성할 수 있음이 증명된 오류 정정 부호이다. 그러나 연속 제거 복호는 오류 전파로 인해 복호 성능이 열화될 수 있으며, 이를 개선하기 위해 연속 제거 리스트 복호 및 순환중복 검사를 이용한 연속 제거 리스트 복호가 제안되었다. 순환 중복 검사 연속 제거 리스트 복호는 복호 과정에서 올바른 경로가 리스트에서 제거될 경우 복구가 어렵다는 한계를 가진다. 이를 보완하기 위해 순환 중복 검사 실패 시 플립을 통해 복호를 재수행하는 연속 제거 리스트 플립 기법이 제안되었으나, 반복 복호로 인해 연산 복잡도가 증가하는 문제가 있다. 본 논문에서는 이러한 복잡도 증가 문제를 개선하기 위한 낮은 복잡도의 연속 제거 리스트 플립 복호 기법을 제안하고 전산 실험을 통해 제안하는 기법이 성능 열화 없이 복잡도를 개선할 수 있음을 보인다.

### I. 서론

극 부호 (polar codes)는 이진 입력 이산 무기억 채널 (binary input discrete memoryless channel, BI-DMC)에서 낮은 복잡도의 연속 제거 (successive cancellation, SC) 복호 기법을 통해 샤넌 (Shannon)의 채널 용량을 달성할 수 있음이 증명된 오류 정정 부호이다 [1]. Arikan이 제안한 연속 제거 복호는 복호 구조가 단순하고 복호 복잡도가 낮은 장점이 있으나, 복호 과정에서 발생하는 오류 전파 (error propagation)로 인해 복호 성능이 열화되는 문제가 있다. 이러한 문제를 개선하기 위해 연속 제거 리스트 복호 (successive cancellation list, SCL) [2]와 연속 제거 플립 복호 (SC-flip decoder) [3]가 제안되었다. 연속 제거 리스트 복호는 연속 제거 과정에서 여러 후보 경로를 유지함으로써 연속 제거 복호에 비해 향상된 복호 성능을 보이지만, 후보 경로 개수에 비례하여 경로 선택 및 LLR (log-likelihood ratio) 계산과 관련된 연산 복잡도가 증가한다. 또한 최후 복호 과정까지 유지된 여러 후보 경로들 중 하나를 선택할 때, 단순히 경로 메트릭 (path metric)만을 기준으로 최적 경로를 결정할 경우 오검출 가능성이 존재한다. 이러한 문제를 개선하기 위해 순환중복검사 (cyclic redundancy check, CRC)를 부가하고, 리스트 복호로 생성된 후보 경로들 중 순환중복검사를 만족하는 경로를 선택하는 순환중복검사를 이용한 연속 제거 리스트 복호 (CRC-aided SCL, CA-SCL) [4]가 제안되었다. 순환 중복검사 연속 제거 리스트 복호는 연속 제거 리스트 복호에서 생성된 후보 경로들에 대해 순환중복검사를 수행함으로써 오류 마루 (error floor) 현상을 개선할 수 있으나, 복호 단계에서 올바른 경로가 리스트에서 제거 (pruning)될 경우 이후 단계에서 이를 복구하기 어렵다는 한계가 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해, 순환중복검사 실패 시 오류가 발생했을 가능성이 높은 비트를 선택하여 해당 비트를 반전 (flip)한 뒤 복호를 재수행함으로써 올바른 경로를 복구하는 연속 제거 리스트 플립 복호 (SCL-flip) 기법이 제안되었다. 연속 제거 리스트-플립 복호는 순환중복검사 연속 제거 리스트 복호 대비 향상된 복호 성능을 기대할 수 있으나, 순환중복검사 실패 시 다수의 반전 후보에 대해 복호를 반복 수행하므로 연산 복잡도가

크게 증가하는 문제가 있다.

본 논문에서는 복호 과정에서 경로 메트릭의 분포 변화를 나타내는 PMR (path metric range)을 이용하여, 신뢰도가 높은 구간에서는 후보 경로 분기를 생략하고 기존 경로에 대해 연속 제거 방식으로 복호를 진행함으로써, 연속 제거 리스트 플립 복호의 복호 복잡도를 감소시키는 기법을 제안한다.

### II. 본론

#### 연속 제거 리스트 복호

연속 제거 리스트 복호는 연속 제거 복호의 구조를 유지하면서, 코드 길이를  $N$ , 리스트 크기를  $L$ 이라 할 때,  $i$ 번째 비트에서 생존 경로를 두 개의 후보 ( $u_i = 0, u_i = 1$ )로 확장하여 최대  $2L$ 개의 후보 경로를 생성한다. 이후 각 후보 경로에 대해 경로 메트릭을 갱신하고, 경로 메트릭이 작은 상위  $L$ 개의 경로만을 선택하여 다음 비트 복호를 진행한다. 이와 같은 과정에서 경로 확장 및 상위 경로 선택 연산이 반복되므로 리스트 크기에 비례하여 복호 복잡도가 증가한다.

#### 연속 제거 리스트 플립 복호

연속 제거 리스트 복호는 복호 중 올바른 경로가 리스트에서 제거될 경우 이후 단계에서 복구가 어렵다는 한계가 있다. 이를 개선하기 위해 연속 제거 리스트 플립 복호는 각 연속 제거 리스트 복호 후 순환중복검사가 실패할 경우, 오류가 발생했을 가능성이 높은 플립 후보를 선택하여 복호를 재수행한다. 즉, 연속 제거 리스트 플립 복호는 1차 연속 제거 리스트 복호 이후 플립 횟수  $T$ 에 비례하여 복호 복잡도가 증가한다.

#### 경로 메트릭

연속 제거 리스트 복호에서는 각 후보 경로의 신뢰도를 평가하기 위해 경로 메트릭을 사용한다. 경로  $l$ 에서  $i$ 번째 비트의 LLR을  $\alpha_i^{(l)}$ , 비트 결정

을  $u_i^{(l)} \in \{0,1\}$  라 할 때, LLR 기반 경로 메트릭 식을 식 (1)과 같이 정의한다.

$$PM_i^{(l)} = \begin{cases} PM_{i-1}^{(l)}, & (\alpha_i^{(l)} \geq 0, u_i^{(l)} = 0) \text{ or } (\alpha_i^{(l)} < 0, u_i^{(l)} = 1) \\ PM_{i-1}^{(l)} + |\alpha_i^{(l)}|, & (\alpha_i^{(l)} \geq 0, u_i^{(l)} = 1) \text{ or } (\alpha_i^{(l)} < 0, u_i^{(l)} = 0) \end{cases} \quad (1)$$

즉, LLR의 부호에 맞는 값을 선택하는 경로의 경우 경로 메트릭이 증가하지 않으며, 반대 경로는 경로 메트릭이 증가한다. 연속 제거 리스트 복호는 생성되는  $2L$ 개의 후보 경로에 대해 식 (1)을 적용한 뒤 경로 메트릭이 작은 상위  $L$ 개 경로를 선택한다.

### PMR

$i$ 번째 비트에서 리스트에 포함된 경로들의 경로 메트릭 집합을  $\{PM_i^{(1)}, PM_i^{(2)}, \dots, PM_i^{(L)}\}$  라 할 때, 경로 메트릭 분포의 범위를 나타내는 PMR을 식 (2)과 같이 정의 한다.

$$PMR_i = \max_{l=1, \dots, L} PM_i^{(l)} - \min_{l=1, \dots, L} PM_i^{(l)} \quad (2)$$

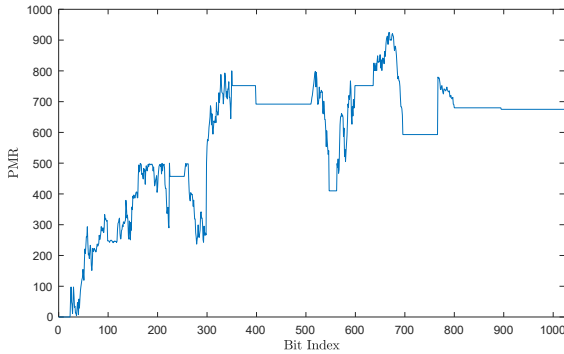


그림 1 비트 인덱스에 따른 PMR 변화

그림 1은 복호 과정에서 PMR의 변화를 나타낸다. 그림 1에서 볼 수 있듯이, PMR은 복호 단계에 따라 증가, 감소, 유지되는 구간으로 구분될 수 있다. 먼저 PMR이 증가하는 구간은 고정비트 (frozen bit) 복호 구간이며, 이 구간에서는 리스트 내 후보 경로들의 경로 메트릭 차이가 점차 벌어지는 경향을 보인다. 반면 PMR이 감소하는 구간은 리스트 내 경로들의 순서가 재정렬되는 과정으로 해석될 수 있으며, 이때 올바른 경로가 리스트에서 제거될 확률이 상대적으로 높아지는 경향이 있다. 마지막으로 PMR이 유지되는 구간은 리스트 내 상위 경로들의 상대적 순위가 안정적으로 유지되는 구간으로, 올바른 경로가 리스트에서 제거될 확률이 낮은 경향이 있다. 본 논문은 그림 1에서 확인되는 PMR 유지 구간의 특성을 이용하여 경로를 나누는 과정을 생략함으로써, 연속 제거 리스트 플립 복호의 복잡도를 감소시키는 기법을 제안한다.

### 제안하는 기법

그림 1에서 확인한 바와 같이 PMR이 유지되는 구간은 리스트 내 상위 경로들의 상대적 순위가 안정적으로 유지되는 reliable bit 구간으로 해석될 수 있다. 이에 본 논문에서는 PMR 유지 구간에서  $2L$ 개의 경로로 나누고 상위  $L$ 개의 경로를 선택하는 과정을 생략하고, 이전 단계에서 선택된  $L$ 개의 경로에 대해 연속 제거 방식으로만 복호를 진행하는 낮은 복잡도의 연속 제거 플립 기법을 제안한다. 제안하는 기법은 PMR이 감소하는 구간에서는 기존 방식과 동일하게 경로를 나누고 선택하는 과정을 수행하

여, 올바른 경로가 리스트에서 제거될 가능성이 높은 구간에서의 성능 저하를 방지한다.

제안하는 기법의 성능 검증을 위해 부호 길이  $N=512$ , 부호율  $R=1/2$ , 최대 플립 시도 횟수  $T=16, 32$ 에서 프레임 오류율 (FER) 성능을 비교하였다. 그림 2는 기존 연속 제거 리스트 플립 기법과 제안하는 PMR 기반 기법의 FER 성능을 나타낸 것이다. 그림 2에서  $T=16$  및  $T=32$ 의 두 경우 모두에서 제안하는 기법과 기존 기법이 유사한 FER 성능을 보이며, 이는 PMR 유지 구간에서의 복호 과정 생략이 오류 성능에 영향을 주지 않으면서 복잡도를 감소시킬 수 있음을 나타낸다.

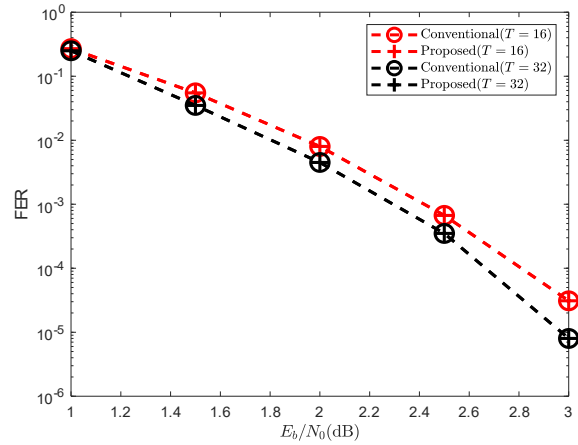


그림 2 최대 플립 시도 횟수 변화에 따른 FER 성능 비교(기존/제안 기법)

### III. 결론

본 논문에서는 순환중복검사를 이용한 연속 제거 리스트 복호의 한계를 개선하기 위해 제안된 연속 제거 리스트 플립 복호의 복잡도를 감소시키는 PMR 기반 기법을 제안하였다. 또한 제안하는 기법의 성능을 검증하기 위해 전산실험을 진행하였고 제안하는 기법이 기존 기법과 유사한 성능을 보이는 것을 확인하였다.

### 참 고 문 헌

- [1] Arikan, Erdal. "Channel polarization: A method for constructing capacity-achieving codes for symmetric binary-input memoryless channels." IEEE Transactions on information Theory 55.7 (2009):3051-3073.
- [2] I. Tal and A. Vardy, "List decoding of polar codes," IEEE Transactions on Information Theory, vol. 61, no. 5, pp. 2213 - 2226, May 2015.
- [3] O. Afisiadis, A. Balatsoukas-Stimming, and A. Burg, "A low-complexity improved successive cancellation decoder for polar codes," in 2014 48th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Nov 2014, pp. 2116 - 2120.
- [4] K. Niu and K. Chen, "CRC-aided decoding of polar codes," IEEE Communications Letters, vol. 16, no. 10, pp. 1668 - 1671, October 2012.
- [5] Yongrun, Yu, et al. "Successive cancellation list bit-flip decoder for polar codes." 2018 10th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). IEEE, 2018.