

# 블록 페이딩 채널을 위한 사전 변환 극 부호 구조

조유빈, 이남윤  
고려대학교

gybin00@korea.ac.kr, namyoon@korea.ac.kr

## Pre-transformed Polar code structure for block fading channel

Yubeen Jo, Namyoon Lee  
Korea Univ.

### 요약

직교 주파수 분할 다중화 기술 사용으로 발생하는 블록 페이딩 상황에서, 수신기만 채널 상태 정보를 알고 있을 때 블록 페이딩에 강인한 극 부호화 및 복호화 알고리즘을 고려한다. 제시된 극 부호 구조는 두 개의 서브 코드를 가지며 각각 같은 위치에 공유 비트를 할당 받는다. 이러한 구조로 인해 블록 페이딩 위치에 무관하게 로그우도 비율을 병합하여 다이버시티 이득을 얻을 수 있다. 또한, 주어진 공유 비트와 사전변환 행렬을 활용하여 동적 결정비트를 만듦으로써 기존 코드대비 최소 거리를 갖는 코드 수가 감소하여 추가적인 복호화 이득을 얻을 수 있다. 시뮬레이션을 통해서 기존 순환중복검사 극 부호와 연속적 제거 리스트 복호기를 사용하였을 때보다  $10^{-4}$ 에서  $0.2\text{dB}$  성능 향상을 확인하였다.

### I. 서론

더욱 더 빠른 통신 속도를 위해서 이동통신 시스템이 진화함에 따라 통신 주파수 대역폭이 증가하고 이는 채널이 전송 신호에 미치는 영향을 증가시킨다. 이를 상쇄하기 위해 현재 시스템에서 직교 주파수 분할 다중화 기술을 사용하므로 각각의 블록은 서로 다른 채널 환경을 겪는다. 3GPP new radio (NR) 제어 채널 코드로 사용되는 극 부호는 코드 워드가 동일한 채널을 겪는다고 가정하고 부호화 하므로 서로 다른 채널에 의해서 비트 별 채널용량 순서가 바뀌면 복호화 성능이 열화 된다[1].

기존 연구에서는 문제 해결을 위해 블록 페이딩이 일어나는 채널에 따라 정보 비트 순서를 바꾸는 방식이 제시 되었다. 이는 송신기에서 블록 별로 channel state information (CSI)을 알고 있을 경우 사용 가능하다[2]. 하지만, 수신기에서 각 블록 대응하는 CSI를 모두 피드백 하는 것은 시스템에 큰 오버헤드로 작용하므로 사용에 제약이 따른다. 따라서 CSI 피드백 없이 수신기만 CSI를 알고 있는 상황에서 블록 페이딩에 강인하게 복호 가능한 극 부호 디자인의 중요성이 강조된다.

이를 위해서 기존 극 부호와 다르게 공통 비트와 사전 변환 행렬을 이용한 새로운 극 부호화 및 복호화 방법을 제안한다. 제안된 부호화 복호화 방법은 공통 비트로 인해 다이버시티 이득을 얻으며 사전변환 행렬을 적용하여 코드 간 최소 거리 분포를 개선하므로 복호화 성능이 향상된다. 또한, 병렬 복호화로 저 지연 동작이 가능하다.

### II. 본론

#### A. 문제 상황 기술

본 논문에서 다루는 문제 상황은 다음과 같은 채널 모델을 따른다고 가정한다.

$$y_i = h_k s_i + n_i, \quad i = 1, \dots, N, \quad (1)$$

여기서  $N$ 은 프레임 크기이다.  $i^{\text{th}}$  채널 사용 상황에서  $s_i = (-1)^{x_i}$ 은 채널의 입력이고  $x_i$ 는 코드 워드이다.  $y_i$ 는 채널의 출력,  $n_i$ 는 평균이 0이고, 분산이  $\sigma^2$ 인 가우시안 노이즈,  $n_i \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2)$ 이다.  $h_k$ 는 블록 페이딩으로 각 블록마다 주어진다. 변조 방법으로는 BPSK를 사용한다. 식 (1)의 양 변에서  $h_k$ 를 나누면 다음과 같다.

$$\hat{y}_i = (-1)^{x_i} + \hat{n}_i, \quad i = 1, \dots, N, \quad (2)$$

$\hat{y}_i = y_i/h_k$  이고,  $\hat{n}_i = n_i/h_k$ 이다. 노이즈 분포  $\hat{n}_i \sim \mathcal{N}(0, \sigma_k^2)$ ,  $\sigma_k^2 = \sigma^2/h_k^2$ 이다.

#### B. 제안하는 방법

##### 1. 부호화 방법

극 부호 부호화 시 사용되는 kernel 행렬은 Arikan이 2009년에 발표한 논문에서 수록된 다음 행렬을 사용한다[3]:

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

정보 비트는 다음과 같이 설정한다. 보내고자 하는 정보 비트를 두 개의 작은 그룹으로 나눈 후에 두 그룹 모두에 공통으로 실리는 비트를 부여하여 인코딩을 한다. 즉,  $(N, K)$  코드에서 공통 비트  $C$ 개를 사용한다면,  $K_{\text{sub}} = (K - C)/2$ 가 된다. 따라서 두 그룹의 정보 비트는 각각  $K_{\text{sub}} + C$  개 만큼 할당된다. 수식으로는 다음과 같이 표현된다.

$$x = [C \ K_{\text{sub}}] F^{\otimes n}, \quad (4)$$

이 때 대괄호는 정보 비트 간의 합 집합을 의미한다. 사전변환 행렬은 상삼각 행렬이 최소 거리를 유지하거나 늘리고 최소 거리를 갖는 코드의 수를 감소시킨다는 사실에 착안하여 공통 비트에 적용하였다[4]. 사전변환

행렬로는 생성다항식  $D^6 + D^5 + 1$  을 활용하여 만들어진 행렬을 사용하였다. 복호기의 전체적인 구조는 기존 다중극 부호 구조를 참고하였다[5].

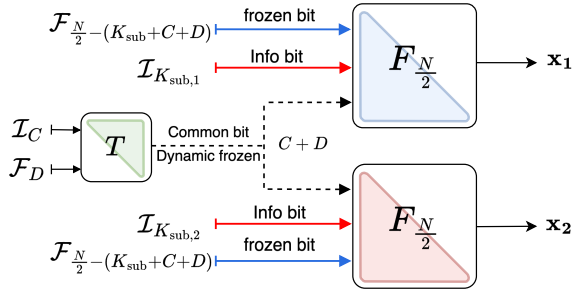


그림 1 극 부호 인코더 구성.

## 2. 복호화 방법

본 논문에서 제안하는 복호기의 동작 방식은 다음과 같다. 두 개의 코드 블록을 병렬로 successive cancellation list (SCL) 연속적 제거 리스트 복호화 하며 공통 비트마다 로그 우도 비율을 병합한다. 그 후에는 signal noise ratio (SNR)이 높은 쪽 블록을 먼저 복호화 후 공통 비트와 동적 결정비트를 SNR이 낮은 블록의 고정된 비트로 활용하여 복호화 함으로써 정보 비트 수를 감소시켜 전체 복호화 성능을 향상시킨다.

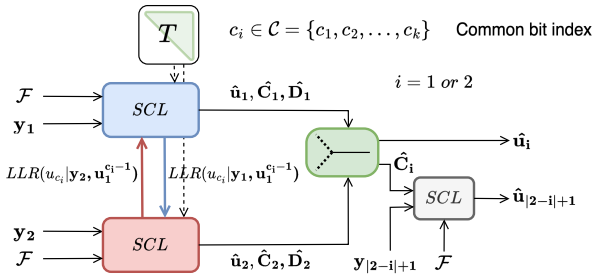


그림 2 공통 비트 사용 극 부호 복호기.

복호화 알고리즘으로는 SCL 알고리즘을 이용 하였다. 전체 복호기의 동작은 위 그림 2와 같다. 시간 복잡도는 리스트 L개, 코드 길이가 N일 때, 아래 표 1과 같으므로 제안하는 복호기는 기존 SCL 복호기에 비해 시간 복잡도가 낮다.

SCL 복호기	$L \times N \log N$
제안된 복호기	$L \times (N/2) \log(N/2) + L \times (N/2) \log(N/2)$

표 1 복호기 시간 복잡도 비교

## 3. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션은 (512, 256) 극 부호로 진행하였고, 블록 페이딩 환경은 아래 그림 3과 같이 설정하였다.

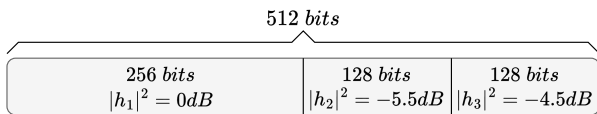


그림 3 블록 페이딩 환경 설정.

정보 비트와 결정 비트 순서는 3GPP NR 표준을 사용하였고[1], 성능 비교를 위한 기존 채널 코딩으로는 cyclic redundant check (CRC)12를 사용하였다. 제안된 극 부호에는 각각 CRC 6을 사용하였다. 페이딩에 의해 SNR이 달라지는 것을 보정하기 위해서 effective SNR을 도입하였고, 아래와 같다.

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{E(|h_k s_i|^2)}{N_0} = \frac{E(h_k^2(\text{linear}))}{\sigma^2} = \frac{0.6592}{\sigma^2}. \quad (5)$$

공통 비트 수에 의해 각 복호기가 복호화 해야 할 정보 비트 수가 달라지므로 성능의 영향을 받는다. 본 논문에서는 공통 비트 114개를 사용하여 실험하였다.

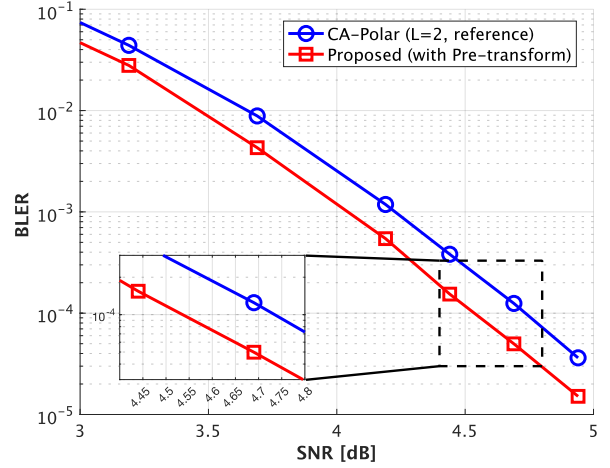


그림 4 제안된 극 부호 성능 비교.

그림 4에서 제안한 극 부호화 및 복호화가 기존 순환 중복 검사 극 부호와 SCL 복호기에 비해 전체 SNR 영역에서 성능이 향상됨을 확인할 수 있다. 구체적으로 블록 오류율  $10^{-4}$  에서 기존 순환 중복검사 극 부호 대비 0.2dB 채널 이득이 있다.

## III. 결론

기존 부호 대비 본 논문이 제시한 극 부호 방법은 수신기만 CSI를 알고 있을 때 블록 페이딩에 강인하게 동작하므로 복호화 성능이 개선된다. 제시된 부호화 및 복호화 방법의 차별점은 다음과 같다. 첫째, 공통비트에서 로그우도 비율 병합이 가능하므로 다이버시티 이득을 얻을 수 있다. 둘째, 두 블록의 공통 비트가 대칭이므로 블록 페이딩 위치에 독립이다. 셋째, 기존 복호기 대비 병렬 복호화로 인해서 저 지연 동작이 가능하다. 넷째, 사전 변환 행렬로 공통 코드 간에 최소 거리가 늘어나므로 SCL 사용시 복호화 성능이 개선된다.

## 참고 문헌

- [1] 3GPP, "NR; multiplexing and channel coding," *Tech. Rep. TS 38.212, Rel. 16*, Jul. 2020.
- [2] S. Liu, Y. Hong, and E. Viterbo, "Polar codes for block fading channels," in *Proc. IEEE Wireless Commun. Netw. Conf.*, 2017.
- [3] E. Arikan, "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, Jul. 2009.
- [4] B. Li, H. Zhang, and J. Gu, "On Pre-transformed Polar Codes," *arXiv preprint arXiv:1912.06359*, 2019, [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1912.06359>
- [5] G. Choi and N. Lee, "Deep polar codes," *IEEE Trans. Commun.* Early Access, 2024.