

블록 페이딩에 강인한 공통비트 사용 로그가능성비율 병합 극 부호 구조에 관한 연구

조유빈, 이남윤
고려대학교

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

A Study on the block fading robust LLR combined common bit Polar code structure

Yubeen Jo, Namyoon Lee
Korea Univ.

요약

본 논문에서는 수신기만 채널 상황을 알고 있을 때, 기존 극 부호 대비 블록 페이딩에 강인한 새로운 극 부호를 제시한다. 제시된 극 부호는 인코딩 시에 서브 코드 간에 공통 비트를 사용하며 두 서브 코드에 부여되는 공통 비트의 위치를 같게 설정한다. 이로 인해서 블록 페이딩의 위치에 독립적으로 디코딩 성능을 유지할 수 있다. 디코딩 시에는 공통 비트의 로그 가능성 비율을 병합하여 디코딩함으로써 다이버시티 이득을 얻음으로써 디코더의 성능 향상이 가능해진다. 또한 기존 코드대비 제안된 디코더는 낮은 시간 복잡도로 동작한다. 시뮬레이션을 통해서 기존 순환중복 검사 사용 극 부호와 연속적 제거 리스트 디코더를 사용하였을 때보다 10^{-3} 에서 0.25dB 성능 향상을 확인하였다.

I. 서론

본 논문에서는 최근 5G NR 에서 제어 채널의 채널 코딩으로 사용되고 있는 순환중복검사 극 부호가 겪는 블록 페이딩(block fading) 문제에 대응하는 새로운 극 부호 구조를 제시한다.

기본적으로 극 부호는 채널이 동일하다고 가정하고 비트 채널 용량을 계산하여 정보 비트의 인덱스를 할당한다. 하지만 블록 단위로 페이딩이 일어날 경우 비트 채널 용량의 순서가 바뀌므로 디코딩 성능이 열화된다.

이러한 이유로 극 부호를 여러 자원 블록(Resource Block)에 걸쳐서 보낼 경우 블록 단위 페이딩 발생에 의해 원래 의도한 디코딩 성능 달성이 어려워진다. 기존 연구에서는 이러한 문제에 대해 블록 페이딩이 일어나는 채널에 따라 극 부호의 정보 비트 순서를 바꾸는 방식도 제시 되었으나[1], 현재 표준에서 제시하고 있는 정보 비트 순서와 달라지는 문제가 남아있다.

따라서 본 논문에서 기존에 사용되고 있는 5G NR 표준 정보 비트를 그대로 사용하면 블록 페이딩에 강인하고 기존 순환중복검사 사용 극 부호의 연속적 제거 리스트 디코더보다 시간 복잡도가 낮은 새로운 구조의 극 부호를 제시한다.

II. 본론

A. 문제 상황 기술

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

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

N 은 프레임 크기이다. i^{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 0 이고, 분산이 σ^2 인 가우시안 노이즈, $n_i \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2)$ 이다. h_k 는 블록 페이딩으로 각 블록마다 주어진다. 변조 방법으로는 이진 위상천이변조(BPSK) 를 사용한다고 가정한다. 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 모델

1. 인코딩 방법

폴라 인코딩 시 kernel 행렬은 Arikan 이 2014 년에 발표한 논문[2]에 수록된 다음 행렬을 사용한다.

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

기존 극 부호와 차별점은 다음과 같다. 보내고자 하는 정보 비트를 두 개의 작은 그룹(sub group)으로 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 연결을 의미한다. 그림으로 표현하면 아래와 같다.

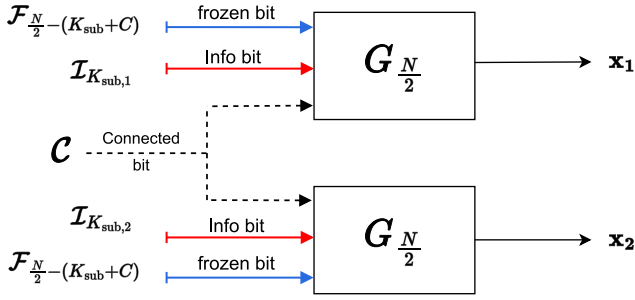


그림 1 폴라 인코더 구성

위 그림에서 공통 비트는 두 서브 그룹에 모두 같은 인덱스에 할당된다.

2. 디코딩 방법

본 논문에서 제안하는 디코더의 동작 방식은 다음과 같다. 두 개의 코드 블록을 병렬로 연속적 제거 리스트 디코딩하며 공통 비트마다 로그가능성 비율을 병합한다. 그 후에는 SNR 이 높은 쪽 블록을 먼저 디코딩한 후 공통 비트를 SNR 이 낮은 쪽 블록의 고정된 비트(frozen bit)로 활용하여 디코딩을 함으로써 정보 비트 수를 감소시켜 디코딩 성능을 향상시킨다.

$$c_i \in C = \{c_1, c_2, \dots, c_k\} \quad \text{Common bit index}$$

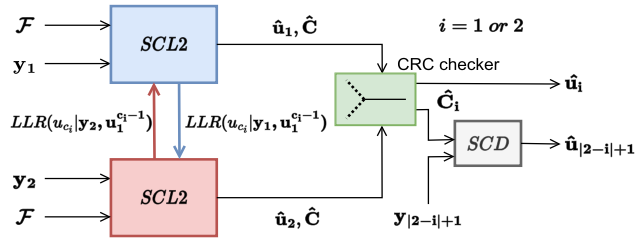


그림 2 공통 비트 사용 극 부호 디코더

SNR 비교는 디코딩된 비트의 순환중복 검사를 통해서 통과한 쪽의 블록을 우선시 하며 둘 다 통과할 경우 임의로 정하고 둘 다 통과하지 못할 경우 디코딩에 실패한 것으로 판단하였다. 연속적 제거 리스트 디코더는 Tal, Vardy 의 논문[3]에 나와 있는 알고리즘을 이용하였다. 전체 디코더의 동작은 위 그림 2 와 같다.

시간 복잡도는 리스트 L 개, 코드워드 N 개일 때, 아래 표 1 과 같으므로 본 논문에서 제안하는 디코더는 기존 연속적 제거 리스트 디코더에 비해 시간 복잡도가 낮다.

SCL 디코더	$L * N \log N$
제안된 디코더	$L * (N/2) \log(N/2) + (N/2) \log(N/2)$

표 1 디코더 시간 복잡도 비교

3. 시뮬레이션 결과

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

256 bits $h_1 = 0dB$	128 bits $h_2 = -4.5dB$	128 bits $h_3 = -5.5dB$
-------------------------	----------------------------	----------------------------

그림 3 블록 페이딩 환경 설정

정보 비트 모음은 5G NR 표준을 사용하였고, 성능 비교를 위한 기준 채널 코딩으로는 CRC24 극 부호와 연속적 제거 리스트 디코더를 이용하였다. 새로 제안된 극 부호에는 CRC12 을 사용하였다. 페이딩에 의해 SNR 이 달라지는 것을 보정하기 위해서 effective SNR 을 도입하였고, 아래와 같다.

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{E(|h_k s_i|^2)}{RN_0} = \frac{E(h_k^2(\text{linear}))}{\sigma^2} = \frac{0.6592}{\sigma^2}. \quad (5)$$

공통 비트(common bit) 수에 의해 각 디코더가 디코딩 해야 할 정보 비트 수가 달라지므로 성능의 영향을 받는다. 본 논문에서는 공통 비트를 126 개를 사용하여 실험하였다.

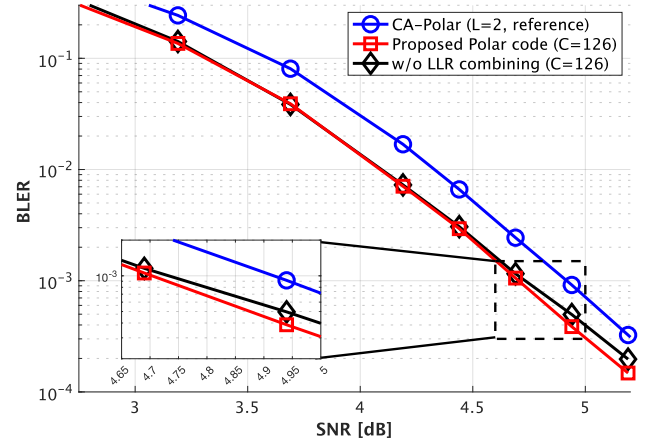


그림 4 제안된 극 부호 성능 비교

그림 4 에서 로그 가능성비율을 병합하지 않았을 경우 높은 SNR 영역에서 성능이 열화가 발생하였지만, 본 논문에서 제시한 디코더의 경우 높은 SNR 에서도 성능이 유지되었다. 또한, 블록 오류율 10^{-3} 에서 기존 극 부호 대비 0.25 dB 의 채널 이득이 있음을 확인하였다.

III. 결론

위의 그래프에서 확인한 바와 같이 채널이 블록 페이딩을 겪을 때, 본 논문에서 제안한 공통 비트를 활용한 극 부호 구조에 채널 이득이 있음을 알 수 있다.

본 논문이 제시한 극 부호 방법의 장점은 다음과 같다. 첫째, 수신기만 채널 상황을 알고 있을 때 동작이 가능하다. 둘째, 기존 디코더 대비 로그가능성비율 병합으로 인해 다이버시티 이득을 얻을 수 있다. 셋째, 두 블록의 공통 비트가 대칭적이므로 블록 페이딩 위치에 독립적 이다. 넷째, 기존 디코더 대비 낮은 시간 복잡도로 동작 한다.

후속 연구로는 코드워드 간에 최소 거리 (minimum distance)를 개선한다고 알려져 있는 선 변환 (pre-transform)을 적용하여 극 부호를 나눴을 때 발생하는 코딩 이득의 손실을 극복하는 방법을 연구할 계획이다.

참고 문헌

- [1] S. Liu, Y. Hong, and E. Viterbo, "Polar Codes for Block Fading Channels," in *IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)*, San Francisco, CA, USA, 2017
- [2] 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, Jul. 2009.
- [3] I. Tal and A. Vardy, "List decoding of polar codes," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 61, no. 5, pp. 2213-2226, May 2015.