

최소 해밍 거리 극대화를 위한 극 부호 설계 기법

고영준, 백성열, 김서영, 오왕록

충남대학교

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

Polar Code Construction Method for Maximizing the Minimum Hamming Distance

Ko Youngjun, Sungyeol Back, Seoyoung Kim and Wangrok Oh

Chungnam National Univ.

요약

극 부호(Polar codes)는 낮은 복잡도로 채널 용량을 달성할 수 있는 오류 정정 부호이지만, 최소 해밍 거리가 낮아 오류 성능이 떨어지는 한계가 있다. 이를 개선하기 위해 제안된 RM-극 부호는 행 무게가 낮은 비트를 고정 비트로 설정하여 최소 해밍 거리를 증가시키는 방식으로 설계된다. 기존 RM-극 부호는 채널 신뢰도만을 기준으로 정보 비트를 선택함으로써, 행 무게가 큰 고정 비트와 행 무게가 낮은 정보 비트를 비효율적으로 배치하는 문제가 있다. 본 논문에서는 이러한 한계를 해결하기 위해, 정보 비트와 고정 비트 간 행 무게 및 채널 신뢰도를 기반으로 한 쌍 교체 방식의 정보 비트 최적화 기법을 제안한다. 전산 실험을 통해 제안된 기법이 기존 RM-극 부호보다 더 우수한 오류 성능을 달성함을 확인하며, 이를 통해 극 부호 설계 시 채널 신뢰도뿐 아니라 비트의 행 무게 또한 고려되어야 함을 보인다.

I. 서 론

극 부호 (polar codes)는 이진 입력 이산 무기억 채널 (binary input discrete memoryless channel, BI-DCM)에서 낮은 복잡도의 순차 제거 (successive cancellation, SC) 복호 기법을 통해 샤넌 (Shannon)의 채널 용량을 달성할 수 있음이 증명된 오류 정정 부호이다[1]. 극 부호는 설계 과정에서 채널 양극화 (channel polarization)를 통해 각 비트 (bit)가 전송되는 채널의 신뢰도를 구하고 신뢰도가 높은 채널은 정보 비트 (information bit), 낮은 채널은 고정 비트 (frozen bit)를 할당한다[2]. 그러나 이러한 설계 방식은 최소 해밍 거리 (minimum hamming distance)를 고려하지 않기 때문에, 부호어 간 거리가 작아 오류 성능이 저하되는 문제가 있다. 이를 개선하기 위해, 극 부호의 최소 해밍 거리를 증가시키는 설계 기법인 RM (reed muller)-극 부호가 제안되었다[3]. 해당 방식은 행 무게가 낮은 비트를 고정 비트로 설정함으로써 최소 해밍 거리를 증가시키는 구조를 따른다. 하지만 기존 RM-극 부호는 최소 해밍 거리를 행 무게로 갖는 비트를 고정 비트로 설정한 이후 남은 고정 비트 선택에 있어 채널 신뢰도만을 고려하므로, 행 무게가 높은 비트가 고정 비트로, 행 무게가 낮은 비트가 정보 비트로 포함되는 문제가 존재한다.

본 논문에서는 RM-극 부호의 설계 방법을 간략히 소개하고, 고정 비트 할당 시 행 무게와 채널 신뢰도를 동시에 고려하여 오류 성능을 새로운 기준을 적용하여 오류 성능을 향상시키는 기법을 제안한다.

II. 본론

RM-극 부호

극 부호는 채널의 신뢰도에 기반하여 정보 비트를 선택하고, 최소 해밍 거리는 고려하지 않는다. 따라서 같은 부호길이 N 의 경우에도 RM 부호보다 낮은 최소 해밍 거리를 갖는다. 부호길이 $N = 512$ 이고, 고정 비트 $K = 256$ 의 경우, 가우시안 근사법 (gaussian approximation, GA) 기반으로 설계된 극 부호 (512, 256)의 최소 해밍 거리는 그림 1과 같이 8, 같은 길이를 갖는 RM 코드 (512, 382)의 최소 해밍 거리는 16이다.

최소 해밍 거리 문제를 해결하기 위해서 RM 극 부호에서 제안하는 새로운 극 부호 (2048, 1024)는 행 무게 (row weight)가 8 이하인 비트 r 개를

먼저 고정 비트로 할당하고 남은 비트 중 $K-r$ 개의 채널 신뢰도가 낮은 비트들을 선택하여 고정 비트로 할당한다. 이처럼 설계된 RM-극 부호 (512, 256)는 최소 해밍 거리가 16으로 증가하며, 그림 1에서와 같이 기존 극 부호보다 더 우수한 FER 성능을 보인다.

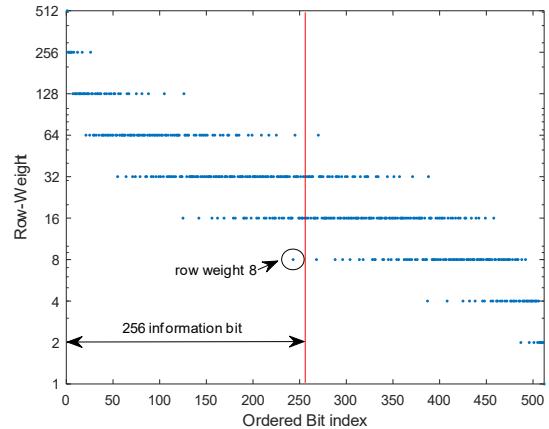


그림 1. 극 부호 (512, 256)의 비트 별 행 무게 (채널 신뢰도 순 정렬)

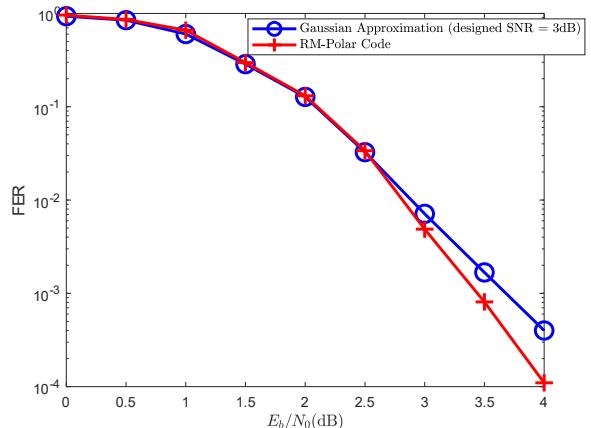


그림 2. RM-극 부호 (512, 256)과 가우시안 근사법을 설계된 극 부호 (512, 256) 사이의 순차 제거 복호 기법 FER 성능 비교.

제안하는 기법

기존 RM-극 부호는 최소 해밍 거리 문제를 해결하기 위해, 행 무게가 달성하고자 하는 최소 해밍 거리 미만인 비트를 고정 비트로 할당함으로써 최소 해밍 거리를 증가시키고, 남은 고정 비트는 채널 신뢰도가 낮은 비트로 선택한다. 이와 같은 설계 방식은 그림 3과 같이 고정 비트와 정보 비트 경계에 있는 비트 중 채널 신뢰도는 낮지만, 행 무게가 큰 비트들이 배제되고, 반대로 채널 신뢰도는 높지만, 행 무게가 낮은 비트들이 정보 비트로 포함되는 문제가 발생한다.

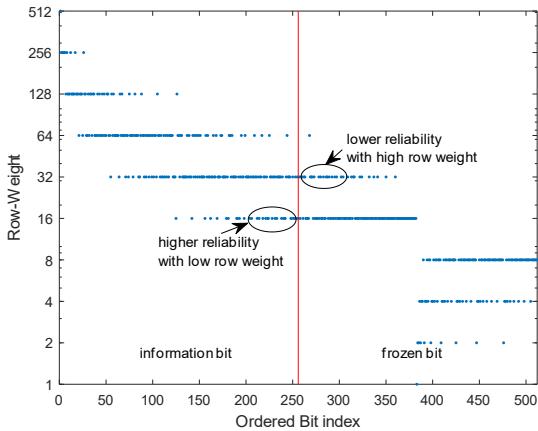


그림 3. RM-극 부호 (512, 256)의 비트 별 행 무게 (채널 신뢰도 순 정렬)

본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해, 기존 RM-극 부호의 정보 비트와 고정 비트 간의 교체를 통해 최소 해밍 거리를 갖는 부호어의 발생 확률을 줄이는 기법을 제안한다. 먼저, RM-극 부호와 같은 초기 정보 비트와 고정 비트를 구성하고, 고정 비트 중 채널 신뢰도와 행 무게가 높은 비트와 정보 비트 중 채널 신뢰도와 행 무게가 낮은 비트를 교체한다. 각 교체 조합에 대한 전산 실험을 통해 프레임 오류율 (frame error rate, FER)을 측정하고, 이 과정을 반복하여 가장 우수한 오류 성능을 보이는 비트 구성으로 정보 비트와 고정 비트를 확정한다. 이 과정을 통해 최소 해밍 거리 확보뿐 아니라, 채널 신뢰도와 행 무게 간 균형을 고려한 보다 효과적인 극 부호 설계가 가능하다.

III. 전산 실험

본 논문에서 제안한 기법의 성능을 검증하기 위해 부호길이 $N=512$, 정보 비트 수 $K=256$ 인 극 부호를 기준으로, 제안한 방식에 따라 비트 간 교체를 1번에서 11번까지 수행한 경우에 대한 전산 실험을 진행하였다. 실험은 BPSK 변조 후 SNR이 3.5 dB인 AWGN 채널을 통해 전송하고 수신 측에서는 순차 제거 복호기를 사용하였다.

전산 실험 결과는 그림 4에 도시되어 있으며, 교체한 비트 수가 증가함에 따라 FER 성능이 개선되는 것을 확인할 수 있다. 특히, 5번 교체에서 가장 우수한 성능이 나타났으며, 이후 교체에서는 낮은 신뢰도의 비트가 정보 비트로 할당되어 성능이 저하되는 경향도 확인할 수 있다.

이에 따라 가장 우수한 성능을 보이는 5번 교체 시의 제안하는 기법과 기존 RM-극 부호를 비교하는 전산 실험을 진행하였다. 그림 5에서 볼 수 있는 바와 같이 제안하는 기법이 FER 10^{-3} 을 달성하는 영역에서 기존 기법 대비 약 0.15 dB 더 우수한 성능을 보이는 것을 확인할 수 있다.

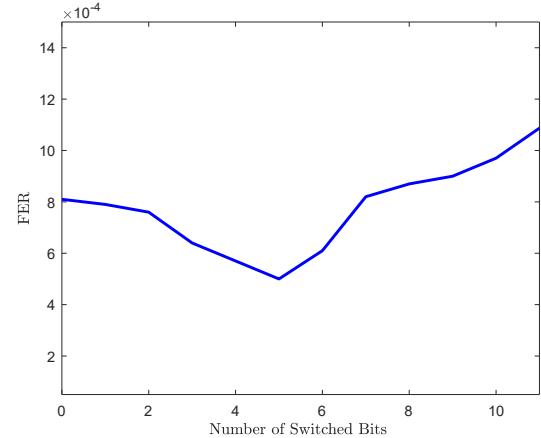


그림 4. 교체한 비트 수에 따른 극 부호의 FER 성능

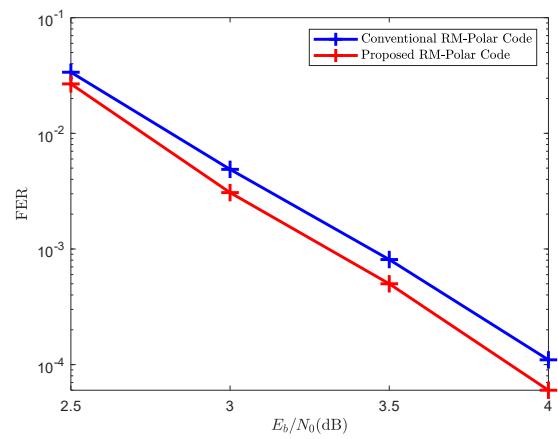


그림 5. RM-극 부호와 제안하는 기법의 FER 성능 비교

전산 실험 결과

IV. 결론

본 논문에서는 RM-극 부호의 설계 과정에서 고려하지 않는 행 무게를 채널 신뢰도와 함께 고려한 설계 기법을 제안하였다. 전산 실험을 통해 제안된 방식의 오류 성능 향상을 확인하였으며, 이를 통해 극 부호 설계 시 기존의 채널 신뢰도 외에도 행 무게를 함께 고려할 필요가 있음을 확인하였다.

참고 문헌

- [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] Li, Huijun, and Jinhong Yuan. "A practical construction method for polar codes in AWGN channels." *IEEE 2013 Tencon-Spring*. IEEE, 2013.
- [3] Li, Bin, Hui Shen, and David Tse. "A RM-polar codes." *arXiv preprint arXiv:1407.5483* (2014).