

수중음향통신에서의 극 부호 기반 터보 등화기 연구

이재훈, 정현우, 홍예권, 정지원

한국해양대학교

bear9907@g.kmou.ac.kr, gusdn0930@g.kmou.ac.kr, cl170625@gmail.com,

jwjung@kmou.ac.kr

A Study on the Polar Code-Based Turbo Equalization for Underwater Acoustic Communication

Jae-Hun Lee, Hyun-Woo Jeong, Ye-Gwon Hong, Ji-Won Jung

Korea Maritime and Ocean Univ.

요약

극 부호는 이론적으로 채널 용량을 달성할 수 있는 채널 부호화기법으로, 5G 표준에 채택되는 등 최근 연구가 활발히 진행 중이다. 그러나 다중경로 간섭이나 채널 왜곡이 존재하는 수중통신환경에서는 극 부호 단독으로는 수신 성능 저하가 발생할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 한계를 극복하기 위해, 극 부호 복호기와 채널 등화기 간에 soft 정보를 반복적으로 교환하는 터보 등화 구조를 적용한다. 터보 등화는 극 부호 복호기에서 출력되는 posterior LLR을 등화기의 soft 입력으로 활용함으로써, 간섭 제거 및 심볼 추정 정확도를 반복적으로 향상시킬 수 있다. 모의 실험 결과, ISI가 있는 채널 환경에서 극 부호를 단독 사용 대비 프레임 오류율 및 비트 오류율이 제안한 터보 등화 구조에서 반복 횟수에 따라 성능이 개선됨을 확인하였다.

I. 서론

채널 부호화 기법은 디지털 통신 시스템에서 신뢰성 높은 데이터를 전송하기 위해 핵심적이다. 그중 극 부호는 E. Arkan에 의해 제안되어 이론적으로 채널 용량을 달성할 수 있는 부호화 기법으로 주목받았고, 5G 이동통신 표준에도 채택되었다. 극 부호는 채널 분극화(channel polarization)[1] 개념을 기반으로 좋은 채널과 나쁜 채널을 분리하고, 좋은 채널을 매우 신뢰성 높은 전송을 가능하게 한다. 그러나 실제 채널 환경에서는 다중경로 페이딩이나 채널 왜곡, 잡음 등에 의해 극 부호 단독으로만 사용하면 성능 저하가 생긴다. 이러한 열악한 채널 환경에서 통신 성능을 개선하는 방법 중 하나로 터보 등화 기법이 있다. 터보 등화는 채널 등화기와 채널 디코더 간에 soft 정보를 반복적으로 교환하는 구조[2]로, 심볼 간 간섭(Inter-Symbol Interference, ISI)이 존재하는 환경에서도 높은 성능을 보장한다. 특히, 다양한 등화 알고리즘과 결합이 가능하며, 반복적인 정보 교환을 통해 등화기의 성능을 향상시킬 수 있다. 본 논문에서는 극 부호 기반 통신 시스템에 LMS-DFE(Least Mean Square-Decision Feedback Equalizer)를 사용한 터보 등화 구조를 적용하고, 연관정 기반 극 부호 디코딩[3] 결과로 얻어지는 posterior LLR을 등화기의 soft 입력으로 활용하여 성능을 향상시키는 구조를 제안한다. 또한, 반복적인 정보 교환을 통해 프레임 오류율 및 비트 오류율이 개선되는 것을 모의실험을 통해 확인하고, 수중 음향 통신과 같이 다중 경로 환경에서도 극 부호의 실용적 가능성을 평가한다.

II. 본론

그림 1은 극 부호 기반 터보 등화 통신시스템을 나타낸다. 송신 측에서는 정보 비트를 극 부호화한 후, 변조를 통해 심볼을 생성하고 다중경로와 가우시안 잡음 채널을 통해 전송한다. 이후, LMS-DFE를 사용하여 ISI를 보정한다. DFE는 피드포워드 필터와 피드백 필터로 구성되며, 훈련 비트열을 사용해 초기 필터 계수를 설정하고, 이후 수신된 신호를 이용하여 등

화를 진행한다.

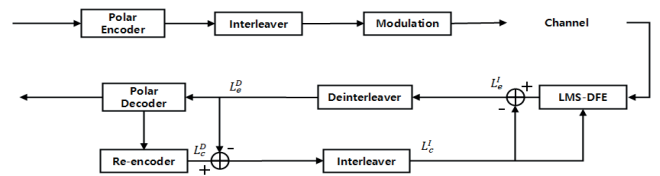


그림 1. 터보 등화를 적용한 극 부호 통신 시스템

Fig 1. Polar code-based turbo equalization communication system

LMS 알고리즘을 통한 가중치 업데이트는 식 (1)과 식 (2)로 표현한다.

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + \mu e^*(n) \mathbf{x}(n) \quad (1)$$

$$e(n) = d(n) - \mathbf{w}^H(n) \mathbf{x}(n) \quad (2)$$

여기서 μ 는 학습률, $d(n)$ 은 훈련 비트열 심볼이다. \mathbf{x} 는 입력신호이다. 등화 이후, 극 부호 복호기를 통해 L_c^D 를 얻는다. 이 L_c^D 을 기반으로 재구성한 Soft 정보 L_c^I 를 이용하여 DFE 입력 및 가중치를 업데이트하며 터보 반복을 수행한다. L_c^D 는 posterior LLR, L_c^I 는 등화기 출력 LLR을 의미한다.

모의실험 파라미터는 표 1과 같다. 극 부호 길이 $N=512$, 코드율 $1/2$ 를 사용했다. 디코딩 기법은 CA-SCL(CRC Aided-Successive Cancellation List), CRC 길이는 16, List 수는 16을 사용하였고 QPSK 변조, 스텝 사이즈 $\mu=0.02$, 채널 환경은 3경로 다중경로 채널에 가우시안 잡음을 더한 채널을 설정하였다.

표 1. 모의실험 파라미터

Table 1. Simulation Parameter

Codeword length(N)	512
Coding rate(R)	1/2
Decoding	CA-SCL($CRC=16, List=16$)
Modulation	QPSK
Step size(μ)	0.02
Channel	3-path + AWGN
Turbo Eq. iteration	3,5

3073, Jul-2009.

[2] M. Tüchler and A. C. Singer, "Turbo Equalization: An Overview," IEEE Transactions on Information Theory, vol. 57, no. 2. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), pp. 920 - 952, Feb-2011.

[3] A. Balatsoukas-Stimming, M. Bastani Parizi, and A. Burg, "LLR-Based Successive Cancellation List Decoding of Polar Codes," IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 63, no. 19. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), pp. 5165 - 5179, Oct-2015.

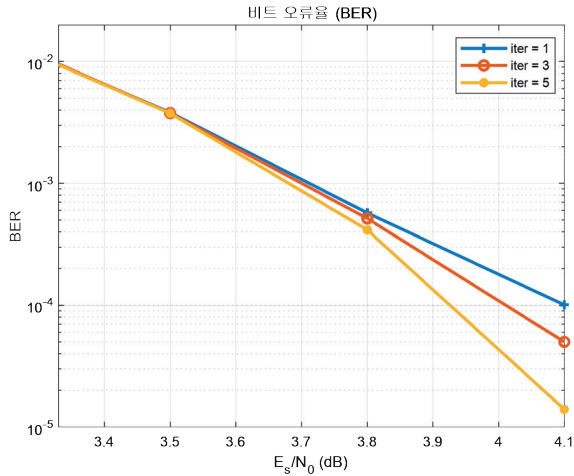


그림 2. 터보 등화 반복 횟수에 따른 BER 성능

Fig 2. BER performance as a function of the number of turbo equalization iterations

그림 2은 터보 등화 반복 횟수에 따른 비트 오류율(Bit Error Rate, BER)을 나타낸다. 반복을 수행하지 않은 경우에 비해, 터보 등화 반복을 수행한 경우 BER 성능이 반복 횟수 별로 점차 향상됨을 확인할 수 있다.

III. 결론

본 논문에서는 수중음향통신에서 극 부호 기반 터보 등화 구조를 적용하였다. LMS-DFE와 터보 등화 구조를 결합하여 등화기의 가중치를 업데이트하고 복호하는 과정을 반복하면서 FER 성능이 반복 횟수에 따라 성능이 향상됨을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2023년도 정부 방위사업청의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임. (KRIT-CT-23-035, 기뢰탐지용 무인잠수정 군집 운용 기술, '23~'28)

참 고 문 헌

[1] E. Arikan, "Channel Polarization: A Method for Constructing Capacity-Achieving Codes for Symmetric Binary-Input Memoryless Channels," IEEE Transactions on Information Theory, vol. 55, no. 7. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), pp. 3051 -