

적응형 Polar-Raptor 부호를 이용한 수중 음향 통신의 신뢰성 및 효율성 향상 기법에 관한 연구

박세용, 김승규, 홍재희, 임태호*

호서대학교

dyd2634@naver.com, ksg980920@naver.com, 1047piclab@gmail.com, *taehoim@hoseo.edu

Adaptive Polar-Raptor Codes for Improved Reliability and Efficiency in Underwater Acoustic Communication

Park Se-Yong, Kim Seung-Gyu, Hong Jae-Hee, Lee Hyo-Song, Im Tae-Ho*

Hoseo Univ.

요약

수중 음향 통신은 긴 전파 지연과 높은 에러율로 인해 재전송(ARQ) 기반의 오류 제어가 비효율적이다. 본 논문에서는 지연 시간을 최소화하기 위해 물리 계층(Polar Code)과 응용 계층(Raptor Code)을 결합한 적응형 교차 계층 FEC 기법을 제안한다. 제안하는 기법은 SNR 구간별 차별화된 오버헤드 할당 전략을 사용한다. 저 SNR 구간(≤ -3 dB)에서는 과도한 대역폭 낭비를 방지하기 위해 적정 수준의 잔여 오류(10~15%)를 허용하며, 고 SNR 구간(≥ 0 dB)에서는 충분한 마진을 확보하여 무오류(Zero Error) 전송을 보장한다. 시뮬레이션 결과, 제안 기법은 0 dB 이상의 환경에서 1.55배의 오버헤드로 완벽한 데이터 복구를 달성하였으며, 극심한 페이딩 환경(-6 dB)에서도 통신 단절 없이 안정적인 처리율(정규화 처리율 > 0.3)을 유지함을 확인하였다.

I. 서론

수중 채널은 육상 무선 통신과 달리 제한된 대역폭, 심각한 다중 경로 페이딩, 그리고 매우 느린 음파 전달 속도라는 물리적 한계를 가진다[1]. 특히 수중의 전파 속도는 약 1,500 m/s로 전자기파(3×10^8 m/s) 대비 약 2×10^5 배 느리기 때문에, 패킷 오류 발생 시 재전송을 요청하고 수신하는 ARQ(Automatic Repeat reQuest) 방식은 전체 시스템의 처리율을 치명적으로 저하시킨다. 예를 들어, 1 km 거리에서의 왕복 지연시간(RTT)은 약 1.3초에 달하며, 패킷 에러율이 30%인 경우 평균 1.43회의 재전송이 필요하여 실효 처리율이 이론값의 50% 이하로 떨어진다. 따라서 수중 통신에서는 데이터 신뢰성을 확보하기 위해 재전송을 최소화하고, 단방향 전송만으로 오류를 정정하는 순방향 오류 정정(FEC, Forward Error Correction) 기법이 필수적이다.

본 논문에서는 짧은 패킷 환경에서 강력한 오류 정정 능력을 제공하는 Polar Code[2]와 패킷 소거 채널에 강인한 Rateless 부호인 Raptor Code[3]를 결합한 적응형 교차 계층 FEC 기법을 제안한다.

II. 시스템 모델 및 제안 기법

A. 교차 계층 부호화 구조 (Cross-Layer Coding)

제안하는 시스템은 이중 부호화 구조를 갖는다.

- 1) 응용 계층 (Raptor Encoding): $k = 100$ 개의 소스 심볼에 대해, 채널 상태에 따라 결정된 오버헤드 비율 OH 를 적용하여 총 $N = [K \times OH]$ 개의 인코딩된 패킷을 생성한다. Raptor Code는 삭제(Erasure) 채널에 강인하여, 수신단에서 N 개 중 임의의 K 개 이상의 패킷만 성공적으로 복조되면 원본 데이터를 복원할 수 있다.
- 2) 물리 계층 (Polar Encoding): 생성된 각 패킷은 CRC-24C가 추가된 후, 5G NR 표준 Polar Code로 인코딩된다(부호화율 $R=1/2$). 복호 알고리즘으로는 CA-SCL(리스트 크기 $L=8$)을 사용한다. Polar Code는

개별 패킷 내 비트 오류를 정정하며, CRC 실패 패킷은 소거로 처리되어 Raptor 복호기로 전달된다. 전체 부호화율은 다음 식과 같다.

$$R_{total} = R_{polar} \times R_{raptor} = \frac{1}{2} \times \frac{K}{N} = \frac{K}{2N} \quad (1)$$

B. 적응형 오버헤드 할당 전략

수중 채널의 제한된 대역폭을 고려할 때, 모든 SNR 구간에서 무조건적인 'Zero Error'를 추구하는 것은 비효율적이다. 본 연구에서는 SNR 영역에 따라 차별화된 목표를 설정하는 구간별 전략을 제안한다.

- 1) 저 SNR 구간 (Low SNR, ≤ -3 dB): 효율성 우선
물리 계층 PER이 40% 이상인 구간이다. 완벽한 복구를 위해서는 $OH > 5$ 가 필요하나, 본 기법은 오버헤드를 최대 2.8로 제한하고 최종 에러율 10~15%를 허용하여 통신 링크 단절을 방지하고 유효 처리율을 확보한다.
 - 2) 중간 SNR 구간 (-3 dB < SNR < 0 dB): 균형
물리 계층 PER 40~20% 구간이다. 이론적 최소 오버헤드에 25%의 안전 마진을 추가하여 최종 에러율 5% 이하를 보장한다.
 - 3) 중간 SNR 구간 (-3 dB < SNR < 0 dB): 균형
물리 계층 PER 20% 이하 구간이다. 이론적 최소 오버헤드에 20% 이내의 안전 마진을 추가하여 최종 에러율 0%를 보장한다.
- 수신단에서 추정된 SNR에 따라 결정되는 오버헤드 OH 은 다음과 같이 설정된다.

$$OH(SNR) = \frac{1}{1 - P_{phy}(SNR)} + \delta \quad (2)$$

여기서 P_{phy} 는 해당 SNR에서의 패킷 에러율이며, δ 는 안정성을 위한 마진이다. 고 SNR 구간에서는 이론 최소값에 20%의 마진을 곱하여 안정성을 확보한다. 예를 들어, $SNR=0$ dB에서 $P_{phy}=0.18$ 인 경우에는 $OH=1.46$ 으로 146개의 패킷을 전송하여 100개의 소스 심볼을 복원함을 의미한다.

III. 시뮬레이션 및 성능 분석

A. 시뮬레이션 환경

제안 기법의 성능을 검증하기 위해 표 1과 같이 수중 음향 통신 환경을 모사한 시뮬레이터를 구축하였다. 현실적인 수중 채널 특성을 반영하기 위해 Rayleigh Fading 모델을 기반으로 하였으며, 송수신 간에 4개에서 7개 사이의 무작위 다중 경로가 존재한다고 가정하였다. 또한, 수중의 심각한 잔향 효과를 반영하기 위해 최대 20ms의 지연 확산과 -3dB의 지수적 전력 감소 특성을 적용하였다. 시뮬레이터의 변복조 및 Polar Code 등의 물리계층 파라미터는 표 2와 같다.

Raptor Code의 OH 는 고정값이 아닌, SNR에 따라 1.1에서 2.8 사이의 범위에서 적응적으로 조절되도록 설계하여 채널 상태에 따른 최적의 전송 효율을 고려하였다.

표 1. 수중 채널 주요 설정 파라미터

Parameter	Value	Note
Channel Model	Rayleigh Fading	Multipath Underwater Channel
Number of Paths	4 ~ 7	Randomly distributed
Max Delay Spread	20 ms	Exponential decay profile (-3dB)
Raptor Overhead (OH)	Adaptive (1.1~2.8)	Optimized based on SNR

표 2. 물리계층 주요 파라미터

Parameter	Value	Description
Modulation	BPSK	Binary Phase Shift Keying
Channel Coding	Polar Code	Based on 5G NR Standard
Target Code Rate	1/2 (0.5)	K/N ratio
Decoding Algorithm	CA-SCL	List Size L=8
Encoded Block Size	248 bits	Including CRC & Parity (Epolar)

B. 성능 분석

그림 1은 물리 계층(Polar Code 단독)과 제안하는 적응형 교차 계층 기법의 패킷 에러율 성능을 비교한 것이다.

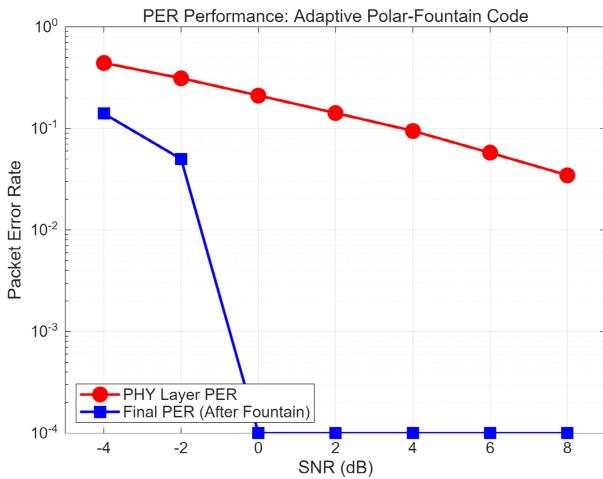


그림 1. 물리 계층(Polar Code)과 제안하는 적응형 교차 계층 기법의 패킷 에러율 성능 비교

저 SNR 구간(-6 dB ~ -3 dB)에서는 물리 계층(PHY)에서의 패킷 에러율이 15% 내외의 최종 에러율을 허용함으로써, 통신 단절을 막고 유효한 처리율을 확보하는 데 성공하였다. 중간 SNR 구간(-3 dB < SNR < 0 dB)에서는 물리 계층 PER이 점진적으로 감소하는 구간이다. 적응형 오버헤드 조절을 통해 최종 PER을 5% 이하로 낮추는 데 성공하였다. 고 SNR 구간(0 dB 이상)에서는 물리 계층 패킷 에러율이 안정화되는 구간에서는

오버헤드를 1.55 이하로 낮추면서도 최종 에러율 0%를 달성하였다. 이는 불필요한 잉여 패킷 전송을 줄여 대역폭 효율을 높이는 결과를 가져왔다.

그림 2는 제안 기법의 적응형 전송 오버헤드 및 정규화된 처리율 성능을 나타낸다. 정규화 처리율은 다음과 같이 정의된다.

$$\eta = \frac{K}{N} \times (1 - PER_{final}) = \frac{1}{OH} \times (1 - PER_{final}) \quad (3)$$

이는 실제 전송된 데이터 대비 성공적으로 복구된 데이터의 비율을 나타낸다. 그림 2에서 볼 수 있듯이, 오버헤드(다이아몬드)는 SNR 증가에 따라 점진적으로 감소하며, 이에 따라 정규화 처리율(삼각형)은 증가한다. 특히 SNR=0 dB를 기점으로 최종 PER이 거의 0%에 도달하면서 처리율이 급격히 향상되는 것을 확인할 수 있다.

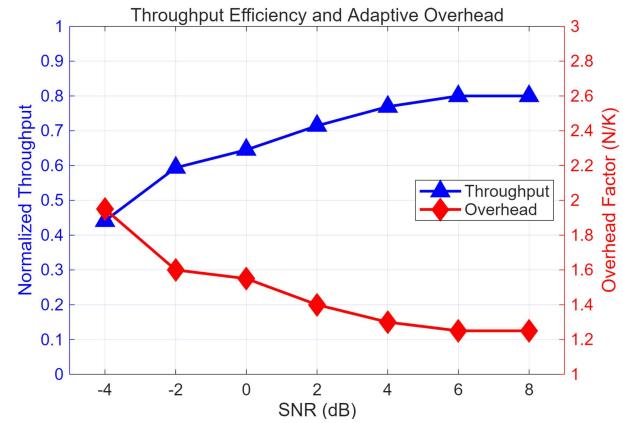


그림 2. 제안 기법의 적응형 전송 오버헤드 및 정규화된 처리율 성능

III. 결론

본 논문에서는 수중 음향 통신의 고질적인 지연 문제를 해결하기 위해, SNR에 따라 신뢰성과 효율성 간의 균형을 조절하는 최적화된 Polar-Raptor 적응형 FEC 기법을 제안하였다. 시뮬레이션 결과, 제안 기법은 0 dB 이상의 환경에서는 재전송 없이 완벽한 데이터 전송(PER 0%)을 보장하며, -6 dB와 같은 열악한 환경에서도 오버헤드 조절을 통해 통신 링크를 유지하는 강인함을 보였다. 이는 기존 ARQ 기법이 갖는 긴 대기 시간 문제를 근본적으로 해결할 수 있는 방안으로, 향후 수중 센서 네트워크 및 실시간 제어 시스템에 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2026년도 정부(과학기술정보통신부)의 지원으로 한국연구재단-실시간 해저재해 감시 기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (2022M3J9A107887612)

참 고 문 헌

- [1] M. Stojanovic and J. Preisig, "Underwater acoustic communication channels: Propagation models and statistical characterization," IEEE Commun. Mag., vol. 47, no. 1, pp. 84-89, 2009.
- [2] V. Bioglio, C. Condo, and I. Land, "Design of Polar Codes for 5G New Radio: A Survey," IEEE Commun. Surveys Tuts., vol. 23, no. 1, pp. 301 - 320, 2021.
- [3] N. Khubchandani, D. S. G. Kumar, and V. E. Balas, "A Comprehensive Survey on Fountain Codes: Past, Present, and Future," IEEE Access, vol. 10, pp. 108365 - 108392, 2022.