

대규모 통신 서비스를 위한 폴라 채널 코딩 방식에 관한 연구

김정임
한국전자통신연구원
jungim@etri.re.kr

A Study on Polar Channel Coding Schemes for Massive Communication Services

Jungim Kim
jungim@etri.re.kr

요 약

본 논문은 차세대 6G 대규모 통신(Massive Communication) 서비스 중의 하나인 대규모 통신 서비스를 위한 채널 코딩 방식으로 폴라 채널 인코딩과 전송 방식을 연구하였다. 제안하는 방식은 단말의 연산 복잡도를 최소화하면서 네트워크의 커버리지를 효과적으로 확장하기 위해 단말과 기지국에 차별화된 폴라 부호화 방식을 적용한다. 단말은 비체계적인 폴라 인코더를 사용하여 낮은 부호 율로 인코딩을 수행하고, 기지국은 체계적인 폴라 인코더를 사용하여 높은 부호 율로 인코딩을 수행하고 다중 안테나로 반복 전송을 수행하여, 단말의 복잡도를 낮추면서 커버리지를 확장하는 방식을 제안한다.

I. 서 론

본 논문에서는 6G 서비스 시나리오 중 하나인 대규모 통신(Massive Communication)**을 위한 채널 코딩 기법에 관하여 연구하였다. 대규모 통신은 5G mMTC(massive Machine Type Communications)가 고도화된 서비스 형태로, 단위 면적당 연결 기기 수가 기존 대비 약 10 배 증가하는 초연결성을 지향한다. 특히, 이러한 환경에서는 방대한 수의 센서 단말이 소량의 데이터를 전송하면서도 에너지 하베스팅(Energy Harvesting) 기술을 통해 자생적으로 동작해야 하므로, 극도의 저전력 통신 방식이 요구된다. 이러한 요구사항을 충족하기 위한 채널 코딩 기술로서 폴라 코드(Polar Codes)가 주목받고 있다. 폴라 코드는 터보 코드(Turbo Codes)나 LDPC 코드와 같은 기존 방식과 비교했을 때, 소량 데이터 전송 환경에서 우수한 오류 정정 성능을 보일 뿐만 아니라 복잡도가 상대적으로 낮다는 강점이 있다. 이러한 기술적 우위성을 바탕으로 폴라 코드는 이미 5G NR의 제어 채널 전송을 위한 표준 기술로 채택되었다.

II. 본론

폴라 코드는 부호 길이 N 이 무한대에 가까워질 때 무기억 채널(memoryless channel)의 채널 용량에 도달할 수 있는 코딩 기술로, $O(N \log 2N)$ 의 복잡도를 갖는 순차적 복호화 (Successive-Cancellation, SC)를 기본 알고리즘으로 한다[1]. 논문 [2]에서 Arikan은 SC 복호기를 사용할 때 체계적(Systematic) 폴라 코드가 비체계적(Non-systematic) 폴라 코드보다 더 우수한 비트 오차율(BER) 성능을 제공하지만, 프레임

오차율(FER) 성능 면에서는 두 방식이 유사한 결과를 보이는 점을 관찰했다.

본 논문에서는 커버리지 확장과 단말의 저전력 통신을 위해, 다음과 같은 비대칭적 전송 구조를 제안한다.

단말은 체계적 인코딩 보다 더 작은 복잡도를 갖는 비체계적 폴라 인코딩 방식으로 낮은 부호 율(Low Code Rate)로 인코딩을 수행하여 전송하고, 기지국이 낮은 부호 율로 전송된 데이터를 디코딩을 수행하여 채널 코딩 이득을 증가시키는 방식을 제안한다. 기지국은 높은 부호 율(High Code Rate)로 체계적인 인코딩 방식으로 인코딩을 수행하여 다중 TRP(Multi-transmission/reception point)를 사용하여 반복 전송을 수행하고, 단말은 높은 부호 율 인코딩 데이터를 다중 TRP를 통해 결합된 신호를 수신하여 높은 부호 율로 인한 감소된 복잡도로 디코딩을 수행한다.

그림 1은 AWGN 채널 환경에서 두 개의 TRP를 통해 전송된 체계적 및 비체계적 폴라 코드의 성능을 비교한 결과이다. 실험 결과, 체계적 인코딩 신호가 비체계적 방식에 비해 우수한 BER 및 FER 성능을 보임을 확인하였다. 이는 체계적 폴라 인코더가 본질적으로 더 우수한 비트 오차 확률 분포를 가지기 때문에, 다중 TRP 신호 결합 시 그 성능 우위가 더욱 극대화되는 것으로 해석할 수 있다.

그림 2에서 Rayleigh 채널에서도 AWGN 채널과 마찬가지로 체계적인 인코딩으로 전송한 신호 결합이 더 우수한 BER 성능을 보임을 확인할 수 있다.

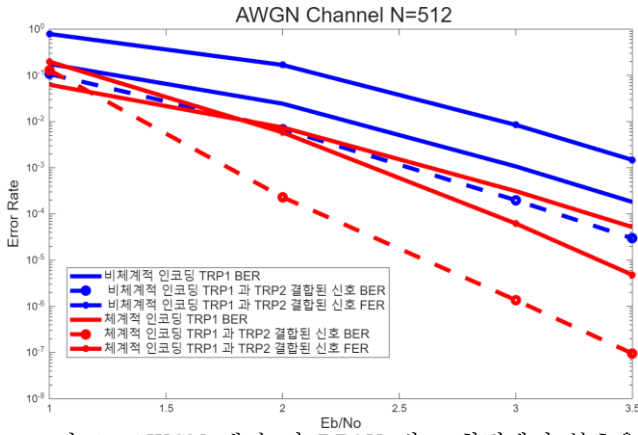


그림 1. AWGN 채널 및 BPSK 변조 환경에서 부호율 R=1/2 에서 SC 디코딩에서 체계적인 과 비체계적인 인코딩 Eb/No 에 따른 BER 과 FER 비교

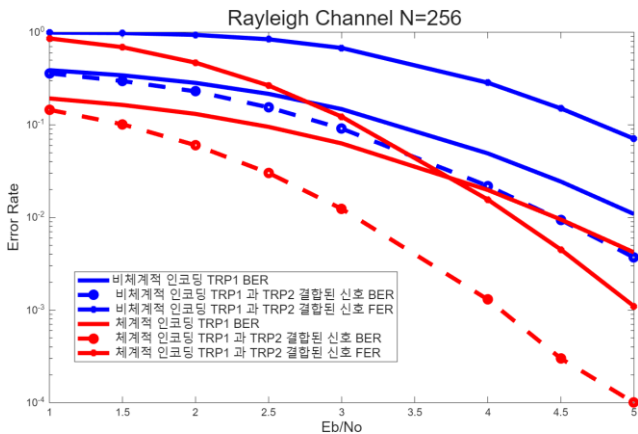


그림 2. Rayleigh 채널 및 BPSK 변조 환경에서 부호율 R=1/2 에서 SC 디코딩에서 체계적인 과 비체계적인 인코딩 Eb/No 에 따른 BER 과 FER 비교

III. 결론

본 논문에서는 6G 대규모 통신 환경에서 소량의 데이터를 전송하는 단말의 에너지 효율성을 극대화하고 서비스 커버리지를 확장하기 위한 비대칭적 폴라 부호화 및 전송 기법을 제안하였다. 단말 측에서는 비체계적 폴라 부호화(Non-systematic Polar Encoding)와 저부호율(Low Code Rate) 기술을 결합하여 송신부의 연산 복잡도를 낮추고 저전력 구동이 가능한 구조를 설계하였다. 이와 동시에, 기지국 측에서는 수신 성능이 우수한 체계적 폴라 부호화(Systematic Polar Encoding)와 다중 TRP(Multi-TRP) 기반의 협력 전송 방식을 적용함으로써 통신 신뢰성을 확보하고 신호 차단 환경에서도 안정적인 커버리지를 보장하도록 하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2025 년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (NO.RS-2024-00397216, Upper-mid Band Extreme massive MIMO(E-MIMO) 시스템 기술 개발)

참 고 문 헌

- [1] 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, July 2009.
- [2] E. Arikan, "Systematic polar coding," IEEE Commun. Lett., vol. 15, no. 8, pp. 860– 862, Aug. 2011.