

DM-OFDM-IM을 위한 Polar 코드 기반 저복잡도 인덱스 검파 기법

김정현, 박호성

전남대학교 지능전자컴퓨터공학과

kim42901@naver.com, hpark1@jnu.ac.kr

Low-complexity Index Detection based on Polar Codes for DM-OFDM-IM

Junghyun Kim, Hosung Park

Dept. of Intelligent Electronic and Computer Engineering, Chonnam National Univ.

요약

본 논문은 이중 모드 인덱스 변조 직교 주파수 분할 다중화 방식을 위한 극부호 기반 인덱스 코드북을 제안한다. 기존 인덱스 매핑 테이블 기반 방식은 모든 가능한 인덱스 패턴을 탐색해야 하므로 인덱스 검파에 지수적 복잡도를 가진다. 제안하는 방법은 인덱스 비트를 극부호 코드워드로 인코딩하고 이를 직접 인덱스 패턴으로 사용하여, 연속 제거 리스트 복호화를 통해 $O(LM\log N)$ 의 준선형 복잡도로 인덱스 검파를 수행한다. 또한, 임의의 인덱스 비트 길이를 지원하여 시스템 설계 유연성을 제공한다. 시뮬레이션 결과를 통해 제안하는 방법은 기존 인덱스 매핑 테이블 방식 대비 상당한 복잡도 감소와 함께 오류 마루를 제거하고 우수한 비트 오류율 성능을 달성하였다.

I. 서론

인덱스 변조 직교 주파수 분할 다중화 방식 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing with Index Modulation, OFDM-IM)은 일부 부반송파만 활성화하며, 부반송파의 인덱스를 통해 추가 정보를 전달하여 기존 OFDM보다 높은 주파수 및 에너지 효율을 달성한다 [1]. 이중 모드 OFDM-IM (Dual-Mode OFDM-IM, DM-OFDM-IM)은 두 개의 구분 가능한 성상도를 사용하여 모든 부반송파를 활성화함으로써 주파수 효율을 개선한다 [2]. 그러나 수신기는 인덱스 검파 시 인덱스 매핑 테이블 (Index Mapping Table, IMT)의 모든 인덱스 패턴을 탐색해야 하므로 지수적 복잡도를 가진다. 부반송파 수가 증가할수록 복잡도가 기하급수적으로 증가하여 실용적인 구현이 어렵다.

기존 IMT 설계 방법들은 인덱스 검파의 지수적 복잡도 문제를 근본적으로 해결하지 못한다 [1]. 본 논문에서는 극부호 기반 인덱스 코드북 (Polar-coded Index CodeBook, PICB)을 제안한다. 극부호는 채널 용량을 달성하며 임의의 부호율을 지원한다 [3]. 제안하는 PICB는 인덱스 비트를 극부호 코드워드로 인코딩하고 이를 직접 인덱스 패턴으로 사용하여, 인덱스 검파를 극부호 복호화 문제로 변환한다. 연속 제거 리스트 (Successive Cancellation List, SCL) 복호화를 통해 준선형 복잡도를 달성하며 우수한 오류정정 성능을 제공한다.

II. 시스템 모델

DM-OFDM-IM 시스템은 N 개의 부반송파로 구성되며, 두 개의 성상도 M_A , M_B 를 사용한다. 본 논문에서는 dual-square QAM (DSQAM) 성상도를 사용하며, 그림 1은 16QAM의 예시를 보여준다 [4]. N 개의 부반송파 중 J 개는 M_A 로 변조되며, 원하는 주파수 효율과 오류 성능을 고려하여 결정된다. 정보 비트는 인덱스 비트 $\mathbf{b}_1$ 와 심볼 비트 $\mathbf{b}_2$ 로 분할되며, 각각의 길이는 $p_1 = \lfloor \log_2 C(N, J) \rfloor$ 과 $p_2 = J\log_2 m_A + (N - J)\log_2 m_B$ 이다. 여기서 $C(N, J)$ 는 이항

계수, m_A 와 m_B 는 각 성상도의 심볼 수이다. 인덱스 비트는 IMT에 따라 인덱스 패턴으로 변환된다. IMT는 2^{p_1} 의 인덱스 패턴으로 구성되며, 각 인덱스 패턴은 M_A 로 변조될 J 개의 부반송파의 인덱스를 지정한다. 수신단에서는 각 부반송파의 로그 우도비 (Log-Likelihood Ratio, LLR)을 계산하고, IMT의 모든 인덱스 패턴에 대해 LLR 합을 계산하여 최대값을 선택한다. 이 과정은 $O(2^{p_1})$ 의 지수적 복잡도를 가진다.

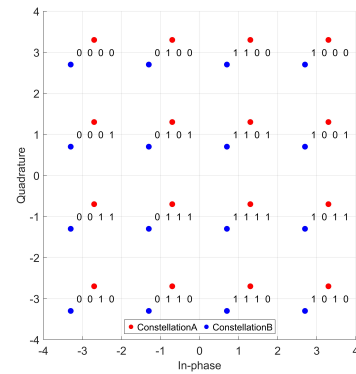


그림 1. DSQAM의 16QAM 성상도

III. 제안하는 방법

제안하는 PICB는 인덱스 비트를 극부호 코드워드로 인코딩하며, 이 코드워드가 직접 인덱스 패턴으로 사용된다. 극부호 Polar(N , K)의 인코딩은 $\mathbf{C} = \mathbf{b}'_1 \mathbf{G}^{\otimes \log_2 N}$ 으로 수행된다. 여기서 $\mathbf{C} = \{0, 1\}^N$ 은 인덱스 코드워드이며, $c_n = 1$ 이면 n 번째 부반송파는 M_A 로, $c_n = 0$ 이면 M_B 로 변조된다. $\mathbf{b}'_1$ 은 K 개의 인덱스 비트와 $N - K$ 개의 동결 비트 (0으로 설정)로 구성된다.

이 접근 방식은 별도의 IMT 없이 극부호 인코딩 자체가 인덱스 매핑 역

할을 한다. 수신단에서는 각 부분송파의 LLR을 SCL 복호기에 입력하여 인덱스 비트를 추정한다. SCL 복호화는 리스트 크기 L 개의 후보 경로를 유지하며 $O(LN\log N)$ 의 복잡도를 가진다. 제안하는 PICB는 임의의 K 값을 선택할 수 있어 시스템 설계 유연성이 향상된다.

극부호의 설계를 위해 가우시안 근사 (Gaussian Approximation, GA) 방법을 사용하여 부채널 신뢰도를 추정한다 [5]. 신뢰도가 가장 높은 K 개를 정보 비트 전송 채널로 선택하고, 나머지는 동결 비트로 설정한다. 부호 설계 시 목표 동작 신호 대 잡음비 (Signal-to-Noise Ratio, SNR) 범위를 고려하여 적절한 설계 SNR을 선택한다.

IV. 모의실험

시뮬레이션은 가산 백색 가우시안 잡음 (Additive White Gaussian Noise, AWGN) 채널, DSQAM 성상도, $N = 32$, $K = 12$ 조건에서 수행되었다. PICB는 $L = 8$ 인 SCL 복호화를 사용하며, 비교 대상은 기존 IMT 기반 DM-OFDM-IM ($N = 32$, $J = 3$, $p_1 = 12$)이다. 극부호 설계를 위한 SNR은 QPSK (Quadrature Phase Shift Keying)의 경우 12dB, 16QAM (Quadrature Amplitude Modulation)의 경우 14dB로 설정하였다.

표 1. 복잡도 비교 ($N = 32$, $K = 12$)

방법	복잡도 차수	연산 수 (근사값)
기존 IMT	$O(2^{b_1})$	4,096
PICB	$O(LN\log N)$	1,280

표1은 $N = 32$ 와 $K = 12$ 일 때 복잡도 비교를 보여준다. PICB는 기존 IMT 방식 대비 약 3.2의 복잡도 감소를 달성하며, N 이 증가할수록 감소 효과는 증가한다.

그림 2와 그림 3은 각각 QPSK와 16QAM에 대한 전체 비트 오류율 (Bit Error Rate, BER) 성능을 보여준다. 전체 BER은 인덱스 비트와 심볼 비트의 오류를 모두 포함한다. 두 변조 방식 모두에서 PICB는 기존 IMT 기반 방식보다 우수한 성능을 보인다.

QPSK의 경우, 약 10dB 이상의 SNR 영역에서 PICB는 기존 IMT 방식 대비 상당한 성능 이득을 보인다. 기존 IMT 방식은 높은 SNR에서도 완만한 BER 감소를 보이는 반면, PICB는 극부호의 우수한 오류 정정 능력으로 가파른 BER 감소를 보인다. 16QAM의 경우에도 유사한 경향을 보이며, 특히 12dB 이상의 SNR 영역에서 PICB의 성능 우위가 더욱 명확해진다. 이는 변조 차수가 증가할수록 인덱스 검파의 중요성이 커지며, 극부호 기반 접근 방식이 더 효과적임을 시사한다. 전반적으로 PICB는 기존 IMT 방식보다 우수한 성능을 제공하며, 이는 극부호 기반 인덱스 검파가 DM-OFDM-IM의 성능 개선에 효과적임을 보여준다.

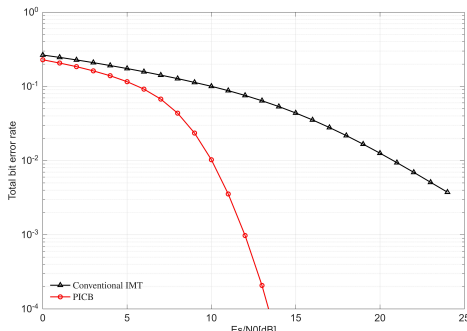


그림 2. QPSK에 대한 전체 BER 성능 ($N = 32$, $K = 12$)

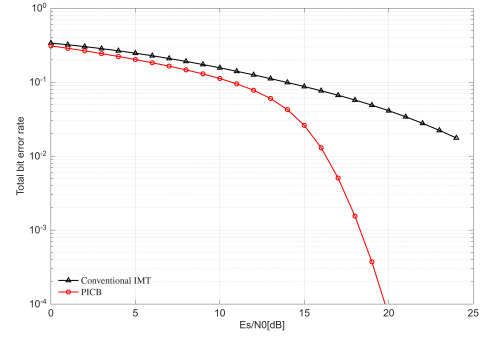


그림 3. 16QAM에 대한 전체 BER 성능 ($N = 32$, $K = 12$)

V. 결론

본 논문은 DM-OFDM-IM을 위한 극부호 기반 인덱스 코드북을 제안하였다. 제안하는 PICB는 인덱스 검파를 극부호 복호화 문제로 변환하여 기존 방식의 지수적 복잡도를 준선형 복잡도로 감소시킨다. 시뮬레이션 결과를 통해 QPSK와 16QAM 모두에서 상당한 복잡도 감소와 우수한 BER 성능을 달성하였다. 특히 높은 SNR에서 PICB는 기존 IMT 방식보다 가파른 BER 감소를 보이며, 변조 차수가 증가할수록 성능 이득이 더욱 명확해진다. 향후 다양한 시스템 파라미터와 성상도에 대한 성능 분석을 수행할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원 (지역지능화혁신인재양성사업 IITP-2026-RS-2022-00156287 30%; 학·석사연계ICT핵심인재양성 IITP-2026-RS-2024-00436837)과 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단 (RS-2025-25398164)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고 문헌

- [1] E. Başar et al., "Orthogonal frequency division multiplexing with index modulation," IEEE Trans. Signal Process., vol. 61, no. 22, pp. 5536–5549, Nov. 2013.
- [2] T. Mao et al., "Dual-mode index modulation aided OFDM," IEEE Access, vol. 5, pp. 50–60, Feb. 2017.
- [3] E. Arıkan, "Channel polarization: A method for constructing capacity achieving codes," IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 55, no. 7, pp. 3051–3073, Jul. 2009.
- [4] K.-H. Kim and H. Park, "New design of constellation and bit mapping for dual mode OFDM-IM," IEEE Access, vol. 7, pp. 52573–52580, 2019.
- [5] P. Trifonov, "Efficient design and decoding of polar codes," IEEE Trans. Commun., vol. 60, no. 11, pp. 3221–3227, Nov. 2012.