

AWGN 채널에서 우수한 QAM 전송을 위한 다이버시티 정렬 기반 매핑 기법

남효근*, 백승엽*, 안현태**, 김상효**†

*성균관대학교 전자전기공학부

**성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

†iamshkim@skku.edu

Diversity Alignment-Based Mapping Technique for Enhanced QAM Transmission over AWGN Channels

Hyogeen Nam*, Seung Yeop Baek*, Hyun Tae Ahn**, Sang-Hyo Kim**

*Department of Electronics and Electrical Engineering, Sungkyunkwan University

**Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University

요약

본 논문에서는 부가 백색 가우시안 잡음 채널의 고차 변조 환경에서 극부호의 성능을 향상시키기 위해, 블록 페이딩 채널에서의 다이버시티 정렬 기법을 응용한 새로운 인터리버 설계 방법을 제안한다. 제안하는 기법은 부호화된 비트들을 다이버시티 정렬을 통해 두 개의 서브 블록으로 나누고, 이를 심볼의 최상위 비트와 최하위 비트에 매핑함으로써 기존의 5G-NR의 삼각 인터리버 대비 향상된 복호 성능을 달성함을 입증하였다.

I. 서 론

극부호(Polar codes)는 부호 길이가 길어짐에 따라 이론적으로 채널 용량을 달성할 수 있음이 증명된 최초의 오류 정정 부호로 [1], 5G-NR(new radio)의 제어 채널을 위한 부호화 방식으로 채택되었다 [2]. 5G-NR 표준에서는 고차 변조(high-order modulation) 전송 시 발생하는 페이딩 효과나 불균등한 오류 보호를 완화하기 위해 비트 인터리빙(bit-interleaving) 기술을 적용하며, 이를 위해 의사 랜덤(pseudo-random) 특성을 갖는 삼각 인터리버(triangular interleaver)를 사용하고 있다 [2].

최근 연구에서는 블록 페이딩 채널(block fading channel, BFC) 환경에서 극부호의 다이버시티 이득을 극대화하기 위한 ‘다이버시티 정렬(diversity alignment)’ 기법이 제안되었다 [3]. 이 기법은 부호어의 구조적 특성을 활용하여, 부호율(code rate) 0.5 이하에서 전-다이버시티(full-diversity)를 보장할 수 있음이 증명되었다.

본 논문에서는 이러한 BFC에서의 다이버시티 정렬 개념을 부가 백색 가우시안 잡음 채널(additive white Gaussian noise channel, AWGNC)의 고차 변조 환경으로 확장 적용하였다. 다이버시티 정렬 기법의 원리를 차용하여, 고차 변조 시스템에서 심볼 내 비트 위치에 따른 신뢰도 차이를 기반으로 가상의 페이딩 블록을 모델링하고, 생성된 서브블록들을 이에 매핑함으로써 기존의 삼각 인터리버 대비 강건한 성능을 얻을 수 있음을 확인하였다.

II. 본 론

1. 극부호 소개

극부호는 채널 양극화(channel polarization) 현상을 이용하는 오류정정부호이다 [1]. 길이 $N = 2^n$ ($n \in \mathbb{N}$)인 극부호는 생성행렬 \mathbf{G}_N 을 통해 소스 벡터 \mathbf{u} 를 부호어 \mathbf{d} 로 변환한다 ($\mathbf{d} = \mathbf{u}\mathbf{G}_N$). 이후 채널을 통과하여, 수신 신호 \mathbf{y} 를 얻게 된다. 여기서 \mathbf{u} 를 입력으로, \mathbf{y} 를 출력으로 하는 하나의 합성 채널(W_N)을 정의할 수 있다. 한편, 각 소스 비트마다 입력이 u_i , 출력이 $\mathbf{y}, \mathbf{u}_0^{i-1} (= (u_0, \dots, u_{N-1}))$ 인 천이 확률(transition probability) $W(\mathbf{y}, \mathbf{u}_0^{i-1} | u_i)$ 가 정의되고, 이에 해당하는 가상의 분리 채널 $W_N^{(i)}$ 를 얻는 과정을 채널 분리(channel splitting)라고 한다.

복호기에서는 연속 제거(successive cancellation, SC) 복호화를 통해 분리 채널의 신뢰도를 얻는다. 극부호에서 분리 채널의 신뢰도는 양극화되며, 신뢰도가 높은 위치에 정보 비트를 할당하고, 신뢰도가 낮은 위치에는 값이 일반적으로 0으로 고정된 비트(frozen bits)들을 할당한다.

2. 극부호 기반 BICM 시스템 소개

BICM(bit-interleaved coded modulation) 시스템은 부호화된 변조(coded modulation) 시스템의 성능을 개선하기 위해, 인코더 출력단에 비트 단위의 인터리빙을 적용하는 시스템이다 [4]. 본 논문에서는 논문 [5]에서 제안한, BICM 구조를 극부호에 적용한 시스템을 이용하였다. 그럼 1과 같이, 극부호화에 의해 생성된 부호어 비트들은 인터리버를 거쳐 순서가 재배열된 후, 변조기(modulator)를 통해 고차 변조 심볼로 매핑된다. 이때 인터리버는 인접한 부호어 비트들이 채널의 깊은 페이딩(deep fading)이나 연접 오류(burst error)에 동시에 노출되는 것을 방지함으로써, 복호 성능을 향상시키는 역할을 한다. BICM 시스템은 전송 효율을 높이기 위해 QAM(quadrature amplitude modulation)과 같은 고차 변조 방식을 주로 사용한다. m -QAM 변조 방식은 $\log_2 m$ 개의 비트를 하나의 복소수 심볼에 매핑하여 전송한다.

그러나 QAM과 같은 고차 변조 방식에서는 구조적인 특성상 모든 비트가 동일한 오류 확률을 갖지 않는다. 일반적으로 성상도(constellation) 매핑 시 그레이 매핑(Gray mapping)을 사용하는데, 이때 각 비트의 위치(bit level)에 따라 결정 경계(decision boundary)까지의 유클리드 거리가 달라지기 때문이다 [4]. 그레이 매핑의 구조상 최상위 비트(most significant bits, MSB)의 결정 경계까지의 거리보다 최하위 비트(least significant bits, LSB)의 결정 경계까지의 거리가 가까우므로, MSB가 LSB에 비해 상대적으로 잡음과 간섭으로 인한 오류 확률이 낮다.

따라서 하나의 QAM 심볼 내에서도 비트의 위치에 따라 불균등한 오류 보호 특성이 필연적으로 발생한다. 그러므로 BICM 시스템의 성능을 극대화하기 위해서는 이러한 비트별 신뢰도 차이를 고려하여, 극부호의 고신뢰도 비트와 저신뢰도 비트를 적절한 변조 비트 위치에 매핑하는 인터리버 설계가 요구된다.

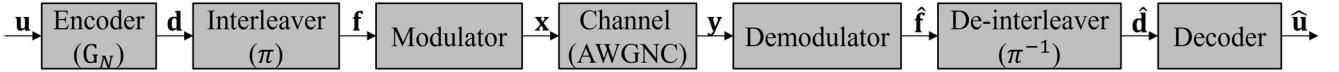


그림 1. BICM 시스템

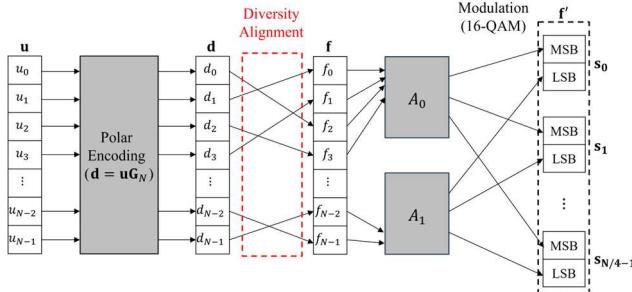


그림 2. 제안된 인터리버의 설계 방법

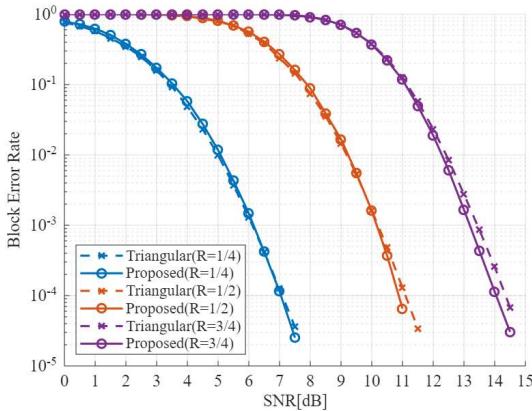


그림 3. 기존의 삼각 인터리버와 제안된 인터리버 ($N = 128$, 16-QAM)의 성능 비교(BLER: 10^{-4}) 실험 결과

3. 블록 페이딩 채널 시스템에서의 다이버시티 정렬

BFC 전송에서 송신 신호는 M 개의 독립적인 페이딩 블록을 통과한다. 다이버시티 정렬은 부호어 비트들을 M 개의 페이딩 블록에 적절히 매핑하여, 복호 과정에서 정보 비트들이 위치한 인덱스가 전-다이버시티를 갖도록 만드는 기법이다 [3]. 구체적으로, M 개의 블록 중 하나만 깊은 페이딩에 빠지지 않아도 모든 정보 비트가 복구 가능할 때, 전-다이버시티를 보장하는 전송이 된다.

4. 제안된 인터리버의 설계 방법

본 논문에서는 AWGNC에서의 16-QAM 변조 시스템 성능 향상을 위해 다이버시티 정렬을 이용한 인터리버 설계를 제안한다(그림 2).

먼저 입력 벡터 \mathbf{u} 는 극부호화를 거쳐 부호어 벡터 \mathbf{d} 를 생성한다. 이후 \mathbf{d} 의 각 원소들은 $M = 2$ 를 가정한 다이버시티 정렬 알고리즘을 통과한다. 이때, 모든 정보 비트가 최적의 다이버시티를 보장하도록 설계된 순열을 적용해 부호어 비트를 재배열해 \mathbf{f} 를 출력한다. 이후 벡터 \mathbf{f} 는 동일한 크기를 갖는 2개의 서브블록 A_0, A_1 로 분할된다 [3].

16-QAM 변조는 하나의 심볼(s_i)에 4개의 비트를 매핑한다. 본 연구에서는 서브블록 A_0 에 할당된 비트들은 각 심볼의 MSB 위치에 할당하고, 서브블록 A_1 에 할당된 비트들은 각 심볼의 LSB 위치에 할당하는 구조를 따른다. 최종 인터리빙 시퀀스 \mathbf{f}' 는 비트 시퀀스 자체로 전송되는 것이 아니라, 각 심볼 내 비트 위치에 따라 재배열된 비트들이 QAM 변조를 통해 심볼 단위로 묶여 채널로 전송되는 구조로 정의된다. 이러한 설계는 심볼 내 비트 위치에 따른 신뢰도 차이를 고려하여, 고차 변조 환경에서 극부호의 복호 성능을 효과적으로 향상시키기 위함이다.

III. 실험 결과

본 절에서는 AWGNC에서 16-QAM 변조를 적용한 극부호의 복호 성능을 관찰한다. 실험 결과, 그림 3에서 보이는 바와 같이 제안된 특정 다이버시티 정렬 기반 인터리버는 기존의 삼각 인터리버 대비 동일한 블록 오율(block error rate, BLER) 조건에서 더 낮은 SNR(signal to noise ratio)을 요구하며 성능 이득을 보였다. 이는 다이버시티 정렬이 BFC뿐만 아니라 AWGNC의 고차 변조에서도 유연하게 동작함을 시사한다. 여기서 부호율이 낮은 경우($R = 1/4$) 경우(이득: 0.045dB)에 비해 부호율이 높은 경우($R = 1/2, 3/4$), 각각 0.22dB와 0.306dB로 더 유의미한 성능 이득을 얻음을 확인할 수 있었다.

IV. 결론

본 논문에서는 BFC 환경을 위해 고안된 다이버시티 정렬 기법을 AWGNC 기반의 고차 변조 시스템에 적용하여 인터리버를 설계하였다. 제안 기법은 부호어를 다이버시티 정렬에 따라 정렬한 뒤 두 개의 서브블록(A_0, A_1)으로 분할하여 변조 심볼의 MSB와 LSB에 체계적으로 매핑함으로써, 기존의 삼각 인터리버 대비 향상된 성능을 달성하였다. 특히 16-QAM과 같이 비트 레벨의 신뢰도 차이가 존재하는 환경에서, 제안된 구조적인 비트 매핑이 기존 기술보다 향상된 복호 성능을 제공할 수 있음을 확인하였다.

향후 연구로는 64-QAM 이상의 변조에 대한 정렬 기법으로의 확장과, 실제 시스템 적용을 위한 부호율 정합(rate matching) 과정이 포함된 환경에서의 성능 분석 및 최적화 연구를 수행할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2026년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(RS-2024-00343913) 및 정보통신기획평가원의 지원(RS-2024-00397216)을 받아 수행된 연구임.

참고 문헌

- [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, p. 3051–3073, Jul. 2009.
- [2] 3GPP, NR; Multiplexing and channel coding, TS 38.212, v. 19.1.0, Sep. 2025.
- [3] H. Ju *et al.*, "Diversity Guaranteeing Transmission of Polar Codes over Block Fading Channels," 2022 IEEE Globecom Workshops, pp. 480–485, 2022.
- [4] G. Caire, G. Taricco, and E. Biglieri, "Bit-interleaved coded modulation," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 44, no. 3, pp. 927–946, May 1998.
- [5] H. Mahdavifar *et al.*, "Polar coding for bit-interleaved coded modulation," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 65, no. 5, pp. 3115–3127, May 2016.