

비트 인터리빙된 극부호화 변조 시스템을 위한 인터리버 설계 방법

남효근*, 백승엽*, 주효상**, 김상호**†

*성균관대학교 전자전기공학부

**성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

†iamshkim@skku.edu

An Interleaver Design for Bit-Interleaved Polar-Coded Modulation Systems

Hyogeun Nam, Seung Yeop Baek, Hyosang Ju, Sang-Hyo Kim*

* Department of Electronics and Electrical Engineering, Sungkyunkwan University

**Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University

요약

본 논문에서는 인터리빙된 극부호화 변조 전송 시스템을 위한 변형된 인터리버 설계 방법을 제안한다. 비트 인터리버를 통해 채널부호의 고차변조 전송 시 페이딩 효과를 상쇄시켜 복호 성능 저하를 방지할 수 있으며, 5G 표준에서는 의사-랜덤 인터리버인 삼각 인터리버(triangular interleaver)를 채택하고 있다. 본 연구팀은 다양한 고차변조 전송 환경에서 삼각 인터리버 대비 개선된 복호 성능을 가질 수 있는 변형된 블록 인터리버의 설계 방법을 제안한다. 경험적인 방법을 통해 결정된 폭을 갖는 블록 인터리버에 따라 인터리빙을 수행하면, 부호길이 128인 극부호의 256QAM 전송 시, 연속 제거 복호 하에서 블록 오류 0.1% 기준 평균 약 0.4dB의 성능 이득을 가질 수 있다.

I. 서론

극부호(polar codes)는 2009년 Erdal Arikan이 제안한 오류정정부호로, 이론적으로 채널 용량을 달성하는 것이 증명된 최초의 부호이다 [1]. 짧은 부호 길이에서의 우수한 복호 성능과 낮은 부호복잡도 덕분에 5G New Radio (NR)를 위한 제어용 채널 부호로 채택되었다. 5G NR 표준에서는 페이딩 채널을 통한 부호화된 데이터의 전송 시 페이딩 효과를 상쇄하기 위해 인터리빙이 적용된 부호화 변조(bit-interleaved coded-modulation, BICM) 시스템을 고려하고 있다 [2,3]. 이때 비트 인터리버는 부호어 비트들을 변조 심볼로 매핑하며, 오류 복원력을 높이는 핵심 역할을 한다.

BICM의 변조 단계에서 BPSK나 QPSK와 같은 저차변조 전송은, 성상도(constellation)의 실수 축에서의 페이딩 효과가 균일하여 인터리버 설계에 따른 성능 차이가 거의 없다. 반면, 고차변조(high-order modulation) 전송 시에는 비트 레벨 간(e.g., MSB (most significant bit) 및 LSB (least significant bit)) 오류 보호 수준이 달라진다. 따라서, 인터리버 설계가 복호 성능에 중요한 영향을 미친다. NR 표준에 채택된 삼각 인터리버는 의사-랜덤 인터리버의 일종으로, 하드웨어 친화적인 구현이 가능함과 동시에 다양한 부호 파라미터에서 랜덤 인터리버와 거의 비슷한 성능을 제공한다.

하지만, 삼각 인터리버는 넓은 파라미터 범위에서 좋은 성능을 확보하기 위해 만들어졌으므로, 특수한 파라미터에서는 성능 개선의 여지가 존재한다. 이에, 본 논문에서는 부호어 비트들의 변조 심볼들의 매핑을 체계적으로 구성한 변형된 블록 인터리버의 설계 방법을 제안한다. 실험 결과, 제안된 인터리버는 다양한 고차변조 환경에서 기존 삼각 인터리버 대비 우수한 복호 성능을 가짐을 확인하였다.

II. 본론

1. 극부호(polar codes)

극부호는 채널 양극화(channel polarization)에 기반해 부호를 설계한다. 소스벡터 \mathbf{u} 는 생성행렬 \mathbf{G}_N 에 의해 부호화되어 부호어 \mathbf{d} 를 생성하며, 채널을 통과해 수신신호 \mathbf{y} 가 얻어진다. 이 때, 벡터 \mathbf{u} 와 \mathbf{y} 를 연결하

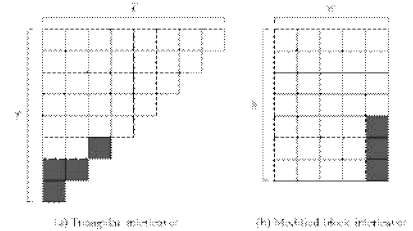


그림 1. 비트 인터리버 예시: (a) 삼각 인터리버, (b) 블록 인터리버. 하나의 합성 채널 W_N 을 얻을 수 있으며, 이 과정이 채널 합성(channel combining)이다. 채널 분리는, 수신신호 \mathbf{y} 로부터 \mathbf{u} 를 한 비트씩 순차적으로 genie-aided 복호 과정에 상응한다. 구체적으로, 각 비트마다 입력이 u_i 이고 출력이 $\mathbf{y} = (y_0, \dots, y_{N-1})$ 및 \mathbf{u}_0^{i-1} 인 전이확률(transition probability) $W_N^{(i)}(\mathbf{y}, \mathbf{u}_0^{i-1} | u_i)$ 이 정의되고, 이에 상응하는 채널을 분리채널(split channel)이라 한다. 분리채널들의 퀄리티는 양극화(polarized)되며, 신뢰도가 높은 비트들에 데이터를 전송하고, 그렇지 않은 비트들에는 통상 0으로 고정된 값을 전송한다.

2. 비트 인터리빙이 적용된 극부호화 변조 전송 시스템

본 세부절에서는 극부호의 BICM (bit-interleaved coded-modulation) 시스템 모델에 대해 소개한다. 부호어 \mathbf{d} 는 변조되기 전 비트 단위로 인터리빙되며, 치환된 부호어 벡터를 \mathbf{f} 라 표기한다. 이 때 인터리버 π 에 대해 입출력 간 비트들의 관계는 $f_i = d_{\pi(i)}$ 로 나타낼 수 있다. 비트 인터리버는 부호어 비트들을 변조 심볼의 비트 위치에 적절히 매핑하여 페이딩 효과를 분산함으로써 복호 성능 향상을 유도할 수 있다. 예컨대 블록 페이딩 환경이나 시간 선택적(selective) 채널에서 인터리빙을 통해 군집오류의 발생을 회피한다.

5G 표준에서는 비트 인터리버로 삼각 인터리버(triangular interleaver)를 채택하고 있으며 [2,3], 이는 그림 1(a)에 나타나 있다. 유효 부호길이 E 에 대하여 삼각 인터리버의 한 번의 길이 $T = \frac{T(T+1)}{2} \geq E$ 를 만족하는 최소 정수값으로 결정되며, 부호어 비트들의 인덱스를 행 방향으로 기록한 후, 열 방향으로 추출한다. 크기가 $T \times T$ 인 보조 행렬 V 에 대하여,

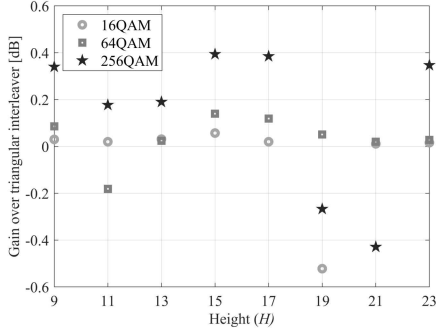


그림 2. 변형된 블록 인터리버의 높이에 따른 다양한 고차변조 전송 환경 (16,64,256QAM)에서 블록 오류 0.1%를 달성하는 요구 SNR 기준 삼각 인터리버 대비 갖는 평균적인 성능 이득[dB]

(i, j) 번째 원소값 $V_{i,j}$ 는

$$V_{i,j} = \begin{cases} \text{NULL, if } i+j \geq \text{Tor}(i) + j \geq E \\ d_{r(i)+j}, \text{ otherwise.} \end{cases} \quad (1)$$

와 같이 나타낼 수 있다.

III. 변형된 비트 인터리버 설계 방법

본 절에서는 극부호의 BICM 시스템을 위한 변형된 인터리버 설계 방법에 대해 상술한다. 고차변조 방식에서는 하나의 심볼에 다수의 부호어 비트들이 매핑되며, 심볼 내 비트 위치에 따라 서로 다른 오류 민감도를 갖는다. 따라서 비트 인터리버 설계 시 비트 위치에 따른 비균등 오류 보호를 고려해야 한다. 블록 인터리버는 채널 송신부에서 비트 시퀀스를 가로 방향으로 입력하고, 세로 방향으로 읽어들이는데, zero-based 인덱싱을 가정했을 때의 (i, j) 번째 원소값은 $mi+j$ 이다. 만약 유효 부호어 길이가 변조 차수로 나누어 떨어지지 않는 경우에는 잔여 공간의 상태는 NULL이다. 즉, 이 위치에는 부호어 비트들이 채워지지 않고 공란으로 남겨진다. 일반적으로 NULL은 모든 부호어 비트 인덱스들을 행 단위로 채우므로 하단 행부터 배치된다. 이는 인터리빙 결과의 세로 패턴, 즉 수직 방향의 비트 배열을 왜곡시킬 수 있다.

따라서 본 논문에서는 NULL을 가장 우측 열의 하단에만 배치하여 수직 방향의 패턴, 특히 MSB 패턴의 구조적 일관성을 유지하도록 구성하는 것을 제안한다. 그림 1(b)에 나타나 있다. 이 방식은 변조 레벨에서 중요도가 높은 비트에 대한 보호 패턴을 예측 가능하고 반복 가능한 형태로 보장할 수 있다. 먼저, 블록 인터리버의 높이(height) 파라미터 h 에 대하여, 너비(width) w 는 $w \geq N/h$ 를 만족하는 최소 정수값으로 설정한다. 이 때, NULL의 개수인 l 은 $l = N - h \cdot w$ 로 결정되고 블록 인터리버의 가장 우측의 최하단 비트부터 l 개만큼 비워진다. 입력 인덱스는 첫번째 행부터 행 단위로 입력되고, 출력 시퀀스는 가장 왼쪽 열부터 열 단위로 읽어 출력 벡터를 생성한다.

IV. 실험 결과

본 절에서는 제안하는 변형된 블록 인터리버의 성능을 5G 삼각 인터리버가 적용된 BICM 시스템 성능과 비교한다. 부호길이는 128, {16,64,256}-QAM 전송을 고려하였고, 연속 제거 복호 하에서의 성능을 비교하였다. 구체적으로, 0.15부터 0.80 사이의 다양한 부호율 영역에 대하여 개별 정보비트 단위로 복호 성능을 평가하였다.

그림 2는 변형된 블록 인터리버의 설계 높이(height, h)에 따라 다양한 변조 환경에 대해 삼각 인터리버 대비 얻을 수 있는 복호 성능 이득을 나타낸다. 구체적으로, 성능 이득은 블록 오류 10^{-3} 을 달성하는 필요 SNR

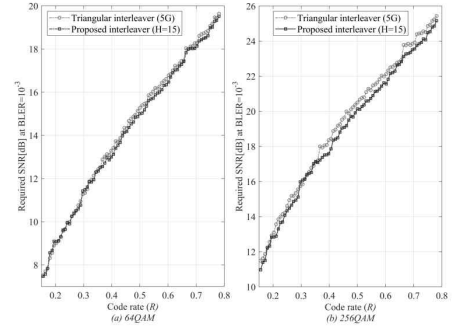


그림 3. $N=128$ 이고 (a) 64QAM, (b) 256QAM 변조를 고려하였을 때 height가 15인 변형된 블록 인터리버와 삼각 인터리버에 대한 SC 복호 시 블록 오류 0.1%를 달성하는 요구 SNR[dB] 비교.

간의 차이이다. 실험 결과, 높이가 15, 17인 블록 인터리버가 삼각 인터리버 대비 항상 강건한 복호 성능 이득을 갖는다. 특히, 변조 차수가 높아짐에 따라서 얻을 수 있는 복호 성능 이득이 커지고, 256QAM의 경우 평균 0.4dB의 성능 이득을 가짐을 알 수 있다.

그림 3은 높이가 15인 변형된 블록 인터리버와 기존의 삼각 인터리버가 각각 적용된 극부호 BICM 시스템에 대하여 64QAM, 256QAM 변조 전송 시 연속 제거 복호 성능을 나타낸 것이다. 구체적으로, 부호율에 따라 블록 오류율 10^{-3} 을 달성하는 요구 SNR을 비교하였다. 실험 결과, 다양한 부호율에서 꾸준히 제안 인터리버가 우수한 성능을 달성할 수 있으며, 특히 256QAM 전송 시 성능 이득이 크다.

IV. 결론

본 논문에서는 극부호를 위한 비트 인터리빙된 부호화 변조 전송을 위한 개선된 인터리버 설계 방법을 제안하였다. 특히, 5G-NR 표준에서 사용하고 있는 삼각 인터리버 대신, 제안하는 변형된 블록 인터리버 구조를 적용함으로써 시스템 성능의 개선 가능성을 확인하였다. 인터리버의 높이와 그에 따른 폭을 계획적으로 설계함으로써, 변조 차수가 증가함에 따라 기존 삼각 인터리버 대비 평균적으로 큰 성능 이득을 확보할 수 있었다.

이 연구 결과는 기존의 블록 인터리버의 파라미터 변경을 통해 유의미한 시스템 성능 향상을 이끌어낼 수 있음을 보여준다. 향후 연구로는, 제안하는 인터리버 구조를 부호율 정합(rate-matched) 극부호의 전송 환경으로 확장하는 것을 고려하고자 한다. 즉, 천공(puncturing) 혹은 단축(shortening) 등을 통해 길이가 $E(<N)$ 인 부호에서도 제안 설계 방법이 강건하게 동작하는 지 검증한다. 더 나아가, CRC 부호를 활용한 연속 제거 리스트 복호 하에서의 성능 강건성을 확인하고자 한다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원(RS-2024-00398449)과 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(RS-2024-00343913)

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. 15.2.0, Sep. 2018.
- [3] V. Bioglio, C. Condo, and I. Land, "Design of polar codes in 5G new radio," IEEE Commun. Surv. Tut., vol. 23, no. 1, p. 29–40, 2021.