연쇄 복호를 이용하는 이중 모드 OFDM-IM 채널코딩

최승기, 박호성*
전남대학교 컴퓨터정보통신공학과

csg05158@naver.com, *hpark1@jnu.ac.kr

Channel coding for dual-mode OFDM-IM using successive cancellation decoding

Seunggi Choi, Hosung Park
Dept. of Computer Engineering, Chonnam Nat'l Univ.

요 약

본 논문은 이중 모드 인덱스 변조 직교 주파수 분할 다중화(dual mode orthogonal frequency division multiplexing with index modulation: DM-OFDM-IM)에서 연쇄 복호를 이용하는 채널코딩 방식을 제안하고 모의 실험 결과 기존의 전체에 채널코딩을 적용하는 방식보다 더 좋은 비트 오류율(bit error rate: BER) 성능을 달성하였다. 제안하는 방식은 DM-OFDM-IM 구조에서 인덱스 비트 부분과 심볼 비트 부분을 각각 다른 부호율로 채널코딩을 수행하고 연쇄 복호를 통해 인덱스 비트 부분 복호를 마친 뒤, 그 결과로 심볼 비트 부분 복호를 진행하는 방식을 사용하였다.

Ⅰ. 서 론

인덱스 변조 직교 주파수 분할 다중화(orthogonal frequency division multiplexing with index modulation: OFDM-IM)은 기존 OFDM 기술에서 활성화 부반송파 인덱스를 사용해 성능을 높였다. 하지만 부반송파를 활성화하면서 사용하지 않는 부반송파로 인해 효율이 떨어지기 때문에 모든 부반송파를 사용하는 DM-OFDM-IM이 제안됐다[1]. 이후 성능 향상을 위해 성상도를 최적화하는 등 다양한 방식들이 제안됐다[2]. 또한, 5G LDPC(low density parity check) 부호를 사용한 DM-OFDM-IM으로의 적용은 좋은 성능으로 이어진다[3]. 기존 방식은 보내려는 인덱스 비트와 심볼 비트가 합쳐진 메시지 비트에 채널코딩을 한번에 부호화, 복호를 하는 반면, 제안하고자 하는 방식은 메시지 비트에서 인덱스 비트와 심볼 비트 부분을 따로 채널코딩을 수행한 뒤, 인덱스 비트를 먼저 복호하고 오류가 정정된 추정값을 통해 심볼 비트 부분을 복호하는 방식이다. 모의 실험을 통해 기존의 방식보다 더 낮은 오류율을 가짐을 보인다.

Ⅱ. 본론

1. 기존 DM-OFDM-IM 및 LDPC 코딩

DM-OFDM-IM에서 보내고자 하는 메시지 Bbit가 부호율 $R=B/E$인 LDPC 부호를 통해 Ebit로 부호화 된다. 완성된 부호어는 G개의 부블록으로 나눠지며 한 부블록당 $p=E/G$bit이다. IFFT의 크기는 N이며 부블록 당 부반송파의 개수는 $n=N/G$이다. 인덱스 비트 부분은 $p_1$bit, 심볼 비트 부분은 $p_2$bit이고 $p=p_1+p_2$이다. $M=2^{bps}$이고 M-QAM(quadrature amplitude modulation)일 때, p_1과 p_2는 다음과 같다.

$$p_1 = \left\lfloor \log_2 \binom{n}{k} \right\rfloor, p_2 = n\log_2 M$$

일반적으로 사용하는 변조방식인 16-QAM의 성상도를

$$M_{16QAM} = \{\pm 1 \pm j, \pm 1 \pm 3j, \pm 3 \pm j, \pm 3 \pm 3j\}$$

라고 할 때, DM-OFDM-IM 두 쌍 M_A와 M_B는 다음과 같다.

$$M_A = M_{16QAM} \oplus (0.48 + 0.48j)$$
$$M_B = M_{16QAM} \oplus (-0.48 - 0.48j)$$

n개 중 k개의 부반송파가 M_A에 의해 변조되고, $n-k$개의 부반송파가 M_B에 의해 변조된다. n개의 심볼이 하나의 부블록 X^g(g=1, 2, ⋯, G)를 생성한다.

2. 제안하는 DM-OFDM-IM 및 LDPC 코딩

제안하는 방법은 보내고자 하는 메시지 비트 Bbit가 인덱스 비트 부분인 B_1bit와 심볼 비트 부분인 B_2bit로 나눠지고 각각 부호율 $R_1=B_1/E_1$, $R_2=B_2/E_2$인 LDPC 부호를 통해 E_1bit, E_2bit로 부호화 된다.

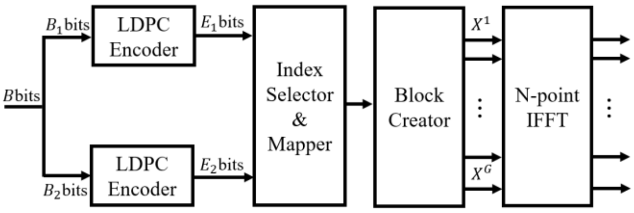

그림 1. 제안하는 DM-OFDM-IM 송신부 블록도

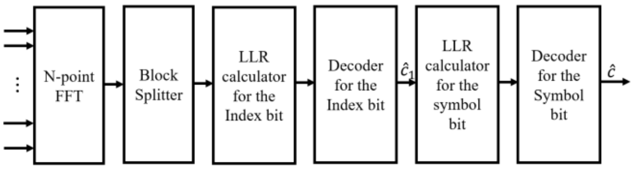

그림 2. 제안하는 DM-OFDM-IM 수신부 블록도

3. LLR 연산 및 복호

송신부에서 전송한 i(1, 2, ⋯, g)번째 부블록을 X^i, 수신부에서 해당 수신값을 Y^i라고 할 때

$$Y^i = \mathrm{X}^{\mathrm{i}} + \mathrm{W}^{\mathrm{i}}$$

이고 벡터 W^i의 j번째 요소 W^i_j(j=1, 2, ⋯, n)는 AWGN(additive white gaussian noise)으로 $W^i_j \sim CN(0,\ N_0)$이다. 수신값 Y^i를 통해 인덱스 비트 LLR(log-likelihood ratio) 값을 계산한다.

$$\lambda_{\mathrm{I}}(\mathrm{b}) = \ln\frac{\sum_{\mathcal{I}\in\mathcal{I}_{\mathrm{b},0}} \mathrm{P}\left(\mathcal{I}(X^i) = \mathcal{I} \mid Y^i\right)}{\sum_{\mathcal{I}\in\mathcal{I}_{\mathrm{b},1}} \mathrm{P}\left(\mathcal{I}(X^i) = \mathcal{I} \mid Y^i\right)}$$

$\mathcal{I}_{b,0}$는 b(1, 2, ⋯, p_1)번째 비트가 0일 때 해당하는 인덱스 패턴, $\mathcal{I}(X^i)$는 부블록 X^i의 인덱스 패턴을 의미한다. 인덱스 비트 LLR을 통해 첫번째 복호를 하고 인덱스 비트의 추정값인 $\hat{c}_1$을 구한다. $\hat{c}_1$로 추정된 인덱스 패턴을 토대로 심볼 비트 LLR 값을 계산한다.

$$\lambda_S(b) = \ln\frac{\sum_{s\in\mathcal{C}_{\mathrm{b},0}} P(x = \mathrm{s}|\mathrm{y})}{\sum_{s\in\mathcal{C}_{\mathrm{b},1}} P(\mathrm{x} = \mathrm{s}|\mathrm{y})}$$

$\mathcal{C}_{\mathrm{b},0}$은 성상도의 심볼 중 b(1, 2, ⋯, p_2)번째 비트가 0일 때 해당하는 심볼들의 집합, x는 송신기에서 전송한 심볼, y는 수신기에서 수신한 심볼이다. 계산한 LLR 값으로 복호하면 추정값 $\hat{c}_2$를 구한다. 따라서 송신부에서 전송한 부호어 c와 그에 대한 추정값인 $\hat{c} = [\hat{c}_1\ \hat{c}_2]$를 통한 BER로 성능평가를 실시한다.

Ⅲ. 모의실험 결과

본 논문에서 제안하는 방법의 성능을 비교하기 위해 부호어 전체에 LDPC 채널코딩을 수행한 방법을 conv. DM-OFDM-IM, 인덱스 비트 부분과 심볼 비트 부분을 나누어 LDPC 채널코딩을 각각 적용하는 방식을 prop. DM-OFDM-IM으로 표기한다. 16-QAM, N=1024, n=4, k=2를 사용하였고, p_1=2이므로 부반송파 인덱스 패턴으로 표1과 같이 사용하였고, AWGN 채널을 사용하였고, 완벽한 채널 추정을 가정하였다.

표 1. Subcarrier 인덱스 패턴

$\mathcal{I}$	bit	pattern
$\mathcal{I}_1$	00	$\{M_A, M_A, M_B, M_B\}$
$\mathcal{I}_2$	01	$\{M_B, M_A, M_A, M_B\}$
$\mathcal{I}_3$	10	$\{M_B, M_B, M_A, M_A\}$
$\mathcal{I}_4$	11	$\{M_A, M_B, M_B, M_A\}$

5G NR에 정의된 LDPC 부호를 사용하였으며, IFFT 크기인 N=1024와 보내는 메시지 비트는 3328bit로 고정하고 conv. DM-OFDM-IM의 부호율은 13/18, prop. DM-OFDM-IM의 부호율은 인덱스는 47/128, 심볼은 785/1024로 채널 코딩을 수행하였다. 모의실험 결과는 그림 3와 같다.

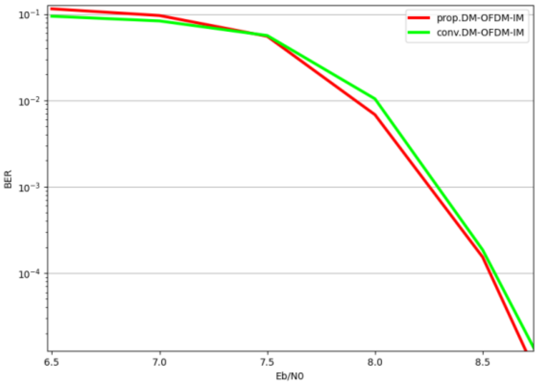

그림 3. M=16일 때 conv. DM-OFDM-IM(4096,3328), prop. DM-OFDM-IM 인덱스(512,188), 심볼(4096, 3140)의 BER 성능 비교

Ⅳ. 결론

본 논문에서는 DM-OFDM-IM에서 연쇄 복호를 위한 채널코딩 방법을 제안했다. 모의실험 결과에 따르면 Eb/N0이 약 7.4dB보다 큰 조건일 때 전체 부호어에 부호화한 방식보다 인덱스 비트 부분과 심볼 비트 부분에 각각 부호화한 뒤 인덱스 비트를 복호한 결과를 통해 심볼 비트를 복호하는 방식이 더 좋은 BER 성능을 가짐을 보였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단(No.2020R1F1A1076583)의 지원을 받았고, 동시에 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 지역지능화혁신인재양성사업(IITP-2022-RS-2022-00156287)의 연구결과임.

참 고 문 헌

[1] T. Mao, Z. Wang, " Dual-Mode Index Modulation Aided OFDM," IEEE Access, vol. 5, pp. 50-60, 2017

[2] X. Zhang, H. Bie, “Dual-Mode Index Modulation Aided OFDM With Constellation Power Allocation and Low-Complexity Detector Design,” IEEE Access, vol. 5, pp. 23871-23880, 2017

[3] N. Du, P. Gu, “Performance Analysis of LDPC Codes in the DM-OFDM System,” 2013 Sixth ICACI, pp. 242-245, 2013