

향상된 디더 신호 설계를 통한 OFDM-IM에서의 PAPR 감소 방법

김기훈*

Enhanced Dither Signal Design for PAPR Reduction in OFDM-IM

Kee-Hoon Kim*

요 약

Orthogonal frequency division multiplexing with index modulation (OFDM-IM) 시스템은 기존의 OFDM 시스템에 색인 변조 (index modulation) 개념을 추가하여 데이터 전송율을 높인 새로운 통신 방식이다. 하지만 OFDM과 마찬가지로 OFDM-IM은 높은 peak-to-average power ratio (PAPR)을 가지고 있다. 따라서 OFDM-IM에서 디더 (dither) 신호를 비활성화 부반송파에 삽입하여 PAPR을 줄여주는 시도가 있었다. 본 논문에서는 이러한 디더 신호를 더 효과적으로 설계하여 PAPR 감소 성능을 향상시켰다.

Key Words : Dither signal, orthogonal frequency division multiplexing with index modulation (OFDM-IM), peak-to-average power ratio (PAPR)

ABSTRACT

Orthogonal frequency division multiplexing with index modulation (OFDM-IM) is a new communication scheme. However, like the classical OFDM system, the OFDM-IM system has a high peak-to-average power ratio (PAPR) problem. In this letter, the enhanced dither signal design is proposed, where the dither signal in the inactive subcarriers can reduce PAPR of OFDM-IM signals.

I. 서 론

Orthogonal frequency division multiplexing with index modulation (OFDM-IM) 시스템은 기존의 OFDM 시스템에 색인 변조 (index modulation)라 불리는 개념을 추가하여 데이터 전송율을 높인 새로운 통신 방식이다^[1]. OFDM-IM은 모든 부반송파를 데이터 심볼 전송에 사용하지 않고 일부만을 활성화해 사용한다.

Zheng은 OFDM-IM은 OFDM과 마찬가지로 높은 peak-to-average power ratio (PAPR)을 갖는다고 보고하였다. 불행히도, 기존의 OFDM에서 PAPR을 감소시키는 여러가지 방법들은 효율적으로 동작하지 않는다^[2]. 따라서 Zheng은 OFDM-IM의 특이한 구조인 비활성화된 부반송파에 디더 (dither) 신호를 삽입하여 OFDM-IM 신호의 PAPR을 감소시키는 방법을 제안하였다^[2].

하지만 Zheng 논문에서 제안된 디더 신호의 설계 방법은 조금 더 향상될 여지가 있다. 왜냐하면, OFDM-IM에서 신호들간의 유클리디안 거리가 중요 한데 Zheng 논문에서는 이를 상세히 고려하지 않았다. 따라서 본 논문에서는 OFDM-IM 시스템에서 PAPR을 감소시키기 위한 디더 신호를 유클리디안 거리를 기반으로 설계한다. 그 결과 디더 신호의 자유도가 Zheng의 기법보다 더 커지고 이는 PAPR 감소 성능의 향상으로 이어진다.

II. OFDM-IM 시스템

부반송파를 N 개 사용하는 OFDM-IM 시스템을 고려하자. 전체 OFDM-IM 블록은 총 g 개의 그룹으로 나뉘게 되며 이 서브블록은 주파수 영역 상에서 n 의 길이를 갖는다. 중요한 것은 서브블록의 n 개의 부반송파 중에서 오직 k 개의 부반송파만이 활성화된다는 점이다. 즉, k 개의 부반송파에만 변조된 심볼이 실리게 된다. 나머지 $n - k$ 개의 비활성화된 부반송파는 아무것도 실리지 않는다^[1]. 자세하게, 각 그룹의 $p = p_1 + p_2$ 개의 비트들 중 p_1 비트들은 부반송파 활성화 패턴을 결정하며 p_2 비트들은 활성화된 부반송파에 실린 k 개의 심볼을 결정한다.

* 본 연구는 한경대학교 2021년도 학술연구조성비의 지원에 의한 것임.

• First Author : (ORCID:0000-0002-0438-8036)Hankyong National University School of Electronic and Electrical Engineering, keehk85@gmail.com, 조교수, 종신회원

논문번호 : 202112-331-A-LU, Received December 4, 2021; Revised December 22, 2021; Accepted December 23, 2021

β 번째 OFDM-IM 서브블록의 k 개의 활성화된 부반송파의 색인들을 다음과 같이 표기한다.

$$I^\beta = \{i_0^\beta, i_1^\beta, \dots, i_{k-1}^\beta\} \quad (1)$$

여기서 $\beta = 0, 1, \dots, g-1$ 이다. 또한 이 부반송파를 통해 전송되는 k 개의 심볼들은 다음과 같다.

$$S^\beta = \{S_0^\beta, S_1^\beta, \dots, S_{k-1}^\beta\} \quad (2)$$

이 심볼들은 quadrature phase shift keying (QPSK)나 quadrature amplitude modulation (QAM) 같은 변조 기법을 사용하여 변조된다.

또한 β 번째 OFDM-IM 서브블록은 다음과 같이 벡터로 표현될 수 있다.

$$X^\beta = [X_0^\beta, X_1^\beta, \dots, X_{n-1}^\beta]^T \quad (3)$$

총 g 개의 OFDM-IM 서브블록 $\{X^\beta\}_{\beta=0}^{g-1}$ 이 만들어진 후 이들은 모두 연결되어 길이 N 의 OFDM-IM 신호 X 가 된다. 그 후 OFDM-IM 신호 X 를 역 이산 푸리에 변환 (IDFT)을 통하여 시간 신호로 바꾸어준 다음 전송하게 된다.

$$x = IDFT(X) \quad (4)$$

그리고 전송되는 신호의 PAPR은

$$PAPR(x) = \frac{\max |x_t|^2}{E[|x_t|^2]} \quad (5)$$

이다. 여기서 x_t 는 x 의 t 번째 원소이며, PAPR을 더 정확히 측정하기 위하여 x 를 오버샘플링한다.

III. 제안하는 디더 신호 설계 방법

3.1 기존의 디더 신호 설계 방법

OFDM-IM에서는 크게 두 종류의 오류가 있다. 첫 번째는 색인 복조 오류이고 두 번째는 심볼 오류이다. 전자는 부반송파 활성화 패턴을 수신단에서 잘못 추정하는 경우이다. 후자는 수신단에서 부반송파 활성화 패턴은 올바르게 추정하되 심볼이 잘못 추정되는 경

우이다. 페이딩 채널을 고려하는 경우 색인 복조 오류는 다이버시티 차수 2를 갖으며 심볼 오류는 다이버시티 차수 1을 갖는다. 따라서 전자에 비해 후자가 OFDM-IM 시스템 성능에 많은 영향을 끼친다. Zheng은 이러한 점에 착안하여 비활성화 부반송파에 설계된 디더 신호를 삽입한다^[2]. 이 디더 신호는 OFDM-IM 신호의 PAPR을 줄이기 위해 설계된다. 명확하게도 비활성화 부반송파의 디더 신호는 심볼 오류 경우에는 영향을 주지 않기에 OFDM-IM 시스템의 오류 성능의 큰 열화 없이 효율적으로 PAPR을 줄일 수 있다.

자세히 β 번째 OFDM-IM 서브블록의 $n-k$ 개의 비활성화된 부반송파에 삽입되는 디더 신호 값들을

$$D^\beta = \{D_0^\beta, D_1^\beta, \dots, D_{n-k-1}^\beta\} \quad (6)$$

라고 할 때 디더 신호는 다음 제한조건을 갖는다.

$$|D_i^\beta| < R \quad (7)$$

즉, OFDM-IM 시스템에 영향을 최소화시키기 위해 진폭을 R 로 제한한 것을 볼 수 있다. 세부적인 디더 신호의 값은 (7)을 고려하며 클리핑과 필터링을 반복적으로 해주어 얻어질 수 있다.

3.2 제안하는 향상된 디더 신호 설계 방법

식 (7)에서 보듯이 디더 신호는 비활성화된 부반송파에 삽입되며 진폭이 R 로 제한한 것을 볼 수 있다. 하지만 이 부분은 개선될 여지가 있다. 일반성을 잃지 않고 전송하려는 β 번째 OFDM-IM 서브블록이 다음과 같다고 하자.

$$X^\beta = \left[S_0^\beta, \dots, S_{k-1}^\beta, \underbrace{0, \dots, 0}_{n-k} \right]^T \quad (8)$$

여기에 디더 신호를 삽입했다고 생각하면,

$$(X^\beta)' = \left[S_0^\beta, \dots, S_{k-1}^\beta, \underbrace{D_0^\beta, \dots, D_{n-k-1}^\beta}_{n-k} \right]^T \quad (9)$$

가 된다.

디더 신호는 색인 복조 오류에만 영향을 주며, 색인 복조 오류를 가장 빈번하게 일으키는 오류 경우 $(X^\beta)' \rightarrow \hat{X}^\beta$ 를 살펴보면 일반성을 잃지 않고

$$\hat{X}^\beta = \left[S_0^\beta, \dots, S_{k-2}^\beta, 0, \underbrace{\hat{S}_{k-1}^\beta, 0, \dots, 0}_{n-k} \right]^T \quad (10)$$

로 잘못 추정되는 경우이다. 즉, $k-1$ 번째 부반송파가 원래 활성화였지만 비활성화로 잘못 추정되며, 동시에 k 번째 부반송파가 원래 비활성화였는데 활성화로 잘못 추정되는 경우이다.

$(X^\beta)' \rightarrow \hat{X}^\beta$ 오류에 영향을 주는 것은 $k-1$ 번째 부반송파의 유클리디안 거리 $|S_{k-1}^\beta|$ 와 k 번째 부반송파의 유클리디안 거리 $|\hat{S}_{k-1}^\beta - D_0^\beta|$ 이다. (7)과 같은 Zheng 논문의 디더 신호의 진폭 제한은 $|\hat{S}_{k-1}^\beta - D_0^\beta|$ 를 억제하는 효과가 있기는 하지만 \hat{S}_{k-1}^β 가 16-QAM이나 QPSK 사용 시에 특정 패턴이 있다는 것을 감안하여 본 논문은 다음과 같은 디더 신호 제한 조건을 제안한다.

$$Re\{D_i^\beta\} + Im\{D_i^\beta\} \leq \sqrt{2} R \quad (11)$$

이는 (7) 식의 제한조건과 비교하였을 때 유클리디안 거리 $|\hat{S}_{k-1}^\beta - D_0^\beta|$ 는 동일하게 유지하며 디더 신호에 더 큰 자유도를 준다. 그림 1은 Zheng의 디더 신호 진폭 제한 (짙은 회색 동그라미 영역)과 제안하는 디더 신호 진폭 제한 (얇은 회색 마름모 영역)를 나타낸다. 두 기법 모두 주변에 존재할 수 있는 심볼 \hat{S}_{k-1}^β 에 대해 유클리디안 거리 $|\hat{S}_{k-1}^\beta - D_0^\beta|$ 의 최소값이 모두 R 로 동일하다. 하지만 제안하는 디더 신호 진폭 제한의 자유도가 Zheng의 기법보다 더 크므로 제안하는 디더 신호가 OFDM-IM 신호의 PAPR을 더 잘 감소시킬수 있다.

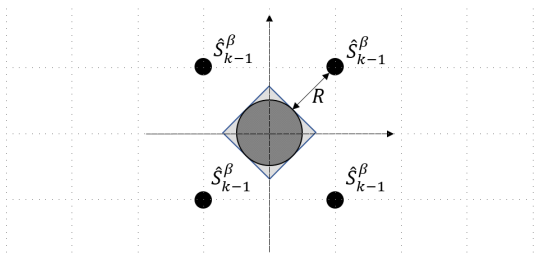


그림 1. 두 기법의 디더 신호 진폭 제한 비교
Fig. 1. Amplitude constraints of two dither signal designs

IV. 모의실험 및 결론

제안하는 기법의 효과를 보기 위해 모의실험을 하였다. $N = 128, n = 4, k = 2$ 를 사용하였으며 활성화된 부반송파에 대해서는 16-QAM 변조를 사용했다. 그림 2는 제안하는 기법과 Zheng 기법의 PAPR의 complementary cumulative distribution functions (CCDF)를 나타낸다. PAPR을 측정하기 위해 4배 오버샘플링이 사용되었다. 두 기법 모두 $R = 0.5$ 를 사용하였다. 제안하는 기법이 Zheng 기법보다 PAPR 감소 성능이 더 좋은 것을 알 수 있다. 수치적으로는 CCDF가 10^{-4} 인 지점에서 제안하는 기법이 Zheng의 기법보다 약 0.3dB 낮은 PAPR을 갖는다. 이는 그림 1에서 보듯이 제안하는 기법이 더 높은 자유도의 디더 신호를 만들 수 있기 때문이다.

그림 3은 두 기법의 비트 오류율 (BER) 성능 그래프이다. Rayleigh 페이딩 채널을 고려 했으며 x축은

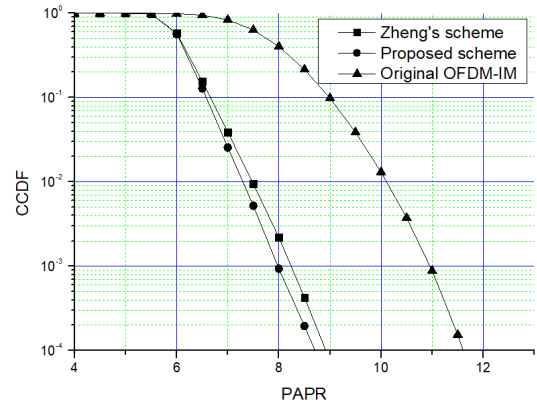


그림 2. Zheng 기법과 제안 기법의 PAPR 감소 성능
Fig. 2. PAPR reduction performances of two schemes

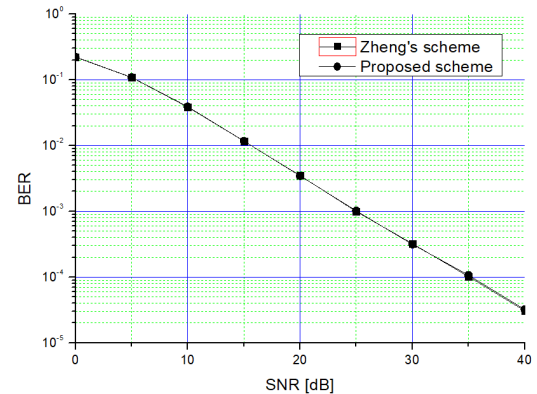


그림 3. Zheng 기법과 제안하는 기법의 BER 성능
Fig. 3. BER performances of two schemes

signal-to-noise ratio (SNR)을 의미한다. 예상한대로 그림 1에서처럼 최소 유클리디안 거리가 $R = 0.5$ 로 동일하기 때문에 두 기법이 거의 동일한 BER 성능을 가짐을 확인하였다.

따라서 제안한 디더 신호 디자인은 기존의 기법에 비해 PAPR 감소 성능은 향상시키면서 BER 성능을 동일하게 유지하는 장점이 있다.

References

- [1] J. H. Kim and E. Yoon, "Subcarrier segmentation based index mapping for OFDM index modulation," *J. KICS*, vol. 44, no. 2, pp. 199-207, Feb. 2019.
- [2] J. Zheng and H. Lv, "Peak-to-average power ratio reduction in OFDM index modulation through convex programming," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 21, no. 7, pp. 1505-1508, Jul. 2017.