

비선형적 전력 증폭기에 강인한 ACE 기반 OCDM PAPR 최적화 기법

김석호, 류재학, 신원재

고려대학교 전기전자공학부

{seokho98, jaehak99, wjshin}@korea.ac.kr

ACE-based OCDM PAPR Optimization for Robustness to Nonlinearity in PA

Seokho Kim, Jaehak Ryu, Wonjae Shin

School of Electrical Engineering, Korea Univ.

요약

차세대 6G 네트워크에서는 비-지상 네트워크, 차량 간 통신과 같이 새로운 통신 환경이 예상되며, 이를 위해 다중경로 페이딩과 도플러 편이에 강인한 Orthogonal Chirp Division Multiplexing (OCDM) 시스템이 고려되고 있다. 이는 서로 직교하는 chirp를 중첩하여 보냄으로써 고-전송률의 통신이 가능하고, Discrete Fresnel Transform (DFnT)를 통한 저-복잡도 송·수신기 구조를 가지는 장점이 있다. 그러나, 송신기에서 보내는 신호의 Peak Average Power Ratio (PAPR)가 크게 나타나 실제 통신을 수행할 때 비선형적 전력 증폭기에 의해 성능이 저하된다는 문제점이 존재한다. 본 논문에서는 OCDM 시스템 모델에 대해 설명하고, Active Constellation Extension (ACE) 기법을 기반으로 높은 PAPR 문제를 해결하도록 한다. 이후, 시뮬레이션을 통해 제안하는 기법이 PAPR을 감소시키고, 이를 통해 전력 증폭기의 비선형성에 의한 비트 오류율 (Bit Error Rate, BER) 성능이 개선됨을 확인한다.

I. 연구 배경 및 목적

차세대 6G 네트워크에서는 높은 주파수 대역을 통한 비-지상 네트워크, 차량 간 통신과 같이 새로운 통신 환경이 고려되고 있다. 이는 통신에 영향을 미치는 도플러 편이와 다중경로 페이딩의 발생 가능성을 높이고, 현재 이동통신에서 사용되고 있는 Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)의 사용을 어렵게 만든다. 따라서, 이를 대체하기 위해 최근 Orthogonal Chirp Division Multiplexing (OCDM)이 연구되고 있으며, 이는 그림 1과 같이 다중경로 페이딩, 도플러 편이에 강인한 chirp를 서로 직교하도록 중첩하여 신호를 보낸다 [1]. OCDM은 고-전송률의 통신이 가능하고, Discrete Fresnel Transform (DFnT)를 통한 저-복잡도 송·수신기 구조를 가진다는 장점이 있다. 하지만, 동일 통신 심볼이 반복되는 경우 Peak Average Power Ratio (PAPR)가 크게 나타나게 되고, 이는 아날로그-디지털 변환기의 복잡도를 증가시키거나, 전력 증폭기를 통과할 때 비선형 왜곡이 발생하는 등 통신에 영향을 미치게 된다.

따라서, 본 논문에서는 먼저 OCDM의 시스템 모델에 대해 설명하고, Active Constellation Extension (ACE) 기법을 기반으로 높은 PAPR 문제를 해결하도록 한다. 이후, 시뮬레이션을 통해 제안하는 기법이 PAPR을 감소시키고, 이를 통해 전력 증폭기의 비선형성에 의한 비트 오류율 (Bit Error Rate, BER) 성능을 개선하는지 확인한다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 다중경로 페이딩 채널에서 OCDM 시스템을 이용한 통신을 고려한다. OCDM 시스템의 송·수신 과정은 그림 2와 같이 DFnT를 통해 구현될 수 있다. 하나의 OCDM 블록에서 N 개의 subchirp를 사용한다고 가정하며, 송신기 측에서 보내고자 하는 통신 심볼 $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^N$ 는 $[x_0, \dots, x_{N-1}]^T$ 의 형태로 구성된다. 또한, OCDM 블록의 송신 신호 $\mathbf{s} \in \mathbb{C}^N$ 는 식 (1)과 같이 통신 심볼 \mathbf{x} 에 inverse DFnT (IDFnT)를 수행한 형태로 나타난다. 이 때, $\Phi \in \mathbb{C}^{N \times N}$ 는 DFnT 행렬을 나타내며, $m = 0, 1, \dots, N-1, n = 0, 1, \dots, N-1$ 이다.

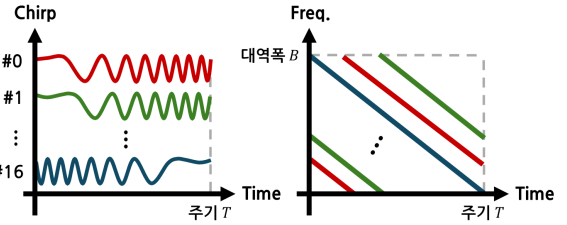


그림 1. Chirp 간의 직교성을 이용한 OCDM 개념도

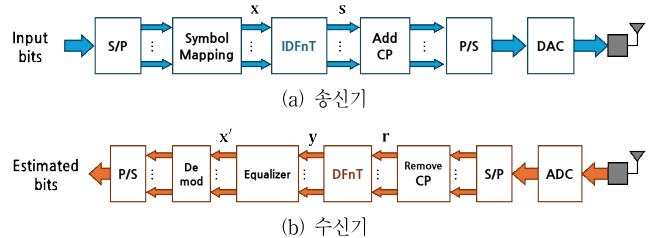


그림 2. OCDM 시스템 구조

$$\mathbf{s} = \Phi^H \mathbf{x}$$

$$\text{where } \Phi(m, n) = \frac{1}{\sqrt{N}} e^{-j\frac{\pi}{4}} \times \begin{cases} j\frac{\pi}{N}(m-n)^2, & \text{even } N \\ j\frac{\pi}{N}\left(m + \frac{1}{2} - n\right)^2, & \text{odd } N \end{cases} \quad (1)$$

각 OCDM 블록에 대한 수신 신호 $\mathbf{r} \in \mathbb{C}^N$ 는 식 (2)와 같이 나타난다. 여기서 $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{N \times N}$ 는 다중경로 페이딩 채널 행렬을 의미하고, 하나의 OCDM 블록 내에서 동일하다고 가정한다. 또한, $\mathbf{n} \in \mathbb{C}^N$ 은 Additive White Gaussian Noise (AWGN) 벡터를 나타낸다.

$$\mathbf{r} = \mathbf{H}\mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (2)$$

이 때, 수신기가 정확한 채널 상태정보를 알고 있다고 가정하며, 수신 신호에 DFnT를 수행하고, 최종적으로 Minimum Mean Square Error (MMSE) equalizer를 통해 통신 심볼에 대한 detection을 수행한다 [1].

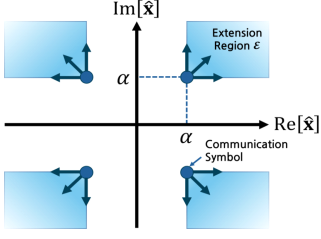


그림 3. QPSK에서의 ACE 개념도

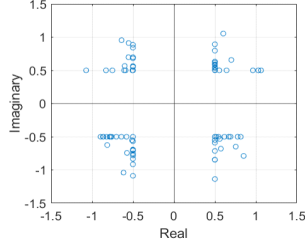


그림 4. QPSK에서 ACE 기법을 통한 통신 심볼 성장도 ($\alpha = 0.5$, $N = 128$)

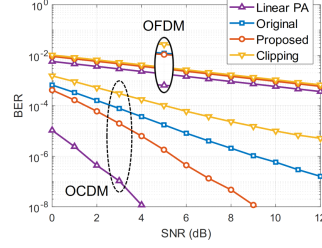


그림 5. 전력 증폭기의 비선형성을 고려한 BER 성능 그래프 ($\alpha = 0.5$)

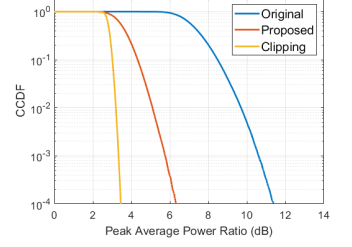


그림 6. PAPR에 대한 CCDF 그래프 ($\alpha = 0.5$)

III. OCDM PAPR 최적화를 위한 ACE 기법

본 논문에서는 ACE 기법을 통해 OCDM의 PAPR 문제를 해결한다 [2]. ACE 기법은 그림 3의 extension region 내에서 통신 심볼을 최적화하여 PAPR을 줄이는 방식으로, 통신 심볼이 decision boundary에서 멀어져 노이즈에 대한 영향을 덜 받아 BER이 감소될 수 있다. 그러나, 통신 심볼에 할당되는 전력이 본래 심볼보다 증가하는 문제가 있어, 이를 해결하기 위해 원점에 더 가깝게 extension region을 확장하는 방법을 고려한다.

ACE 기법을 최적화 문제로 나타내면 아래의 P_1 과 같으며, 각 시간 슬롯에 대해 최적화된 송신 신호 크기의 최댓값을 최소화한다. 또한, 모든 $|\hat{s}_i|^2$ 는 A 보다 작아야 하며, 최적화된 통신 심볼 $\hat{\mathbf{x}}$ 는 extension region을 나타내는 \mathcal{E} 에 속해야 한다.

$$P_1: \underset{\hat{\mathbf{x}}}{\text{minimize}} \|\hat{\mathbf{s}}\|_{\infty}^2 \quad (3a)$$

$$\text{s.t. } |\hat{s}_i|^2 \leq A, i = 0, 1, \dots, N-1 \quad (3b)$$

$$\hat{\mathbf{s}} = \Phi^H \hat{\mathbf{x}}, \quad (3c)$$

$$\hat{\mathbf{x}} \in \mathcal{E}. \quad (3d)$$

본 최적화 문제를 풀기 위해 Projection onto Convex Sets (POCS) 방식을 적용하며, 이는 먼저 본래의 통신 심볼 \mathbf{x} 에 IDFnT를 수행한 후, 얻어진 송신 신호 \mathbf{s} 의 최대 크기를 A 로 제한하는 클리핑 과정을 진행한다. 이에 대해 다시 DFNT를 수행하여 심볼 $\hat{\mathbf{x}}$ 로 변환하고, 각각의 심볼이 extension region \mathcal{E} 에 포함되지 않는 경우, 해당 심볼을 extension region에 투영한다. 이렇게 얻어진 최적화된 통신 심볼 $\hat{\mathbf{x}}$ 를 이용하여 앞선 과정을 반복함으로써, 최종적으로 PAPR을 최소화하면서 BER 성능을 보장하는 송신 신호 $\hat{\mathbf{s}}$ 를 도출한다.

IV. 시뮬레이션 결과

제안하는 기법을 적용하여 다중경로 페이딩 채널에서 OCDM 시스템에 대한 시뮬레이션을 수행하도록 한다. 이 때, 하나의 OCDM 블록에서 전체 subchirp의 갯수 N 은 128개를 고려하며, Monte Carlo 시뮬레이션은 Signal-to-Noise Ratio (SNR)에 따라 총 1,000,000회 수행한다. 통신 심볼은 QPSK로 변조되며, ACE 기법은 10회 반복하고, 클리핑 과정에서 임계치 A 는 1로 설정한다. 또한, 채널의 최대 지연 시간이 OCDM 블록 사이의 guard interval 길이보다 짧다고 가정한다.

먼저, 전력 증폭기의 비선형성을 고려하였을 때, 제안하는 기법을 사용함으로써 기존 대비 BER 성능 향상이 이루어지는지 확인하고 이를 OFDM과 비교한다. 또한, 최적의 BER 성능을 나타내는 extension region을 결정하도록 한다. 이 때, extension region은 실수부와 허수부의 절댓값이 α 이상이 되는 영역으로 결정한다. 전력 증폭기의 모델은 식 (4)와 같이 표현되며, Solid-State Power Amplifier (SSPA) 모델을 사용한다 [3]. s_i 는 전력 증폭기에 입력되는 신호를 나타내고, g_i 는 입력된 신호가 전력 증폭기를 통과한 결과를 나타낸다. 이 때, p 는 3으로 고려한다.

$$g_i = m(\rho_i)e^{j\phi_i} \text{ where } s_i = \rho_i e^{j\phi_i}, m(\rho_i) = \frac{\rho_i}{[1 + \rho_i^{2p}]^{1/2p}} \quad (4)$$

그림 5는 전력 증폭기의 비선형성을 고려하였을 때, SNR에 따라 BER 성능을 비교한 그래프이다. OCDM과 OFDM 시스템에 대해 본래 신호와 제안하는 기법, 클리핑 기법에 대한 성능을 확인한다. α 를 변화시키며 시뮬레이션을 수행하였으며, 최적화를 수행하기 전 통신 심볼에 할당된 전력의 합과 최적화를 수행한 후 통신 심볼에 할당된 전력의 합을 같게 설정한다. 그 결과, α 를 0.5로 할당할 때, 제안하는 기법에서 BER 성능이 가장 좋게 나타나는 것을 확인할 수 있었으며, 이는 본래 OCDM 신호와 클리핑 기법을 사용하였을 때보다도 낮은 BER이 나타난다. 이러한 이유는 ACE 기법이 클리핑 과정을 반복하여 피크 신호의 크기를 낮춰 비선형적 전력 증폭기의 영향을 덜 받기 때문이다. 그와 동시에 OFDM 대비 향상된 BER 성능을 보여주는데, 이는 OCDM을 이용하게 되면 다중경로 페이딩에 대한 강인성으로 인해 심볼 간 간섭이 완화되기 때문이다. OFDM의 경우, 전력 증폭기의 비선형성을 고려하지 않더라도 심볼 간 간섭으로 인해 상대적으로 높은 BER을 보여주고 있으며, 이로 인해 PAPR 최적화를 수행하더라도 성능 개선이 충분히 이루어지지 않는 것을 볼 수 있다.

다음으로, 앞서 결정한 α 를 통해 제안하는 기법을 적용하는 경우, PAPR이 적절하게 감소되는지 확인한다. 그림 6은 SNR이 0 dB일 때, Monte Carlo 시뮬레이션을 바탕으로 PAPR에 대한 CCDF 그래프를 그린 것이다. 이를 통해, 제안하는 기법이 클리핑 기법보다는 PAPR 감소가 덜 하지만, 최적화를 수행하기 전보다 PAPR이 약 5 dB 감소되는 것을 확인할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 비선형적 전력 증폭기로 인한 신호 왜곡을 줄이기 위해 ACE 기법을 기반으로 OCDM 시스템의 PAPR을 최적화하였다. 시뮬레이션을 통해 제안하는 기법이 본래 OCDM 신호 대비 PAPR을 감소시키기면서, 적절한 extension region을 설정하는 경우 BER 성능을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. 2022RIA2C4002065)과 정보통신기획평가원(No.2024-00359235, 2022-0-00704, 2021-0-00467, 2021-0-00260)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고 문헌

- [1] X. Ouyang *et al.*, "Orthogonal Chirp Division Multiplexing," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 64, no. 9, pp. 3946-3957, Sep. 2016.
- [2] B. S. Krongold *et al.*, "PAR reduction in OFDM via active constellation extension," *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 49, no. 3, pp. 258-268, Sep. 2003.
- [3] C. Rapp, "Effects of HPA-nonlinearity on a 4-DPSK/OFDM-signal for a digital sound broadcasting signal," *ESA Special Publication*, vol. 332, pp. 179-184, 1991.