OFDM 시스템에서 PAPR의 감소와 대역 내 왜곡 보정에 관한 연구

김완태* · 유선용* · 조성준*

A Study on PAPR Reduction and Compensation for In-Band Distortion in OFDM Systems

Wan-Tae Kim* · Sun-Yong Yoo* · Sung-Jun Cho*

본 논문은 지식경제부 한국산업기술평가원 지정 한국항공대학교 부설
인터넷정보검색 연구센터의 지원에 의함.

요 약

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 방식은 주파수 선택적 페이딩 (frequency selective fading)과 협대역 간섭 (narrowband interference)에 강한 전송 방식으로 대용량 데이터 통신에 적합하다. 하지만, OFDM 신호는 독립적으로 변조된 많은 부반송파들로 구성되므로 이들이 동위상으로 더해질 때 신호의 진폭이 증가하여 PAPR (Peak-to-Average Power Ratio) 문제가 발생한다. 본 논문에서는 OFDM 시스템의 PAPR 문제를 해결하기 위해 반복 구조의 clipping과 filtering 기법을 적용하고, 이로 인해 발생되는 대역 내 왜곡을 EVM (Error Vector Magnitude)을 이용하여 보정하는 기법을 제안하였다. 이 기법은 PAPR 감소는 물론 clipping에 의한 대역 내 왜곡을 감소시킬 수 있다. 제안하는 알고리즘을 무선 통신 시스템에 적용하였을 때 PAPR 감소 효율과 EVM, BER (Bit Error Rate) 성능을 시뮬레이션을 통해 분석했다.

ABSTRACT

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) system is robust to frequency selective fading and narrowband interference in high-speed data communications. However, an OFDM signal consists of a number of independently modulated subcarriers, which can give a large PAPR (Peak-to-Average Power Ratio) when added up coherently. In this paper, we apply clipping and filtering to solve the PAPR problem and compensate the inband compensation using calculated EVM (Error Vector Magnitude). The proposed method can reduce the PAPR and inband distortion . From the results, we analyze the PAPR reducing efficiency and EVM, BER performance of proposed algorithm in the wireless communication system.

키워드

OFDM, PAPR, Clipping, CCDF, EVM

* 한국항공대학교 대학원

접수일자 2008. 04. 03

Ⅰ. 서 론

OFDM 시스템은 직교하는 여러 부반송파를 사용하여 정보를 전송하는 기법으로 단위 시간당 많은 양의 정보를 전송 할 수 있는 장점을 가지며, 주파수 선택적 페이딩이나 협대역 간섭에 효율적이기 때문에 주로 고속 멀티미디어 무선 네트워크 및 디지털 방송의 전송 방식으로 응용되고 있다. 그러나 OFDM 시스템에서는 여러 부반송파가 동위상으로 겹쳐지면서 최대 부반송파 수에 비례하여 PAPR이 증가하게 되므로 A/DC (Analog to Digital Converter)와 D/AC (Digital to Analog Converter)의 복잡도가 증가하고 RF 전력증폭기의 효율이 감소한다.

따라서 PAPR 문제를 감소시키기 위한 여러 가지 방법들이 제안되었으며 [1], 이들 중 가장 간단하게 PAPR 문제를 해결할 수 있는 것은 clipping 기법이다 [2]. 이 기법은 신호의 위상은 변화시키지 않고, 일정 레벨을 넘어가는 신호의 크기만을 제한한다. 하지만 clipping은 원 신호를 왜곡시키기 때문에 대역 내 왜곡이 발생하여 BER 성능이 저하되고, 대역 외 스펙트럼 방출 현상이 발생하는 문제점을 가진다. 이를 개선하기 위하여 clipping 이후에 filtering을 수행함으로써 대역 외 스펙트럼 방출을 감소시킬 수 있다 [3], [4]. 하지만 filtering 이후 첨두값의 재생성이 일어나기 때문에 PAPR 문제가 여전히 존재하며, 반복 구조의 clipping과 filtering 기법으로 첨두값의 재생성 문제는 어느 정도 해결할 수 있지만 대역 내 왜곡 문제는 더욱 심해진다 [5].

본 논문에서는 clipping 이후의 filtering 기법을 반복적으로 적용하고, 동시에 이에 대한 대역 내 왜곡을 보정하는 기법을 제안하였다. 반복적으로 clipping과 filtering을 수행하면 반복 횟수에 비례하여 원신호의 왜곡 정도가 증가하므로 성능이 지속적으로 떨어지게 된다. 이를 해결하기 위해 clipping 이후에 신호의 EVM 값을 측정하여 왜곡 정도를 확인한 후 일정 기준 이상으로 왜곡된 신호를 보정하는 기법을 제안하였다.

Ⅱ. 본 론

2.1 OFDM 시스템

그림 1은 OFDM 시스템의 송신단에서 제안하는 PAPR 감소 기법을 적용한 시스템 블록도이다. QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) 매핑을 거쳐 입력된 데이터는 다수의 부반송파로 변조하기 위해 IFFT (Inverse Fast Fourier Transform)를 수행한 후 제안한 알고리즘을 반복적으로 적용한다.

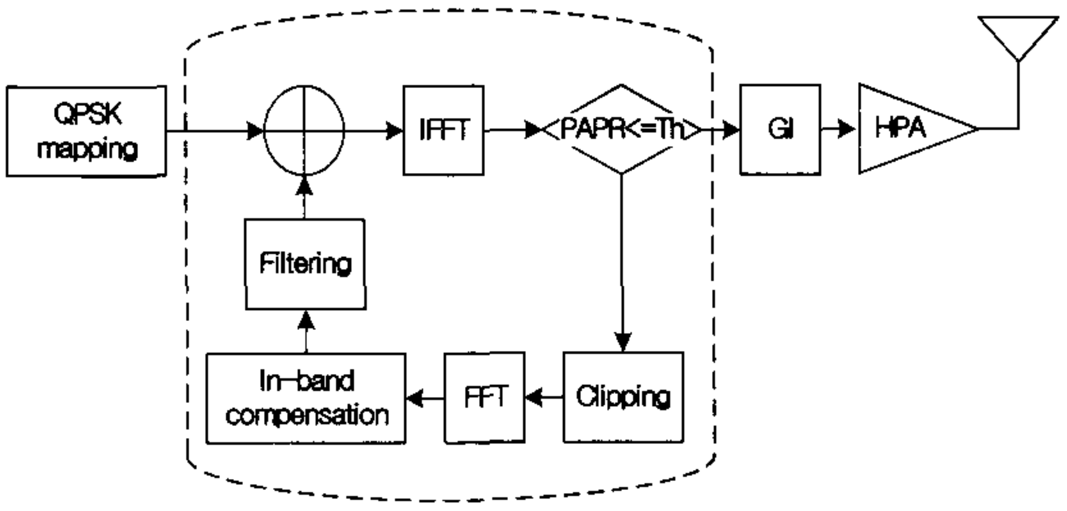


그림 4. 제안하는 OFDM 시스템 송신 구조
Fig. 1 Proposed OFDM system transmit structure

다음으로 ISI (Inter Symbol Interference) 방지를 위해 GI (Guard Interval)를 삽입하고 HPA (High Power Amplifier)에서 신호를 증폭시킨 후 전송하게 된다. 여기서 부반송파의 개수가 N개인 OFDM 시스템의 n번째 기저대역 복소수 신호는 식 (1)과 같다.

$$x_n = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j2\pi nk/N} \quad (1)$$

식 (1)에서 k는 부반송파의 순서, n은 심볼의 순서를 나타내며, X_k는 k번째 부반송파에 입력되는 QPSK 변조 데이터이다. 식 (1)은 실수부와 허수부로 간단히 정리할 수 있으며, 일반적으로 i.i.d (independent and identically distributed) 성질을 갖는 불규칙한 신호로 볼 수 있다. QPSK 변조에서 신호의 구성은 $X_k \in \{\pm 1, \pm j\}$가 되고, N이 충분히 크면 중심극한 정리 (Central Limit Theorem)에 의해 $Re\{x_n\}$과 $Im\{x_n\}$의 분포는 Gaussian 확률 밀도 함수를 갖는 불규칙한 신호가 된다. 따라서 $|x_n|$은 레일레이 (Rayleigh) 분포를 따르고, $|x_n|^2$은 평균이 0이고 자유도 (degree of freedom)가 2인 중심 chi-square 분포가 되며 전력의 확률밀도함수는 식 (2)와 같다 [1].

$$F(|x_n|^2) = 1 - e^{-|x_n|^2} \quad (2)$$

식 (2)로부터 OFDM 심볼의 PAPR이 특정 임계값 PAPR0를 초과할 확률을 유도할 수 있다. 먼저 OFDM 심

볼 크기의 최대치와 평균치의 비로 정의되는 PAPR은 식 (3)과 같다.

$$PAPR(x) = \frac{E[|x|^2]}{\max(|x_n|^2)} \quad (3)$$

식 (3)에서 $\max(|x_n|)^2$은 N개의 표본 가운데 전력이 가장 큰 것을 나타내며, $E[|x|^2]$ 은 OFDM 심볼 x의 평균 전력을 의미한다.

위의 수식을 바탕으로 중첩된 부반송파에서 최대 전력을 찾기 위해 상호 무상관인 N개의 샘플링 된 값들을 이용하여 PAPR(x)가 문턱 값 PAPR0보다 작을 확률을 CDF (Cumulative Distribution Function)로 나타내면 식 (4)와 같다 [6].

$$\Pr(PAPR \le PAPR_0) = (1 - \exp(-PAPR_0))^N \quad (4)$$

따라서 OFDM 신호의 PAPR에 대한 CCDF (Complementary Cumulative Distribution Function)는 식 (5)와 같다.

$$\Pr(PAPR > PAPR_0) = 1 - (1 - \exp(-PAPR_0))^N \quad (5)$$

2.2 PAPR 감소 기법

본 논문에서는 PAPR을 감소시키기 위해 clipping과 filtering을 반복적으로 수행하였다. 이 기법은 clipping을 이용하여 신호의 첨두값을 감소시키고, 그때 생기는 대역 외 스펙트럼을 filtering하여 해결하는 방법이다 [7]. 하지만 filtering 과정에서 신호의 첨두값이 재생성 되고, 이를 제한하기 위해 반복적으로 clipping과 filtering을 수행한다. 그림 1에서 clipping 블록은 신호의 크기가 일정 레벨 이상을 초과할 때 차분값을 계산하며 식 (6)과 같다.

$$C_k = \begin{cases} 0, & |X_k| \le Th_{clipp} \\ X_k - Th_{clipp} \cdot e^{j\angle X_k}, & |X_k| > Th_{clipp} \end{cases} \quad (6)$$

식 (6)에서 X_k는 IFFT 이후의 신호를 나타내며 Th_{clipp}는 차분 clipping을 수행하기 위해 필요한 제한 레벨의 크기이다. 신호의 크기가 제한 레벨보다 작으면 0이라는

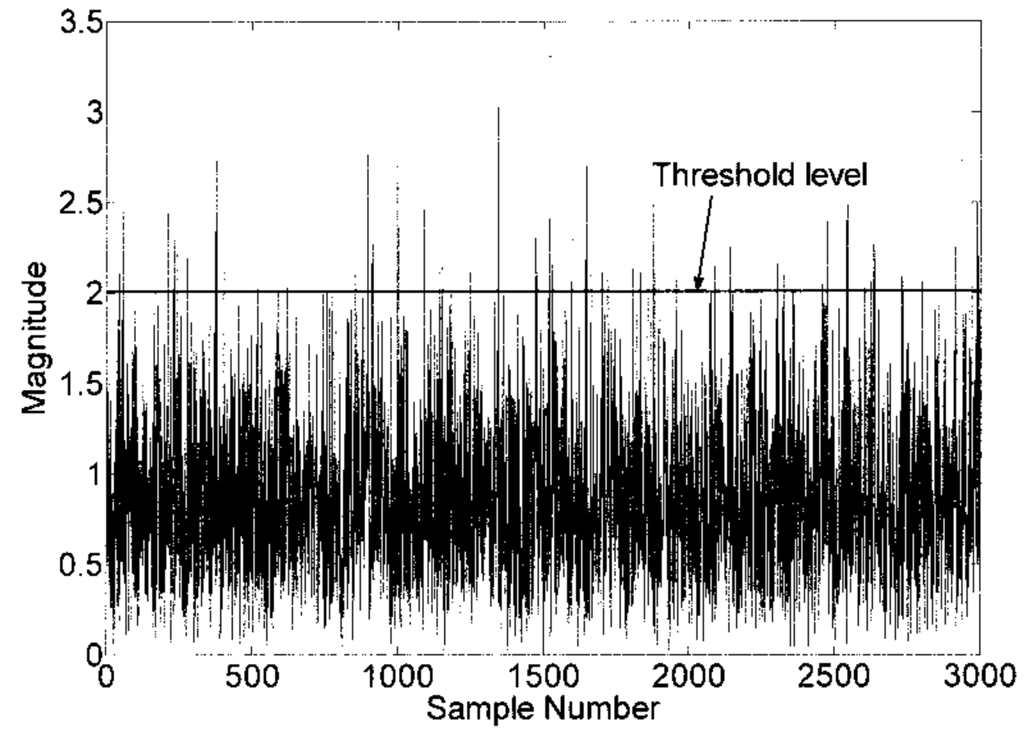


그림 2. IFFT 이후의 신호 모양
Fig. 2 Signal shaping after IFFT

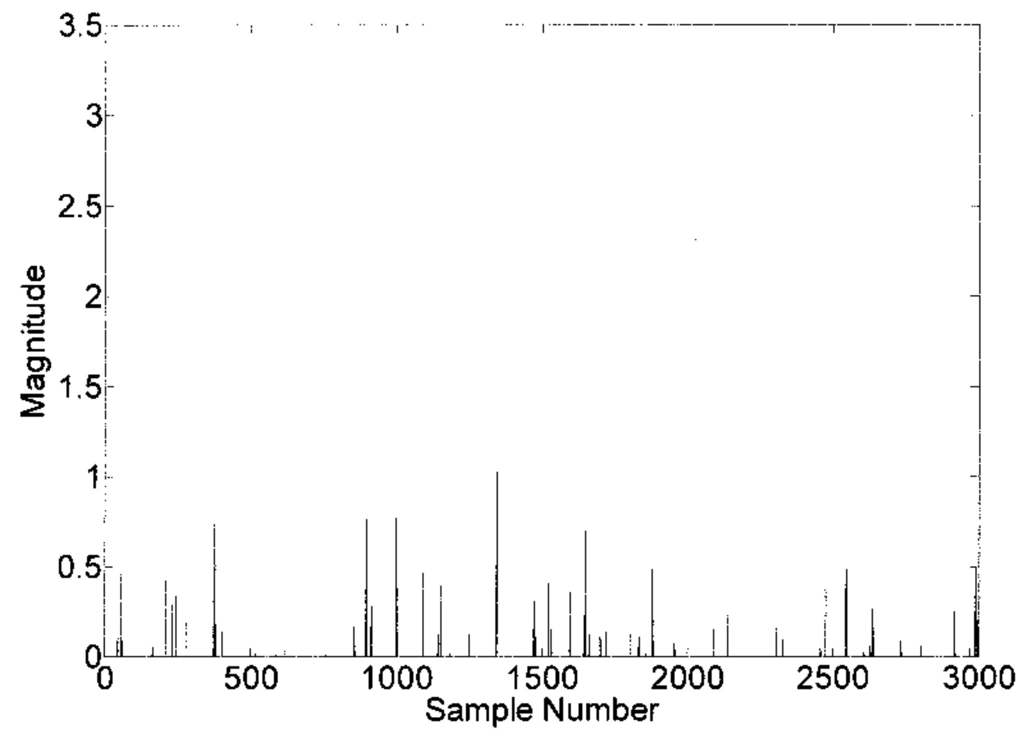


그림 3. 제안한 구조에서 clipping 이후의 신호모양
Fig. 3 Signal shaping after clipping in proposed structure

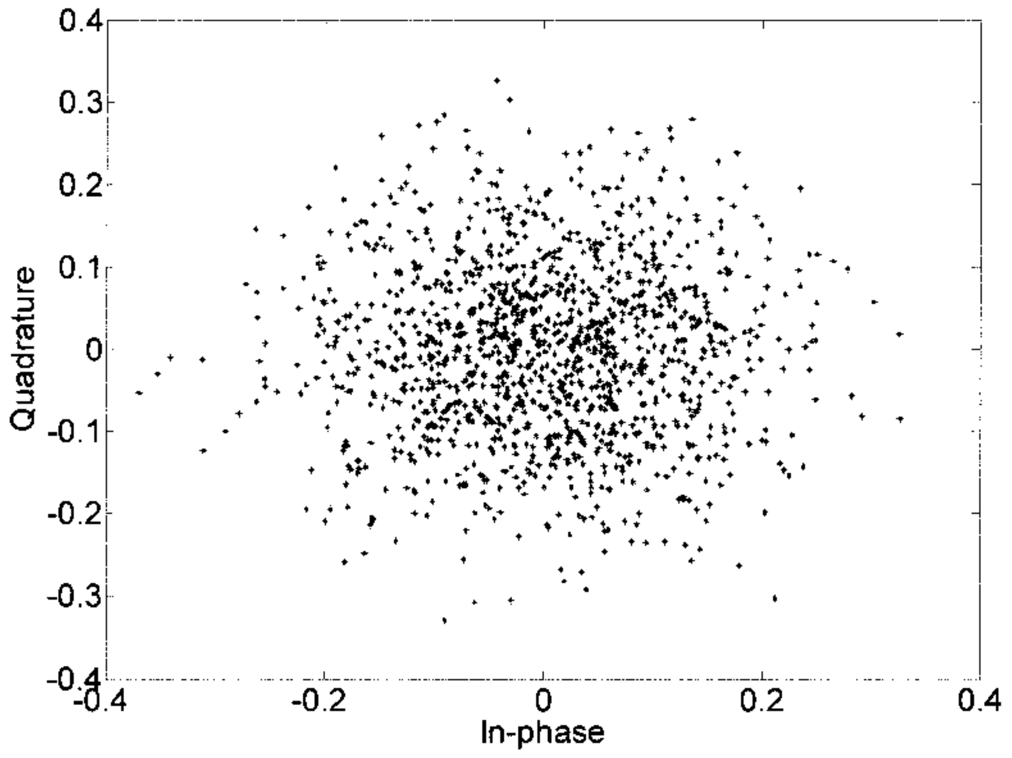


그림 4. Clipping으로 인해 발생한 왜곡의 성좌도
Fig. 4 Distorted signal constellation by clipping

신호를 보내게 되고, 제한 레벨보다 크면 신호의 위상은 고정 시키면서 신호와 제한 레벨의 차분값 만을 계산하여 보내게 된다. 그림 2는 IFFT 이후의 신호의 크기를 보여주며, 그림 3은 식 (6)을 통하여 수행된 clipping 이후의 신호의 모양을 나타낸다. Clipping을 거친 신호 C_k는 대역 내 왜곡 보정과 filtering 수행을 위해 FFT를 수행한다. 이때 신호는 차분값 만을 FFT 처리하였기 때문에 그림 4와 같이 원점을 중심으로 임의로 분포하며, PAPR 감소를 위해 원신호에 차분되는 성분이 된다. 즉, clipping 이후의 신호는 원신호를 변화시켜 BER 성능을 떨어뜨리게 되므로 대역 내 왜곡 보정 과정을 수행하여 왜곡을 완화시킨 후 대역 외 스펙트럼을 제거하기 위해 filtering을 수행한다. Filtering 과정은 대역 외 요소들을 0으로 만드는 과정이며 식 (7)과 같다.

$$f_k = \begin{cases} 0, & k<l\ ,\ k>h \\ \hat{C}_k, & l \le k \le h \end{cases} \tag{7}$$

식 (7)에서 $\hat{C}_k$는 대역 내 왜곡 보정 과정을 거친 후의 신호이며 l과 h는 대역 내 요소의 상하한 범위를 나타낸다. 하지만 filtering을 수행하여 대역 외 스펙트럼 방출을 감소시키는 과정에서 신호의 왜곡에 따른 첨두값의 재생성이 발생하고, 이를 감소시키기 위해 반복 구조의 clipping과 filtering을 수행한다.

2.3 대역 내 왜곡 보정 기법

PAPR 감소를 위해 clipping과 filtering 과정을 반복적으로 수행할 경우, 신호를 강제로 왜곡 시키게 되어 대역 내 왜곡이 발생하게 된다. 왜곡을 확인하기 위해 주파수 축에서 신호의 성좌도를 보면 그림 4와 같다. 그림 4는 QPSK 매핑 이후 성좌도의 각 점에 차분될 신호이며, 결국 clipping 과정에 의해 발생되는 왜곡이라 할 수 있다. 실제 오류가 발생하는 경우는 성좌도의 점이 결정 경계 (decision boundary)를 넘어서는 경우인데, 경계에 가까울수록 오류가 발생할 확률은 높아진다. 오류를 보정하기 위하여 본 논문에서는 FFT 이후의 신호에 대하여 원점을 기준으로 EVM을 측정하여 위상은 고정하고 크기만 변화시켜 보정하는 기법을 제안하였다. 이 기법은 실제 신호에 영향을 주는 차분 신호를 EVM으로 보정함으로써 원 신호의 왜곡을 줄이는 기법이다. 식 (8)은 일반적인 OFDM 시스템의 주파수 축에서의 EVM을 나타낸 수식이다 [8], [9].

$$EVM = \sqrt{\frac{\sum_{l=0}^{M-1}\sum_{n=0}^{N-1} |\overline{C}(n) - C(n)|^2}{\sum_{l=0}^{M-1}\sum_{n=0}^{N-1} |C(n)|^2}} \times 100(\%) \tag{8}$$

식 (8)에서 $\overline{C}(n)$은 차분 clipping을 수행한 후 FFT를 거친 신호이고 $C(n)$은 비교가 되는 기준 신호이다. 그리고 M은 OFDM 심볼의 개수, N은 부반송파의 개수를 나타내며 l은 심볼의 순서, n은 부반송파의 순서를 나타낸다. 제안한 구조에서 FFT 과정을 거치는 신호는 PAPR을 감소시키기 위해 QPSK 매핑 된 신호에 차분될 신호이므로 기준은 왜곡이 없는 경우인 0이 된다. 그러므로 $C(n)$은 0이 되고 EVM 수식을 식 (9)와 같이 간단하게 정리할 수 있다.

$$EVM_{proposed} = \sqrt{\sum_{l=0}^{M-1}\sum_{n=0}^{N-1} |\overline{C}(n)|^2} \times 100(\%) \tag{9}$$

식 (9)에서 비교의 기준이 되는 $C(n)$이 별도로 필요하지 않기 때문에 계산의 복잡도를 줄일 수 있다. 기존의 EVM을 계산하기 위해서는 3N+2M번의 덧셈과 4NM 만큼의 곱셈 연산이 추가로 필요한데 반해 [8], 제안한 구조의 경우 N+M번의 덧셈 연산과 2NM 만큼의 곱셈 연산으로 수행이 가능하다.

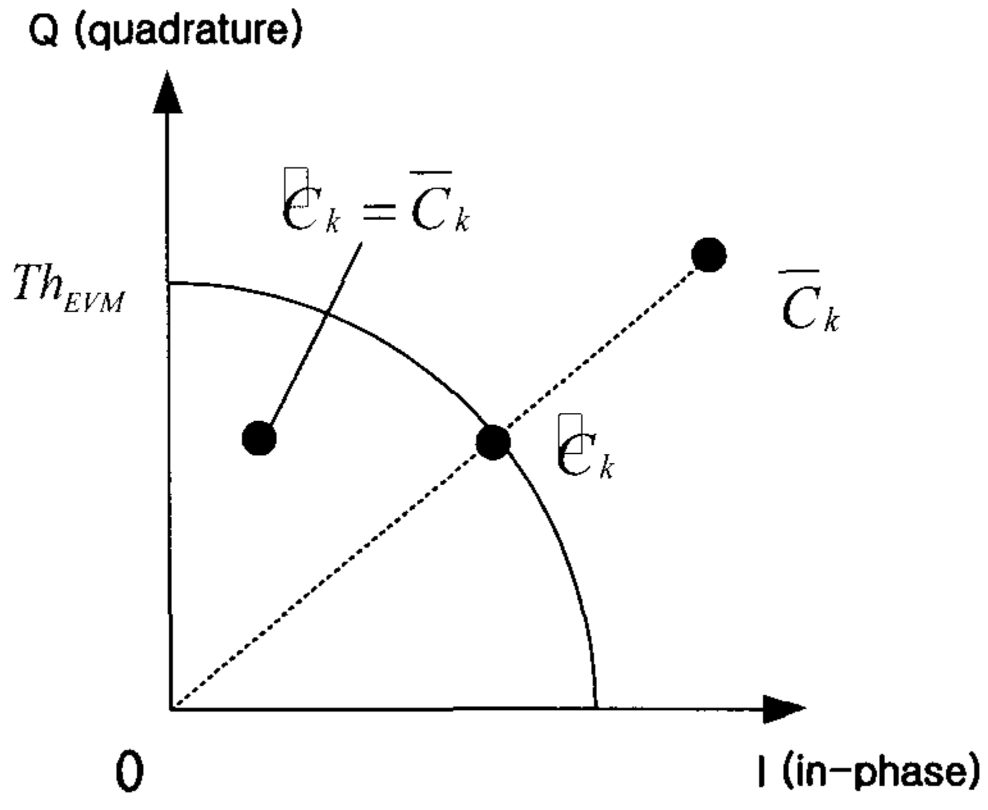


그림 5. EVM을 이용한 대역 내 왜곡 보정
Fig. 5 Inband distortion compensate using EVM

또한 기존의 EVM 측정 기법에서 과거입력 상태를 보존하면서 정확한 샘플 동기를 맞추어 계산해야 하는 어려움을 개선할 수 있다. 식 (9)에서 계산한 EVM을 바탕으로 $EVM\{\overline{C_k}\} > Th_{EVM}$이 될 경우 대역 내 왜곡에 대한 보정이 식 (10)과 같이 이루어지고 이때 Th_{EVM}는 에러 벡터에 대한 경계값이 된다.

$$\tilde{C}_k = \begin{cases} \overline{C}_k, & \mathrm{EVM}\{\overline{C}_k\} \le Th_{EVM} \\ Th \cdot e^{j\angle \overline{C}_k}, & \mathrm{EVM}\{\overline{C}_k\} > Th_{EVM} \end{cases} \quad (10)$$

위의 기법은 그림 5와 같이 계산한 EVM 값이 Th_{EVM}보다 작을 경우 원 신호를 그대로 보존하고, 클 경우 신호의 위상은 고정하면서 크기만 감소시켜 Th_{EVM}의 경계로 이동시킴으로써 신호의 왜곡을 제한시켜 에러가 날 확률을 줄여주는 역할을 한다. 대역 내 왜곡 보정 과정을 거친 신호는 filtering을 수행한 후 QPSK 매핑한 원 신호에 차분되는데, 이때 성좌도의 각 점에서 본 신호의 EVM은 식 (10)에서 제한한 Th_{EVM} 값을 넘어가지 않게 되므로 BER 성능 저하를 줄일 수 있다. 그림 6은 EVM 10%로 대역 내 왜곡을 보정한 것이다. 이로부터 각 점들의 에러 크기가 어떻게 보정되는지 확인할 수 있다. 하지만 신호의 왜곡을 EVM으로 보정하는 과정에서 첨두값의 재생성이 발생하고, PAPR 문제를 해결하기 위해 반복적으로 제안하는 구조를 수행 하게 된다.

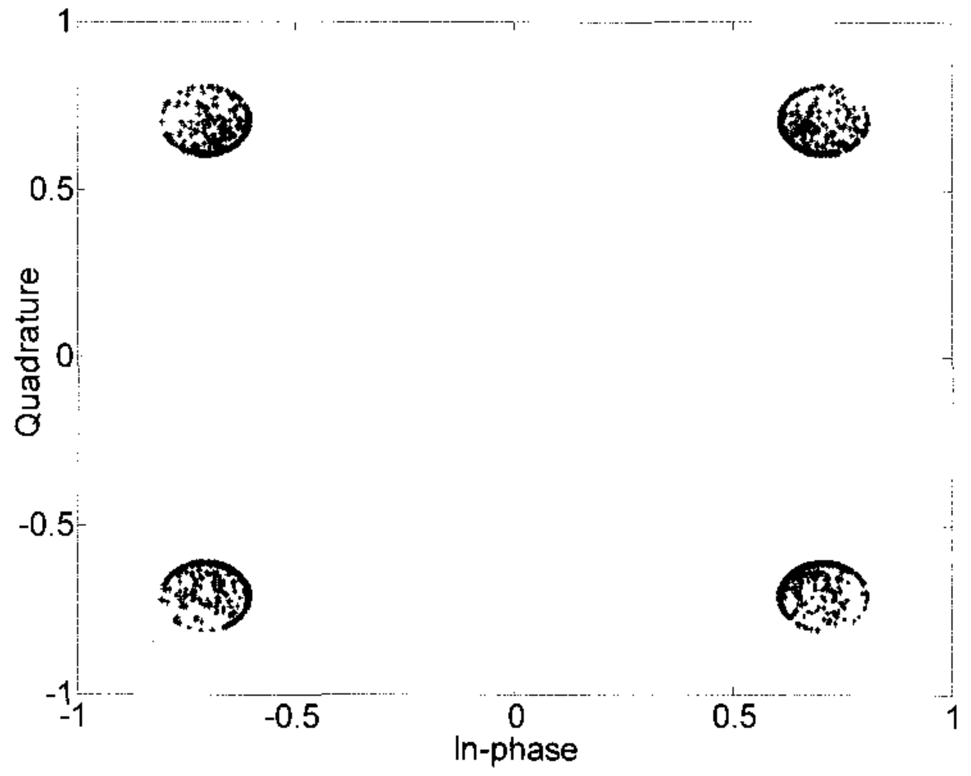


그림 6. EVM 10%일 경우 대역 내 왜곡 보정 이후의 성좌도
Fig. 6 Signal constellation after inband distortion compensation at 10% EVM

2.4 반복 횟수의 결정

본 논문에서 제안한 구조를 반복적으로 적용할 경우 성능은 좋아지지만 복잡도가 증가한다. 즉 반복적으로 알고리즘을 수행하는 횟수가 중요한데, 이는 복잡도와 성능을 비교하여 상황에 따라 최적화된 값으로 정해야 한다. 제안한 구조는 IFFT와 FFT, 차분 clipping, 대역 내 왜곡 보정과 filtering에 따른 구조가 추가 된다.

IFFT와 FFT를 수행하는데 필요한 연산량은 $(NM)\log_2 N$ 만큼의 곱셈과 $(2NM)\log_2 N$ 만큼의 덧셈 연산이 필요하다.

다음으로 차분 clipping은 $|X_k| > Th_{clipp}$인 경우 수행되며, 이때의 조건 $|X_k|$의 값을 계산하기 위해 2NM 만큼의 곱셈 연산이 필요하다. 앞서의 조건을 만족하는 k의 개수가 n_{clipp}이라고 할 경우 $X_k - Th_{clipp}e^{j\angle X_k}$를 계산하기 위해 $3M \cdot n_{clipp}$만큼의 곱셈 연산과 $M \cdot n_{clipp}$만큼의 덧셈 연산이 필요하다.

대역 내 왜곡 보정 기법은 $EVM\{\overline{C_k}\} > Th_{EVM}$인 경우 수행되게 되는데, 이를 계산하기 위해 N+M번의 덧셈과 2NM 만큼의 곱셈 연산을 필요로 하게 된다. 다음으로 $EVM\{\overline{C_k}\} > Th_{EVM}$일 경우 조건을 만족하는 k의 개수가 n_{EVM}이라고 할 때 $Th \cdot e^{\angle j\overline{c_k}}$을 계산하기 위해 $M \cdot n_{EVM}$만큼의 곱셈 연산이 필요하다.

마지막으로 filtering은 MN 만큼의 덧셈 연산이 필요하게 된다. 추가되는 과정을 수식으로 정리하면 식 (11)과 같다.

$$\begin{aligned} T = &\alpha\{M(N\log_2 N + 4N + 3n_{clipp} + n_{EVM})\} + \\ &\beta(M(2N\log_2 N + N + n_{clipp} + 1) + N\} \end{aligned} \quad (11)$$

식 (11)에서 T는 제안하는 구조에서 추가되는 총 연산량을 의미하며 α는 곱셈 연산, β는 덧셈 연산을 나타낸다. 추가되는 연산량과 시뮬레이션 결과로부터 알아낼 성능 향상을 비교하여 반복 횟수를 설정하여야 한다.

Ⅲ. 시뮬레이션 결과

본 논문에서 제안한 기법의 성능 평가를 위한 시뮬레이션 조건은 다음과 같다. 변조 방식으로 QPSK를 사용

하고, 전체 부반송파의 수를 N=128로 하였다. 실제 통신 시스템에서는 통신 환경에 따라 허용되는 왜곡의 정도가 다른데, 이때의 성능을 살펴보기 위하여 EVM 제한 레벨이 5%, 10%, 15%인 경우를 기준으로 시뮬레이션을 하였고, 제안하는 구조가 반복적으로 수행되기 때문에 반복 횟수에 따른 CCDF, BER, PSD 성능을 분석하였다.

3.1 제안하는 구조의 CCDF 성능 비교

OFDM 시스템은 다수의 부채널이 존재하며 평균 파워가 일정하지 않기 때문에 PAPR을 감소시키기 위한 크기 제한은 절대적일 수 없으므로 OFDM 신호의 PAPR 감소를 확인하기 위해 CCDF를 분석하였다.

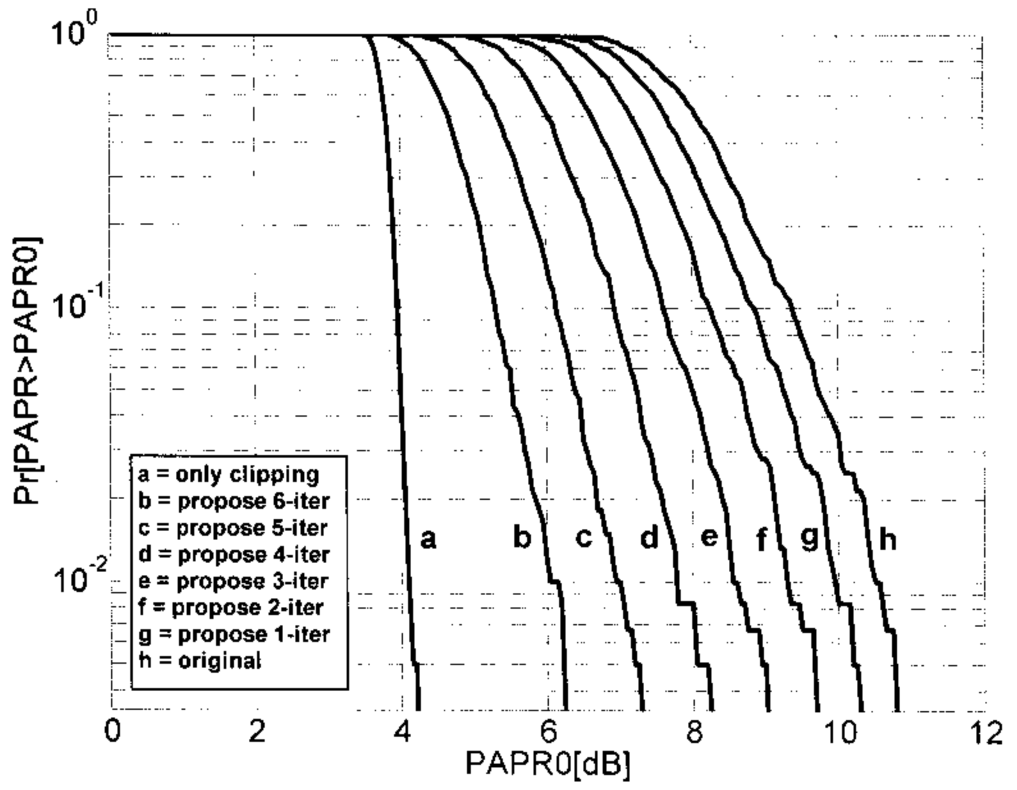


그림 7. EVM 5%일 경우 PAPR 값의 CCDF
Fig. 7 CCDF of PAPR at 5% EVM

그림 7은 EVM을 5%로 보정하고 PAPR 4.2 dB로 신호를 제한하였을 때의 CCDF이다. 원신호의 CCDF인 h와 제안한 구조를 한번 적용하였을 때의 g를 비교한 결과, 제안한 구조를 한번 수행하면 0.8 dB 정도의 PAPR 감소가 있음을 확인할 수 있다. 이는 filtering과 EVM 보정 과정에서의 첨두값 재생성 때문이며, 이를 해결하기 위해 제안한 구조를 반복적으로 수행한다. 제안한 구조를 반복적으로 수행한 b~g를 분석해 본 결과 반복 횟수가 늘어날수록 PAPR이 1~1.2 dB 정도 씩 지속적으로 감소함을 알 수 있다.

그림 8은 EVM을 10%로 보정하고 PAPR 4.2 dB로 신호를 제한하였을 때의 CCDF이다. 제안한 구조를 반복적으로 수행할 때의 CCDF를 살펴보면 그림 7과 비교해서 PAPR의 감소 정도가 더욱 큰 것을 확인할 수 있다. PAPR의 감소 정도가 커지는 것은 첨두값의 재생성이 EVM 5%에 비해 상대적으로 감소하기 때문이다. c와 d를 비교하여 보면 반복 횟수가 4회를 넘어갈 경우 PAPR 감소 비율이 급격히 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 반복적으로 clipping을 수행하는 과정에서 첨두값의 상당량이 EVM 5%에 비해 제한 레벨 이하로 빠르게 떨어져 clipping 조건에 해당하는 샘플의 수가 줄어들어 PAPR 감소의 한계치에 도달했다는 것을 의미한다.

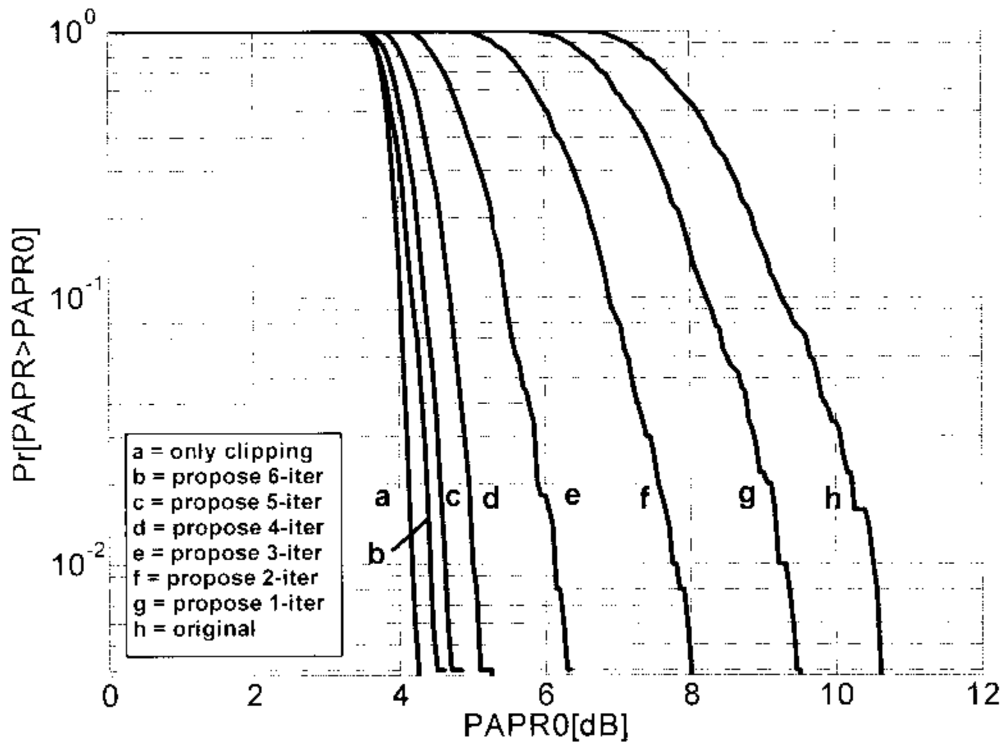


그림 8. EVM 10%일 경우 PAPR 값의 CCDF
Fig. 8 CCDF of PAPR at 10% EVM

그림 9는 EVM을 15%로 보정하고 PAPR 4.2 dB로 신호를 제한하였을 때의 CCDF이다. 그림 8에서 제안한 기법을 반복적으로 4번 수행했을 때와 그림 9에서 제안한 기법을 반복적으로 3번 수행하였을 때의 CCDF를 비교함으로써 EVM이 증가할 경우 더욱 빠르게 PAPR이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

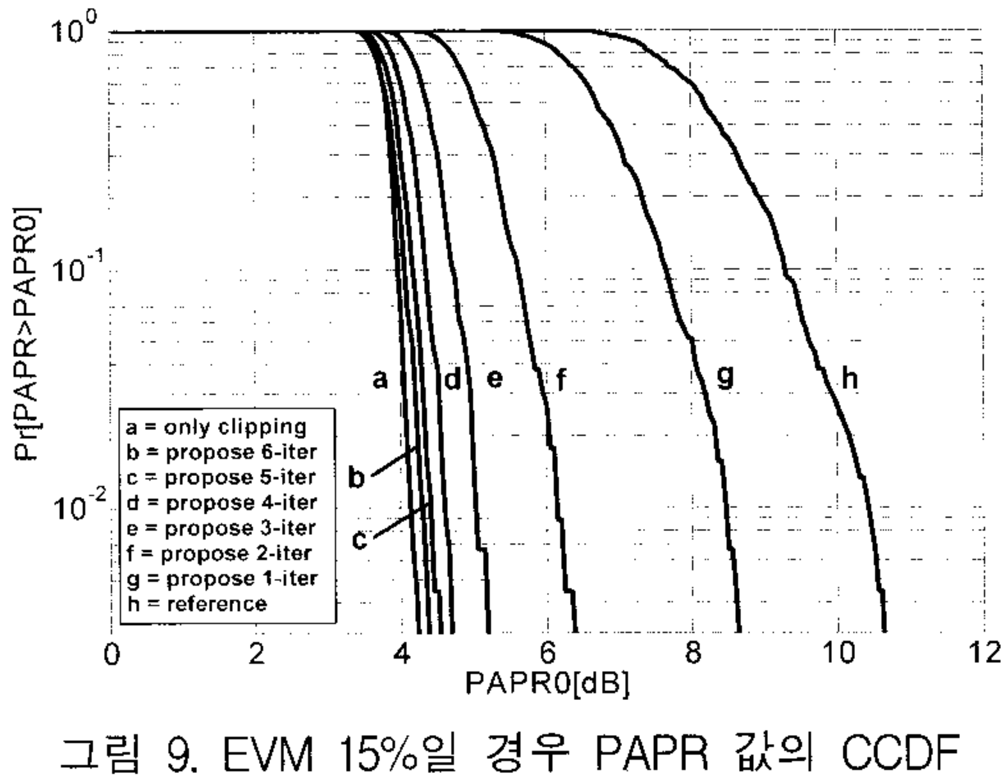


그림 9. EVM 15%일 경우 PAPR 값의 CCDF
Fig. 9 CCDF of PAPR at 15% EVM

표 1은 EVM 제한 레벨에 따른 CCDF를 정리한 것이다. EVM 제한 레벨이 커질수록 PAPR 감소가 크고, 더욱 빠르게 PAPR 감소 한계치에 도달하는 것을 확인할 수 있다. 또한 제안하는 기법의 반복 수행 횟수가 증가함에 따라 PAPR 감소 효율이 좋아지는 것을 알 수 있다.

표 1. EVM 제한 레벨에 따른 CCDF
Table. 1 CCDF according to EVM threshold level

	EVM 5%	EVM 10%	EVM 15%
	$PAPR_0$[dB]	$PAPR_0$[dB]	$PAPR_0$[dB]
original	11.402	11.402	11.402
clipping	4.301	4.301	4.301
1-iter	10.454	9.812	8.739
2-iter	9.803	8.101	6.423
3-iter	9.121	6.293	5.365
4-iter	8.236	5.564	4.988
5-iter	7.359	4.926	4.821
6-iter	6.204	4.531	4.448

3.2 제안하는 구조의 BER 성능 비교

Clipping 기법의 수행에 따른 대역 내 왜곡을 감소시키기 위한 EVM 보정의 성능을 확인하기 위해 시스템의 BER을 분석하였다.

그림 10은 EVM을 5%로 보정하고 PAPR 4.2 dB로 신호를 제안할 때의 BER이다. 제안한 구조를 한번 수행한 경우와 두 번 수행한 경우를 비교하면 BER 10-5 기준으로 0.2 dB 정도 성능이 저하되고 반복 횟수가 3회를 넘어서면 1 dB 이상으로 성능이 감소하며, 최종적으로 한번 수행한 경우와 여섯 번 수행한 경우를 비교할 때 5.7 dB 정도로 성능이 저하된다. 따라서 제안한 구조를 반복할수록 BER 성능이 조금씩 떨어지는 것을 확인할 수 있다.

그림 11은 EVM을 10%로 보정하고 PAPR 4.2 dB로 신호를 제안할 때의 BER이다. 그림 10과 11에서 제안한 구조를 한번 수행하였을 때의 BER 성능을 비교하여 보면 BER 10-5 기준으로 0.8 dB 가량 성능 저하가 있음을 알 수 있다. 즉, EVM 경계를 크게 할수록 BER 성능이 저하가 큰 것을 알 수 있다. 다음으로 그림 11에서 반복 횟수를 4회 이상 수행한 경우의 BER을 비교해보면 0.2 dB 정도의 비교적 작은 차이가 나는 것을 볼 수 있다. 이는 반복적으로 clipping을 수행하는 과정에서 첨두값의 상당량이 제한 레벨 이하로 떨어졌기 때문이며 그림 8에서 PAPR 감소 효율이 낮아진 것과 같은 이유이다.

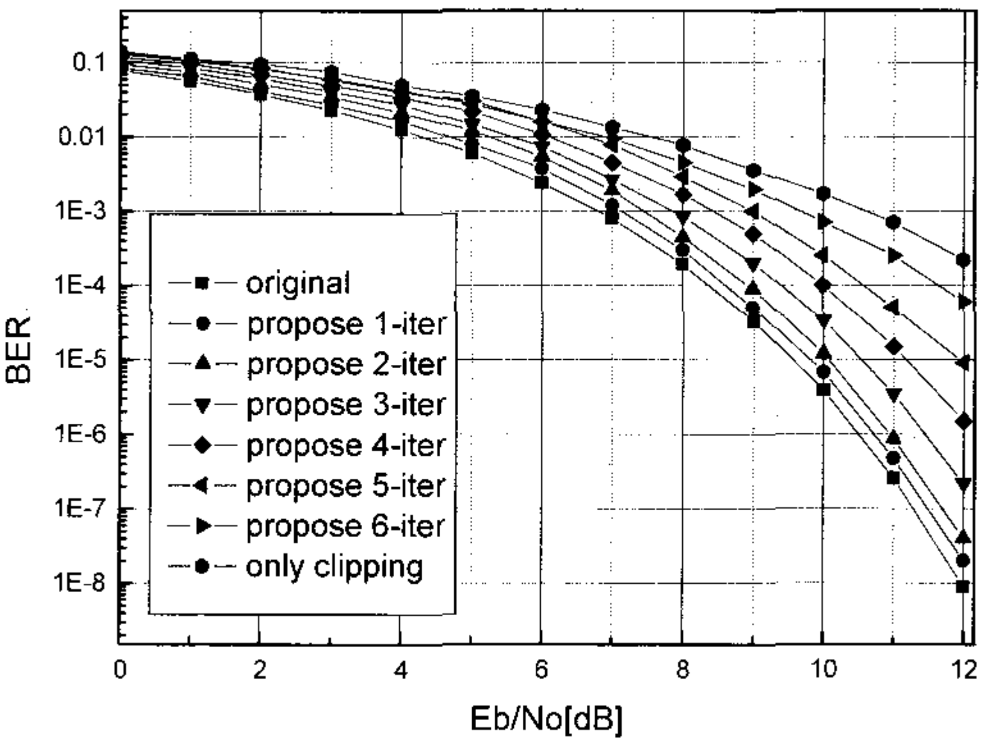


그림 10. EVM 5%일 경우 제안한 구조의 BER
Fig. 10 BER of Proposed structure at 5% EVM

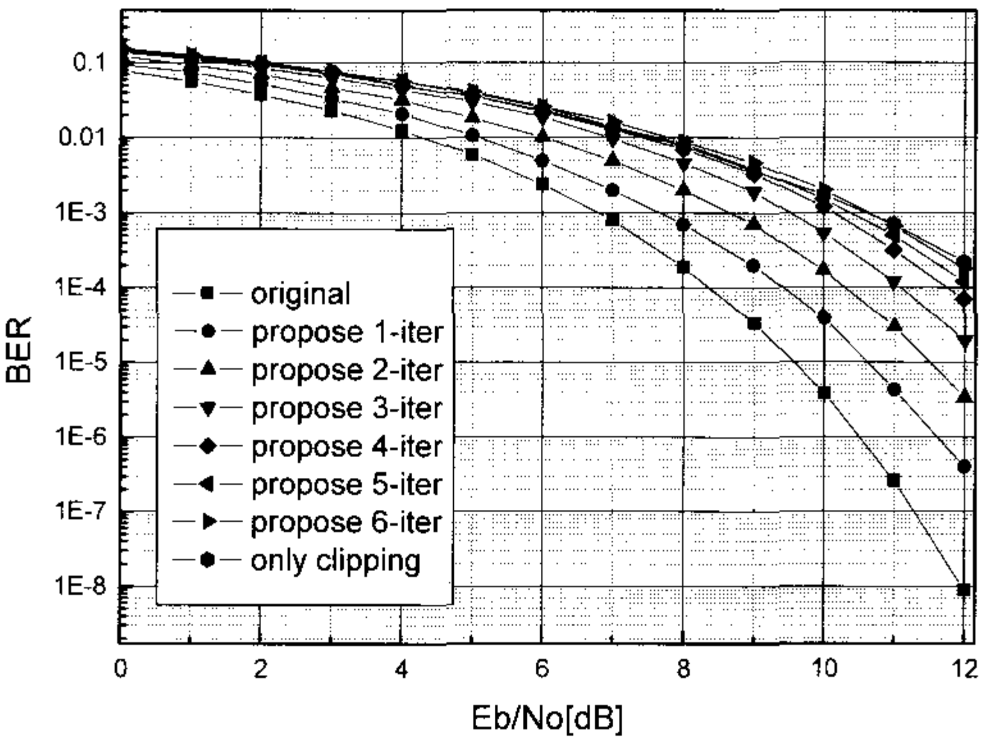


그림 11. EVM 10%일 경우 제안한 구조의 BER
Fig. 11 BER of Proposed structure at 10% EVM

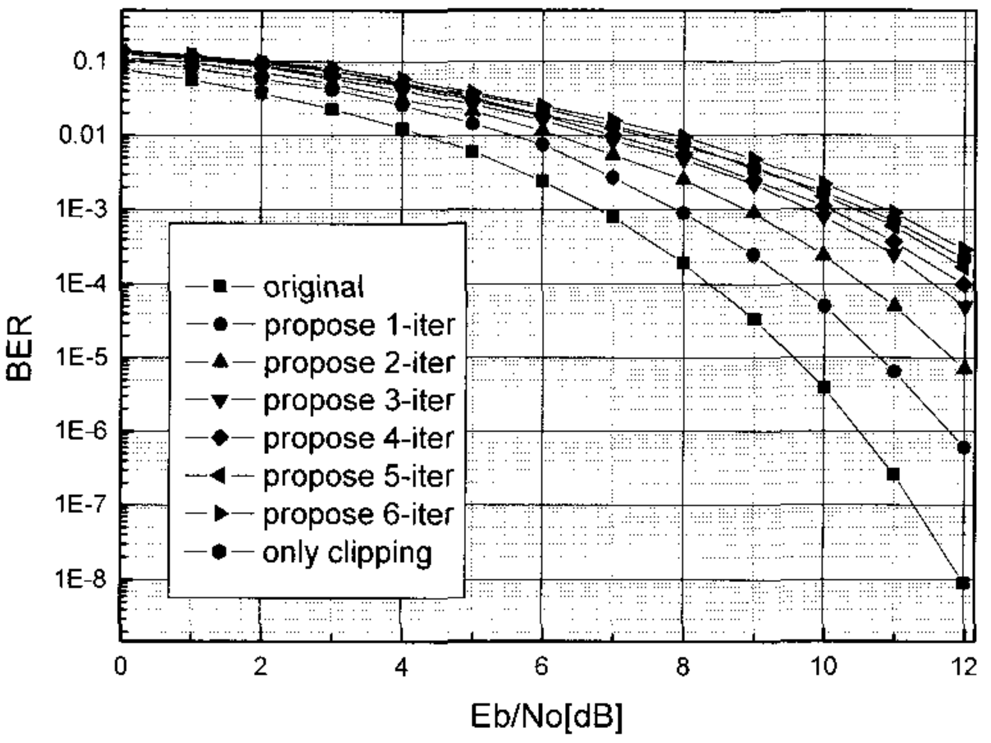


그림 12. EVM 15%일 경우 제안한 구조의 BER
Fig. 12 BER of Proposed structure at 15% EVM

그림 12는 EVM을 15%로 보정하고 PAPR 4.2 dB로 신호를 제한할 때의 BER이다. EVM 15% 이고 반복 횟수가 3회일 때 BER 성능 곡선이 EVM 5%일 때 6회, 10%일 때 4회와 비슷한 것을 볼 수 있으며, 반복 횟수가 3회 이상이 되면 거의 한계치에 도달하여 BER 성능 저하 정도가 급격히 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 이것은 EVM 5%일 경우 6회 이상에서 한계치에 도달하고, EVM 10%일 경우 4회 정도에서 한계치에 도달하는 것과 비교해 봤을 때 EVM 경계값이 커질수록 더욱 빠르게 한계치에 도달한다는 것을 나타낸다.

표 2. BER 10^{-5}기준으로 필요로 하는 E_b/N_0
Table. 2 Required E_b/N_0 based on BER 10^{-5}

	EVM 5%	EVM 10%	EVM 15%
	E_b/N_0[dB]	E_b/N_0[dB]	E_b/N_0[dB]
original	9.5	9.5	9.5
clipping	13.91	13.91	13.91
1-iter	9.8	10.53	10.73
2-iter	10.08	11.43	11.85
3-iter	10.52	12.21	12.71
4-iter	11.15	13.04	13.16
5-iter	11.98	13.46	13.42
6-iter	12.87	13.52	13.65

표 2는 EVM 제한 레벨에 따라 BER 10^{-5}을 만족하는 Eb/N0 값을 나타낸 것이다. 기본적으로 EVM 보정 과정을 수행하면 단순히 clipping만을 적용했을 때와 비교하여 BER 성능이 좋은 것을 알 수 있으며, EVM 제한 레벨이 커질수록 BER 성능은 떨어지고 더욱 빠르게 BER 성능 저하가 한계치에 도달하는 것을 확인할 수 있다. 또한 반복 횟수가 증가할수록 BER 성능이 떨어지는 것을 볼 수 있다. 표 1과 비교하여 EVM 제한 크기와 반복 횟수가 증가할 경우 PAPR 감소 효율은 좋지만 BER 성능은 떨어지는 것을 확인할 수 있다.

3.3 제안하는 구조의 PSD 성능 비교

그림 13은 제안하는 구조를 적용하였을 때의 대역 외 스펙트럼 방출 크기를 알아보기 위해 EVM을 5%로 보정하고 PAPR 4.2 dB로 제한할 때의 PSD이다. 단순히 clipping만을 적용한 a와 제안한 구조를 5번 수행한 b를 비교하여 보면 제안한 구조를 적용하였을 때, 단순 clipping에 비해 35 dB 가량의 성능 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. 반복적으로 제안한 구조를 수행한 b, c, d를 분석하면 반복 횟수가 적을수록 PAPR 감소는 적지만, 대역 외 스펙트럼 방출도 감소하는 것을 확인할 수 있다. c와 d를 비교하여 보았을 때, 반복 횟수를 2회 증가시키면 5 dB 정도 이득을 얻는 것을 확인할 수 있고, b와 c를 비교하였을 때 역시 5 dB정도의 이득이 있음을 확인할 수 있다. 또한 PAPR 감소 기법을 적용하지 않은 e와 d를 비교하여 보았을 때 10 dB 가량 차이가 있는 것을 확인할 수 있다.

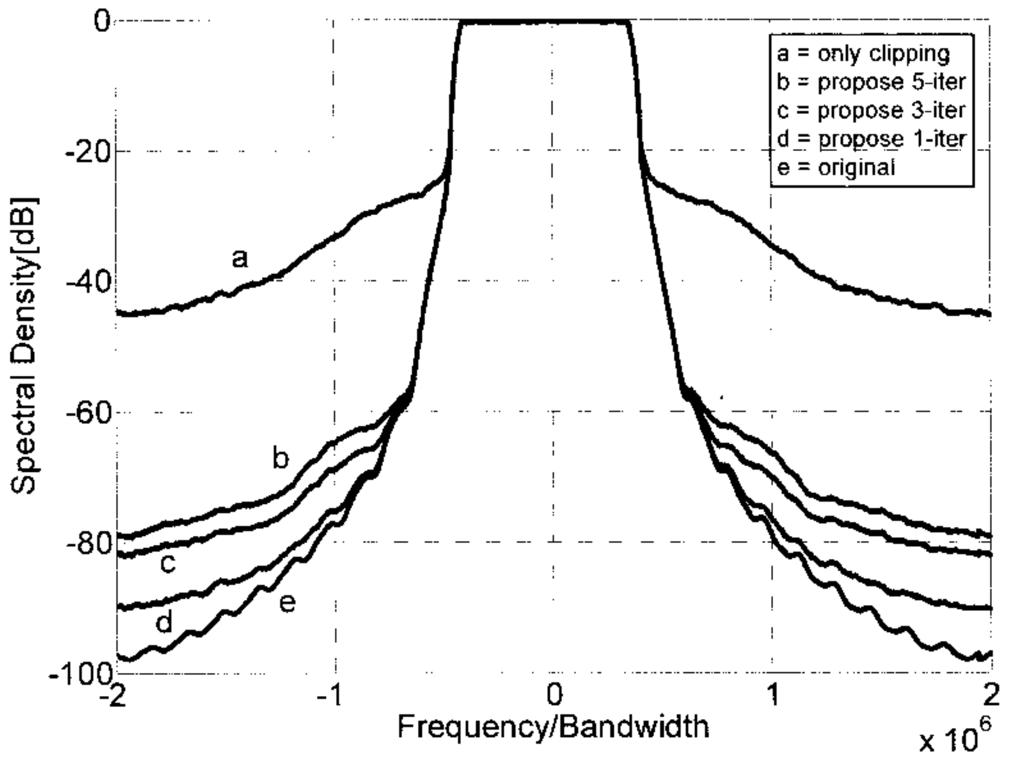


그림 13. EVM 5%일 경우 제안하는 구조의 PSD
Fig. 13 PSD of Proposed structure at EVM 5%

Ⅳ. 결 론

본 논문에서는 OFDM 시스템에서 발생하는 PAPR 문제를 해결하기 위해 clipping과 filtering 기법을 반복적으로 사용하고 이에 따른 대역 내 왜곡을 EVM 보정을 통하여 개선시키는 방법을 제안하였다. PAPR을 감소시키기 위한 반복 구조의 clipping 기법이 가지는 특성을 이용하여 기존의 EVM 측정 방식이 가지는 복잡도를 감소시킴과 동시에 동일한 효과를 낼 수 있다. 이에 대한 성능을 분석하여 본 결과 EVM 제한 레벨의 크기에 따라 clipping과 filtering을 반복적으로 수행할 때 PAPR 감소 정도가 다른 것을 확인할 수 있었다. 이때 EVM 제한 레벨을 크게 할수록 PAPR 감소 정도와 대역 외 스펙트럼의 감소 성능은 증가하지만, 이와 반대로 BER 성능은 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 CCDF와 PSD, BER

성능이 서로 반비례 관계를 가짐을 보여준다. 반복 횟수의 설정에 있어서 제안한 구조를 수행할 때 추가로 필요한 연산량과 성능을 적절히 고려하여야하며, 횟수가 증가할수록 PAPR이 감소하지만 대역 외 스펙트럼 방출이 증가하고 BER 성능이 감소하게 된다. 통신시스템 운용에 있어 필요로 하는 BER 성능과 증폭기에서의 선형 구간의 특성, 스펙트럼 마스크를 고려하여 EVM 제한 레벨과 반복 횟수를 결정한 후 알고리즘을 수행하였을 때 기존의 clipping 기법보다 BER과 대역 외 스펙트럼 방출에 있어서 성능이 향상됨으로서 최적의 시스템을 구현할 수 있다.

참고문헌

[1] R. Van Nee, R. Prasad, *"OFDM for Wireless Multimedia Communications"*, Artech House Publishers, 2000.

[2] H. Ochiai, H. Imai, "Performance analysis of deliberately clipped OFDM signals", IEEE Transactions, vol. 50, no. 1, pp. 89-101, Jan. 2002.

[3] X. Li, L. J. Cimini, Jr., "Effects of clipping and filtering on the performance of OFDM", IEEE Communications Letters, vol. 2, no. 5, pp. 131-133, May. 1998.

[4] L. Wang, C. Tellambula, "A Simplified Clipping and Filtering Techniques for PAR Reduction in OFDM System", IEEE Signal Processing Letters, Vol 12, no. 6, pp. 453-456, June. 2005.

[5] J. Armstrong, "Peak-to-average power reduction for OFDM by repeated clipping and frequency domain filtering", IEEE Electronics Letters, vol. 38, no. 5, pp. 246-247, Feb. 2002.

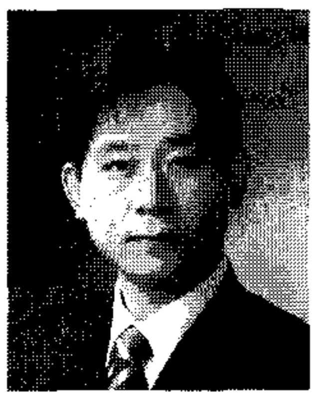
[6] S. H. Han, J. H. Lee, "An overview of peak-to-average power ratio reduction techniques for multicarrier transmission", IEEE Wireless Communications, vol. 12, no.2, pp. 56-65, April. 2005.

[7] M. Ojima, T. Hattori, "PAPR Reduction Method using Clipping and Peak-windowing in CI/OFDM System", IEEE Vehicular Technology Conference, pp. 1356-1360, Sept. 2007.

[8] J. Lei, D. Gang, Z. Ping, "EVM Measurement Algorithm for OFDM Transmitters", IEEE Communications and Information Technologies, pp. 102-107, Sept. 2006.

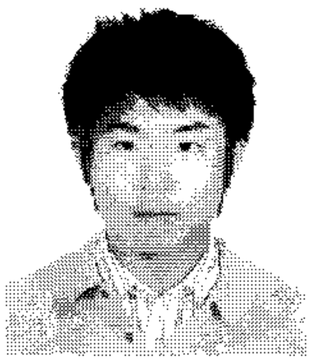
[9] C. Zhao, R. J. Baxley, "Error Vector Magnitude Analysis for OFDM Systems", IEEE ACSSC'06, pp. 1830-1834, Nov. 2006.

저자소개



김 완 태(Wan-Tae Kim)

1975년 4월 27일생
2005년 2월 : 한국항공대학교 대학원 졸업(공학석사)
2005년 1월 ~ 2007년 2월 : (주) 모드멘 CDMA 단말기 개발
2007년 3월~현재 : 한국항공대학교 대학원 박사과정
※관심분야 : WLAN, 무선통신, 이동통신



유 선 용(Sun-Yong Yoo)

1986년 1월 4일생
2007년 6월 : 한국항공대학교 정보통신과 졸업
2007년 7월 ~ 현재 : 한국항공대학교 대학원 석사과정
※관심분야 : WiBro, WPAN, 무선통신, 이동통신

조 성 준(Sung-Jun Cho)

1969년 2월 : 한국항공대학교 항공통신공학과 졸업 (공학사)
1975년 2월 : 한양대학교 대학원 전자통신공학 전공졸업(공학석사)
1981년 3월 : 오사카대학 대학원 통신공학전공 졸업(공학박사)
1972년 8월 ~ 현재 : 한국항공대학교 항공전자 및 정보통신공학부 교수
※관심분야 : 무선통신, 이동통신, 환경전자공학, 이동무선인터넷