

고출력 증폭기의 비선형 왜곡 특성에 강인한 Companding 기법

준회원 김재운*, 한승우*, 종신회원 신요안*

A Robust Companding Scheme against Nonlinear Distortion of High Power Amplifiers

Jaewoon Kim*, Seungwoo Han* *Associate Members*, Yoan Shin* *Lifelong Member*

요약

본 논문에서는 고출력 증폭기 (High Power Amplifier; HPA)의 비선형 특성에 관계없이 시스템의 비트오율 (Bit Error Rate; BER) 성능을 유지하면서 동시에 효율적으로 PAPR (Peak-to-Average Power Ratio)을 감소시킬 수 있는 CCP (Companding Combined with Predistorter) 기법을 제안한다. 제안된 CCP 기법은 기존에 본 저자들이 제안한 Companding 기법이 가지고 있는 Compression 특성과 HPA의 비선형 왜곡 특성에 의해 발생하는 전송 신호의 왜곡으로 인해 나타나는 시스템의 BER 성능 열화를 보완하기 위해 Predistorter를 기존의 Companding 기법에 결합하였다. 따라서, 제안된 CCP 기법은 HPA의 비선형 특성에 관계없이 효율적으로 PAPR을 감소시킬 수 있으며 동시에 시스템의 BER 성능도 유지시킬 수 있는 PAPR 감소 방식이라고 할 수 있다. 모의실험 결과, 제안된 CCP 기법은 TD (Total Degradation) 측면에서 Predistorter를 고려한 Clipping 기법과 Wang이 제안한 Companding 기법에 비해 모든 변조방식에서 가장 낮은 TD 성능을 나타내고 있음을 확인하였다.

Key Words : OFDM, PAPR, Companding, HPA, Clipping, Nonlinear Distortion

ABSTRACT

In this paper, we propose a CCP (Companding Combined with Predistorter) scheme that maintains BER (Bit Error Rate) performance of systems, while effectively reducing PAPR (Peak-to-Average Power Ratio) of OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) signals, independent of nonlinear property of HPAs (High Power Amplifiers). The proposed CCP scheme combines the conventional companding scheme proposed by the authors with the predistorter, in order to prevent degradation of BER performance caused by signal distortion from nonlinear property of the HPA and the compression property of the companding scheme. Hence, the proposed scheme effectively reduces the PAPR and simultaneously maintains the BER performance, independent of nonlinear property of the HPA. Simulation results showed that the proposed CCP scheme provides the lowest total degradation for all the modulations, when comparing with the companding scheme proposed by Wang and the clipping scheme.

I. 서론

최근 들어 OFDM (Orthogonal Frequency

Division Multiplexing) 시스템은 무선랜, 휴대인터넷, 차세대 이동통신 등의 고속 멀티미디어 무선 네트워크와 더불어 디지털 라디오, TV 방송에 이르기

※ 본 연구는 숭실대학교 교내연구비 지원으로 이루어졌음.

※ 본 논문은 JCCI 학술대회에서 우수논문으로 선정되어 게재 추천된 논문입니다.

* 숭실대학교 정보통신전자공학부 통신및정보처리 연구실 ((ecko99, muse16)@amcs.ssu.ac.kr, yashin@e.ssu.ac.kr)

논문번호 : KICS2007-06-270, 접수일자 : 2007년 6월 13일, 최종논문접수일자 : 2007년 10월 12일

까지 폭넓은 분야에서 독보적인 무선 전송 방식으로 각광받고 있다^{1,2)}. OFDM 시스템은 변조 신호들을 다수의 직교 부반송파를 이용하여 전송하는 방식으로서, 전체 전송 대역을 다수의 협대역 직교 부채널로 분할하여 데이터를 전송하게 된다. 이러한 OFDM 시스템은 인접 부반송파 간에 직교성을 유지함으로써 부채널들을 중첩하여 배치할 수 있으므로 높은 대역폭 효율을 가지며, 단일 반송파를 사용하는 시스템에 비해 주파수 선택적 페이딩에 강한 특성을 갖는다.

OFDM을 포함한 대부분의 무선통신 시스템은 송신단에서 충분한 송신 전력을 얻기 위하여 고풍력 증폭기 (High Power Amplifier; HPA)를 사용하게 되는데, 이러한 HPA로부터 최대 출력 전력을 얻기 위해서는 일반적으로 포화 영역 근처에 동작점을 설정하여야 하며 이로 인해 발생하는 비선형 왜곡은 시스템 성능을 크게 저하시키는 요인이 된다. 이러한 HPA의 비선형 특성은 전송 신호의 진폭 변화에 매우 민감하기 때문에, 다수의 부반송파로 변조된 신호를 결합하여 전송하는 OFDM 시스템의 경우 전송 신호 진폭이 매우 크게 변하게 되어 결국 전송 신호에 대한 최대전력대평균전력비, 즉 PAPR (Peak-to-Average Power Ratio)이 단일 반송파 시스템에 비해 매우 큰 단점을 갖게 된다^{1,2)}. 이러한 OFDM 신호의 특성은 선형성이 우수한 고가의 고풍력 증폭기 및 넓은 Dynamic Range를 갖는 ADC (Analog-to-Digital Converter)를 요구하게 된다. 또한, 많은 수의 부반송파를 갖는 OFDM 전송 신호의 경우 가우시안 분포를 보이는데 이것은 큰 크기의 신호 발생 빈도가 매우 낮음을 나타내며³⁾, 따라서 ADC의 균일 양자화가 효과적이지 못하다는 것을 알 수 있다.

OFDM 시스템에서 PAPR 감소를 위한 기법 중 하나인 Clipping은 구조가 간단하고 효과적이거나 부가적인 Clipping 잡음은 시스템의 성능을 저하시키는 원인이 된다⁴⁾. 한편 Wang에 의해 제안된 μ -law Companding 기법⁵⁾은 음성 신호 처리에 사용되는 Companding을 OFDM 신호의 PAPR 감소에 응용한 방법으로서, Clipping 기법보다 좋은 성능을 보이나 송신단에서 Compression한 후에 신호의 평균 전력이 증가하고⁶⁾ 여전히 균일하지 못한 분포를 갖고 있다. 이에 본 저자들은 앞서⁷⁾에서 μ -law Companding 기법의 단점을 극복하기 위해 새로운 Companding 기법을 제안한 바 있다. 이 기법은

Compression 전후의 평균 전력은 유지시키고 통계적으로 가우시안 분포 특성을 나타내는 OFDM 전송 신호의 분포를 균일하게 만드는 방식으로서, 시스템의 부반송파수나 변조 방식에 관계없이 PAPR이 약 4.8 dB로 일정하게 하여 PAPR 감소 측면에서는 매우 효과적인 기법이라고 할 수 있다⁷⁾. 그러나 이러한 장점에도 불구하고 이 기법에 의해 전송될 신호의 분포가 균일하게 되어 높은 크기의 신호 분포가 늘어나게 되므로, 비선형 특성이 강한 HPA가 송신기에서 사용될 경우 상당히 많은 수의 전송 신호가 왜곡되어 심각한 비트오율 (Bit Error Rate; BER) 성능 열화가 발생되게 되는 약점을 가지고 있다.

이에 본 논문에서는 본 논문의 저자들이 제안하였던 기존의 Companding 기법⁷⁾에 Predistorter를 결합함으로써 HPA의 비선형 특성에 관계없이 시스템의 BER 성능을 유지시킬 수 있는 CCP (Companding Combined with Predistorter) 기법을 제안한다. 이를 위한 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는⁷⁾에서 제안된 Companding 기법에 대해 살펴보고, 3장에서는 본 논문에서 제안된 CCP 기법을 설명한다. 이어 4장에서는 모의실험 결과를 제시하고, 마지막으로 6장에서 결론을 맺는다.

II. OFDM 전송 신호의 PAPR 및 일반적인 Companding 기법

2.1 OFDM 전송 신호의 PAPR

일반적으로 OFDM 전송 신호에 대해 PAPR은 한 OFDM 심벌에서 전송 신호 $x(t)$ 의 최대 순시 전력과 평균 전력의 비율로서 다음과 같이 정의된다³⁾.

$$PAPR \equiv \frac{\max_{0 \leq t < NT_s} |x(t)|^2}{\frac{1}{NT_s} \int_0^{NT_s} |x(t)|^2 dt} \quad (1)$$

여기서 T_s (sec)와 N 은 각각 하나의 OFDM 심벌에 대한 구간과 부반송파수를 나타낸다. 한편, 이산 시간 신호를 이용하여 PAPR을 계산하는 경우, 전송 신호 $x(t)$ 를 충분히 빠르게 표본화하지 않으면 원래의 연속 시간 신호에서 실제 최대 순시 전력을 나타내는 부분, 즉 피크값들이 표본화된 신호 샘플에 포함되지 않게 되는 경우가 발생한다. 대부분의 경우 4배의 과표본화 (Oversampling)을 하면 충분히 원래 연속시간 신호에서의 실제 피크값들을

표본화할 수 있다고 알려져 있으며^[3], 본 논문에서도 이러한 4배의 과표본화 과정을 적용하였다.

2.2 일반적인 Companding 기법

그림 1에서는 부가성 백색 가우시안 잡음 (Additive White Gaussian Noise; AWGN) 채널에서 일반적인 Companding 기법을 사용하는 OFDM 시스템의 구조를 도시하고 있다. 본 논문에서는 실수 전송 신호를 갖는 OFDM 시스템을 고려하며, 이러한 방식의 OFDM 시스템에서 IFFT (Inverse Fast Fourier Transform) 블록의 출력값이 실수가 되기 위해서는 아래의 식 (2)과 (3)를 만족하여야 한다^[8].

$$X_{N-k} \equiv X_k^* \quad (k = 1, \dots, N/2 - 1) \quad (2)$$

$$X_0 = X_{N/2} = 0 \quad (3)$$

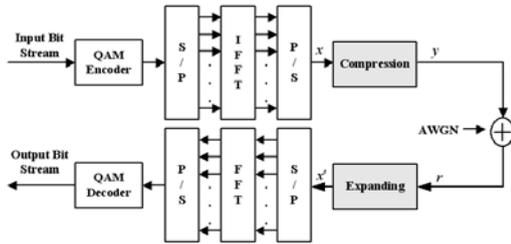


그림 1. AWGN 채널에서 일반적인 Companding 기법을 사용하는 OFDM 시스템의 구조.

또한, 일반적으로 OFDM 시스템에서 Companding 은 표본화된 신호 각각에 적용되기 때문에 본 논문에서는 표현의 편의상 이산 신호 인덱스 n 을 생략하고 $x \equiv x_n$ 등으로 표기한다^[7].

본 저자들에 의해 ^[7]에서 제안된 Companding 기법 (이하 “Uniform Companding” 기법)에 대해 간략히 살펴보면 다음과 같다. 우선 입력 및 출력을 랜덤변수 X , Y 라고 하면, 이 Uniform Companding의 Compression 함수 $C(\cdot)$ 는 랜덤변수 Y 가 $[-K, K]$ 구간에서 균일 분포 (Uniform Distribution)를 갖도록 처리한다^[7].

$$y = C(x) = K \left\{ 1 - \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right\} \quad (4)$$

위 식에서 Y 의 분산은 $K^2/3$ 이고, 최대 전력은 K^2 이므로 이 Uniform Companding을 사용한 시스템의 PAPR은 다음과 같다^[7].

$$10 \log_{10} \left(\frac{K^2}{K^2/3} \right) \approx 4.8 \text{ [dB]} \quad (5)$$

이 기법을 사용한 시스템의 PAPR은 K 와 무관하며, OFDM 시스템의 전체 부반송파수나 변조 방식과 상관없이 일정하고, $K = \sqrt{3}\sigma$ 일 경우 Compression을 수행한 뒤에도 평균 전력이 원래의 신호와 동일하게 유지된다^[7].

한편, 과도한 채널 잡음에 의해 발생할 수 있는 계산상의 문제를 막기 위해, 이 Companding 기법에서는 Expanding 함수 입력값의 크기를 $S \cdot K$ 로 제한하였다. 단, 여기서 $S < 1$ 이며 $S \cdot K \approx 1$ 이다. 따라서 Expanding 함수의 출력 x' 는 다음과 같다^[7].

$$x' = \begin{cases} \sqrt{2}\sigma \operatorname{erfc}^{-1} \left(1 - \frac{r}{K} \right), & |r| < S \cdot K \\ \sqrt{2}\sigma \operatorname{erfc}^{-1} (1 - S \cdot \operatorname{sgn}(r)), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

그림 2에서는 64개의 부반송파수, 16-QAM 변조 방식을 사용하는 OFDM 시스템에서 Uniform Companding의 Compression 알고리즘에 의한 입력 및 출력 신호의 분포를 확률밀도함수 (Probability Density Function; PDF)로 도시하고 있다.

그림 2에서 알 수 있듯이, Uniform Companding 은 사용되는 시스템의 부반송파수와 변조방식에 관계없이 전송 신호의 분포를 균일하게 변환하여 식 (5)과 같이 효과적으로 PAPR을 감소시킬 수 있게 된다. 그러나, 전송될 신호의 분포가 균일하게 되어 고출력 신호의 분포가 늘어나게 되므로, 비선형 특성이 강한 HPA가 송신기에서 사용될 경우 상당히 많은 수의 전송 신호가 왜곡되어 심각한 시스템의 BER 성능 열화가 발생될 것으로 예상된다.

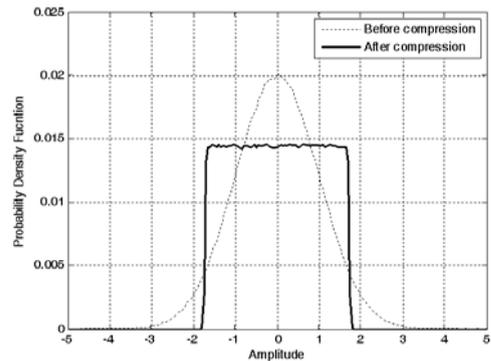


그림 2. Uniform Companding의 Compression 함수에 의한 입력 및 출력 신호의 PDF ($N = 64$, 16-QAM).

III. 제안된 CCP 기법

OFDM 신호의 PAPR 감소를 위한 다양한 기법에 대해 실제적인 평가를 위해서는 실제와 근접한 시스템 환경을 고려해야 된다. 본 논문에서 고려하는 PAPR 감소 기법은 Companding이므로, 이 기법을 기반으로 하는 알고리즘을 평가하기 위해서는 시스템의 BER 성능을 제시해야 된다. 따라서, 제안된 기법 및 일반적인 Companding 기법에 대한 성능 지표인 BER 성능을 모의실험을 통해 실제 OFDM 통신 시스템과 근접하게 평가하기 위해서는 HPA를 적용한 OFDM 시스템을 고려해야 한다. 본 논문에서는 HPA로서 SSPA (Solid State Power Amplifier)를 고려하며, 이의 비선형 특성에 대한 수학적 모델링은 다음과 같다.

SSPA는 증폭기의 비선형 파라미터인 p 의 값에 따라 증폭기의 비선형성이 변화하는 증폭기이며 위상변화는 없는 특성을 가진다. 증폭기의 입력 신호 y 에 대한 포화 한계치가 A_{sat} 일 경우 SSPA 증폭기의 입력-출력 특성은 다음과 같이 표현된다^{9,10}.

$$s = \frac{y}{[1 + (y/A_{sat})^{2p}]^{1/2p}} \quad (7)$$

여기서 s 는 SSPA의 출력 신호를 나타내고, SSPA의 비선형 파라미터인 p 는 낮은 값일수록 HPA의 비선형 특성이 강한 것을 의미한다. 이는 비선형 파라미터인 p 값에 따른 SSPA의 입출력 신호에 대한 예를 나타내고 있는 그림 3에서 확인할 수 있다.

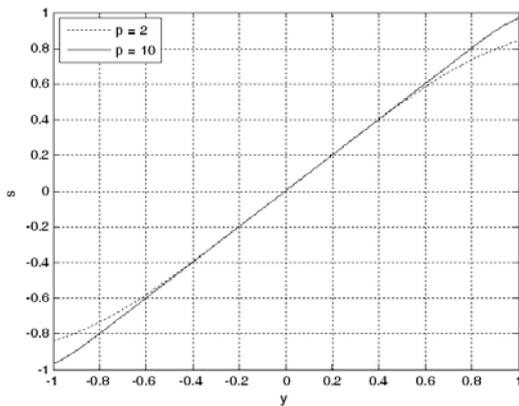
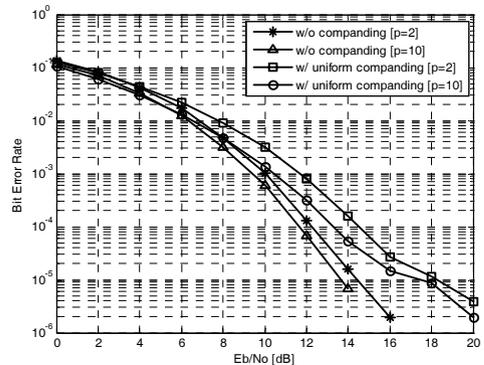
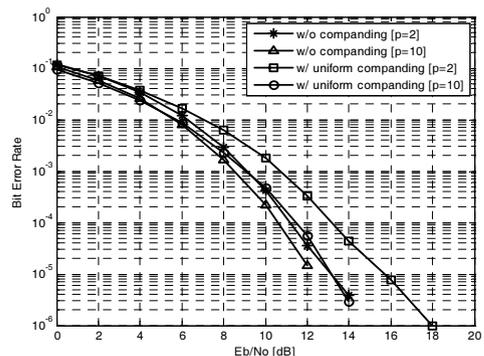


그림 3. p 값에 따른 SSPA의 입력-출력 신호 관계의 예.

따라서 이러한 HPA가 적용된 OFDM 시스템 송신기를 고려할 경우, 앞서 언급한 바와 같이 Uniform Companding은 비선형 특성이 강한 HPA 일수록 시스템의 BER 성능이 상당히 열화될 것으로 예상할 수 있다. 이에 대해 본 논문에서는 모의 실험을 통해 분석하였으며, 이를 위해 SSPA가 적용된 OFDM 시스템을 고려하였다. 하나의 OFDM 심벌에서 전송하는 부반송파수 N 을 64개로 고정하였고, 변조 방식으로는 QPSK (Quadrature Phase Shift Keying), 16-QAM (Quadrature Amplitude Modulation)을 사용하였다. 채널로는 다중경로 페이딩에 의한 영향을 고려하지 않은 AWGN 채널을 가정하였고, Uniform Companding에 적용되는 S 파라미터와 K 값은 각각 0.975와 $\sqrt{3}\sigma$ 로 설정하였다. 또한, SSPA의 비선형 파라미터인 p 는 모든 변조 방식에서 2, 10을 적용하였으며, SSPA의 IBO (Input Back-Off)는 QPSK일 경우 3, 4 dB로, 16-QAM일 경우 6, 7 dB로 설정하였고 SSPA의 입력 포화 한계치인 A_{sat} 는 1로 고정하였다.

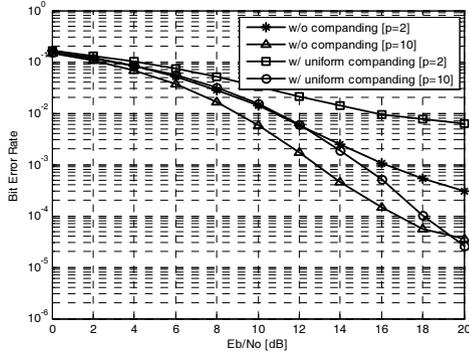


(a) QPSK (IBO = 3 dB)

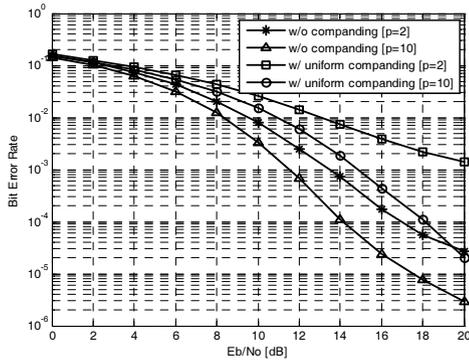


(b) QPSK (IBO = 4 dB)

그림 4. SSPA를 적용한 OFDM 시스템에서의 Uniform Companding의 BER 성능 (QPSK).



(a) IBO = 6 dB



(b) IBO = 7 dB

그림 5. SSPA를 적용한 OFDM 시스템에서의 Uniform Companding의 BER 성능 (16-QAM).

그림 4와 5에서는 Uniform Companding이 사용된 경우 (“w/ uniform companding”)와 사용되지 않은 경우 (“w/o companding”)에 대해 다양한 변조 방식과 IBO 및 비선형 파라미터 p 값을 사용한 상황에서의 E_b/N_0 에 따른 BER 성능을 도시하고 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 모든 경우에서 Uniform Companding이 사용된 OFDM 시스템은 이를 사용하지 않는 시스템과 비교할 때 HPA의 비선형 파라미터인 p 가 작은 값일 경우, 즉 비선형성이 큰 HPA일수록 BER 성능이 더욱 열화되는 것을 확인할 수 있다. 결국, Uniform Companding은 부반송파의 수와 변조방식에 관계없이 효과적으로 PAPR을 감소시킬 수 있지만, HPA의 비선형 특성과 함께 시스템의 BER 성능에 많은 영향을 미치게 된다.

이에 본 논문에서는 Uniform Companding의 효율적인 PAPR 감소 성능을 유지하면서 HPA의 비선형 특성에 관계없이 신뢰성 높은 BER 성능을 제공할 수 있는 향상된 CCP 기법을 제안한다. 제안된 CCP 기법은 OFDM 신호의 PAPR을 효율적으로

감소시키기 위해 Uniform Companding을 기반으로 하며, HPA의 비선형 특성을 극복하기 위해 [9]에서 제안된 Predistorter를 고평 결합한다. 그림 6에서는 HPA의 비선형 특성을 수식적 모델링한 SSPA [9,10]를 가정할 경우, 본 논문에서 제안된 CCP 기법을 적용한 OFDM 시스템의 구조를 도시하고 있다.

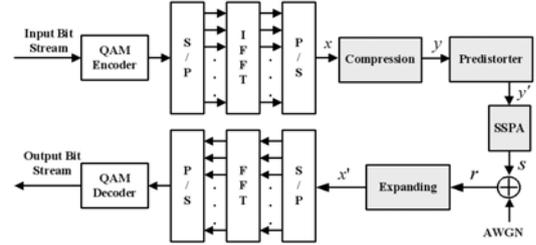


그림 6. SSPA를 고려한 상황에서 제안된 CCP 기법이 적용된 OFDM 시스템 구조

그림 6에서 알 수 있듯이 제안된 CCP 기법은 송신단에서 Compression과 Predistorter를 순차적으로 결합한 기법이라고 할 수 있는데, 이 때 신호처리된 신호 y' 은 SSPA를 통해 증폭되어 채널로 전송되며 SSPA의 출력 s 는 CCP 기법의 Compression 함수와 Predistorter에 의해 신호처리된 신호 y' 가 입력값이 되어 다음과 같이 표현된다.

$$s = \frac{y'}{[1 + (y'/A_{sat})^{2p}]^{1/2p}} \quad (8)$$

한편, 제안된 CCP 기법에서 적용한 Predistorter는 식 (7)에서 표현된 SSPA 함수의 역함수로 나타낼 수 있으며 이의 입력-출력 특성은 다음과 같다[9].

$$y' = \begin{cases} \frac{y}{[1 - (y/A_{sat})^{2p}]^{1/2p}}, & 0 \leq |y| < \bar{A}_{sat} \\ \frac{\bar{A}_{sat}}{[1 - (\bar{A}_{sat}/A_{sat})^{2p}]^{1/2p}}, & |y| > \bar{A}_{sat} \end{cases} \quad (9)$$

여기서 \bar{A}_{sat} 값은 $\bar{A}_{sat} = 0.99 \times A_{sat}$ 를 통해 산출된다.

위의 식 (8)과 (9)을 통해 알 수 있듯이, 제안된 CCP 기법을 사용하는 시스템에서는 SSPA 증폭기의 역함수 형태로 구성된 Predistorter의 식 (9)의 출력값 y' 이 SSPA의 입력 신호가 되므로 증폭기의 비선형 특성을 나타내는 파라미터 p 값에 관계없이 선형성을 보장할 수 있게 된다. 따라서, 제안된

CCP 기법은 Predistorter를 사용하여 HPA의 비선형 특성에 의한 발생하는 전송 신호의 왜곡을 효과적으로 완화시킬 수 있게 되므로 시스템의 BER 성능을 유지시킬 수 있게 된다. 결국 제안된 CCP 기법은 기본적으로 기존에 본 저자들에 의해 제안된 Uniform Companding을 고려하고 여기에 Predistorter를 결합함으로써, HPA의 비선형 특성에 관계없이 효율적으로 PAPR을 감소시킬 수 있고 신뢰성 높은 BER 성능을 제공할 수 있는 방식이 된다. 그림 7에서는 Predistorter에 의해 SSPA의 비선형 특성이 보상되는 신호처리 예를 도시하고 있다.

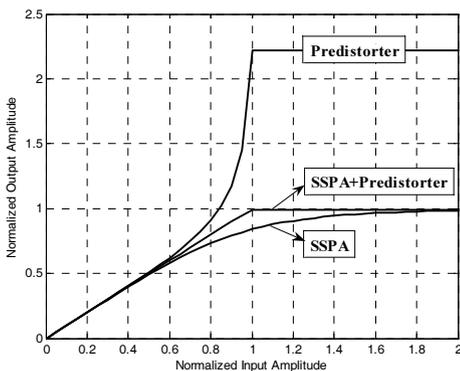


그림 7. Predistorter에 의해 SSPA의 비선형 특성이 보상되는 신호처리의 예.

한편 OFDM 시스템의 PAPR 감소 기법들에 대한 통합적인 성능 지표는 PAPR 감소량과 BER 성능을 동시에 같이 산출하는 것으로서, 이러한 평가 지표로는 대표적으로 다음 식 (10)에서와 같은 TD (Total Degradation)가 널리 사용된다^[10].

$$TD = SNR_{PA} (IBO) - SNR_{AWGN} + IBO \text{ [dB]} \quad (10)$$

여기서 SNR_{AWGN} 은 SSPA를 사용하지 않아 비선형 왜곡이 없는 이상적인 AWGN 채널 환경에서 목표 BER 성능을 얻기 위해 요구되는 신호대잡음비 (Signal-to-Noise Ratio; SNR)를 나타내며, SNR_{PA} 는 정해진 IBO로 동작하는 SSPA를 사용하여 신호를 전송할 경우 목표 BER 성능을 얻기 위해 요구되는 SNR 값을 의미한다. 따라서, OFDM 시스템의 PAPR 감소 기법에 대한 통합적인 성능 지표인 TD는 주어진 IBO에서 가장 낮은 TD 값을 보이는 PAPR 감소 기법을 가장 효율적인 방식이라고 판단 할 수 있는 기준을 제공한다^[10].

IV. 모의실험 결과

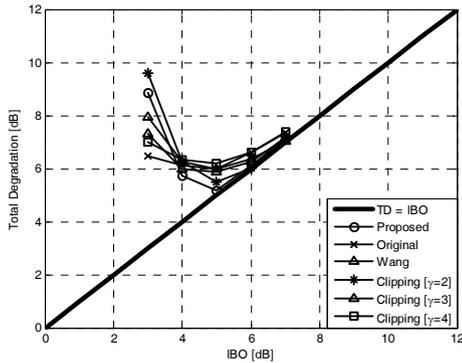
본 논문에서는 앞서 3절에서 설명한 바와 같은 TD를 통해 PAPR 감소 기법의 성능을 분석하였으며, 이 TD 값을 산출하기 위해 목표로 하는 시스템의 BER을 10^{-4} 로 고정하였다. 이를 위해 AWGN 채널에서 식 (2), (3)의 관계식을 이용하여 실수 신호를 전송하는 OFDM 시스템과 SSPA가 적용된 시스템을 고려하였다. 또한 하나의 OFDM 심벌에서 전송하는 부반송파수 N 을 64로 고정하였고, 변조 방식으로는 QPSK, 16-QAM를 사용하였다. 제안된 CCP 기법의 Companding 함수에서 적용되는 S 파라미터와 K 값은 각각 0.975와 $\sqrt{3}\sigma$ 로 설정하였다. 본 논문에서 제안된 CCP 기법과 공정한 비교를 위해 Wang에 의해 제안된 μ -law Companding 기법^[5]과 일반적인 Clipping 기법^[10]에도 Predistorter를 공히 적용하였고, SSPA의 비선형 파라미터인 p 와 입력 포화 한계치인 A_{sat} 값은 각각 2와 1로 고정하였다. 한편, Clipping 기법에서 사용되는 CR (Clipping Ratio) γ 은 다음과 같이 정의된다^[10].

$$\gamma = \frac{A_{max}}{\sqrt{\rho_s}} \quad (11)$$

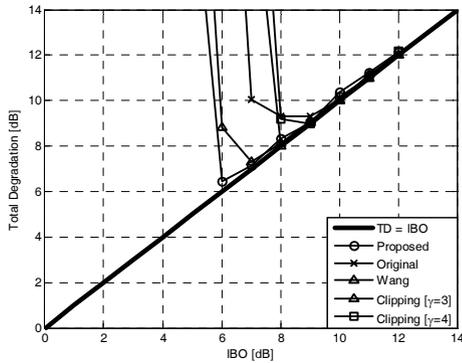
여기에서 ρ_s 는 입력 신호에 대한 평균 전력을 나타내며, A_{max} 는 γ 값을 사용하는 Clipping 기법에 의해 출력되는 신호 최대 크기를 의미한다.

그림 8에서는 QPSK와 16-QAM를 사용하는 OFDM 시스템에서 제안된 CCP 기법 (“Proposed”)과 일반적인 Clipping 기법 (“Clipping”) 및 μ -law Companding 기법 (“Wang”)에 대한 TD 성능을 도시하고 있다. 여기에서 “Original”은 어떠한 PAPR 감소 기법도 적용되지 않은 OFDM 시스템을 의미한다. 또한 가장 굵은 선은 이상적인 TD 값을 나타내며, 이론적으로 어떠한 PAPR이 적용된 OFDM 시스템일지라도 주어진 IBO에서는 이 이상적인 TD 값보다 낮은 TD 성능을 나타낼 수는 없다. 그림을 통해 알 수 있듯이, 제안된 CCP 기법은 일반적인 Clipping 및 μ -law Companding 기법에 비해 QPSK의 경우에는 IBO가 5 dB에서 여타의 기법에 비해 0.5~1.5 dB 정도 우수함을 알 수 있다. 변조 레벨이 높은 16-QAM의 경우 모든 IBO에서 가장 낮은 TD 값을 보이고 있고, 특히 IBO가 6 dB에서

매우 낮은 TD 값을 나타내고 있어 여타의 기법에 비해 최소 2 dB 정도의 낮은 TD를 보장하고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 OFDM 시스템의 PAPR 감소 기법에 대한 통합적인 성능 지표인 TD 값을 측정할 결과, 제안된 CCP 기법은 변조 방식에 관계없이 매우 효과적인 PAPR 감소 기법임을 확인할 수 있었다.



(a) QPSK



(b) 16-QAM

그림 8. 제안된 CCP 기법과 일반적인 Clipping 및 μ -law Companding 기법에 대한 TD 성능 비교 ($N = 64$).

V. 결론

본 논문에서는 HPA의 비선형 특성에 관계없이 시스템의 BER 성능을 유지시키면서 동시에 효과적으로 OFDM 신호의 PAPR을 감소시킬 수 있는 CCP 기법을 제안하였다. 제안된 CCP 기법은 기존에 본 저자들에 의해 제안된 Uniform Companding의 Compression 특성과 HPA의 비선형 왜곡 특성에 의해 발생하는 전송 신호의 왜곡 때문에 나타나는 시스템의 BER 성능 열화를 보완하기 위해 Predistorter를 Companding 기법에 결합하였다. 따

라서 제안된 CCP 기법은 기본적으로 기존의 Companding 기법을 기반으로 구성되어 효율적으로 PAPR을 감소시킬 수 있으며, 결합된 Predistorter에 의해 HPA의 비선형 특성에 관계없이 시스템의 BER 성능도 유지시킬 수 있게 된다. 제안된 CCP 기법의 PAPR 감소 효율성을 평가하기 위해 Predistorter를 고려한 Clipping 기법과 Wang이 제안한 Companding 기법을 TD 측면에서 모의실험한 결과, 제안된 CCP 기법이 모든 변조 방식에서 가장 낮은 TD 성능을 나타내고 있음을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] L. Hanzo, M. Munster, B. Choi, and T. Keller, *OFDM and MC-CDMA for Broadband Multi-user Communications, WLANs and Broadcasting*, John Wiley & Sons, 2003.
- [2] R. Prasad, *OFDM for Wireless Communications Systems*, Artech House Publishers, 2004.
- [3] S. Han and J. Lee, "An overview of peak-to-average power ratio reduction techniques for multicarrier transmission," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 12, no. 4, pp. 56-65, Apr. 2005.
- [4] D. Kim and G. Stuber, "Clipping noise mitigation for OFDM by decision-aided reconstruction," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 3, no. 1, pp. 3-6, Jan. 1999.
- [5] X. Wang, T. Yjhung, and C. Ng, "Reduction of peak-to-average power ratio of OFDM system using a companding technique," *IEEE Trans. Broadcast.*, vol. 45, no. 3, pp. 303-307, Sept. 1999.
- [6] A. Mattsson, G. Mendenhall, and T. Dittmer, "Comments on 'Reduction of peak-to-average power ratio of OFDM system using a companding technique'," *IEEE Trans. Broadcast.*, vol. 45, no. 4, pp. 418-419, Dec. 1999.
- [7] J. Han and Y. Shin, "A companding scheme for PAPR reduction in OFDM systems," *Proc. ITC-CSCC 2002*, vol. 3, pp. 1909-1912, Phuket, Thailand, July 2002.
- [8] A. Ruiz, J. Cioffi, and S. Kasturia, "Discrete multiple tone modulation with co-set coding for the spectrally shaped chan-

nel," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 40, no. 6, pp. 1012-1029, June 1992.

- [9] H. Ryu, J. Park, and J. Park, "Threshold IBO of HPA in the predistorted OFDM communication system," *IEEE Trans. Broadcast.*, vol. 50, no. 4, pp. 425-428, Dec. 2004.
- [10] S. Thompson, J. Proakis, and J. Zeidler, "The effectiveness of signal clipping for PAPR and total degradation reduction in OFDM systems," *Proc. IEEE GLOBECOM 2005*, vol. 5, pp. 2807-2811, St. Louis, USA, Nov. 2005.

김 재 운 (Jaewoon Kim)

준회원



2004년 2월 숭실대학교 정보통신
전자공학부 졸업 (학사)
2006년 2월 숭실대학교 정보통신
공학과 졸업 (석사)
2006년 3월~현재 숭실대학교 정
보통신공학과 박사과정
<관심분야> UWB 전송 시스템,

OFDM 시스템, Cognitive Radio

한 승 우 (Seungwoo Han)

준회원



2003년 2월 경기대학교 전자공학
과 졸업 (학사)
2005년 3월~2007년 2월 숭실대
학교 정보통신공학과 졸업 (석사)
<관심분야> OFDM 전송 시스템,
OFDM PAPR 감소 기법

신 요 안 (Yoan Shin)

중신회원



1987년 2월 서울대학교 전자공학
과 졸업 (학사)
1989년 2월 서울대학교 전자공학
과 졸업 (석사)
1992년 12월 University of Texas
at Austin 전기및컴퓨터공학과
졸업 (박사)

1992년 12월~1994년 7월 오스틴 소재 MCC (Micro-
electronics & Computer Technology Corp.) 연구원
소시엄 Member of Technical Staff
1994년 9월~현재 숭실대학교 정보통신전자공학부 정교수
<관심분야> CDMA 및 OFDM 모뎀, UWB 전송 시스
템, MIMO 시공간 신호처리, Cognitive Radio