

OFDM 시스템에서 PAPR 감소를 위한 스케일러블 컴팽딩 함수

준회원 이지혜*, 왕진수*, 박재철*, 종신회원 김윤희*

A Scalable Companding Function for Peak-to-Average Power Ratio Reduction in OFDM Systems

Ji Hye Lee*, Jin Soo Wang*, Jea Cheol Park* *Associate Members,*
Yun Hee Kim* *Lifelong Member*

요약

본 논문은 OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) 시스템에서 PAPR (peak-to-average power ratio) 감소 기법으로 복잡도가 낮은 컴팽딩 (companding) 기법을 고려한다. 기존의 컴팽딩 함수는 시스템 요구 사항에 따라 설계하기 어렵고 비트오류율 성능 열화가 매우 큰 단점이 있다. 이에 본 논문에서는 임의의 최대 PAPR 값을 제공하고 그에 따라 비트오류율 성능이 점진적으로 바뀌는 스케일러블 컴팽딩 함수를 제안한다. 제안하는 컴팽딩 함수는 시스템이 요구하는 PAPR 성능과 비트오류율 성능에 따라 쉽게 설계할 수 있으며, 모의실험 결과 같은 PAPR 조건에서 기존의 클리핑이나 μ -law 컴팽딩 기법보다 우수한 비트오류율 성능을 제공함을 볼 수 있다.

Key Words : PAPR(peak-to-average power ratio), OFDM, Companding, High Power Amplifier

ABSTRACT

In this paper, we consider a low-complex companding technique for peak-to-average power ratio (PAPR) reduction in orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) systems. For the technique, we propose a novel companding function to compensate the problem of the conventional companding functions which are difficult to design complying with system requirements and deteriorate the bit error rate (BER) performance significantly. The proposed scalable companding function can provide an arbitrary value of the maximum PAPR with which the BER performance changes gracefully. In addition, the proposed companding function can be designed readily according to the PAPR and BER performance required by the system and is observed to provide better BER performance than the conventional clipping and μ -law companding schemes under the similar PAPR condition.

1. 서론

OFDM(orthogonal frequency division multiplexing)

은 광대역 통신에 유리한 특성으로 디지털 방송, 무선 랜, 차세대 이동통신 등 다양한 무선 전송 규격에 채택되고 있다. 그러나, 다중 반송파 신호로 구성되는

※ 본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과 (NIPA-2010-C1090-1021-0007)와 정부(교육과학기술부) 재원으로 한국연구재단 지원을 (No. 2009-0083992) 받아 수행된 연구임.

* 경희대학교 전자전파공학과 (yoyo278@khu.ac.kr, delta310@khu.ac.kr, jcpark@khu.ac.kr, yheekim@khu.ac.kr)

논문번호: KICS2010-02-050, 접수일자: 2010년 2월 3일, 최종논문접수일자: 2010년 4월 6일

OFDM 신호는 PAPR이 (peak-to-average power ratio) 크기 때문에 D/A (digital-to-analog) 변환 과정과 HPA를 (high power amplifier) 통과할 때 비선형 왜곡을 발생시키고 전력 효율을 나쁘게 한다^{1,2}.

이러한 문제점을 해결하기 위해 OFDM 신호의 PAPR 감소 기법에 대한 연구가 다양하게 진행되었는데, 대표적인 기법으로 클리핑(clipping), 컴팬딩(companding), SLM(selective mapping), PTS (partial transmit sequence) 등이 있다¹⁻¹¹. 클리핑 기법은 임계값 이상의 전송 신호를 잘라서 전송하기 때문에 복잡도가 가장 적지만, 신호 왜곡으로 고차 변조 방식 적용 시 성능 열화가 매우 크다는 단점이 있다^{3,4}. SLM과 PTS기법은 부반송파 데이터에 위상 변화를 다르게 하여 다수의 후보 신호를 만들고 이 가운데 가장 낮은 PAPR을 갖는 후보를 선택하는 방법으로, 비트오류율 성능 저하는 없지만 복잡도가 크고 부가정보를 필요로 하는 단점이 있다^{5,6}.

한편, 컴팬딩 기법은 입력 신호 진폭을 크기에 따라 다른 비율로 압축하여 PAPR을 줄이는 기술로 클리핑보다는 복잡도가 조금 커지나 SLM과 PTS 기법보다는 훨씬 낮은 복잡도로 구현할 수 있다⁷⁻¹¹. 처음 제안된 μ -law 컴팬딩 기법은 음성신호에서 사용한 함수를 그대로 적용한 것으로, PAPR 감소에는 효과적이거나 평균 전력 증가와 수신단에서의 신호 왜곡으로 링크 성능이 나빠지는 단점이 있다. 또한, 시스템이 요구하는 PAPR과 비트오류율 성능에 알맞은 적절한 μ 값을 선택하기 어렵다⁷. 최근 제안된 지수 컴팬딩 기법은 OFDM 신호의 확률적 분포를 고려하여 매우 우수한 PAPR 성능을 제공하도록 설계되었으나⁸, 그에 따른 비트오류율 성능 열화가 크다는 단점이 있다.

이에 본 논문에서는 기존의 컴팬딩 기법을 보완하여 시스템이 요구하는 PAPR 성능에 따라 쉽게 설계할 수 있고, PAPR 성능에 따라 비트오류율 성능 또한 점진적으로 바뀌는 스케일러블 컴팬딩 함수를 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 시스템 모형을 설명하고, III장에서는 기존의 컴팬딩 기법에 견주어 제안하는 스케일러블 컴팬딩 기법을 소개한다. IV장에서는 모의실험 결과를 통해 제안된 기법의 성능을 분석하고, V장에서 결론을 맺는다.

II. 시스템 모형

컴팬딩 기법을 적용한 OFDM 시스템 모형은 그림 1과 같다. 먼저 심볼 대응기는 정보 비트를 QPSK 또는 QAM 성좌도에 대응하여 변조 심볼 S_k 를 출력한다.

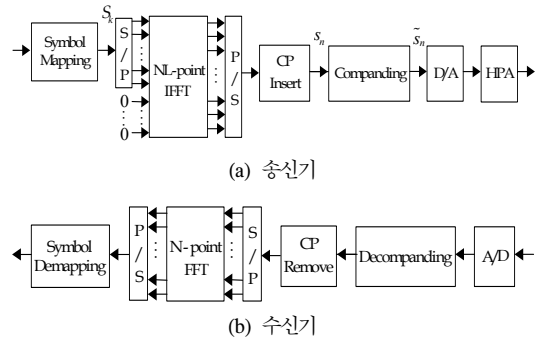


그림 1. 시스템 모형

다. 직렬 변환으로 N 부반송파 수로 전송될 변조 심볼 $\{S_k, k=0,1,\dots,N-1\}$ 을 구성하고, $N(L-1)$ 널 심볼을 추가하여 크기가 NL 인 IFFT (inverse fast Fourier transform)를 수행한다. 그러면, IFFT 출력은 시간영역 OFDM 신호를 L 배로 과표본화한 신호 샘플로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$s_n = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} S_k e^{j2\pi \frac{kn}{LN}}, \quad 0 \leq n \leq LN-1 \quad (1)$$

이러한 OFDM 신호의 PAPR은 다음과 같이 최대 전력과 평균 전력의 비로 정의된다.

$$PAPR\{s_n\} = \frac{\max_{0 < n < LN-1} [|s_n|^2]}{E[|s_n|^2]} \quad (2)$$

여기서, $E[\cdot]$ 는 기댓값이다. 실제 PAPR은 연속시간 신호로 결정되거나 이산시간 신호로 측정할 경우 과표본율이 $L \geq 4$ 로 하면 비슷한 값을 얻을 수 있다.

송신기는 OFDM 신호 샘플은 심볼간간섭을 줄이기 위한 순환전치(Cyclic Prefix: CP) 삽입한 뒤, PAPR을 줄이기 위해 컴팬딩 과정을 수행한 뒤 D/A, HPA 과정을 차례로 거쳐 전송한다. 여기서, 컴팬딩 과정은 OFDM 신호 샘플 s_n 의 위상은 바꾸지 않고 진폭만 컴팬딩 함수 $C(x)$ 로 변환하여 출력 신호 $\tilde{s}_n = C(|s_n|)e^{j\angle s_n}$ 를 내보낸다. 한편, 수신단은 OFDM 송신단의 역과정을 통해 데이터를 복원한다.

III. 컴팬딩 기법

3.1 기존의 컴팬딩 함수

먼저 Wang이 제안한 μ -law 컴팬딩 기법은 다음

의 함수를 사용한다^[7].

$$C_{\mu}(x) = \frac{x_{\max} \ln \left[1 + \mu \frac{x}{x_{\max}} \right]}{\ln(1 + \mu)} \quad (3)$$

여기서, x_{\max} 는 입력 신호와 출력 신호의 최대값이고 μ 는 압축률을 결정하는 상수로 μ 값이 커질수록 압축을 크게 하여 PAPR 성능을 향상시키는 반면 신호 왜곡을 크게 한다. 그러나, 시스템이 요구하는 PAPR 성능을 만족하는 μ 값을 찾기가 어려운 단점이 있다.

또 다른 기법으로 지수 컴펜딩 기법^[8] 컴펜딩 입력 신호인 OFDM 신호의 분포를 고려하여 출력 신호의 진폭 또는 전력이 균일한 분포를 갖도록 컴펜딩 함수를 설계한 기법이다. 즉, 컴펜딩 입력 OFDM 신호 (1)의 분포를 중심극한정리를 적용하여 평균이 0이고 분산이 $P_{\text{in}} = E[|s_n|^2] = 2\sigma^2$ 인 복소 정규 분포로 가정하여 컴펜딩 함수를 설계한다. 이 경우, 입력 신호 진폭 $X = |s_n|$ 는 레일리 분포를 가지면 누적분포함수는 다음과 같다.

$$F_X(x) = 1 - e^{-x^2/(2\sigma^2)}, \quad x \geq 0 \quad (4)$$

이러한 입력 신호 분포에 대한 가정 하에 지수컴펜딩 기법은 출력 $Y = |\tilde{s}_n| = C(X)$ 의 누적분포함수가 다음과 같게 한다.

$$F_Y(y) = \frac{x^d}{\alpha_d}, \quad 0 \leq x < \sqrt[d]{\alpha_d}, \quad d = 1, 2 \quad (5)$$

여기서, $d = 1$ 은 출력 신호 진폭의 분포가 균일한 경우, $d = 2$ 는 출력 신호 전력의 분포가 균일한 경우이며, α_d 는 입력 신호의 전력과 출력 신호의 전력을 같게 하는 상수로 $\alpha_1 = \sqrt{6\sigma^2}$, $\alpha_2 = 4\sigma^2$ 이다. 이러한 조건을 만족하는 지수 컴펜딩 함수 $C_{Ed}(x)$ 는 다음과 같다.

$$C_{Ed}(x) = F_Y^{-1}(F_X(x)) = \sqrt[d]{\alpha_d \left[1 - \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \right]}, \quad d = 1, 2 \quad (6)$$

지수 컴펜딩 함수는 최대 PAPR 값이 $d = 1$ 일 때 4.7 dB이고 $d = 2$ 일 때 3 dB로 PAPR을 크게 줄이지

만 그에 따라 비트오류율 성능이 크게 나빠진다.

3.2 제안하는 스케일러블 컴펜딩 함수

본 논문에서는 지수 컴펜딩 함수를 확장하여 출력 신호의 확률적 특성을 바꿈으로써 임의의 최대 PAPR 값을 제공하고 최대 PAPR 값이 커짐에 따라 비트오류율 성능 또한 점진적으로 개선되는 스케일러블 컴펜딩 함수를 제안한다. 제안하는 컴펜딩 함수는 출력 신호의 전력이 특정 베타 분포가 되도록 하며, 해당 분포의 확률밀도함수와 누적분포함수가 다음과 같이 정의된다.

$$f_Y(y) = \frac{2\beta_S y}{A_{\max}} \left(1 - \frac{y}{A_{\max}} \right)^{\beta_S - 1}, \quad 0 \leq y \leq A_{\max} \quad (7)$$

$$F_Y(y) = 1 - \beta_S \left(1 - \frac{y^2}{A_{\max}^2} \right)^{\beta_S}, \quad 0 \leq y \leq A_{\max} \quad (8)$$

여기서, A_{\max} 는 출력 신호의 최대 진폭, $\beta_S \geq 1$ 는 A_{\max} 에 따라 임출력 신호의 평균 전력이 같아지도록 확률 분포 모양을 다르게 하는 스케일링 파라미터이다. 즉, 스케일링 파라미터는 $A_{\max}^2 \beta_S \int_0^1 t(1-t)^{\beta_S - 1} dt = 2\sigma^2$ 조건을 만족하는 값으로 다음과 같이 결정된다.

$$\beta_S = A_{\max}^2 / 2\sigma^2 - 1 = \text{PAPR}_{\max} - 1 \quad (9)$$

식 (8)의 출력 분포 정의에 의한 제안하는 스케일러블 컴펜딩 함수는 다음과 같다.

$$C_S(x) = F_Y^{-1}(F_X(x)) = A_{\max} \sqrt{1 - e^{-x^2/\beta_S}} \quad (10)$$

즉, 시스템이 허용하는 최대 PAPR 값인 PAPR_{\max} 가 결정되면, 제안하는 컴펜딩 함수의 파라미터는 $\beta_S = \text{PAPR}_{\max} - 1$ 와 $A_{\max} = \sqrt{P_{\text{in}} \text{PAPR}_{\max}}$ 로 바로 결정된다. 또한, 제안하는 컴펜딩 함수에서 $\text{PAPR}_{\max} = 3$ dB이면 $d = 2$ 일 때의 지수 컴펜딩 함수와 동일하게 되므로 제안 기법은 기존의 지수 컴펜딩 함수를 포함하는 일반화된 컴펜딩 함수라 할 수 있다. 참고로 수신단에서 디컴펜딩을 위한 역함수는 다음과 같다.

$$C_S^{-1}(x') = \sqrt{-\beta_S \ln\left(1 - \frac{x'}{A_{\max}}\right)}, \quad 0 \leq x' \leq A_{\max} \quad (11)$$

그림 2는 OFDM 신호의 평균 전력을 1로 했을 때 몇몇 PAPR_{max} (dB) 값에 대해 제안하는 컴팬딩 함수의 입출력 특성을 보인 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 최대 허용 PAPR이 커짐에 따라 선형성이 커지는 것을 볼 수 있다. 그림 3은 컴팬딩 함수에 64-QAM을 적용할 때의 컴팬딩 함수의 입력단과 출력단 신호 진폭의 확률밀도함수를 측정된 결과를 보인 것이다. 최대 허용 PAPR이 커짐에 따라 출력 분포가 입력 분포에 더 비슷해짐을 볼 수 있다.

그림 2와 그림 3에서 볼 수 있듯이 최대 허용 PAPR 값이 늘어남에 따라 신호 왜곡이 줄어들 것임을 예상할 수 있다.

그림 4는 덧셈백색정규잡음에서 HPA가 없을 때

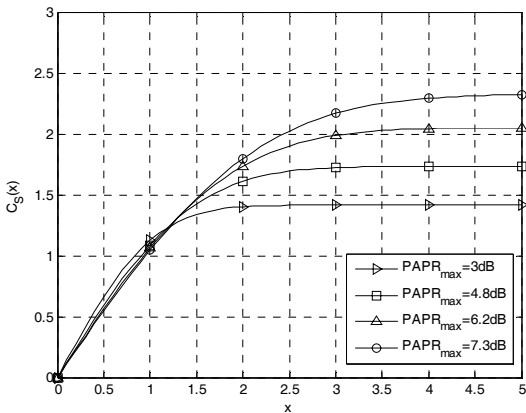


그림 2. 스케일러블 컴팬딩 함수의 입출력 특성

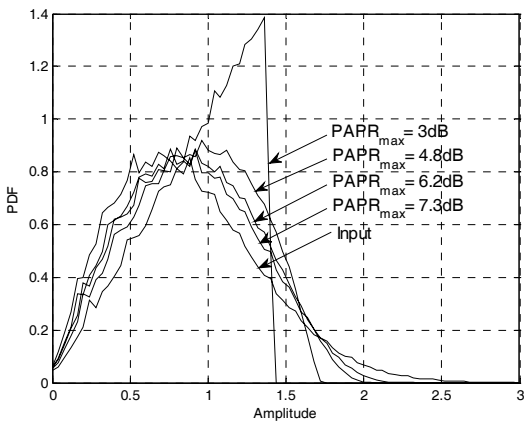


그림 3. 제안하는 컴팬딩 함수의 파라미터에 따른 입출력 진폭의 확률밀도함수

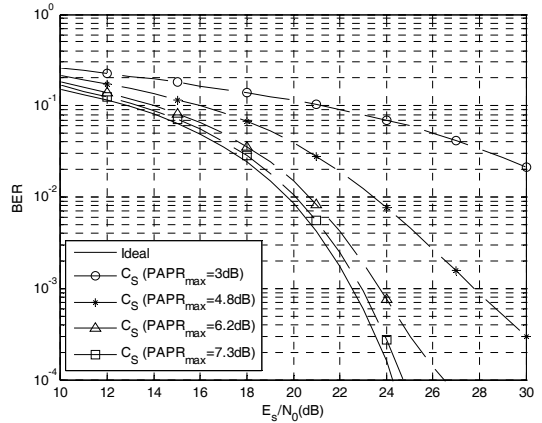


그림 4. 제안하는 컴팬딩 함수의 파라미터에 따른 64-QAM 적용 시 OFDM 시스템의 비트오류율.

컴팬딩에 의해서만 발생하는 성능 왜곡을 보인 것이다. OFDM 신호의 부반송파 수는 $N=128$, 변조 방식은 64-QAM일 때 여러 PAPR_{max}에 따른 비트오류율 성능을 비교하였다. 그림에서 PAPR_{max}=3dB는 기존의 지수 컴팬딩 함수를 나타내며 PAPR 성능은 가장 좋지만 비트오류율 성능 열화가 매우 큼을 볼 수 있다. 제안하는 스케일러블 컴팬딩 함수는 PAPR_{max} 값에 따라 β_S 를 조절하여 비트오류율 성능을 개선함을 볼 수 있다. 즉, 제안 기법은 3 dB 이상의 임의의 최대 PAPR 값에 대한 컴팬딩 함수를 쉽게 설계할 수 있으며, 시스템이 요구하는 비트오류율 성능과 PAPR 성능을 절충하는 알맞은 컴팬딩 함수를 선택할 수 있도록 한다.

IV. 모의 실험

본 절에서는 $N=128$ 인 OFDM 시스템에서 QAM 기반의 변조방식을 적용할 때 제안하는 컴팬딩 함수와 기존의 컴팬딩 함수의 성능을 비교한다. 송신단 HPA로 SSPA (solid state power amplifier)를^[12] 적용하였으며, 이 때 SSPA의 입출력 특성을 보면 위상 변화는 없고 출력 진폭 $\tilde{a}(t)$ 는 입력 진폭 $a(t)$ 에 대해 다음과 같은 특성을 갖는다.

$$\tilde{a}(t) = \frac{a(t)}{\left[1 + (a(t)/A_{\max})^{2p}\right]^{\frac{1}{2p}}} \quad (12)$$

여기서, p 는 SSPA의 비선형 파라미터로 p 가 작을 수록 비선형 특성이 강함을 의미하며, A_{\max} 는 출력

포화 전력을 나타낸다. 따라서, 제안하는 컴펜딩 기법은 HPA의 A_{max} 로부터 최대 PAPR 값과 그에 따른 스케일링 파라미터로 컴펜딩 함수를 정의한다.

먼저 그림 5는 16-QAM을 적용할 때 제안하는 컴펜딩 함수와 기존의 μ -law 컴펜딩 함수를 적용할 때 송신단 PAPR의 여누적분포함수 (complementary cumulative distribution function: CCDF) $Pr[PAPR > PAPR_0]$ 를 보인 것이다. 제안 함수와의 비교를 위해 μ -law 컴펜딩 함수는 CCDF가 $1e-3$ 에서의 PAPR 값이 6.2 dB, 7.3 dB가 되는 값 $\mu=32$ 와 $\mu=17$ 에 대한 성능을 보였다. 먼저 제안 컴펜딩 함수는 CCDF 곡선이 가파른 반면 μ -law 컴펜딩 함수의 기울기가 비교적 완만함을 볼 수 있다. 제안 기법은 최대 PAPR 값에 따라 스케일링 파라미터 β_S 를 쉽게 얻을 수 있으나, μ -law 기법은 모든 μ 값에 대한 PAPR 성능을 도출한 후 요구 성능에 맞는 파라미터 값을 찾아야 하는 단점이 있다.

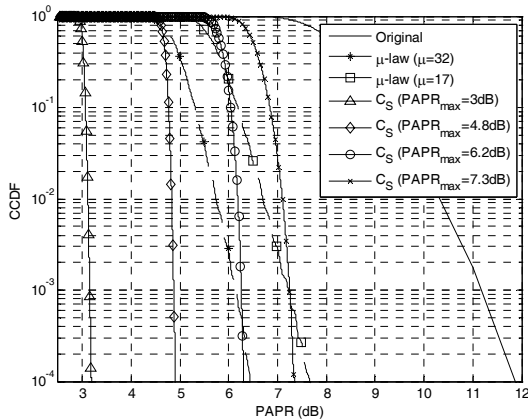


그림 5. μ -law 컴펜딩 기법과 제안하는 기법의 CCDF

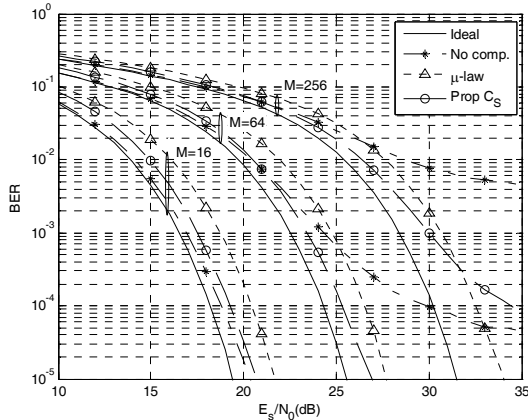


그림 6. $PAPR_{max}=6.2dB$ 에서 OFDM 시스템의 비트오류율

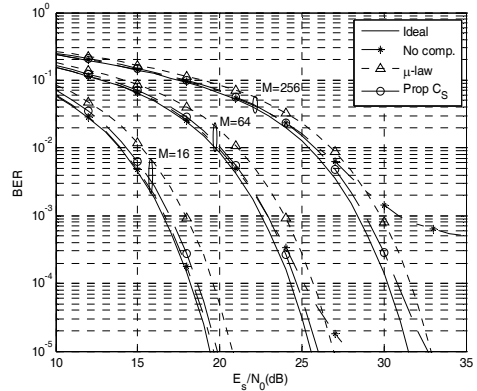


그림 7. $PAPR_{max}=7.3dB$ 에서 OFDM 시스템의 비트오류율

그림 6, 그림 7은 송신단 HPA로 $p=6$ 이고 최대포화 영역 진폭이 $A_{max} = 5\sqrt{P_{in}}$ 인 SSPA를 사용하였을 때 덧셈백색정규잡음 채널에서의 OFDM 시스템의 비트 오류율 성능을 보인 것이다. 변조 방식으로 M-QAM에서 $M=16, 64, 256$ 일 때를 적용하였다. 그림에서 ‘Ideal’은 HPA 왜곡이 없는 이상적인 환경에서의 성능, ‘No Comp’는 컴펜딩 없이 HPA를 통과시켰을 때의 성능, ‘ μ -law’와 ‘Prop C_S ’는 기존 μ -law 기법과 제안하는 스케일러블 컴펜딩 기법을 나타낸다. 그림 6은 HPA 최대 허용 PAPR이 6.2 dB이고 그림 7은 최대 PAPR이 7.3 dB인 경우로, μ -law 기법과 제안 기법은 그림 5에서 보인 해당 PAPR 값을 제공하는 함수를 각각 적용하였다.

그림에서 볼 수 있듯이 16-QAM과 같이 비교적 낮은 신호대잡음비에서 동작하는 변조 방식은 컴펜딩을 하지 않고 HPA에 의해 클리핑 되는 경우가 성능이득이 있으나 64-QAM과 256-QAM 같이 높은 신호대잡음비에서 동작하는 고차 변조 방식에서는 컴펜딩 기법의 성능 향상이 큰 것을 볼 수 있다. 이는 수신단에서 디컴펜딩을 적용할 경우 잡음이 큰 경우 디컴펜딩 오차가 커지나 잡음 세기가 적어지면 디컴펜딩 시 잡음의 영향이 거의 없기 때문이다. 또한, 비슷한 PAPR 성능에 대해서 기존의 μ -law 컴펜딩 기법보다 제안하는 컴펜딩 기법의 성능이 더 우수함을 볼 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 OFDM 시스템의 PAPR 감소 기법으로 비교적 복잡도가 낮은 컴펜딩 기법을 고려하고

다양한 시스템 성능 요구 사항에 맞추어 설계할 수 있는 스케일러블 컴팬딩 함수를 제안하였다. 제안하는 컴팬딩 함수는 PAPR 성능과 비트오류를 성능에 있어서 다양한 절충 값을 제공할 수 있으며, 모의실험 결과 기존의 μ -law 컴팬딩 기법보다 우수한 성능을 제공함을 볼 수 있었다. 또한, 컴팬딩 기법은 신호대 잡음비가 낮은 영역에서 동작하는 저차 변조 방식보다 신호대잡음비가 높은 영역에서 동작하는 고차변조 방식에서 적용하는 것이 바람직함을 볼 수 있다.

참 고 문 헌

[1] S. L. Miller and R. J. O’Dea, “Peak power and bandwidth efficient linear modulation,” *IEEE Trans. Commun.*, Vol.46, pp.1639-1648, Dec. 1998.

[2] T. Jiang and Y. Wu, “An overview: peak-to-average power ratio reduction techniques for OFDM signals,” *IEEE Trans. Broadcast.*, Vol. 54, No.2, pp.257-268, June 2008.

[3] H. Ochiai, H. Imai, “Performance Analysis of Deliberately Clipped OFDM Signals,” *IEEE Trans. Commun.*, Vol.50, No.1, pp.89 - 101, Jan. 2002.

[4] S. K. Deng, M. C. Lin, “Recursive clipping and filtering with bounded distortion for PAPR reduction,” *IEEE Trans. Commun.*, Vol.55, No. 1, pp.227-230, Jan. 2007.

[5] S. J. Heo, H. S. Noh, J. S. No, and D. J. Shin, “A modified SLM scheme with low complexity for PAPR reduction of OFDM systems,” *IEEE Trans. Broadcast.*, Vol.53, No.4, pp.804-808, Dec. 2007.

[6] T. Jiang, W. D. Xiang, P. C. Richardson, J. H. Guo, and G. X. Zhu, “PAPR reduction of OFDM signals using partial transmit sequences with low computational complexity,” *IEEE Trans. Broadcast.*, Vol.53, No.3, pp.719-724, Sept. 2007.

[7] X. Wang, T. T. Tjhung and C. S. 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, Sep. 1999.

[8] T. Jiang, Y. Yang and Y. Song, “Exponential

companding technique for PAPR reduction in OFDM systems,” *IEEE Trans. Broadcast.*, Vol. 51, No.2, pp.244-248, Jun. 2005.

[9] T. Jiang, W. Yao, P. Guo, Y. Song, and D. Qu, “Two novel nonlinear companding schemes with iterative receiver to reduce PAPR in multi-carrier modulation systems,” *IEEE Trans. Broadcast.*, Vol.52. No.2, pp.268-273, Jun. 2006.

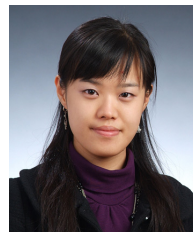
[10] T. G. Pratt, N. Jones, L. Smee, and M. Torrey, “OFDM link performance with companding for PAPR reduction in the presence of nonlinear amplification,” *IEEE Trans. Broadcast.*, Vol.52, No.2, pp.261-267, June 2006.

[11] S. A. Aburakhia, E. F. Badran, and E. Mohamed, “Linear companding transform for the reduction of peak-to-average power ratio of OFDM signals,” *IEEE Trans. Broadcast.*, Vol. 55, No.1, pp.155-160, Mar. 2009.

[12] A. Conti, D. Dardari, and V. Tralli, “On the performance of cdma systems with nonlinear amplifier and awgn,” in Proc. 6th IEEE Int. Symp. Spread Spectrum Techniques and Applications (ISSSTA’00), Vol.1, pp.197-202, Sep. 2000,

이 지 혜 (Ji Hye Lee)

준회원



2009년 2월 경희대학교 전자정보학부 공학사
2009년 3월~현재 경희대학교 전자전파공학과 석사과정
<관심분야> OFDM, 인지 라디오

왕 진 수 (Jin Soo Wang)

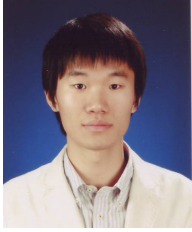
준회원



2009년 2월 경희대학교 전자정보학부 공학사
2009년 3월~현재 경희대학교 전자전파공학과 석사과정
<관심분야> MIMO-OFDM, 부호화 협력, 이동통신

박재철 (Jae Cheol Park)

준회원



2009년 2월 경희대학교 전자공학과 공학사
2009년 3월~현재 경희대학교 전자전파공학과 석사과정
<관심분야> 이동/무선 통신, 통신 이론

김윤희 (Yun Hee Kim)

중신회원



1995년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학사
1997년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학석사
2000년 1월~2000년 4월 UCSD 방문 연구원
2000년 8월 한국과학기술원 전자전산학과 박사
2000년 9월~2004년 8월 한국전자통신연구원 선임 연구원
2004년 9월~현재 경희대학교 전자정보학부 조교수, 부교수
2006년 1월~현재 IEEE 준석학회원, 한국통신학회 논문지 편집위원
<관심분야> 이동/무선 통신, 통신이론, 통계학적 신호처리, 부호이론