

OFDM 신호의 효율적인 PAPR 감소를 위한 적응적 Companding 기법

정희원 김재운*, 종신회원 신요안*^o

An Adaptive Companding Scheme for Effective PAPR Reduction of OFDM Signals

Jaewoon Kim* *Regular Member*, Yoan Shin*^o *Lifelong Member*

요 약

본 논문에서는 시스템의 복잡도와 비트오율 (Bit Error Rate; BER) 성능을 모두 고려하여 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 신호의 PAPR (Peak-to-Average Power Ratio)을 효과적으로 감소시키기 위한 적응적 Companding 기법을 제안한다. 제안된 기법은 OFDM 시스템의 변조 레벨에 따라 BER 성능과 PAPR 감소를 모두 고려하기 위해 송신단의 Compression과 수신단의 Expanding 함수를 적응적으로 변화시킨다. 또한 본 논문에서는 제안된 기법에 대한 스펙트럼 특성을 분석하고, 대역외 스펙트럼 전력을 감소시키기 위한 필터링 방안을 도입하여 적용한 후의 BER 성능을 확인하였다. 일반적인 Companding 알고리즘과 비교한 모의실험 결과, 제안된 기법은 PAPR 감소 측면에서도 효과적일 뿐만 아니라 스펙트럼 전력 측면에서도 좋은 특성을 보이면서도, 필터링 사용 유무에 관계없이 BER 성능도 매우 우수함을 확인할 수 있었다.

Key Words : OFDM, PAPR, Companding, HPA, Filtering

ABSTRACT

In this paper, we propose an adaptive companding scheme to effectively reduce PAPR (Peak-to-Average Power Ratio) of the OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) signals, while considering both complexity and BER (Bit Error Rate) performance of systems. The proposed scheme adaptively alters the compression function in the transmitter and the expanding function in the receiver to simultaneously take into account the BER performance and the PAPR reduction. In this paper, we also measure in-band and out-of-band spectra of the proposed scheme, and observe the BER performance after applying the filtering to reduce the out-of-band radiation. As compared to the conventional companding algorithm, simulation results reveal that the proposed scheme achieves more reliable BER performance in all the cases of with and without the filtering, and has a good spectrum characteristic with effective PAPR reduction.

1. 서 론

최근 들어 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 시스템은 무선랜, 휴대인터넷

넷, 차세대 이동통신 등의 고속 멀티미디어 무선 네트워크와 더불어 디지털 라디오, TV 방송에 이르기까지 폭넓은 분야에서 독보적인 무선 전송 방식으로 각광받고 있다^{1,2)}. OFDM 시스템은 변조 신호들

* 본 논문은 서울시 산학연 협력사업 (No. 10544)의 지원으로 이루어짐.

^o 숭실대학교 정보통신전자공학부 통신 및 정보처리 연구실(ecko99@amcs.ssu.ac.kr, yashin@ssu.ac.kr) (^o : 교신저자)
논문번호: KICS2009-08-362, 접수일자: 2009년 8월 18일, 최종논문접수일자: 2009년 11월 10일

을 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)}.

OFDM 신호의 PAPR을 감소시키기 위해, 가장 간단한 Clipping 기법을 비롯하여 Companding 기법, SLM (SeLective Mapping), PTS (Partial Transmit Sequence) 등의 다양한 PAPR 감소 기법이 제시되었다³⁾. Clipping 기법은 구조가 간단하고 PAPR을 감소시키는 측면에서는 효과적이지만, 전송 신호 가운데 일정 레벨 이상의 크기를 갖는 피크 신호를 잘라낸 후 전송하게 되므로 신호의 왜곡이 심해져서 시스템의 비트오율 (Bit Error Rate; BER) 성능이 상당히 열화된다. 한편, SLM과 PTS 기법은 각각 고유의 원리가 존재하지만 기본적인 접근은 위상 변화를 주어 IFFT (Inverse Fast Fourier Transform) 취함으로써 통계적으로 독립적인 다수의 시간 영역 시퀀스들을 생성하고 이 중에서 가장 낮은 PAPR을 갖는 시퀀스를 선택하여 전송하는 방식이다. 따라서 SLM과 PTS 기법은 신호에 위상 변화만 있으므로 시스템의 BER 성능이 열화되지는 않지만, 선택된 위상 패턴 즉, 부가 정보를 수신기로 추가적으로 전송해야 하고 다양한 위상 조합들을 모두 IFFT 연산 처리를 해야 되므로 송신단의 연산량이 기하급수적으로 증가하는 단점이 존재한다. 이에 반해, Companding 기법은 일정 정도 자의적인 신호 왜곡에 따라 BER 성능이 열화

되지만 Clipping 방식에 비해 PAPR 감소와 BER 성능 측면에서 훨씬 효과적인 것으로 알려져 있다. 더불어, SLM과 PTS 기법 등과는 달리 어느 정도 BER 성능 열화가 있지만 상당한 계산량 증가 또는 부가 정보를 수신기로 전송해야 되는 부담이 없다. 특히 OFDM 시스템에서 PAPR을 감소시키고자 하는 최종 목표는, HPA의 비선형 특성으로 인해 발생하는 OFDM 신호의 왜곡을 최소화하는 것에 있다. 하지만, 전송 신호는 HPA의 비선형 특성으로 인해 발생하는 예측 어려운 신호 왜곡에 의해 수신단에서 해석할 수 없는 형태로 수신되게 되므로 큰 BER 성능 열화를 유발한다. 이를 극복하기 위해 Companding 기법은 송신단의 HPA 이전에 의도적으로 신호를 Compression 시켜 PAPR을 감소시키게 되므로 HPA로 인해 발생하는 예측 어려운 신호 왜곡을 줄일 수 있게 되어, 결국 실제 증폭기를 포함하는 전체 OFDM 시스템에서 BER 성능 열화를 최소화시킬 수 있게 된다^{3,4,5)}.

이에 본 논문에서는 시스템의 복잡도와 BER 성능을 모두 고려하여 OFDM 신호의 PAPR을 효과적으로 감소시키기 위한 적응적 Companding 기법을 제안한다. 기본적으로 제안된 기법은 앞서 본 저자들에 의해 제안된 송신 신호의 분포를 균일하게 할 수 있는 Companding 기법 (이하 “Uniform Companding”)⁴⁾을 기반으로 구성된다. 하지만 기존의 Uniform Companding 기법과는 달리, 제안된 기법은 시스템의 변조 레벨에 따라 BER 성능과 PAPR 감소를 모두 고려하기 위해 송신단의 Compression과 수신단의 Expanding 함수를 적응적으로 변화시킨다. 모의실험 결과, 제안된 기법은 Wang에 의해 제안된 Companding 기법 (이하 “Wang Companding”)⁵⁾에 비해 대역내 (In-band) 신호 왜곡에 강인한 BER 성능을 나타내고 PAPR 감소 측면에서도 매우 효과적임을 확인할 수 있다. 더욱이, 제안된 기법은 앞서 본 저자들에 의해 제안된 Uniform Companding과는 달리 높은 변조 레벨에서도 대역내 신호 왜곡에 강인한 신뢰성이 높은 BER 성능을 제공함을 확인할 수 있다.

한편 일반적으로 Companding 알고리즘을 사용하는 OFDM 시스템에서는 PAPR을 효과적으로 감소시킬 수 있는 반면, 대역외 (Out-of-band) 스펙트럼 전력이 상승하여 인접 대역의 다른 시스템에게 간섭을 주게 되는 현상을 발생시킨다. 이에, 본 논문에서는 제안된 적응적 Companding 기법에 대한 대역내 및 대역외 스펙트럼 특성을 분석하고, 대역외

스펙트럼 전력을 감소시키기 위한 필터링 (Filtering) 방안을 도입하여 적용한 후의 BER 성능을 확인한다. Wang Companding과 비교한 모의실험 결과, 제안된 기법은 PAPR 측면에서 효과적으로 감소시킬 수 있었으며, 필터링 후의 BER 측면에서도 대역내 및 대역외 신호 왜곡에 강인한 성능을 제공할 수 있음을 확인할 수 있었다. 더욱이, 제안된 기법은 대역내 및 대역외 스펙트럼 분석 결과 Wang Companding에 비해 인접 대역외의 간섭량이 작게 나타남을 확인할 수 있었다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 OFDM 전송 신호 및 PAPR에 대해 정의하고, 3장에서는 제안된 적응적 Companding 기법을 제시한다. 4장에서는 Wang Companding 기법과 비교하여 제안된 기법에 대한 PAPR 감소와 필터링 전후의 BER 성능을 모의실험을 통해 분석한다. 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

II. OFDM 전송 신호의 PAPR

OFDM 시스템에서는 전체 전송 대역을 다수의 협대역 부채널로 분할하여 데이터 변조된 심벌들을 여러 개의 직교 부반송파를 이용하여 전송한다. 이러한 OFDM 시스템의 송신단에서는 먼저 입력 데이터 비트들이 PSK (Phase Shift Keying) 또는 QAM (Quadrature Amplitude Modulation) 부호기에 의해 L 비트 단위로 묶여 심벌 간격이 T_s (sec) 인 N 개 변조 심벌 X_ℓ ($\ell=0, \dots, N-1$)로 변환된다. 여기서 M 진 변조 방식을 고려할 경우 $L = M \log_2 M$ 이다. 이러한 N 개 변조 심벌들은 주파수 간격이 $\Delta f \equiv 1/NT_s$ (Hz)인 N 개 직교 부반송파에 의해 변조된 후, 직병렬 변환기를 통해 직렬 신호로 변환되어 HPA의 입력이 된다. 따라서, N 개 변조 심벌 길이인 NT_s (sec) 동안 OFDM 변조된 기저대역 신호 $x(t)$ 는 적절한 크기 변환을 거쳐 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$x(t) = \frac{1}{N} \sum_{\ell=0}^{N-1} X_\ell e^{j2\pi f_\ell t / NT_s} \quad (0 \leq t < NT_s) \quad (1)$$

위 식에서 X_ℓ 은 ℓ 번째 변조 심벌이며, f_ℓ 은 X_ℓ 을 전송하기 위한 ℓ 번째 부반송파 주파수 성분으로서 $f_\ell \equiv \ell \Delta f = \ell / NT_s$ (Hz)이다. 한편, $x(t)$ 를 변조 심벌 간격인 T_s 단위로 매 $t = nT_s$ ($n=0, \dots,$

$N-1$)마다 표본화한 이산 시간 시스템에서 기저대역 전송 신호는 다음 식과 같이 표현될 수 있다.

$$x_n \equiv x(nT_s) = \frac{1}{N} \sum_{\ell=0}^{N-1} X_\ell e^{j2\pi f_\ell n / N} \quad (n=0, \dots, N-1) \quad (2)$$

여기서 식 (2)는 N 개 변조 심벌 X_ℓ 에 대한 IDFT (Inverse Discrete Fourier Transform) 후에 병렬-직렬 변환한 것과 동일함을 알 수 있고, 따라서 N -point IFFT를 이용하여 디지털 방식을 통해 효과적으로 구현될 수 있다. 또한 OFDM 시스템의 수신단에서는 송신단의 이러한 과정에 대한 역과정을 수행하게 되며, 특히 부반송파 복조는 N -point FFT로 수행된다.

변조 심벌 X_ℓ 이 통계적으로 서로 독립일 경우 전송 신호 $x(t)$ 의 진폭은 N 이 커질수록 (복소) 가우시안 분포를 만족하게 되어 매우 큰 값을 가질 수 있는 가능성이 존재하게 된다. 일반적으로 이러한 연속 시간 OFDM 전송 신호에 대해 PAPR은 한 OFDM 심벌에서 전송 신호의 최대 순시 전력과 평균 전력의 비율로서 다음과 같이 정의된다^[3].

$$PAPR \equiv \frac{\max_{0 \leq t < NT_s} |x(t)|^2}{\frac{1}{NT_s} \int_0^{NT_s} |x(t)|^2 dt} \quad (3)$$

한편 식 (2)와 같은 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. 실제로 식 (2)에서는 이산 시간 신호 x_n 을 생성하기 위해 변조 심벌 간격인 T_s (sec) 단위로 표본화를 수행하게 되므로 이러한 문제가 발생할 가능성이 크다. 따라서 가급적 정확한 피크값을 표본화하기 위해 연속시간 신호 $x(t)$ 를 T_s (sec)가 아닌 T_s/Q (sec) 단위로 Q 배 과표본화 (Oversampling)하게 되는데, 이렇게 과표본화된 시간 영역 신호 샘플들은 길이 N 의 원래 데이터 심벌 블록에 $(Q-1)$ 개 0을 삽입 (Zero-Padding)한 후 QN -point IDFT 연산을 적용하여 등가적으로 구할 수 있다^[3]. 대부분의 경우 $Q=4$ 정도면 충분히 원래 연속시간 신호에서의 실제 피크값들을 표본화할 수 있다고 알려져 있으며^[3], 본 논문에서도 이러

한 4배의 과표본화 과정을 적용하였다.

III. 제안된 적응적 Companding 기법

그림 1에서는 부가성 백색 가우시안 잡음 (Additive White Gaussian Noise; AWGN) 채널에서 Companding 기법을 사용하는 OFDM 시스템의 구조를 도시하고 있다. 본 논문에서는 실수 전송 신호를 갖는 OFDM 시스템을 고려하며, 이러한 방식의 OFDM 시스템에서 IFFT 블록의 출력값이 실수가 되기 위해서는 아래의 식 (4)과 (5)를 만족하여야 한다⁶⁾.

$$X_{N-k} \equiv X_k^* \quad (k=1, \dots, N/2-1) \quad (4)$$

$$X_0 = X_{N/2} = 0 \quad (5)$$

본 논문에서 제안된 적응적 Companding 기법은 기본적으로 [4]에서 본 저자들에게 의해 제안된 Uniform Companding을 기반으로 한다. 이 기법에 대해 세부적으로 살펴보면 다음과 같다. Compression 함수 $C(\cdot)$ 의 입력 및 출력을 랜덤변수 X , Y 라고 하면, 각 랜덤변수의 누적분포함수 (Cumulative Distribution Function; CDF)는 $F_X(x)$, $F_Y(y)$ 로 나타낼 수 있다. 이 때 랜덤변수 Y 는 $[-K, K]$ 구간에서 균일 분포 (Uniform Distribution)를 갖도록 하기 때문에 CDF는 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$F_Y(y) = \begin{cases} 0, & y < -K \\ \frac{1}{2K}y + \frac{1}{2}, & -K \leq y < K \\ 1, & y > K \end{cases} \quad (6)$$

랜덤변수의 변환 관계⁷⁾에 의해, 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$y = C(x) = F_Y^{-1}F_X(x) \quad (7)$$

OFDM 전송 신호를 나타내는 랜덤변수 X 는 평균이 0이고 분산 (또는 평균 전력)이 σ^2 인 가우시안 분포로 가정하기 때문에 랜덤변수 X 의 CDF는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$F_X(x) = 1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{2}\sigma}\right) \quad (8)$$

여기서 $\operatorname{erfc}(z) \equiv \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_z^\infty e^{-t^2} dt$ 이다. 결국 식 (6)~(8)을 통해 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$y = C(x) = K \left\{ 1 - \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{2}\sigma}\right) \right\} \quad (9)$$

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

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

이 기법을 사용한 시스템의 PAPR 값은 K 와 무관하며, OFDM 시스템의 전체 부반송파수나 변조 방식과 상관없이 일정하고, $K = \sqrt{3}\sigma$ 일 경우

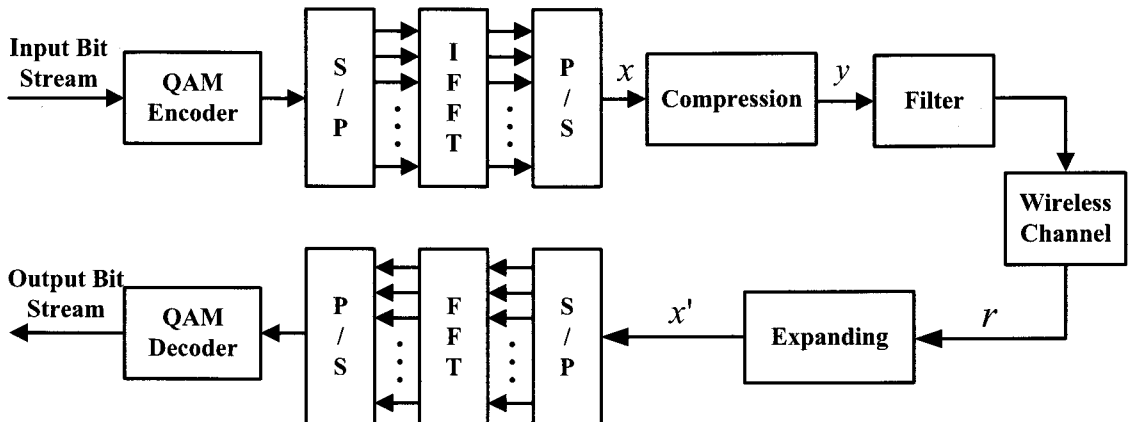


그림 1. Companding 알고리즘과 필터를 사용하는 OFDM 시스템의 송수신 구조
Fig. 1. The transceiver structure of OFDM systems employing a companding algorithm and a filter

Compression을 수행한 뒤에도 평균 전력이 원래의 신호와 동일하게 유지된다[4].

채널 잡음이 없는 이상적인 환경에서 수신단의 Expanding 함수 $E(\cdot)$ 는 $C(\cdot)$ 의 역함수로 구할 수 있으며, 이를 통해 원래의 OFDM 전송 신호가 완벽하게 복원된다. 하지만 과도한 채널 잡음에 의해 발생할 수 있는 계산상의 문제를 막기 위해, 이 Companding에서는 Expanding 함수 입력값의 크기를 $S \cdot K$ 로 제한하였다. 단, 여기서 $S < 1$ 이며 $S \approx 1$ 이다. 결국 Expanding 함수의 출력 x' 는 다음과 같다.

$$x' = \begin{cases} \sqrt{2} \sigma \text{erfc}^{-1} \left(1 - \frac{r}{K} \right), & |r| < S \cdot K \\ \sqrt{2} \sigma \text{erfc}^{-1} (1 - S \cdot \text{sgn}(r)), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

따라서, 이 Uniform Companding은 사용되는 OFDM 시스템의 부반송파수와 변조 방식에 관계없이 전송 신호의 크기를 균일 분포로 변환하여 식 (10)과 같이 효과적으로 PAPR을 감소시킬 수 있게 된다. 반면 Uniform Companding은 변조 방식에 관계없이 송신 신호 크기의 분포를 균일하게 Compression시키므로, 변조 레벨이 높아질수록 시스템의 BER 성능은 더욱 열화된다. 이에 본 논문에서는 기본적으로는 Uniform Companding을 기반으로 하지만, 변조 방식에 따라 송신단의 Compression 함수와 수신단의 Expanding 함수를 적응적으로 변화시킬 수 있는 적응적 Companding 기법을 제안한다. 제안된 적응적 Companding 기법은 기존의 Uniform Companding의 Compression 및 Expanding 함수를 나타내는 식 (9)와 (11)을 다음과 같이 변형한다.

$$y_n = C_n(x) = K \left\{ 1 - \text{erfc} \left(\frac{x}{\sqrt{2 + \Omega}} \right) \right\} \quad (12)$$

$$x'_n = \begin{cases} \sqrt{2 + \Omega} \sigma \text{erfc}^{-1} \left(1 - \frac{r}{K} \right), & |r| < S \cdot K \\ \sqrt{2 + \Omega} \sigma \text{erfc}^{-1} (1 - S \cdot \text{sgn}(r)), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (13)$$

여기서 Ω 는 변조 방식에 따라 Compression 함수와 Expanding 함수를 적응적으로 조절하기 위한 적응 Companding 가중치를 나타낸다. 한편 $\Omega = 0$ 일 경우 식 (12)와 (13)은 Uniform Companding과 같게 된다. 그림 2에서는 16-QAM을 사용하는 OFDM 시스템에서 제안된 기법의 Compression 알

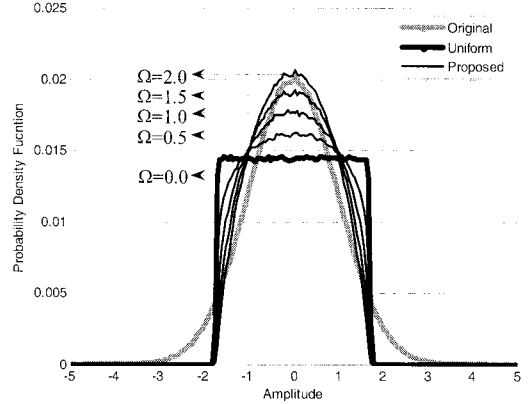


그림 2. 제안된 기법의 Compression 함수에 의한 입력 및 출력 신호의 PDF

Fig. 2. The PDFs of input and output signals by the compression function of the proposed scheme

고리즘에 의한 입력 및 출력 신호 분포 특성을 확률밀도함수 (Probability Density Function; PDF)로 도시하고 있다.

여기서 표기된 “Original”과 “Uniform”은 어떠한 Companding 기법도 사용되지 않은 본래의 OFDM 신호와 기존에 본 저자들에 의해 제안된 Uniform Companding^[4]이 사용된 OFDM 신호를 나타내고, “Proposed”는 본 논문에서 제안된 기법이 사용된 OFDM 신호를 의미한다. 그림에서 알 수 있듯이 제안된 기법은 Compression 함수와 Expanding 함수를 변조 방식에 따라 적응적인 조절이 가능하므로, 각각의 변조 방식에서 최적인 BER 성능과 PAPR 감소 모두를 제공할 수 있을 것으로 기대할 수 있다. 한편 Jiang과 Zhu에 의해 소개된 또 다른 Companding 기법^[8]과 비교해보면, 제안된 기법은 Companding 알고리즘의 특성상 나타나는 유사한 접근 방식을 보유하고 있기는 하지만 Compression 함수에서의 파라미터 조절 방법과 Expanding 함수의 형태가 다르다.

IV. 모의실험 결과

본 논문에서는 일반적인 Uniform Companding^[4] 및 Wang Companding^[5]과 제안된 적응적 Companding 기법을 PAPR 감소와 필터링 전의 BER 성능 측면에서 모의실험을 통해 비교 분석하였다. 이를 위해, 우선 본 논문에서는 AWGN 채널 환경에서 식 (4)와 (5)를 만족하여 실수 전송 신호를 갖는 OFDM 시스템을 고려하였다. 이 OFDM 시스템의 전체 부

반송파의 수 N 은 256으로 고정하였으며, 변조 방식은 QPSK, 16-QAM, 64-QAM을 사용하였다. 또한 제안된 기법과 Uniform Companding을 위한 S 와 K 는 각각 0.975, $\sqrt{3}\sigma$ 로 설정하였다. 그리고 제안된 기법의 적응 Companding 가중치 Ω 는 -0.5에서 2.0까지 0.5 간격으로 다양하게 적용하였고, Wang Companding의 가중치 μ 는 최적의 값인 $\sqrt{N-2}$ 으로 적용하였다^[5]. 마지막으로 본 논문의 모의실험에서는 4배의 과표본화를 고려하였다.

그림 3과 4에서는 각각 일반적인 Uniform Companding (“Uniform”) 및 Wang Companding (“Wang”)과 제안된 기법 (“Proposed”)에 대한 필터링 전의 PAPR 감소와 BER 성능을 도시하고 있다. 여기서 표기된 “Original”은 어떠한 PAPR 감소 기법도 사용되지 않은 본래의 OFDM 시스템을 의미한다. 그림 3과 4를 통해 알 수 있듯이, 제안된 기법은 Ω 가 2.0일 경우를 제외하고 Wang Companding에 비해 PAPR 감소 성능이 우수하다고 할 수 있다. 더욱이 제안된 기법은 모든 변조 방식에서 적정 Ω 값을 설정할 경우 Wang Companding에 비해 우수한 BER 성능을 제공하고 있음을 확인할 수 있다. 즉, 제안된 기법은 필터를 사용하지 않은 경우 (대역내 신호 왜곡만을 고려한 경우)에도 PAPR 감소 대비 BER 성능 열화가 Wang Companding에 비해 상당히 적음을 알 수 있다. 이와 더불어, 제안된 기법은 Ω 값을 변조 방식에 따라 적절히 조절할 경우 Uniform Companding에 비해 PAPR 감소 성능이 약간 열화되지만 상당히 우수한 BER 성능을 나타내고, 특히 높은 변조 레벨에서 매우 신뢰성

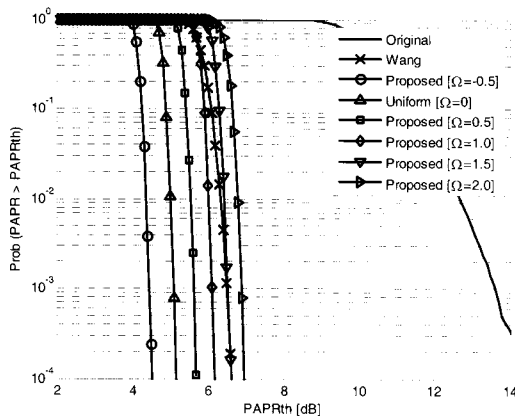
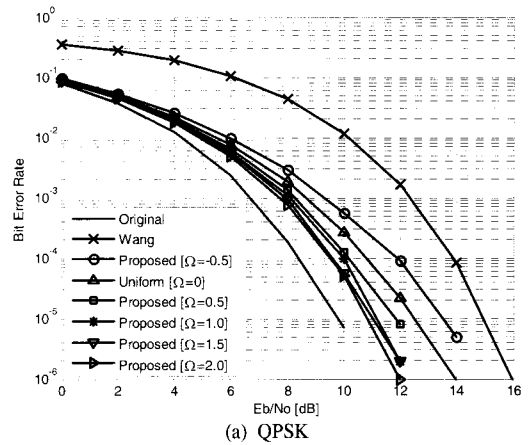
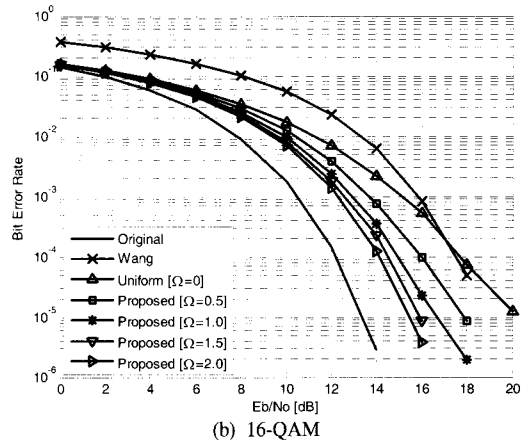


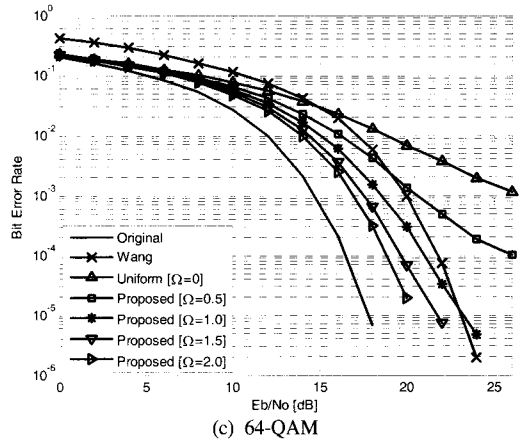
그림 3. Uniform Companding 및 Wang Companding과 제안된 적응적 Companding 기법의 PAPR 감소 성능 비교
Fig. 3. Comparison of PAPR reduction performance among uniform companding, Wang's companding and the proposed adaptive companding schemes



(a) QPSK



(b) 16-QAM



(c) 64-QAM

그림 4. Uniform Companding 및 Wang Companding과 제안된 적응적 Companding 기법이 적용된 OFDM 시스템의 필터링 전 BER 성능 비교

Fig. 4. The BER comparison of OFDM systems before filtering, when applying uniform companding, Wang's companding and the proposed adaptive companding schemes

이 높은 BER 성능을 제공하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 본 논문에서는 Wang Companding과 제안된 적응적 Companding 기법에 대한 필터링 후

BER 성능을 분석하였다. 이를 위해, 대부분의 OFDM 시스템 파라미터는 위에서 설명한 필터링 전 모의실험과 같다. 다만 제안된 기법과 Wang Companding의 필터링 후 BER 성능을 공정히 비교하기 위해, 이들 기법이 동일한 PAPR 감소 성능을 나타낼 수 있는 Ω 와 μ 값으로 설정하였다. 즉, 모의실험에서 제안된 기법의 적응 Companding 가중치 Ω 는 0, 1, 2, 3으로 다양하게 적용하였고, Wang Companding의 가중치 μ 는 16, 32, 64, 128로 설정하였다. 또한, 대역의 스펙트럼 전력을 감소시키기 위한 필터로는 103 탭의 Parks-McClellan Optimal Equiripple FIR (Finite Impulse Response) 필터^[9]를 사용하였다.

그림 5와 6에서는 각각 Wang Companding과 제안된 기법에 대한 PAPR 감소와 필터링 후 BER 성능을 도시하고 있다. 우선 본 논문에서는 동일한 조건에서 BER 성능을 비교하기 위해 제안된 기법과 Wang Companding이 동일한 PAPR 감소 성능을 나타낼 수 있는 가중치 값들로 설정하였음을 그림 5으로부터 확인할 수 있다. 결국 동일한 필터를 사용하면서 같은 PAPR 감소 성능을 나타낼 수 있는 파라미터로 고정한 경우, Wang Companding과 제안된 기법의 BER 성능은 그림 6에서 도시하고 있다. 그림에서 확인할 수 있듯이, 제안된 기법은 동일한 PAPR 감소를 제공하면서 인접 대역의 시스템에 간섭 영향을 고려하여 대역의 스펙트럼 전력을 감소시킬 수 있는 필터를 사용한 OFDM 시스템에서 Wang Companding에 비해 매우 우수한 BER 성능을 보장할 수 있음을 확인할 수 있다. 결국 앞

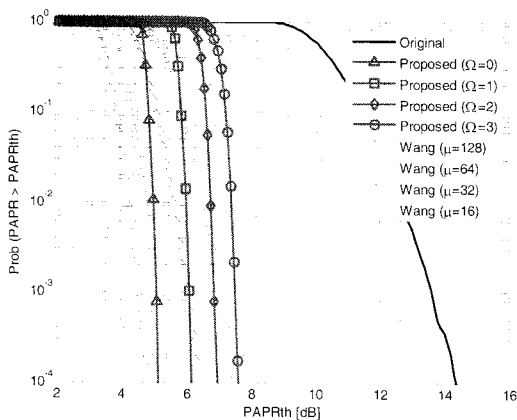
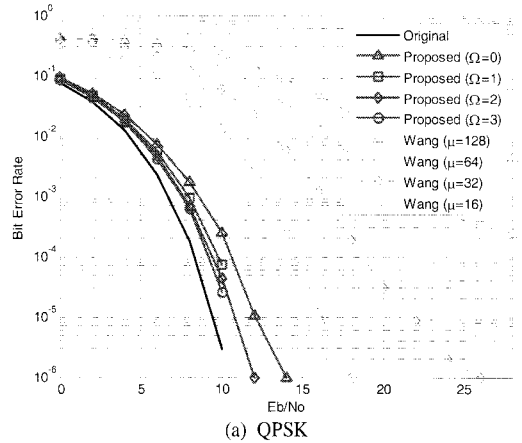
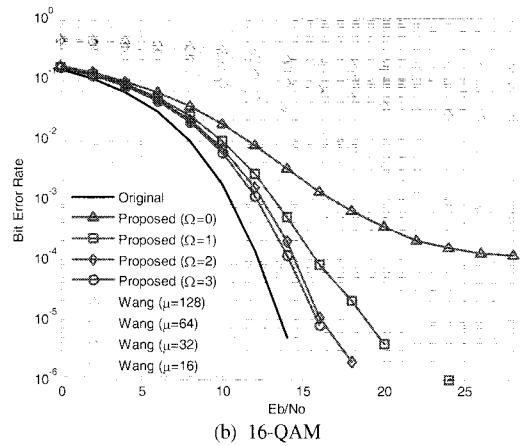


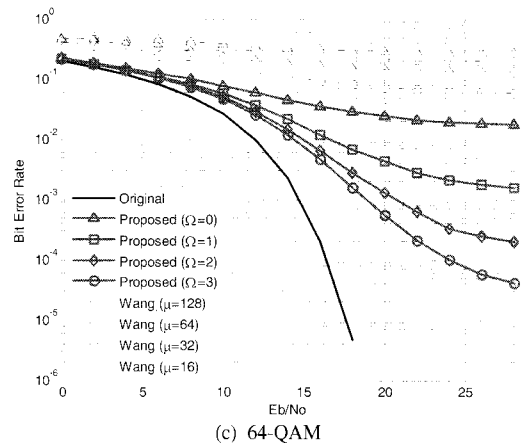
그림 5. 파라미터 설정에 따른 Wang Companding과 제안된 적응적 Companding 기법의 동일한 PAPR 감소 성능 검증 Fig. 5. Verification of the same PAPR reduction performance by Wang's companding and the proposed adaptive companding schemes according to parameter set



(a) QPSK



(b) 16-QAM



(c) 64-QAM

그림 6. Wang Companding과 제안된 적응적 Companding 기법이 적용된 OFDM 시스템의 필터링 후 BER 성능 비교 Fig. 6. The BER comparison of OFDM systems after filtering, when applying Wang's companding and the proposed companding schemes

서 필터링 전 BER 성능 결과와 비교하자면, 이 모의실험 결과는 필터를 사용한 경우, 즉 대역의 신호 왜곡까지도 고려한 경우 제안된 기법의 PAPR 감소

대비 BER 성능이 Wang Companding에 비해 더욱 우수하다는 것을 의미한다.

한편, 그림 7에서는 Wang Companding과 제안된 기법에 대한 필터링 전후의 Single-Sided PSD (Power Spectral Density)를 도시하고 있다. 여기서 사용된 제안된 기법의 적응 Companding 가중치 ($\Omega=3$)와 Wang Companding의 가중치 ($\mu=16$)는 그림 5로부터 확인할 수 있듯이 동일한 PAPR 감소 성능을 나타낼 수 있는 파라미터이다. 그림 7로부터 알 수 있듯이, 대역내 PSD 측면에서 Wang Companding과는 달리 제안된 기법은 전력 상승이 없을 뿐만 아니라 인접 대역 시스템에 간섭 영향을 줄 수 있는 대역의 PSD 측면에서도 필터링 사용 전후 모두에서 매우 낮음을 확인할 수 있다. 따라서 제안된 기법은 스펙트럼 측면에서도 Wang Companding에 비해 매우 우수한 특성을 보유하고 있음을 확인할 수 있다.

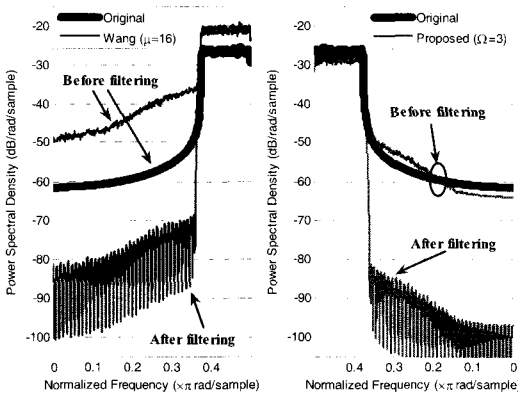


그림 7. Wang Companding과 제안된 적응적 Companding 기법의 Single-Sided PSD 비교
Fig. 7. Comparison of single-side PSDs for Wang's companding and the proposed adaptive companding schemes

V. 결론

본 논문에서는 변조 방식에 따라 OFDM 전송 신호의 분포를 적응적으로 조절할 수 있는 적응적 Companding 기법을 제안하였다. 기본적으로 제안된 적응적 Companding 기법은 앞서 본 저자들에 의해⁴에서 제안된 Uniform Companding을 사용한다. 하지만 다양한 변조 방식에 대해 시스템의 BER 성능과 PAPR 감소 성능 모두를 고려하기 위해, 제안된 기법은 Uniform Companding의 Compression 및 Expanding 함수를 적응적으로 조절한다. 모의실험 결과, 제안된 기법은 일반적인 Wang Companding

에 비해 상당히 우수한 PAPR 감소와 BER 성능을 나타냈다. 더욱이 기존의 Uniform Companding과는 달리, 제안된 기법은 높은 변조 레벨에서도 신뢰성 높은 BER 성능을 제공할 수 있다. 한편, 본 논문에서는 제안된 기법에 대한 대역내 및 대역외 스펙트럼 특성을 제시하였고 대역외 스펙트럼을 필터링하는 방안을 소개하였다. 모의실험 결과, 제안된 기법은 Wang Companding에 비해 스펙트럼 측면에서도 우수한 특성을 보유하고, 인접 대역의 시스템에 간섭 영향을 고려하여 필터를 사용하면서 동일한 PAPR 감소 성능을 나타낼 수 있는 파라미터로 고정한 경우에서 매우 우수한 BER 성능을 제공할 수 있음을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] L. Hanzo, M. Munster, B. J. Choi, and T. Keller, *OFDM and MC-CDMA for Broadband Multi-user Communications, WLANs and Broadcasting*, John Wiley & Sons, 2003.
- [2] P. van Nee and R. Prasad, *OFDM for Wireless Multimedia Communications*, Artech House Publishers, 2000.
- [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] 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.
- [5] 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. on Broadcasting*, vol. 45, no. 3, pp. 303-307, Sept. 1999.
- [6] A. Ruiz, J. M. Cioffi, and S. Kasturia, "Discrete multiple tone modulation with coset coding for the spectrally shaped channel," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 40, no. 6, pp. 1012-1029, June 1992.
- [7] P. Z. Peebles, Jr., *Probability, Random Variables, and Random Signal Principles*, Ch. 3, 4th Ed., McGraw-Hill, 2001.

- [8] T. Jiang and G. Zhu, "Nonlinear companding transform for reducing peak-to-average power ratio of OFDM signals," *IEEE Trans. Broadcasting*, vol. 50, no. 3, pp. 342-246, Sept. 2004.
- [9] T. W. Parks and C. S. Burrus, *Digital Filter Design*, Ch. 3, John Wiley & Sons, 1987.

김 재 운 (Jaewoon Kim)

정회원

한국통신학회논문지 Vol. 34, No. 1 참조

신 요 안 (Yoan Shin)

중신회원

한국통신학회논문지 Vol. 34, No. 1 참조