
Clipping 구조를 개선한 OFDM 전송시스템의 PAPR 감소에 관한 연구

김완태* · 조성준*

A Study on Reducing PAPR of OFDM Transmit System by Clipping Structural Improvement

Wan-tae Kim* · Sung-joon Cho*

본 논문은 산업자원부 한국산업기술평가원 지정 한국항공대학교 부설 인터넷정보검색연구센터의 지원에 의함.

요 약

현재의 통신 시스템은 멀티미디어 서비스를 제공하기 위하여 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 방식이 주로 쓰이고 있다. 그러나 OFDM 방식은 다수의 부반송파를 사용하므로 부반송파들이 동일위상으로 더해질 때 높아지는 PAPR(Peak-to-Average Power Ratio) 이 문제가 되고 있다. PAPR 의 문제는 신호가 전력증폭기와 같은 비선형 소자를 통과할 때 심각한 왜곡을 받게 되므로 전송시스템 성능이 저하된다. 본 논문에서는 PAPR 문제를 해결하기 위해 IF-Clipping 기법을 제안하고, 신호의 clipping에 의해 발생하는 신호의 왜곡을 SAW(Surface Acoustic Wave) 필터와 전력증폭기를 사용하여 제한하였다. 또한 clipping 기법 이용 후 SAW Filter와 전력증폭기를 사용하여 WiBro 시스템의 Spectrum Mask를 만족하는 이상적인 파라미터 값(PAPR, Backoff)을 찾았다.

ABSTRACT

Recently many communication systems are adapting the OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) for multimedia data services. However, OFDM has some problems that PAPR is increased when sub-carriers are summed up with same phases. This problem causes severe signal distortions while the signal is passing through non-linear system such as power amplifier resulting in performance degradation of transmission system. In this paper, we use IF-Clipping method to solve PAPR problem and the signal distortion caused by clipping is limited by use of SAW (Surface Acoustic Wave) filter and power amplifier(TWTA). And we derive the optimal parameter(PAPR, Backoff) values to meet the spectrum mask of WiBro system.

키워드

OFDM, Clipping, PAPR, SAW Filter, TWTA.

I. 서 론

OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 방식은 단위 시간당 많은 량의 정보를 전송 할 수 있는

장점을 가지고 있다. 따라서 멀티미디어 서비스를 지원하는 시스템에 주로 응용되고 있다. 그 중 WLAN(Wireless Local Area Network) 과 WMAN(Wireless Metropolitan Area Network) 그리고 WiBro(Wireless Broadband) 시스

템이 대표적이라 할 수 있다[1]. 시간영역에서의 OFDM 신호는 독립적으로 변조된 많은 부반송파로 구성되므로 이들이 동 위상으로 더해질 때 신호의 중첩에 의해 PAPR(Peak-to-Average Power Ratio)이 높아진다. PAPR이 높아지면 A/DC(Analog to Digital Converter)와 D/AC(Digital to Analog Converter)의 복잡도가 증가하고 RF 전력증폭기의 효율이 감소하는 단점이 발생되게 된다. 따라서 이러한 PAPR을 감소시키기 위해 여러 가지 기법들이 제안되었다[2]. 제안된 기법들 가운데 가장 간단하기 PAPR 문제를 해결할 수 있는 것은 신호의 일정크기 이상을 band band에서 제거하는 clipping 기법이다[3][4].

Clipping 기법은 원 신호를 왜곡시키는 기법으로 일종의 자기 간섭이 발생하여 BER(Bit Error Rate)이 저하된다. 또한 clipping은 비선형 왜곡에 해당하므로 스펙트럼 사이의 In-Band 왜곡과 Out-of-Band 방출 현상이 심각하게 나타난다. 두 가지 왜곡 중 Out-of-Band 스펙트럼의 성질은 주로 주변 스펙트럼 사이의 간섭을 초래하여 인접 스펙트럼에 영향을 미친다[5].

본 논문에서는 IF band에서의 clipping 기법을 제안하고 제안하는 clipping 기법을 이용하여 PAPR을 감소시킨 후 SAW Filter를 이용하여 clipping으로 인해 발생하는 Out-of-Band 스펙트럼 문제를 해결한다. 그리고 전력증폭기를 이용하여 WiBro 서비스 지원을 위한 표준화 문서[1]에서 제안하고 있는 Spectrum Mask를 만족하는 시스템 파라미터 값을 구한다.

II. Clipping 기법 제안

2.1 OFDM SYSTEM

그림 1은 OFDM 방식을 이용하는 WiBro 시스템의 기본 블록도이다. OFDM 변조를 위해 QPSK mapping을 거쳐 입력된 데이터는 다수의 부반송파로 변조하기 위

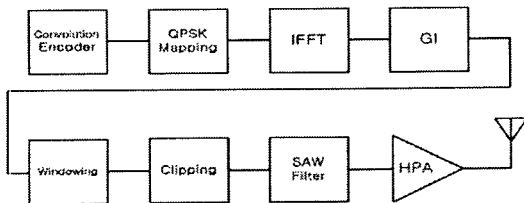


그림 1. OFDM 송신 시스템
Fig. 1. OFDM transmission system.

해 IFFT를 수행하게 되고 GI(Guard Interval) 블록을 거친 후 windowing을 수행하게 된다. Windowing을 수행한 심볼은 clipping 과정을 거친 후 BPF를 거쳐 HPA로 증폭시킨 후 전송하게 된다. 여기서 N개의 부 반송파를 갖는 시간영역의 OFDM 심볼의 기저대역 복소수 신호는 다음과 같다.

$$x(t) = \sum_{n=1}^N a_n \cos w_n t + j b_n \sin w_n t \tag{1}$$

식 (1)에서 QPSK 변조일 경우 $a_n, b_n \in \{-1, 1\}$ 으로 구성되고 다음과 같이 표현할 수 있다[5].

$$s(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} d_I(t) \cos(2\pi f_c t) + \frac{1}{\sqrt{2}} d_Q(t) \sin(2\pi f_c t) \tag{2}$$

그림 2는 기저대역 신호를 IF로 바꾸기 위해 vector modulation을 하기 위한 블록도이다.

벡터 변조기는 기저대역 신호를 IF로 바꾸기 위해 vector modulation을 수행하게 되고 OFDM 신호의 PAPR은 다음과 같이 정의할 수 있다[6][7].

$$PAPR_s = \frac{\max\{s^2(n)\}}{E\{s^2(n)\}} \tag{3}$$

2.2 SQUARE CLIPPING

PAPR을 감소시키는 가장 간단한 방법은 신호의 peak 값을 특정 레벨로 제한시키는 clipping이다. 하지만 clipping 기법은 시스템 적용에 따라 시스템 성능에 차이가 발생하고 시스템의 구조적인 장단점을 가지게 된다. Baseband에서 수행하는 square clipping을 살펴보면 먼저 IFFT를 거친 신호는 레일리 분포를 따르게 되며 real 축과 imag 축에 대하여 각각 다음과 같은 함수로 정의된다[8].

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \tag{4}$$

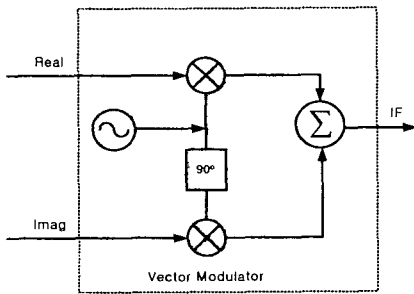


그림 2. 벡터 변조기
Fig. 2. Vector modulator.

Square clipping 은 real 축과 imag 축에서 각각 수행하며 구현이 간단하다는 장점을 가지게 되고 저속의 D/A C 를 사용할 수 있다. 하지만 두 개의 D/A C 를 사용하여 vector modulation 을 수행해야 하고 신호의 크기와 위상이 불안정하다는 단점을 가지게 된다. 그림 3은 square clipping 을 적용하기 위한 시스템 구조 이고 그림 4 는 square clipping 기법으로 OFDM 신호를 clipping 하였을 때의 성좌도이다. 성좌도는 real 축과 imag 축 각각에 대한 level 제한으로 인해 신호의 위상과 진폭이 불안정한 정사각형 형태를 가지게 된다.

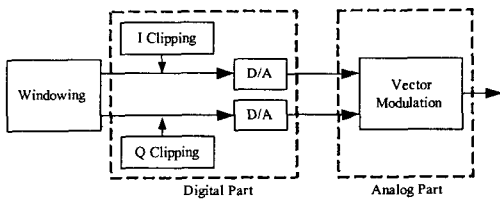


그림 3. Square clipping 시스템 구조
Fig. 3. System structure of square clipping.

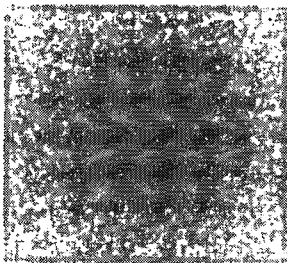


그림 4. Square clipping 적용된 성좌도
Fig. 4. Constellation of square clipping.

2.3 CONVENTIONAL CLIPPING

Conventional clipping 은 square clipping 과 달리 real 축과 imag 축에 각각 clipping 을 적용하지 않고 식 (2) 로 정의된 복소수 값을 가지는 s(t)에 clipping 을 적용하게 된다.

Conventional clipping 기법을 적용하기 위한 신호는 레일리 분포를 따르고 다음과 같은 함수로 정의할 수 있다[8].

$$f(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} \quad (5)$$

s(t)에 conventional clipping 을 적용할 경우 square clipping 때 보다 신호의 위상과 진폭이 안정적이므로 우수한 성능을 얻을 수 있다.

그러나 conventional clipping 기법을 적용하기 위해서는 baseband 에서 신호의 진폭과 위상을 더하여 하나의 신호로 만들어야 한다. 따라서 곱셈기, 제곱근기, 나눗셈기 등 복잡한 하드웨어를 구현해야 하므로 시스템을 운용하는데 있어 많은 문제점을 가지게 된다.

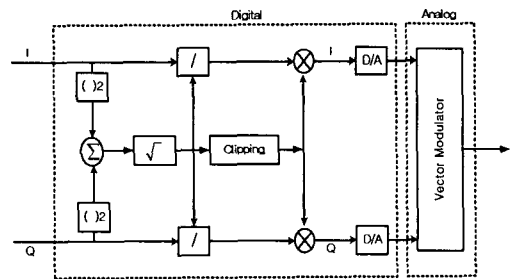


그림 5. Conventional 시스템 구조
Fig. 5. System structure of Conventional clipping.

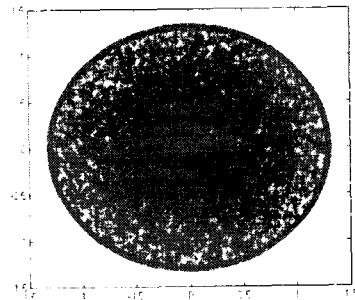


그림 6. Conventional clipping 적용된 성좌도
Fig. 6. Constellation of conventional clipping.

그림 5는 conventional clipping을 적용하기 위한 시스템 구조이다. 이 블록에서는 QPSK mapping 되어 입력되는 각각의 신호를 복잡한 하드웨어를 거쳐 D/AC와 vector modulation을 수행하게 된다. 즉, 기저대역에서 clipping을 수행해야 하므로 복잡한 시스템 구조를 갖게 된다.

Real 축과 imag 축으로 분류되어 있는 신호를 하나의 신호로 구성하여 clipping을 수행하게 되면 그림 6과 같이 신호의 위상과 진폭이 안정적인 성좌도를 얻을 수 있다.

2.4 제안하는 IF-CLIPPING 구조

Conventional clipping 기법을 적용하기 위한 블록은 매우 복잡하다. 본 논문에서는 conventional clipping 기법을 적용하기 위해 복잡한 블록 구조 대신 간단히 구현할 수 있는 구조를 제안한다.

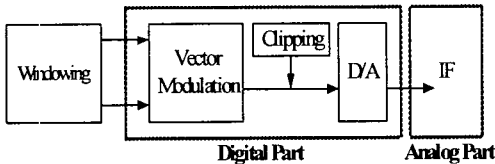


그림 7. 제안하는 IF-Clipping 블록
Fig. 7. Proposed IF-Clipping block.

그림 7은 본 논문에서 제안하고 있는, conventional clipping 기법을 개선한 시스템 블록도이다. 이 방식은 vector modulation을 거치고 난 후 clipping을 수행하는 것이 특징이다. IF-Clipping 기법의 적용은 baseband에서 수행하는 square clipping 기법과는 달리 clipping 적용 시 real 축과 imag 축으로 분류하지 않고 IF 신호 s(t)에 적용하게 된다. 기존의 conventional clipping 기법에서는 시스템 구현이 복잡하다는 단점으로 인해 시스템 운용에 있어 어려움이 있으나 제안하는 IF-Clipping 구현 방식은 conventional clipping 기법과 동일한 성능을 갖도록 하면서도 square clipping과 같이 시스템을 간단히 구현할 수 있다. 또한 vector modulation을 디지털로 수행하기 때문에 신호의 크기와 위상이 안정적이고 시스템 성능이 우수하다.

III. IF-Clipping 기법을 적용한 시스템 응용

3.1 Convolution 부호화 기법

Convolution 부호화 기법은 에러정정 능력이 우수하기 때문에 많은 통신 시스템에서 사용된다.

Convolution 부호화 기법은 clipping으로 발생하는 시스템의 BER 성능을 개선할 수 있다. 본 논문에서는 QPSK mapping 전에 convolution 부호화기를 사용한다. 사용된 부호화기의 구조는 그림 8과 같다.

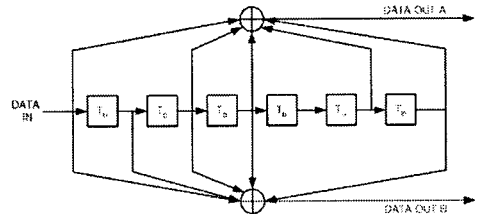


그림 8. Convolution 부호화기
Fig. 8. Convolution encoder.

3.2 SAW Filter와 Amplifier 모델링

IF-Clipping이 수행된 신호는 SAW Filter를 거친 후 전력증폭을 수행하게 된다. SAW Filter의 적용은 OFDM 신호에 clipping을 수행함에 따라 발생하는 스펙트럼의 Out-of-Band 방출 문제를 해결하기 위한 것으로서 40dB의 스퀘트 특성을 가지는 필터를 적용하였다. 전력증폭기는 TWTA(Traveling-wave tube amplifiers)를 모델링하여 적용하였고 전력증폭기 모델은 다음과 같다[2].

$$A(r) = \frac{1.9638r}{1 + 0.9945r^2} \tag{6}$$

IV. 시뮬레이션 결과

4.1 Clipping 구조에 따른 성능

OFDM 시스템에서 발생하는 PAPR은 시스템의 성능을 저하 시킨다. 따라서 PAPR 문제를 해결하는 방법으로 본 논문에서는 conventional clipping 기법을 간단히 구현할 수 있는 IF-Clipping 기법을 제안하였다. 시스템 시뮬레이션에 의해 clipping level에 따른 PAPR의 변화를 보면 그림 9와 같다.

4.2 IF-Clipping 을 적용한 시스템 성능

시뮬레이션 수행은 WiBro 서비스를 위한 표준화 문서의 정의[1]에 따라 1024 개의 부반송파를 적용하였고 변조 방식으로는 QPSK 변조방식을 적용하였다. 채널 대역폭은 10 MHz로 설정하였고, 채널 환경은 AWGN(Additive White Gaussian Noise)을 고려하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션의 기준은 WiBro 표준화 문서에서 정의된 파라미터 중 표 1 과 같은 수신 조건을 기준으로 convolution 부호화기, IF-Clipping, SAW Filter와 TWTA 를 적용한 후 최적의 파라미터를 찾아 표준화 문서에 정의된 Spectrum Mask 를 만족하는 결과를 얻었다.

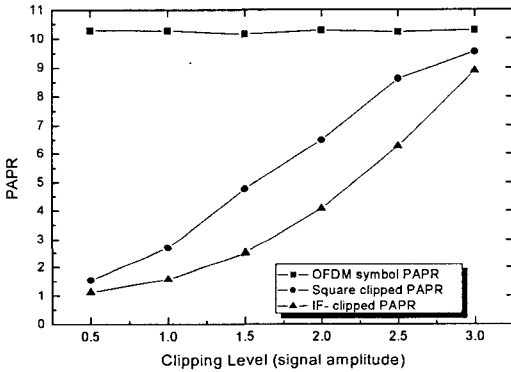


그림 9. Clipping level 에 따른 PAPR
Fig. 9. PAPR according to Clipping level.

그림 9 를 통하여 square clipping 이 적용된 신호와 IF-Clipping 이 적용된 신호의 PAPR 을 살펴보면 신호의 크기를 2.0 으로 제한했을 경우, square clipping 이 적용된 신호는 PAPR 8.6 이고 IF-Clipping 이 적용된 신호는 PAPR 6.2 이므로 신호의 크기를 동일하게 제한하여도 IF-Clipping 기법이 적용된 신호가 2.4 정도 PAPR 이 낮으므로 square clipping 을 적용 하였을 때 보다 우수한 PAPR 성능을 갖는다.

표 1. WiBro 시스템의 수신조건
Table 1. Receiving condition of WiBro system.

Modulation	E_b/N_0 [dB]	BER
QPSK	10.5	10^{-6}

4.2.1 BER(Bit Error Rate)

WiBro 서비스를 위한 표준화 문서는, 수신조건으로

E_b/N_0 가 10.5 dB 일 때 BER 10^{-6} 을 정의하고 있다. 따라서 clipping 기법의 적용은 시스템에서 요구하는 범위에서의 적용이 필수적이다. 하지만 본 논문에서는 convolution 부호화기를 사용함으로써 2dB 정도의 E_b/N_0 이득을 얻을 수 있다. 그림 10 은 부호화기를 적용하였을 때와 적용하지 않았을 때의 PAPR 6 dB 와 PAPR 7 dB 에 대하여 E_b/N_0 에 따른 BER를 나타낸 것이다.

그림 10 에서 알 수 있듯이 부호화기를 사용함에 따라 WiBro 시스템의 수신조건인 BER 10^{-6} 을 만족하기 위한 E_b/N_0 는 약 8.5 dB로 2dB의 이득을 얻을 수 있다. 또한 BER 10^{-6} 을 만족하기 위한 기준에서 최소한의 손실을 가지는 PAPR은 6 dB 라는 것을 알 수 있었다. 앞서 언급한 E_b/N_0 와 PAPR 파라미터를 이용하여 시스템 성능에 손실을 주지 않도록 최적의 clipping 레벨을 결정한 후 clipping을 적용함으로써 clipping 으로 인한 시스템의 손실을 최소화 할 수 있다.

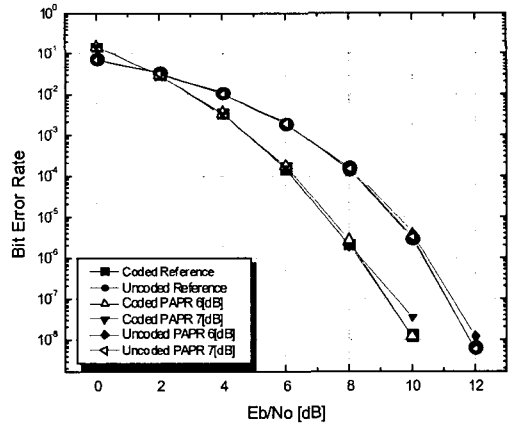


그림 10. System BER 성능
Fig. 10. System BER performance.

4.2.2 PSD

그림 11은 convolution 부호화기를 사용하고 IF clipping 을 수행한 신호에 40dB 의 스퀘트 특성을 갖는 SAW Filter를 적용하였을 때 각각의 PAPR에 따른 PSD 이다. 그림 11 에서와 같이 40dB 의 스퀘트 특성을 갖는 SAW Filter를 적용한 OFDM 신호의 스펙트럼은 WiBro 시스템에서 요구되는 중심 주파수 기준으로 10 MHz 대역폭에서 -52dB 를 정의 하고있는 Spectrum Mask를 만족하게 된다. 하지만 SAW Filter 사용으로 인해 -20dB 정

도의 전력손실이 발생된다. 따라서 손실된 전력을 해결하기 위해 TWTA를 사용한다. TWTA의 사용은 손실된 전력을 증폭하여 전력손실에 대한 문제는 해결할 수 있으나 비선형 특성을 가지는 소자 이므로 전력증폭기의 Backoff 값에 따라 심각한 왜곡이 발생된다. 전력증폭기의 Backoff 선택은 무엇보다 중요하고 전력 증폭기의 Backoff 값은 그림 13 과 같다.

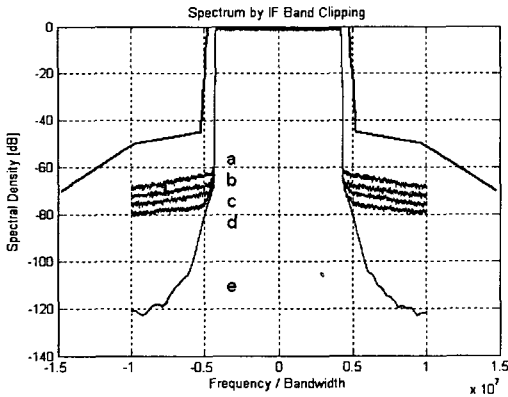


그림 11. SAW Filter와 PAPR 에 따른 PSD
Fig. 11. PSD according to PAPR and SAW filter. (PAPR [dB]: a=4, b=5, c=6, d=7, e=unclipping)

그림 12는 TWTA의 Backoff에 따른 스펙트럼이다. PAPR 6 dB에서 Backoff 를 10 dB로 선택할 경우 시스템에서 요구하는 수신조건에 근사하게 접근하는 것을 알 수 있다.

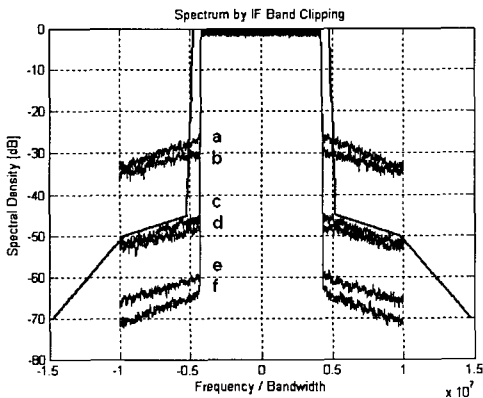


그림 12. HPA 의 Backoff 에 따른 PSD
Fig. 12. PSD according to HPA backoff. (a, b= Backoff: 5 dB, PAPR: a= 6, b= 4 dB) (c, d= Backoff: 10 dB, PAPR: c= 6, d= 4 dB) (e, f= Backoff: 15 dB, PAPR: e= 6, f= 4 dB)

그림 13 을 통하여 PAPR 5 dB, 6dB, 7dB로 IF-Clipping 을 수행 하였을 경우 Spectrum Mask를 만족하기 위한 최적의 Backoff 값을 살펴보면 PAPR 6 dB에서 전력증폭기 Backoff 값은 9.6 dB 라는 것을 알 수 있다.

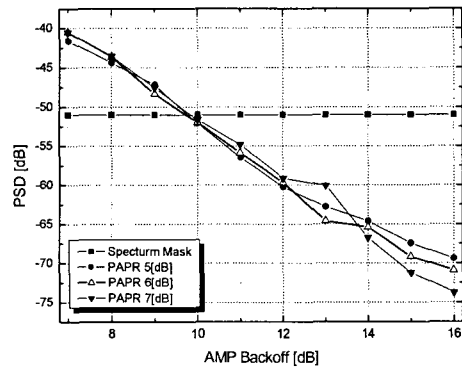


그림 13. HPA 의 Backoff와 PAPR에 따른 PSD
Fig. 13. PSD according to HPA Backoff and PAPR.

4.3 WiBro 서비스를 위한 시스템의 이상적 PSD

시뮬레이션을 통해, WiBro 시스템에서 부호화기를 사용한 후 IF-Clipping 을 적용하고 SAW Filter와 전력증폭기를 사용하여 OFDM 신호를 전송 할 경우 가장 이상적인 시스템 파라미터 값은 그림 10을 통해 얻어진 PAPR 6 dB 와 그림 13을 통해 얻어진 전력증폭기 Backoff 값 9.6 dB였다. 시뮬레이션을 통해 얻어진 파라미터를 이용하여 그림 14와 같이 WiBro 시스템에서 최적화된 스펙트럼을 얻을 수 있었다.

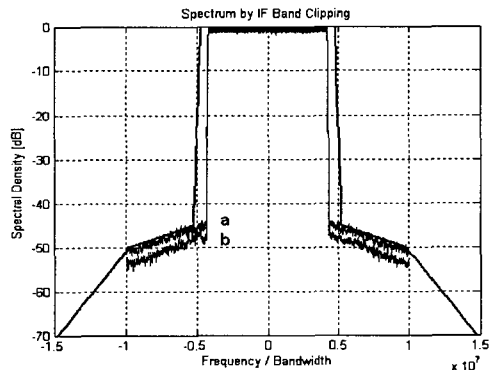


그림 14. WiBro 시스템의 이상적인 PSD
Fig. 14. Optimu PSD of WiBro system. (a= PAPR 6 dB, Backoff= 9.6 dB) (b= PAPR 6 dB, Backoff= 10.5 dB)

V. 결 론

본 논문에서는 OFDM 방식을 이용하는 시스템에서 발생하는 문제점인 PAPR을 해결하기 위해 clipping 기법에 관한 시스템 구조를 제안하고 clipping 적용에 의해 발생하는 Out-of-Band 방출을 해결하기 위하여 SAW Filter와 TWTA 전력증폭기를 이용하여 시스템의 PSD와 BER 그리고 전력증폭기의 Backoff 특성을 분석하였다. WiBro 서비스지원을 위한 시스템에 convolution 부호화기를 적용하였고 clipping 기법으로는 위상과 진폭이 안정적이며 시스템 구조를 간단히 할 수 있는 IF-Clipping 기법을 적용하고 40dB의 스퀘트 특성을 갖는 SAW Filter를 적용하였다. WiBro 시스템에서 요구하는 수신조건인 E_b/N_0 10.5dB 일때 BER 10^{-6} 을 부호화기 적용 후 8.5dB에서 BER 10^{-6} 으로 2dB의 E_b/N_0 이득을 얻을 수 있었고 IF-Clipping 적용으로 OFDM 시스템에서 발생하는 PAPR을 감소시킬 수 있었다. 또한 clipping 적용으로 인해 발생하는 Out-of-Band 방출을 해결하기 위하여 스퀘트 특성이 40dB인 SAW Filter를 이용함에 따른 PSD의 손실을 전력증폭기를 이용하여 그림 14에서 보는 바와 같이 0.9 dB의 이득을 얻을 수 있었다. 또한 WiBro 서비스 지원을 위한 시스템에서 요구하는 수신조건 보다 우수한 시스템 성능을 얻을 수 있었다.

참고문헌

- [1] 정보통신단체 표준초안 "Specifications for 2.3 GHz band Portable Internet Service," June, 2004
- [2] A. Saleh, "Frequency-independent and frequency dependent nonlinear models of TWT amplifiers," *IEEE Transaction on Communications*, vol. 29, no. 11, Nov. 1981.
- [3] X. Li and L. J. Cimini, Jr., "Effects of clipping and filtering on the performance of OFDM," *IEEE Communications Letters*, vol. 2, no. 5, May 1998.
- [4] R. D. J. V. Nee, "OFDM codes for peak-to-average power reduction and error correction," *GLOBECOM*, vol. 1, pp. 740-744, 1996.

- [5] H. Harada and R. Prasad, *Simulation and Software Radio for Mobile Communications*, Artech House, 2002.
- [6] G. Ren, H. Zhang, and Y. Chang, "A complementary clipping transform technique for the reduction of peak-to-average power ratio of OFDM system," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 49, no. 4, pp. 922-926, Nov. 2003.
- [7] N. Carson and T. A. Gulliver, "PAPR reduction of OFDM using selected mapping, modified RA codes and clipping," *Vehicular Technology Conference*, 2002, vol. 2, pp. 1070 - 1073.
- [8] G. Hill and M. Faulkner, "Comparison of low complexity clipping algorithms for OFDM," *The 13th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, 2002, vol. 1, pp. 15-18.

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

조 성 준 (Sung-Joon Cho)



1969년 2월 한국항공대학교 항공통신
공학과 졸업 (공학사)
1975년 2월 한양대학교 대학원 전자
통신공학 전공 졸업(공학석사)

1981년 3월 오사카대학 대학원 통신공학전공 졸업(공학박사)
1972년 8월 ~ 현재 한국항공대학교 항공전자 및 정보통신공학부 교수
※ 관심 분야: 무선통신, 이동통신, 환경전자공학, 이동무선인터넷