

OFDM-FDMA 통신 시스템에서 PAPR 저감을 위한 Clipping 기법과 잡음 분석

Clipping Scheme and Noise Analysis for the PAPR Reduction of OFDM-FDMA Communication System

Tran Phuong Hoa · 박종현 · 윤기후 · 유흥균

Tran Phuong Hoa · Jong-Hyun Park · Kee-Hoo Yoon · Heung-Gyoon Ryu

요 약

Clipping은 고속 OFDM(orthogonal frequency division multiplexing) 통신 시스템에서 비선형 왜곡 방지를 위한 단순하고 편리한 PAPR(peak-to average power ratio) 저감 방법이다. 그러나, clipping 방법은 BER 성능을 저해하는 clip 잡음을 발생한다. 잡음은 대역내 clipping 잡음과 대역외 clipping 잡음으로 분류된다. 본 논문에서는 OFDM-FDMA 통신 시스템의 forward link의 clipping 잡음 특성을 분석하고 BER 성능을 이론적으로 분석한다. HPA를 통과한 clipped OFDM-FDMA 신호의 BER 성능을 분석한다. 시뮬레이션 결과를 통해서 OFDM-FDMA 시스템의 BER 성능이 clipping 방법에 의한 성능 저하를 연구하였다. 본 연구의 결과로, 우리는 원하는 BER 성능을 얻기 위한 알맞은 IBO(input back-off) 값과 CR(clip ratio)을 선택할 수 있다.

Abstract

Clipping is a simple and convenient PAPR reduction method to prevent the high-speed OFDM communication system from the nonlinear distortion. However, it inherently produces clip noise so that BER performance can be degraded. Clipping noise can be divided into in-band and out-of-band clipping noise. In this paper, we study the clipping effect on the forward link of the OFDM-FDMA system. BER performance of OFDM-FDMA system using clipping method is theoretically analyzed. We also investigate the BER performance of the clipped OFDM-FDMA signal through the HPA. From the simulation results it can be quantified how much the BER performance of OFDM-FDMA system is degraded by the clipping method. From the study results, we can choose the appropriate IBO value and CR(clip ratio) to get the desired BER performance.

Key words : OFDM, PAPR, Clipping Noise, Clip Ratio

I. 서 론

OFDM 시스템은 다경로 환경과 협대역 간섭에서의 강인성 때문에 적절한 통신 방법이다. FDMA는 주파수 대역을 통신의 사용자 채널로 할당하기 위해 나누는데 각 채널은 한번에 오직 한 명의 사용자에

게 할당된다. 각 채널은 음성 대화와 이미지, 디지털 데이터를 전송할 수 있다. OFDM-FDMA 시스템은 분리된 각 주파수별로 디지털 변조 형태에 따라 유연한 하향링크 데이터 전송을 지원한다. 그러나, OFDM 신호의 높은 PAPR은 HPA(high power amplifier)에서의 비선형 왜곡 때문에 심각한 문제이다.

「본 연구는 과학기술부, 한국과학재단 지정 청주대학교 정보통신연구센터의 지원에 의한 것임.」

충북대학교 전자공학과 및 컴퓨터정보통신연구소(Dept. of Electronic Engineering and Research Institute of Computer, Information & Communication, Chungbuk National University)

· 논문 번호 : 20040715-089

· 수정완료일자 : 2004년 10월 13일

이 문제를 해결하기 위해서, 몇 가지 방법이 연구되었다. 예로써 SLM(selective mapping), PTS(partial transmit sequence), block coding 방법과 clipping 방법 [1]-[3] 등이 있다. SLM과 PTS 방법은 PAPR을 줄이기 위해 위상을 제어한다. SLM은 데이터를 다중화하고 몇 개의 위상의 시퀀스로 모아서 그 중 가장 낮은 PAPR을 가진 데이터 시퀀스로 전송한다. PTS는 들어오는 데이터를 몇 개의 클러스터로 나누고 낮은 PAPR 신호를 만들기 위해 반복적으로 최적화된 계수를 곱한다. 이 두 가지 방법은 스펙트럼 왜곡이 발생하지 않으며 PAPR을 효과적으로 줄일 수 있다. 그러나, 복잡성과 많은 IFFT(inverse fast Fourier transform) 단계, 복잡한 최적화 과정으로 인한 계산의 신중함이 단점이다. Block coding 방법은 3 dB 아래로 PAPR을 유지하기 위해 orthogonal sequence를 사용한다. 신호에 전혀 왜곡이 없었기 때문에 Magic WAND 시스템에서 사용되었고 coding 효과를 보여준다. 그러나, code rate와 대역효율이 매우 낮다. PAPR을 줄이는 가장 간단한 방법은 비선형 HPA에 앞서 확실히 정해진 level 이상의 peak치를 잘라내는 것이다. 그러나, clip 잡음에 의한 BER 성능 저하가 나타날지도 모른다. Clipping 잡음은 대역내 clipping 잡음과 대역외 clipping 잡음으로 나눌 수 있다. 따라서, OFDM-FDMA 시스템에서 clipping에 의해 얼마나 많이 BER 성능이 시스템에서 저하되는지를 분석하고 원하는 최고의 BER 성능을 얻기 위해서 CR (clip ratio)과 HPA에서 적당한 IBO(input back-off) 값을 결정하는 연구는 매우 중요하다.

OFDM 시스템의 Clipping 효과에 대해서 시뮬레이션과 분석식으로 연구한 바 있다^{[4]-[6]}. 그럼에도 불구하고, 단일 사용자 채널에서의 대역외 clip 잡음은 일반적으로 BPF(band-pass filter)에 의해 억제되기 때문에 고려되지 않았다. 그러나, clipping 방법이 OFDM-FDMA 시스템의 하향에 적용될 때, 대역외 clip noise는 주변 사용자들의 BER 성능의 저하를 더욱 크게 한다 따라서, SNR(signal to noise ratio) 감소와 BER 성능의 하락은 대역내뿐 아니라 대역외 clip 잡음에 밀접하게 관련된다. 본 논문에서는 대역내와 대역외의 clipping 잡음이 고려된 OFDM-FDMA 통신 시스템의 하향링크에서의 clipping 효과를 연구한다. 또한, OFDM-FDMA에서 비선형 HPA가 BER에 미치

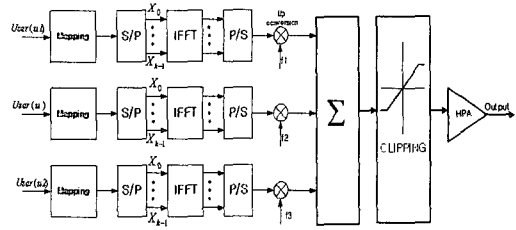


그림 1. OFDM-FDMA 시스템의 순방향 링크 구성도
Fig. 1. Block diagram of the forward link of OFDM-FDMA system.

는 영향에 대해서 시뮬레이션을 통해 연구한다.

II. 시스템 모델과 PAPR

그림 1에서 볼 수 있듯이 간략화를 위해서 우리는 주변의 가장 가까운 이웃채널을 가진 OFDM-FDMA 시스템을 가정하였다. 세 명 사용자의 데이터는 적절한 변조 후에 K개의 병렬 가지로 변환된다.

K번째 사용자의 복소 데이터 열은 $X_0^k, X_1^k, \dots, X_{K-1}^k$ 의 길이 벡터가 되며, 여기서 X_k^i 는 k번째 sub-carrier 상의 심볼이다. IDFT(inverse Fourier transform) 후에 복소 기저대역 OFDM-FDMA 신호는 다음과 같이 주어진다.

$$x(t) = \frac{1}{\sqrt{K}} \sum_{i=1}^3 \sum_{k=0}^{K-1} X_k^i e^{j(\frac{2\pi k}{N}t - f_i t)} \quad 0 \leq t < T. \quad (1)$$

여기서, T는 하나의 OFDM-FDMA 신호에서 주기를 나타내고, f_i 는 i번째 사용자의 반송파의 주파수이며, 여기서 i는 1~3으로 사용자의 수를 나타낸다. 수신기에서 DFT 후의 신호의 식은 아래와 같이 쓰인다.

$$Y_k = H_k X_k + \eta_k \quad (2)$$

H_k 가 k번째 부반송파의 채널 응답이고, η_k 는 AWGN이다.

OFDM-FDMA 신호의 PAPR은 아래와 같이 정의된다.

$$PAPR = \frac{\max |x(t)|^2}{E \{ |x(t)|^2 \}} \quad 0 \leq t < T. \quad (3)$$

PAPR을 연구하기 위한 목적으로 J의 항으로 과도샘플을 한 경우를 고려하였을 때 이산 형태의 OFDM-FDMA 신호는 아래와 같이 쓸 수 있다.

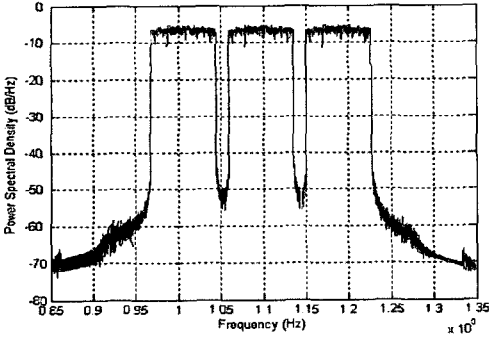


그림 2. Clipping 이전의 3명 사용자의 전력스펙트럼
Fig. 2. Power spectrum of 3 users before clipping.

$$x(n) = \frac{1}{\sqrt{JK}} \sum_{i=1}^3 \sum_{k=0}^{JK-1} X_k^i e^{j\left(\frac{2\pi kn}{JK} - f_i\right)} \quad n = 0, 1, \dots, JK-1. \quad (4)$$

따라서, 각각의 사용자에게 주어진 이산 OFDM-FDMA 신호의 PAPR은 다음과 같다.

$$PAPR = \frac{\max_n |x(n)|^2}{\frac{1}{JK} \sum_{n=0}^{JK-1} |x(n)|^2} \leq n < JK. \quad (5)$$

그림 2는 사용자가 3명일 때의 클리핑을 하기 전의 OFDM-FDMA 시스템의 스펙트럼이다.

Clipping 처리 후, OFDM-FDMA 시스템의 출력 진폭 크기는 다음과 같이 주어진다.

$$\tilde{x}(n) = g(x(n)) = \begin{cases} x(n), & \text{for } |x(n)| \leq A_{\max} \\ A_{\max} e^{j\arg(x(n))}, & \text{for } |x(n)| > A_{\max}. \end{cases} \quad (6)$$

Amplitude clip ratio γ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\gamma = \frac{A_{\max}}{\sqrt{P_{in}}} \quad (7)$$

이때,

$$P_{in} = \frac{1}{JK} \sum_{k=0}^{JK-1} |x(n)|^2. \quad (8)$$

여기서, P_{in} 는 clipping 이전의 OFDM-FDMA 신호의 평균입력 전력이다.

다음으로, clip된 OFDM-FDMA 신호는 다음과 같이 모델링 될 수 있는데,

$$\tilde{x}(n) = \alpha x(n) + v(n). \quad (9)$$

여기에서 α 는 감쇄 계수이고 $v(n)$ 은 clipping 잡음

이다. 주파수 영역에서 DFT 이후, 왜곡된 신호는 아래와 같이 주어진다.

$$\tilde{X}_k = \alpha X_k + W_k. \quad (10)$$

상수 α 는 clip ratio^{[4],[6]}의 매개변수의 상관관계로부터 분석적으로 얻을 수 있다.

$$\alpha = 1 - e^{-\gamma^2} + \frac{\sqrt{\pi}}{2} \gamma \operatorname{erfc}(\gamma). \quad (11)$$

그 후, 총 출력신호전력은 [4], [5]에 의해 아래와 같이 주어진다.

$$S = \alpha^2 P_{in} = K_\gamma P_{out} \quad (12)$$

$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\pi} \int_x^\infty e^{-t^2} dt$ 일 때, 총감쇄 계수 K_γ 은 다음과 같이 정의된다.

$$K_\gamma = \frac{S}{P_{out}} = \frac{\alpha^2}{1 - e^{-\gamma^2}}. \quad (13)$$

Clipping 후의 총전력은 신호와 왜곡 요소의 합으로 표현되는데 다음과 같다.

$$P_{out} = E\{|\tilde{x}(n)|^2\} = (1 - e^{-\gamma^2}) P_{in}. \quad (14)$$

따라서, 우리는 총 왜곡전력 P_D 는 다음과 같음을 확인할 수 있다.

$$P_D = P_{out} - \alpha^2 P_{in} = (1 - e^{-\gamma^2} - \alpha^2) P_{in}. \quad (15)$$

P_D 는 두 가지 요소를 포함한다. σ_i^2 로 표현되는 원 데이터 심볼의 대역내 clipping 잡음과 σ_o^2 로 표현되는 대역외 clipping 잡음이다. 따라서

$$P_D = \sigma_i^2 + \sigma_o^2. \quad (16)$$

$$\sigma_i^2 = \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} \sigma_{w_k}^2. \quad (\text{대역내 잡음}) \quad (17)$$

$$\sigma_o^2 = \frac{1}{K} \sum_{k=K}^{JK-K} \sigma_{w_k}^2. \quad (\text{대역외 잡음}) \quad (18)$$

잡음 요소의 power는 $\sigma_{w_k}^2$, $k = 0, \dots, JK-1$

$$\sigma_{w_k}^2 = (1 - e^{-\gamma^2}) K P_{in} \sum_{m=0}^{JK-1} R_S[m] e^{-j\frac{(K-1)m\pi}{JK}} e^{-j2\pi\frac{mk}{JK}} - \alpha^2 \cdot p_{in,k} \quad (19)$$

신호의 전력은 $P_{m,k} = E\{|S_k|^2\} = \frac{P_{in}}{K}$ 인데, 각 부반송파로 분배된다.

[5]에 의해 주어진 clipping 과정 후 일반화 된 자기 상관 함수는

$$R_s[m] = \frac{\rho_m(1-\rho_m^2)^2}{1-e^{-\gamma^2}} \sum_{k=0}^{\infty} \rho_m^{2k}(k+1) \cdot \left(\frac{\gamma}{\sqrt{1-\gamma^2}} \frac{\Gamma(k+\frac{3}{2})}{\Gamma(k+2)} \left(1-P\left(\frac{\gamma^2}{1-\rho_m^2}, k+\frac{3}{2}\right) \right) + P\left(\frac{\gamma^2}{1-\rho_m^2}, k+2\right) \right) \quad (20)$$

$\Gamma(a)$ 는 gammer 함수이고, $P(x,a)$ 는 불완전한 gammer 함수이다.

ρ_m 은 OFDM-FDMA 신호의 자기상관계수이며 다음과 같다.

$$\rho_m = \frac{R_s[m]}{R_s[0]} \quad (21)$$

그림 3은 사용자가 3명일 때의 클리핑을 실시한 후의 OFDM-FDMA 시스템의 스펙트럼이다.

$R_s[m]$ 는 clipping 과정을 거치기 전의 OFDM-FDMA 신호의 자기상관 함수이다.

$$R_s[m] = e^{\frac{(K-1)m\pi}{JK} \sum_{k=0}^{JK-1} p_{in,k} e^{2\pi \frac{km}{JK}}}, \quad m = 0, 1, \dots, JK-1. \quad (22)$$

$p_{in,k} = \frac{P_m}{K}$ 이기 때문에, $R_s[0] = P_m$ 임을 얻는다.

오직 가장 가까운 이웃 채널이 대역의 clip 잡음의 원인이라 가정하면, 중심 사용자의 왜곡은 그 자신의 대역내 간섭과 두 인접한 사용자의 대역외 간섭을 포함한다.

$$D = \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} \sigma_{w_k}^2 + \frac{2}{K} \sum_{k=2K}^{3K-1} \sigma_{w_k}^2 \quad (23)$$

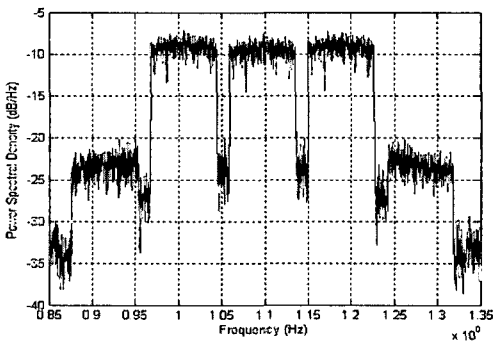


그림 3. Clipping 후의 3 사용자의 전력스펙트럼
Fig. 3. Power spectrum of 3 users after clipping process.

결과적으로, clipping 후의 SDNR은 다음과 같다.

$$SDNR = \frac{S}{D+N} = \frac{K_s P_{out}}{D+N} \quad (24)$$

이때, N 은 AWGN의 전력이다.

SDNR은 BPSK 변조의 BER 공식의 SNR로 대체될 수 있다.

$$P_b = Q(\sqrt{SDNR}) \quad (25)$$

Clipping 후의 BPSK의 BER 성능은 다음과 같다.

$$P_{bd} = Q(\sqrt{SDNR}) \quad (26)$$

만약, 단일 사용자 경우에서 대역 통과 필터가 대역외 방사를 억제하기 위해 사용되었다면 clipping 과정을 통한 왜곡 잡음은 오직, 대역내 잡음뿐이다. 그것이 식 (23)의 첫 항과 같다.

$$D_I = \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} \sigma_{w_k}^2 \quad (27)$$

대역 통과 필터후 PAPR은 다시 재생된다. $SDNR_I$ 은 오직 대역내 잡음만 포함한다.

$$SDNR_I = \frac{S}{D_I+N} = \frac{K_s P_{out}}{D_I+N} \quad (28)$$

그 후, 대역내 잡음만 가진 경우의 BER은 다음과 같이 된다.

$$P_{bl} = (\sqrt{SDNR_I}) \quad (29)$$

III. 시뮬레이션 결과와 논의

3명의 다중사용자를 만들었고 각 사용자들은 다음과 같은 파라미터를 갖는다. 그리고 본 논문에서 실시한 시뮬레이션의 시스템은 그림 1과 같다. 그리고 시뮬레이션 환경은 다음과 같다.

- a. 부반송파의 수: $K=64$.
- b. IFFT points: $JK=256$.
- c. 변조 방식: QPSK.
- d. Clip ratio: 1, 1.5, 2 and infinite.
- e. Channel: AWGN.
- f. Amplifier: SSPA with Rapp's coefficient, $p=2$.
- g. Input Back-off(IBO): 0 and 5 dB.

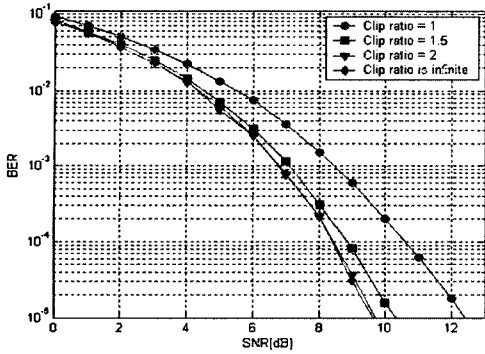


그림 4. 대역내 잡음만 포함한 clipped OFDM-FDMA의 BER

Fig. 4. BER of clipped OFDM-FDMA with only in-band noise.

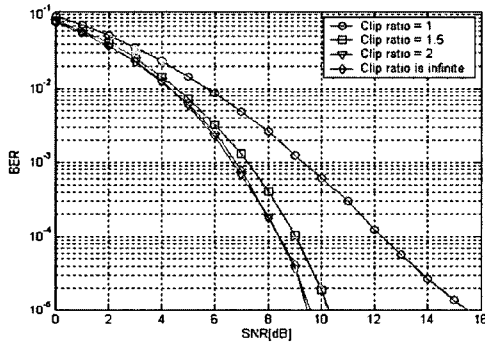


그림 5. 대역내 잡음과 대역외의 잡음을 포함한 clipped OFDM-FDMA의 BER

Fig. 5. BER of clipped OFDM-FDMA with in-band noise and out-of-band noise.

Clipping 이후, 가운데 위치한 사용자의 BER 성능을 평가한다.

우리는 clipping 과정을 통한 BER 성능의 변화를 관찰하기 위해 HPA가 선형 증폭기라 가정한다. 또한, 중심 사용자는 이웃한 주변의 두 사용자에게 영향 받지 않는다고 가정하였다. 따라서, 이 사용자에게 대역외의 잡음의 영향은 없다. BER 성능은 저하되지 않는다. 이 경우는 OFDM 시스템의 단일 사용자와 같은 경우이다. Clip ratio가 늘어날 때 BER 성능이 더 나아지는데 시뮬레이션 결과는 그림 4에서 볼 수 있다. Clip ratio가 약 2인 경우와 clip ratio가 무한할 때 같은 BER 성능을 보인다.

그림 5의 대역내 잡음과 대역외의 잡음을 고려한 clipped OFDM-FDMA BER 성능을 살펴보자. Clip

ratio가 1일 때, BER 성능의 감소가 나타난다. 따라서, BER= 10^{-5} 을 만족하는 SNR은 16 dB이다. Clip ratio가 1.5일 때 BER 곡선은 clip ratio가 각각 2와 무한일 때와 비슷하다. Clip ratio가 1.5이고 BER= 10^{-5} 을 만족하는 SNR은 10 dB를 넘는다. 그림 5에서 볼 수 있듯이 clip ratio가 2일 때 BER= 10^{-5} 을 만족하는 SNR은 약 10 dB이다.

그림 6은 대역내 잡음만 가진 경우와 대역내 잡음에 대역외 잡음이 더해진 경우의 비교를 보여준다. Clip ratio가 1인 경우 BER 성능을 저하시키며 대역외 잡음은 중앙의 사용자에게 많은 영향을 미친다. BER= 10^{-5} 을 기준으로, 대역내 잡음만 고려한 시스템의 요구 SNR이 12 dB인 반면에 대역외의 잡음을 고려한 경우는 요구 SNR이 약 16 dB로 증가된다. Clipping이 없는 경우와 clip ratio가 2인 경우는, BER= 10^{-5} 을 만족하는 SNR은 약 10 dB로 동일하다. 그림 6과 7의 경우는 OFDM-FDMA 시스템에서 대역외, 대역내 클리핑 노이즈를 고려하였을 때의 BER 성능을 보여준다. 각각 clip-ratio가 1과 2일 때이다. 또한 클리핑 노이즈를 고려하지 않은 결과를 추가하여 각 노이즈의 유무에 따른 BER 성능의 차이점을 보여준다.

그림 7의 결과는 clip ratio가 1과 1.5를 가진 앞선 2가지 경우에 비해 훨씬 나은 모습을 보인다. 대역내 잡음만 가지고 있는 경우의 BER 성능은 clipping 잡음을 가지지 않은 경우와 같다. 대역내 잡음을 가진 경우와 대역내 잡음+대역외의 잡음을 가진 경우

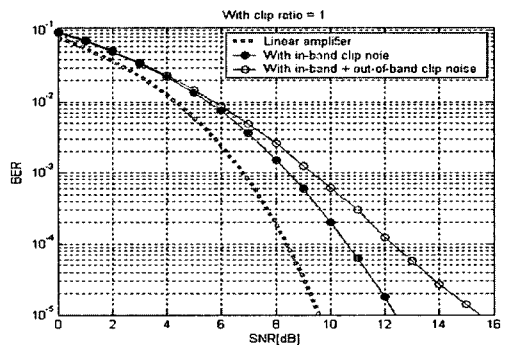


그림 6. Clip ratio=1일 때, 대역외의 잡음이 추가된 경우의 비교

Fig. 6. BER comparison whether out-of-band noise is included(clip ratio=1).

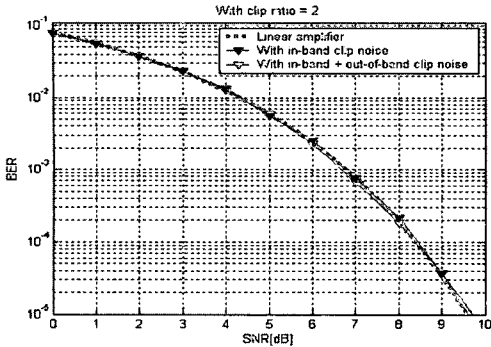


그림 7. Clip ratio=2일 때, clipped OFDM-FDMA의 BER
Fig. 7. BER of clipped OFDM-FDMA when clip ratio =2.

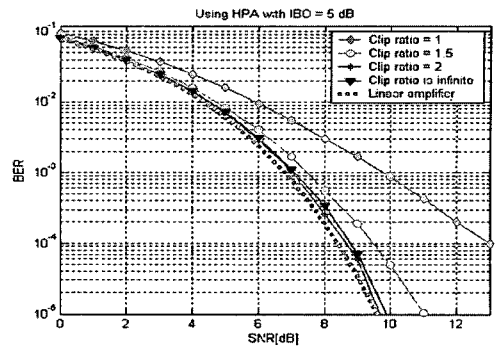


그림 9. IBO=5 dB인 HPA를 통과시 대역내 잡음과 대역외 잡음을 가진 경우
Fig. 9. BER of in-band noise+out-of-band noise through HPA with IBO=5 dB.

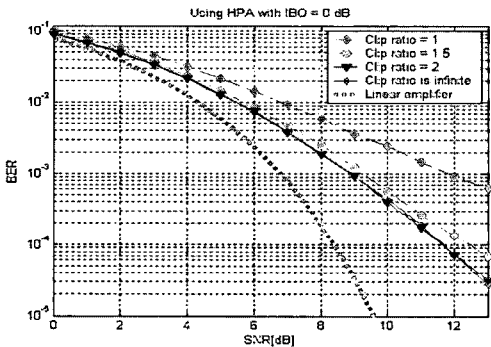


그림 8. IBO=0 dB인 HPA에서 대역내와 대역외 잡음을 가진 경우의 BER 성능
Fig. 8. BER with in-band noise+out-of-band noise through HPA at IBO=0 dB.

의 BER 성능도 같다. 그리고 또한 clipping하지 않은 경우와도 같다. BER=10⁻⁵을 얻기 위해서 거의 10 dB의 SNR이 시스템에서 요구된다.

그림 8은 IBO=0인 HPA를 통과한 clip된 BER 성능을 보인다. OFDM-FDMA 시스템에서 만약 우리가 PAPR 감소 방법으로 clipping 방법을 사용하지 않고 이상적인 HPA를 사용한다면 세 명의 사용자 중 주파수 대역의 중앙 사용자의 BER 성능 저하는 일어나지 않는다. 그러나, 사실은 실제 시스템에서 사용되고 있는 HPA는 비선형 왜곡을 가진다. 따라서, HPA를 사용하는 것은 BER 성능을 저하시킬 것이다. 시뮬레이션 그림에서 볼 수 있듯이 만약 HPA가 IBO(input back off)를 가지지 않는다면, BER 곡선은 많은 성능 저하를 가진다. Clip ratio가 낮을 때, BER도 매우 높아진다. HPA에 같은 값의 IBO를 가질 때,

clip ratio가 보다 높을 때 더 좋은 BER 성능을 보일 것이다.

IBO를 높이면 높일수록 보다 좋은 BER 성능을 얻을 수 있다. HPA의 IBO=5 dB인 그림 9의 경우, BER 성능은 예상한 바와 같은 BER 곡선을 보여 준다. 그림 5는 선형 HPA를 가진 clipped OFDM-FDMA의 BER을 보여준 반면, 그림 9는 비선형 HPA에 5 dB의 IBO를 실시한 clipped OFDM-FDMA의 BER 성능을 보인다. 각각의 clip ratio를 가진 두 그림은 명확한 차이를 보인다. 따라서, IBO가 5 dB이고 clip ratio=2인 경우 선형 HPA에 근사함을 얻을 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서 대역내 clipping 잡음과 대역외 clipping 잡음으로 고려되는 clipping 잡음의 하향링크 OFDM-FDMA 통신 시스템에서의 영향을 분석하였다. 이론적으로 BER 성능을 대역내와 대역외의 clipped OFDM-FDMA 신호로 나누었다. 대역외 잡음의 포함때문에 BER 성능의 결과는 오직 대역내 잡음만 가진 경우의 성능보다 더욱 저하되었다. 따라서, clipping 방법에서 clip ratio에 따라 얼마나 많은 BER 성능 저하가 일어나는지 정량화 할 수 있었다. 이런 결과들은 시뮬레이션 결과를 쫓아보면서 볼 수 있는데 clipping ratio가 거의 2일 때, 오직 대역내 잡음만 가지는 clip된 OFDM-FDMA의 BER이 clipping 되지 않은 OFDM-FDMA의 BER 성능과 비슷하다.

이에 반해서, 대역내와 대역외 잡음을 고려한 경우의 BER 성능은 clipping하지 않은 경우와 많은 차이를 가진다. 시뮬레이션 결과는 비선형 HPA를 고려한 OFDM-FDMA 시스템에서 clipping을 위해 선택한 clip ratio와 HPA의 비선형성을 보완하기 위한 IBO의 크기를 적절히 선택하는 것이 원하는 BER 성능을 얻는데 중요함을 보여주었다.

참 고 문 헌

[1] A. E. Jones, T. A. Wilkinson and S. K. Barton, "Block coding scheme for reduction of peak to mean envelope power ratio of multicarrier transmission schemes", *IEE Electronics Letters*, vol. 30, pp. 2098-2099, Dec. 1994.

[2] S. H. Muller, J. B. Huber, "OFDM with reduced peak-to-average power ratio by optimum combination of partial transmit sequences", *IEE Electronics Letters*, vol. 33, no. 5, pp. 368-369, Feb. 1997.

[3] R. W. Bauml, R. F. H. Fisher and J. B. Huber, "Reducing the peak-to-average power ratio of multi-carrier modulation by selected mapping", *Electronics Letters*, vol. 32, pp. 2056-2057, Oct. 1996.

[4] H. Ochiai, H. Imai, "Performance of the deliberate clipping with adaptive symbol selection for strictly band-limited OFDM system", *IEEE J. Select. Areas Communications*, vol. 18, pp. 2270-2277, Nov. 2000.

[5] H. Ochiai, H. Imai, "Performance analysis of deliberately clipped OFDM signal", *IEEE Transactions on Communication*, vol. 50, pp. 89-101, Jan. 2002.

[6] X. Li, L. J. Cimini Jr., "Effects of clipping and filtering on the performance of OFDM", *IEEE Communications Letters*, vol. 3, pp. 131-133, May 1998.

[7] R. Dinis, A. Gusmao, "On the performance evaluation of OFDM transmission using clipping techniques", *Proc. IEEE VTC' 99 Fall*, Amsterdam, Netherlands, pp. 2923-2928, Sep. 1999.

[8] P. Banelli, G. Baruffa and S. Cacopardi, "Effects of HPA non linearity on frequency multiplexed OFDM signals", *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 47, pp. 123-136, Jun. 2001.

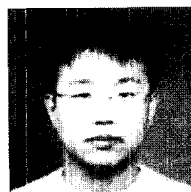
[9] S. Sampei, *Applications of Digital Wireless Technologies to Global Wireless Communications*, Prentice-Hall, 1997.

Tran Phuong Hoa



2003년 6월: 베트남 하노이 국립대학 전자통신공학과 (공학사)
 2003년 7월~현재: 충북대학교 전자공학과 석사과정
 [주 관심분야] 디지털 통신시스템, OFDM 통신시스템, CDMA 이동통신 및 전력선 통신 시스템 등

박 종 현



2003년 2월: 충북대학교 전자공학과 (공학사)
 2003년 3월~현재: 충북대학교 전자공학과 석사과정
 [주 관심분야] OFDM 통신시스템, DSP 통신신호처리, 확산 스펙트럼 시스템 등

윤 기 후



1979년 2월: 충북대학교 전기공학과 (공학사)
1982년 2월: 성균관대학교 전기공학과 (공학석사)
1998년 8월: 충북대학교 전자공학과 박사수료
1992년~현재: 주성대학교 디지털

정보제어공학과 부교수
[주 관심분야] 디지털 공학, 통신시스템, 통신 회로 설계

유 흥 균



1988년~현재: 충북대학교 전자공학과 정교수
1999년~현재: IEEE 논문 심사위원
2002년: 한국전자과학회 학술상 수상
2002년 3월~2004년 2월: 충북대학교 컴퓨터정보통신연구소 소장

[주 관심분야] 디지털 통신 공학, 이동/위성 통신 시스템, 통신 회로 설계 및 통신 신호 처리