

위성 WiBro 시스템에서 전력 증폭기의 효율성 향상과 비선형성 개선을 위한 PAPR 감소 기법과 사전 왜곡 기법 연구

PAPR Reduction Techniques and Pre-Distortion Techniques to Improve Nonlinearity and Efficiency of the TWT Power Amplifier in the Satellite Wibro System

박 평 주 · 서 명 환 · 이 병 섭

Pyung-Joo Park · Myung-Hwan Seo · Byung-Seub Lee

요 약

OFDM 다중 반송파 시스템은 높은 PAPR 특성을 가지고 있으며, 일반적으로 널리 사용되는 TWTA와 같은 전력 증폭기는 진폭과 위상의 비선형 왜곡 특성을 가지고 있다. 이는 전력 증폭기의 증폭 효율을 떨어뜨릴 뿐만 아니라, 높은 에러율과 인접 채널간 간섭을 유발하는 가장 큰 원인이 된다. 본 논문에서는 이러한 문제를 개선하기 위해 위성 WiBro 시스템을 기반으로 피크 제거 기법과 능동 성장도 확장 기법 그리고 사전 왜곡 기법을 모두 적용하여 TWT 증폭기로 입력되는 WiBro 신호의 IBO를 비약적으로 감소시키는 시스템을 제안하였다.

Abstract

Satellite WiBro system has high PAPR characteristics in addition to the nonlinear characteristics of the power amplifier. These characteristics reduce amplifying efficiency of the power amplifier and also cause high error rate and interference with adjacent channels. This paper proposed satellite WiBro based system to reduce input signal's IBO of TWTA remarkably by adapting simultaneously PAPR reduction techniques, active-constellation extension technique and pre-distortion technique.

Key words : OFDM, Power Amplifier, Nonlinearity, PAPR, Pre-distortion

I. 서 론

이동 무선 멀티미디어 서비스가 성장함에 따라 대역폭의 효율을 높이거나 전송 속도를 높이려는 여러 전송 방식이 연구되어 왔다. 그 중 직교 주파수 분할 다중화(OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing)에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. OFDM 기술은 현재 유럽의 디지털 비디오 방송(DVB: Digital Video Broadcasting), 광대역 무선 접속

(BWA: Broadband Wireless Access), 디지털 멀티미디어 방송(DMB: Digital Multimedia Broadcasting) 등에 적용되어 있다. 특히 국제 표준으로 채택된 WiBro(무선 광대역, 802.11e Mobile WiMax)의 핵심 전송 기술로 사용되고 있으며, WiBro에 위성이 접목된 4G 시스템에서도 발전되어 사용될 가능성이 높은 전송 기술이다^[1].

WiBro의 기반 기술이 되는 OFDM 시스템은 고속의 직렬 데이터를 저속의 병렬 데이터로 나누어

한국항공대학교 정보통신공학과(Department of Telecommunication and Information Engineering, Korea Aerospace University)

· 논문 번호 : 20080618-076

· 수정완료일자 : 2008년 11월 19일

여러 부반송파에 실어 보냄으로써 기존의 단일 반송파 시스템보다 높은 대역폭의 효율성과 함께 데이터를 고속으로 전송할 수 있으며, 다중 경로 페이딩 환경과 ISI(Inter Symbol Interference) 협대역 간섭에 강한 장점을 가지고 있다. 또한 송수신단에서 IFFT와 FFT를 이용해 시스템을 간단히 구현할 수 있어 하드웨어의 복잡도를 줄일 수 있는 장점이 있다.

한편 OFDM 시스템에서 데이터를 실은 부반송파가 IFFT를 거치는 과정에서 부반송파 신호들이 동일한 위상으로 중첩되는 경우에 높은 PAPR(Peak-to-Average Power Ratio)를 갖게 된다. OFDM 신호의 높은 PAPR 특성은 다중 반송파 시스템의 큰 단점 중 하나로서 ADC(Analog to Digital Converter) 및 DAC(Digital to Analog Converter)의 복잡도를 증가시킬 뿐 아니라 전력 증폭기(power amplifier)의 포화 영역에서 동작하게 함으로써 증폭기의 효율을 크게 떨어뜨린다.

PAPR을 감소시키기 위해 제안된 여러 기법 중 본 논문에서 사용하는 선형 피크 제거 기법(linear peak cancellation)은 참조 신호를 사용하여 신호의 피크로부터 참조 신호를 뺌으로써 높은 피크를 제거할 수 있는 기법이다. 이 기법은 비슷한 신호 왜곡 기법에 속하는 클리핑(clipping)이나 피크 윈도우링(peak windowing) 기법과 비교하여 신호의 왜곡이 작기 때문에 BER 성능이 좋고, 대역 외 방사(out-of-band emission)로 인한 에너지 방출이 크지 않다는 장점이 있다^[2]. 그러나 선형 피크 제거 기법도 역시 PAPR이 감소하는 대신 BER 성능 저하와 대역 외 방사 문제가 발생하므로 이러한 단점을 보완할 필요가 있다.

한편 위성 Wibro 시스템의 RF 송신단에서 주로 사용되는 TWTA(Traveling Wave Tube Amplifier)와 같은 고풍력 전력증폭기(HPA: High Power Amplifier)는 비선형적 출력 특성을 가지고 있다. 증폭기의 비선형 특성 또한 대역 외 방사로 신호의 에너지를 확산시켜 스펙트럼의 효율을 떨어뜨리고 수신단에서 에리올을 증가시키는 등 시스템의 성능을 저하시키는 큰 문제점으로 작용한다.

전력증폭기의 비선형 왜곡의 영향을 줄이기 위한 가장 기본적인 방법은 입력 신호의 최대 진폭이 선형 영역에서 작동하도록 백오프(back-off)를 설정하여 증폭기의 평균 동작 지점을 포화 지점에서 선형

영역으로 이동시키는 방법이 있다. 그러나 이 방법은 증폭기의 증폭 가능한 최대 전력을 낮추기 때문에 증폭기의 효율을 떨어뜨리는 단점을 가지고 있다.

이러한 비선형성 왜곡을 피하기 위해 연구된 가장 효율적인 방법 중의 하나는 증폭기의 비선형성을 상쇄시키는 사전 왜곡 기법을 사용하는 것이다. 이 방법은 사전 왜곡기(PD: Pre-Distorter)를 입력 신호와 증폭기 사이에 삽입하여 증폭기 출력 신호의 비선형적 진폭 왜곡을 선형적으로 만들고 비선형적 위상 천이를 바로 잡아줌으로써 비선형 왜곡을 상쇄시켜 증폭기의 효율을 떨어뜨리지 않으면서도 BER 성능을 향상시키는 방법이다.

본 논문에서는 PAPR 감소 기법 및 전력 증폭기의 사전 왜곡 기법을 혼합 적용하는 시스템을 제안하고 성능 향상 정도를 비교 분석하였다. 제안하는 시스템에서는 먼저 선형 피크 제거 기법을 통해 OFDM 신호의 PAPR을 감소시키고 피크 제거 보상 기법인 능동 성장도 확장 기법을 적용한 후 rational 필터를 사용한 사전 왜곡기를 적용하여 전력 증폭기의 비선형성을 개선하도록 한다. 이는 높은 PAPR을 갖는 WiBro OFDM 신호의 피크를 줄여 전력증폭기의 증폭 효율을 높이고 전력증폭기의 비선형적 증폭 특성을 보상함으로써 Input Back-off(IBO)를 낮게 설정해도 입력 신호의 신호의 왜곡이 거의 발생하지 않도록 한다.

II. OFDM 신호의 특성과 TWTA 모델

OFDM의 출력 신호는 PSK 또는 QAM 등으로 변조된 고속의 직렬 데이터 심볼은 저속의 병렬 데이터로 변환되어 주파수 영역에서 N 개의 부반송파에 실은 뒤 IFFT(Inverse Fast Fourier Transform)를 거쳐 시간 영역의 OFDM 신호가 된다. 전체 N 개의 부반송파에서 n 번째 부반송파의 주파수 영역의 심볼 $X(n)$ 이 IFFT를 거친 시간 영역의 OFDM 신호 $x(t)$ 는 식 (1)과 같이 표현된다. 여기서 T 는 OFDM 유효 심볼 주기이다.

$$x(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N X(n) e^{j2\pi \frac{n}{T} t}, \quad 0 \leq t \leq T \quad (1)$$

식 (1)에서와 같이 다중 반송파를 사용하는 OF-

DM 시스템에서는 각각의 주파수 영역의 부반송파 심볼들이 IFFT를 거쳐 시간 영역에서 출력 신호의 합으로 나타나면서 N 개의 신호가 동일한 위상으로 중첩되는 경우 최대 전력이 평균 전력의 최대 N 배까지 커지면서 PAPR이 매우 높아지는 것이 OFDM 시스템의 단점이다. PAPR은 하나의 심볼이 전송되는 시간에 대해서 전송 신호의 최대 전력과 전송 신호의 평균 전력의 비율로 나타나며, 식 (2)로 정의된다.

$$PAPR_{(dB)} = 10 \log_{10} \frac{\max[|x(t)|]^2}{E[|x(t)|^2]} \quad (2)$$

변조 심볼 $x(n)$ 이 QPSK로 변조되고 부반송파 N 이 충분히 크다면 IFFT 변조된 시간 영역의 신호 $x(t)$ 의 실수부와 허수부는 각각 중심극한정리에 의해 평균이 0이고 분산이 1/2인 가우시안 분포를 가진다. 따라서 OFDM 신호의 진폭은 레일리(Rayleigh) 분포를 갖게 되어 전력 분포는 평균이 0이고 자유도 2인 central chi-square 분포가 되므로 식 (3)과 같은 누적 분포를 갖는다^[2].

$$F(z) = \int_0^z \frac{1}{2 \cdot \sigma^2} e^{-\frac{u}{2\sigma^2}} = 1 - e^{-z} \quad (\sigma = \frac{1}{2} \text{ for QPSK mapping}) \quad (3)$$

이 때 식 (3)에서 각 OFDM 신호 샘플들이 서로 무상관(uncorrelated)할 때 OFDM 신호의 PAPR이 특정 임계 PAPR 레벨 z 를 초과할 확률은 식 (4)과 같이 CCDF(Complementary Cumulative Distribution Function)로 표현할 수 있다^[2].

$$\Pr(PAPR > z) = 1 - F(z)^N = 1 - (1 - e^{-z})^N \quad (4)$$

한편 위성 하향 링크 OFDM 신호는 게이트 스테이션으로부터 전송되어 위성 트랜스폰더 증폭기를 거쳐 사용자 단말로 전송된다. 이 때 대부분의 무선 송신시스템에서는 충분한 송신 전력을 얻기 위해 TWTA와 같은 고효율 전력증폭기를 사용하게 되는데, 고효율 전력증폭기가 갖는 출력의 비선형적 특성은 대역 내 비선형 왜곡과 대역 외 전력 스펙트럼 방출의 원인이 된다. 대역 내 왜곡은 ISI(Inter-Symbol Interference)을 일으켜 BER 성능을 감소시키는 한편 대역 외 스펙트럼의 방출은 ACI(Adjacent Channel Interference)를 일으키게 된다^[3]. OFDM 신호가 일반적

인 단일 반송파 시스템의 신호를 전송할 때 설정하는 3 dB의 IBO로 증폭기를 통과하면 높은 PAPR로 인해 증폭기의 포화 영역을 넘어 동작하게 된다. 따라서 OFDM 신호를 전송할 경우, 전력증폭기의 IBO를 높게 설정해야 하므로 증폭기의 효율을 크게 떨어뜨리며^[1], 일반적으로 전력증폭기의 IBO를 10 dB 이상으로 설정해야 한다^[4].

TWTA의 비선형 특성은 Saleh가 제안한 전력 증폭기의 AM-AM 및 AM-PM 변환 모델^[5]이 널리 사용되고 있으며 이 모델은 식 (5) 및 (6)과 같이 나타난다. 여기서 함수 $G(\cdot)$ 와 $\Phi(\cdot)$ 은 입력 신호의 진폭 $r(t)=|x(t)|$ 에 대한 함수이며 파라미터는 각각 (α_G, β_G) 과 $(\alpha_\Phi, \beta_\Phi)$ 이다.

$$G(r(t)) = \frac{\alpha_G r(t)}{1 + \beta_G r^2(t)} \quad (5)$$

$$\Phi(r(t)) = \frac{\alpha_\Phi r^2(t)}{1 + \beta_\Phi r^2(t)} \quad (6)$$

식 (7)의 파라미터는 TWTA의 비선형 특성을 Saleh 모델의 AM-AM, AM-PM 변환으로 표현하고 사전 왜곡기를 적용하기 위한 값이며, 이는 커브피팅(curve fitting) 기법을 사용해 Kaye, George, Eric이 추출한 값^[5]이다.

$$\begin{aligned} \alpha_G &= 2.1587, \beta_G = 1.1517 \\ \alpha_\Phi &= 4.033, \beta_\Phi = 9.1040 \end{aligned} \quad (7)$$

식 (5)~(7)을 적용한 TWTA 모델의 특성 곡선은 그림 1과 같다.

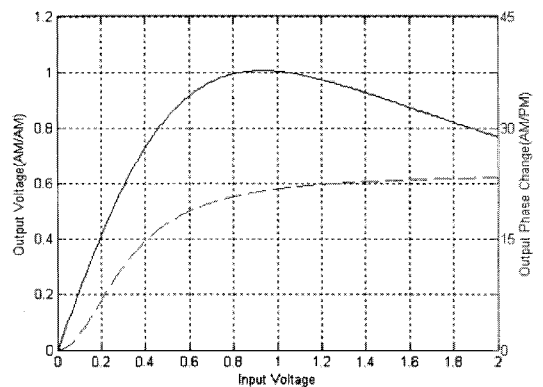


그림 1. TWTA 모델
Fig. 1. TWTA model.

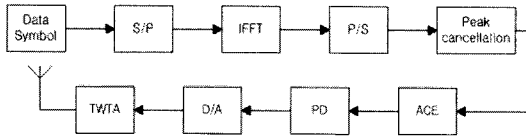


그림 2. 제안하는 시스템 모델의 블록도
Fig. 2. Block diagram of the proposed system model.

III. 시스템의 성능 향상을 위한 알고리즘

본 논문에서는 위성 Wibro OFDM 시스템을 기반으로 전력증폭기의 효율을 높이고 비선형성을 개선하기 위한 여러 기법들을 순차적으로 적용하여 그 성능 향상 정도를 비교하였다. 제안하는 시스템은 그림 2의 블록도와 같다.

먼저 Peak cancellation 블록에서 OFDM 신호의 높은 진폭을 낮추어 PAPR을 감소시키는 선형 피크 제거 기법을 적용한 뒤 ACE 블록에서 Peak cancellation 블록에서 발생한 대역 외 방사 스펙트럼과 낮아진 BER 성능을 보상하기 위해 능동 성상도 확장(ACE: Active Constellation Extension) 기법을 적용하여 전력증폭기에 입력되는 신호의 PAPR을 낮춘다. 그리고 PD 블록에서 사전 왜곡기를 사용하여 전력증폭기의 비선형성을 개선하는 사전 왜곡 기법을 적용함으로써 증폭기의 증폭 효율을 높이는 다단계의 기법을 적용한다.

3-1 선형 피크 제거(LPC: Linear Peak Cancellation) 기법

OFDM 신호의 높은 PAPR을 감소시키는 가장 간단하고 효율적인 방법은 클리핑 기법과 같이 높은 최대 진폭을 일정 레벨 이하로 낮추는 것이다. 그런데 이 기법은 신호 진폭을 일괄적으로 잘라냄으로써 심한 왜곡이 발생하여 자기 간섭(self-interference)으로 인한 BER 성능 감소와 클리핑 노이즈로 인한 대역 외 방사를 초래하게 된다. 이러한 단점을 최대한 줄이면서 최대 진폭을 낮추는 방법으로 선형 피크 제거 기법이 있다. 이는 OFDM 신호의 일정 임계 레벨을 초과하는 진폭만 골라 time-shift 및 scale된 참조 신호의 크기만큼 빼는 방법이다^[6].

참조 신호는 식 (8)로 주어지며 진폭 $r_n = |x(n)|$, l 은 피크 제거 레벨, $a = \max(r_n) - l$ 그리고 $\rho = w \cdot a$

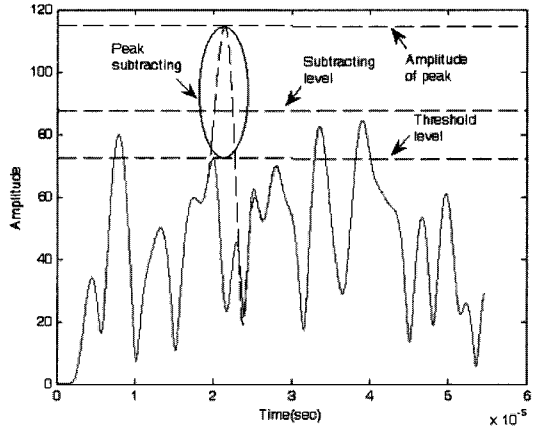


그림 3. OFDM 신호의 피크 제거
Fig. 3. Peak cancellation in OFDM signal.

($0 < w < 1$)을 의미한다.

$$ref(n) = \begin{cases} a, & r_n > l + \rho \\ 0, & r_n \leq l + \rho \end{cases} \quad (8)$$

이 참조 신호를 피크 제거 기법에 사용한 신호의 진폭은 식 (9)이며 여기서 l_{th} 은 진폭의 임계 레벨로써 그림 3과 같이 나타낼 수 있다.

$$r_{pc}(n) = \begin{cases} r_n - a, & r_n > l_{th} \\ r_n, & r_n \leq l_{th} \end{cases} \quad (9)$$

a, l_{th}, ρ, w 값들은 신중하게 선택되어야 하는데 적용되는 시스템마다 FFT크기 및 유효 부반송파의 수, 심볼 매핑 방식 등이 다르며 이들 값의 크기에 따라 PAPR 감소 성능 및 BER 성능이 변화되기 때문이다. 따라서 BER 감소 및 out-of-band 전력 방출은 최소로 유지하면서 PAPR 감소 성능은 최대가 되도록 하는 최적값을 실험적으로 찾아낼 필요가 있다.

3-2 능동 성상도 확장(ACE: Active Constellation Extension) 기법

OFDM 신호에 최적화된 피크 제거 기법을 적용하더라도 어느 정도의 BER 성능의 감소와 대역 외 방사는 피할 수 없다. 따라서 피크 제거 기법을 적용한 후에 능동 성상도 확장 기법^[7]을 적용하여 이러한 문제를 보상할 수 있다. 그림 4는 그림 2의 ACE 블록의 세부 과정을 나타낸 것이다.

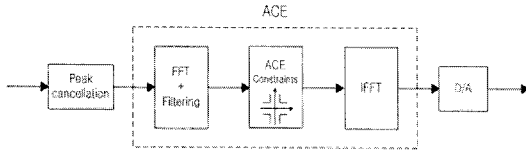


그림 4. ACE 기법의 블록도
Fig. 4. Block diagram of the ACE technique.

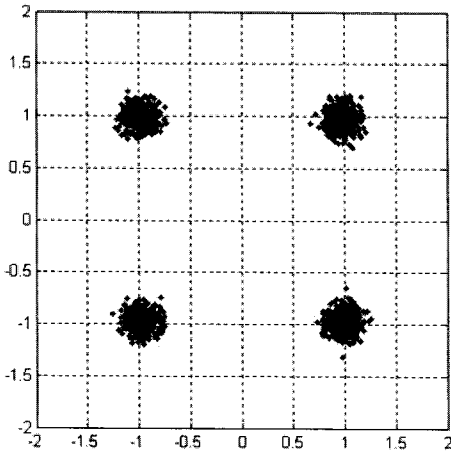


그림 5. 피크 제거 기법을 적용한 성상도
Fig. 5. Constellation of peak cancellation.

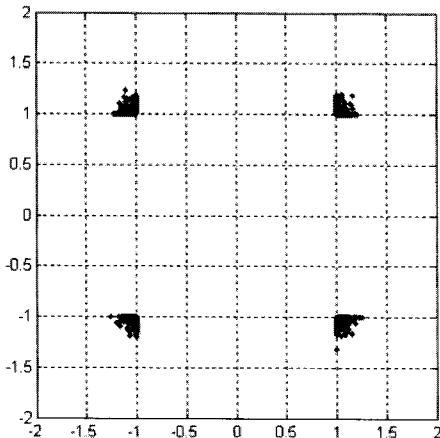


그림 6. 피크 제거 기법과 ACE 기법을 적용한 성상도
Fig. 6. Constellation of peak cancellation and ACE.

클리핑 기법으로 피크가 제거된 시간 영역의 OFDM 신호를 FFT를 통해 주파수 영역에서 볼 때, 데이터 심볼은 클리핑 노이즈에 의해 그림 6과 같이 성상도가 흩어지게 되어 BER 성능 저하가 일어난다. 이렇게 분포된 데이터 심볼들 중에 결정 경계선

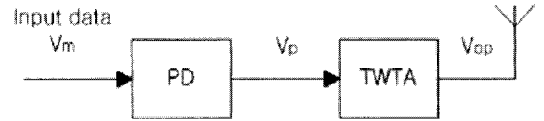


그림 7. Pre-distortion 기법의 블록도
Fig. 7. Block diagram of the pre-distortion technique.

(decision boundaries) 가까이에 위치한 데이터 심볼을 그림 7과 같이 제한 영역 안으로 확장시키는 것은 능동 성상도 확장 기법이라 한다^[8].

ACE 기법을 적용하면 PC기법에 의해 감소된 PAPR이 다시 어느 정도 증가하는 대신 원래 OFDM 신호에 가까운 BER 성능을 넘과 동시에 대역 외 방사도 함께 제거할 수 있다.

3-3 Pre-Distortion 기법

다항식으로 모델링 된 TWTA 및 사전 왜곡기 모델들은 차수의 한계로 인해 성능의 한계를 보일 수밖에 없다. 따라서 본 논문에서는 TWTA은 Saleh의 모델을 사용하고 이에 대해 Rational 필터를 이용한 PD 기법을 적용하였다^[3]. 여기서 사전 왜곡기의 진폭은 TWTA의 AM-AM 비선형 모델에 대한 정확한 역함수를 찾아 적용하고 사전 왜곡기의 위상은 TWTA의 AM-PM 왜곡 모델에 대한 절대값의 반대 부호를 TWTA의 입력 신호에 적용한다. 그림 2에서 PD 블록에 해당하는 사전 왜곡 기법을 거치는 OFDM 신호는 그림 8과 같다.

입력 신호는 식 (10)과 같이 복소 신호가 진폭과 위상으로 표현된 신호이다.

$$V_m(t) = r(t)e^{j\theta(t)} \quad (10)$$

입력 신호가 전력증폭기를 통과하여 진폭 및 위상이 왜곡된 출력 신호는 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 $G(\cdot)$ 와 $\Phi(\cdot)$ 는 식 (5)와 (6)으로부터 전력증폭기의 진폭과 위상에 대한 비선형성을 나타내는 AM-AM 및 AM-PM 변환 특성이다.

$$V_a(t) = G(r(t))e^{j(\Phi(r(t))+\theta(t))} \quad (11)$$

이제 입력 신호가 전력증폭기를 통과하기 전에 사전 왜곡기를 거친 신호를 식 (12)와 같다고 가정한다면 $F(\cdot)$ 와 $H(\cdot)$ 는 각각 진폭 및 위상에 대한 사전

왜곡 함수가 되며

$$V_p(t) = F(r(t))e^{j(H(r(t))+\theta(t))} \quad (12)$$

사전 왜곡기를 거친 신호 $V_p(t)$ 가 전력증폭기를 통과한 출력 신호는 식 (13)과 같이 표현된다.

$$V_{op}(t) = G(F(r(t)))e^{j(\Phi(F(r(t)))+H(r(t))+\theta(t))} \quad (13)$$

따라서 진폭에 대한 함수 $F(\cdot)$ 가 $G(\cdot)$ 의 역함수이고 위상에 대한 함수 $H(\cdot)$ 가 $\Phi(\cdot)$ 의 반대 부호이므로 전력증폭기를 통과하면 식 (14)와 (15)가 된다.

$$G(F(r(t))) = r(t) \quad (14)$$

$$H(r(t)) + \Phi(F(r(t))) = 0 \quad (15)$$

임의의 시간 t 에 대해 PD에 입력되는 신호의 진폭을 x 라 하고 사전 왜곡기로부터 출력되는 신호의 진폭을 y 라 하면 식 (14)에서 나타난 PD와 전력증폭기를 통과한 선형 응답은 식 (5)로부터 식 (16)과 같이 표현된다.

$$G(y) = \frac{\alpha_A y}{1 + \beta_A y^2} = x \quad (16)$$

식 (16)을 이차방정식의 형태로 변환하면 식 (17)이 되며,

$$(\beta_A x)y^2 - (\alpha_A)y + x = 0 \quad (17)$$

사전 왜곡기 출력 신호의 진폭 y 에 대한 해를 구하면 식 (18)과 같다.

$$y = \frac{-\alpha_A \pm \sqrt{\alpha_A^2 - 4\beta_A x^2}}{2\beta_A x} \quad (18)$$

한편 위상 사전 왜곡 함수는 그림 7의 블록도에서와 같이 사전 왜곡기 출력 신호의 진폭에 대한 함수로 표현되므로 식 (6)과 식 (15)에 의해서 식 (19)과 같이 나타낼 수 있다.

$$H(y) = -\frac{\alpha_A y^2}{1 + \beta_A y^2} \quad (19)$$

그러므로 진폭과 위상에 대한 사전 왜곡 함수 $F(\cdot)$ 와 $H(\cdot)$ 는 다음과 같이 정리 될 수 있다.

$$F(r(t)) = \left| \frac{-\alpha_A - \sqrt{\alpha_A^2 - 4\beta_A r^2(t)}}{2\beta_A r(t)} \right| \quad (20)$$

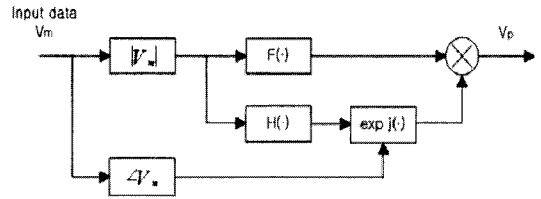


그림 8. 사전 왜곡기의 블록도
Fig. 8. Block diagram of the pre-distorter.

$$H(F(r(t))) = -\frac{\alpha_A F^2(r(t))}{1 + \beta_A F^2(r(t))} \quad (21)$$

식 (20)과 (21)을 이용한 사전 왜곡기의 블록도는 그림 8과 같이 나타낼 수 있다.

이렇게 앞서 설명한 PAPR 감소 기법인 선형 피크 제거 기법과 보상 기법인 ACE 기법을 적용하여 입력 신호의 IBO를 낮출 수 있어 전력증폭기의 증폭 효율을 향상시킬 수 있으며, 사전 왜곡 기법을 함께 적용하여 전력 증폭기의 비선형성을 개선하면 대역 내 비선형 왜곡을 제거하고 대역 외 스펙트럼 방출을 줄여 BER 성능을 크게 향상시킬 수 있다.

IV. 모의실험

4-1 모의실험의 시스템 모델

모의실험은 WiBro의 시스템을 모델로 하여 AWGN 채널 환경에서 수행되었다. 시스템의 파라미터는 표 1과 같다.

4-2 제안된 시스템의 모의실험 결과

표 1. 모의실험 시스템 파라미터
Table 1. System parameters of simulation.

파라미터	값
채널 대역폭	9 MHz
유효 채널 대역폭	8.75 MHz
FFT 크기	1,024
부반송파 수	864
부반송파 대역폭	9.77 kHz
반송파 주파수	2.3 GHz
샘플링 주파수	365.7 MHz
샘플링 간격	2.73 nsec

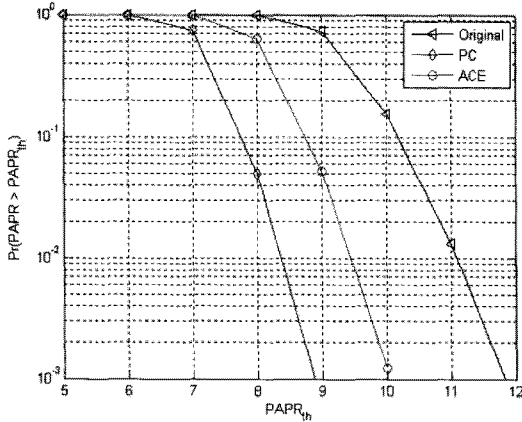


그림 9. PC 기법 및 ACE 기법을 적용하여 나타낸 CCDF

Fig. 9. CCDF that applied PC and ACE techniques.

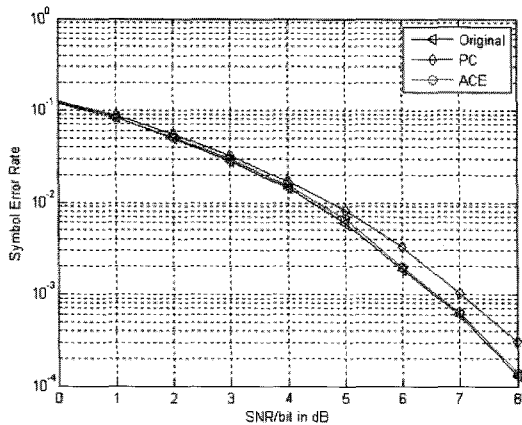


그림 10. PAPR 감소 기법의 BER 성능 곡선

Fig. 10. BER curve of the PAPR reduction schemes.

먼저 선형 피크 제거 기법을 적용하여 피크 제거 레벨 l 과 w 를 정하면 a 값과 ρ 값을 알 수 있으므로 최대 입력 레벨 l_m 와 함께 참조 함수가 결정된다. 이 때 l 값과 w 값에 따라 PAPR 감소 성능이 달라져 증폭기 효율성에 영향을 미치기 때문에 시스템 모델에 최적화된 l 값과 w 값을 찾을 필요가 있다. 시뮬레이션 모델에 최적화되어 결정된 레퍼런스 함수와 l_m 값을 이용한 피크 제거 기법 및 능동 성장도 확장 기법을 적용하여 나타낸 CCDF는 그림 10과 같다.

그림 10에서 피크 제거 기법만을 적용한 경우와 피크 제거 기법과 능동 성장도 확장 기법을 결합한 경우를 원래 OFDM 신호와 CCDF로 비교하였다. 피

크 제거 기법만 사용한 경우가 CCDF가 가장 많이 감소하며 피크 제거 기법과 능동 성장도 확장 기법을 결합한 경우에 PAPR가 10 dB을 넘을 확률이 원래 OFDM 신호에 비해 약 1/100 정도로 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 그림 6과 같이 능동 성장도 확장 기법을 통해 데이터 심볼들을 제한 영역 안으로 확장시키는 과정에서 신호의 피크가 다시 증가하여 피크 제거 기법만 사용하는 경우보다 PAPR이 다소 높아지기 때문이다.

피크 제거 기법만 사용한 경우는 피크가 가장 많이 감소하지만 피크 제거 기법과 능동 성장도 확장 기법을 함께 적용한 경우보다 BER 성능이 떨어지는 것을 그림 10을 통해 알 수 있다. 반면 피크 제거 기법과 능동 성장도 확장 기법을 함께 적용한 경우는 원래 신호의 BER과 동일한 성능을 보여주는 것을 알 수 있다. 능동 성장도 확장 기법으로 성장도를 보정하여 에러율을 낮추어 주었기 때문이다. 따라서 피크 제거 기법과 능동 성장도 확장 기법을 함께 적용한 경우 BER은 원래 OFDM 신호와 동일하게 유지되면서 PAPR이 감소하므로 입력 신호의 IBO를 낮출 수 있어 TWTA의 증폭 효율을 향상시킬 수 있다.

이후 능동 성장도 확장 기법을 거친 OFDM 신호가 TWTA를 통과할 때 발생하는 진폭과 위상의 비선형 왜곡을 보정하기 위하여 사전 왜곡 기법을 적용한다. 그림 7의 사전 왜곡기를 통과한 OFDM 신호는 그림 11 및 그림 12와 같이 왜곡이 보정된다.

그림 13은 SNR이 8 dB이고 IBO가 0 dB일 때 사

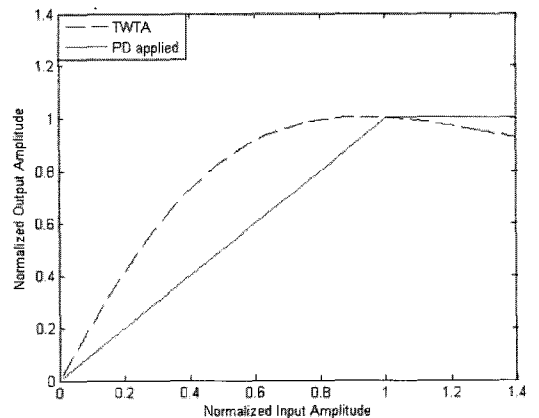


그림 11. PD 기법을 적용한 TWTA의 AM-AM 응답
Fig. 11. AM-AM response of the TWTA with PD.

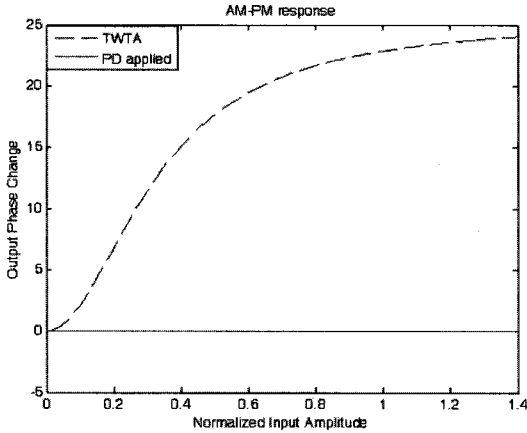


그림 12. PD 기법을 적용한 TWTA의 AM-PM 응답
Fig. 12. AM-PM response of the TWTA with PD.

전 왜곡 기법을 적용하지 않고 TWTA를 거쳐 수신된 신호의 성상도이다. 수신된 신호가 TWTA를 통과하면서 비선형적 특성에 의해 데이터 심볼이 분산되고 위상이 회전하여 많은 심볼이 결정 경계 영역을 넘어서는 것을 확인할 수 있다. 반면에 그림 14에서 나타난 것처럼 이고 동일 조건인 IBO가 0 dB일 때 사전 왜곡 기법이 적용된 신호가 TWTA 모델을 거쳐 수신된 데이터 심볼은 증폭기의 비선형성이 보정되면서 에러율이 약 1.1×10^{-1} 에서 약 2.8×10^{-3} 정도로 크게 줄어들어 결정 경계 영역을 넘는 심볼이 거의 없음을 확인할 수 있다.

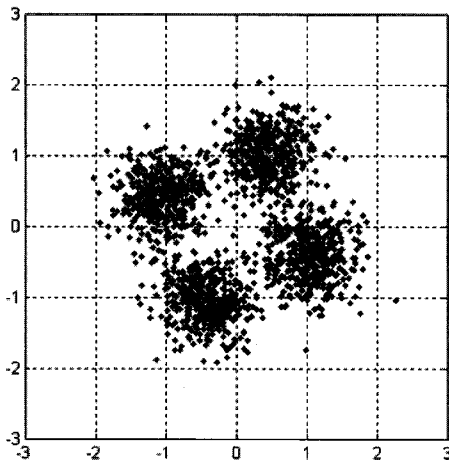


그림 13. PD 기법을 적용하지 않은 수신 신호의 성상도
Fig. 13. Received signal constellation without PD.

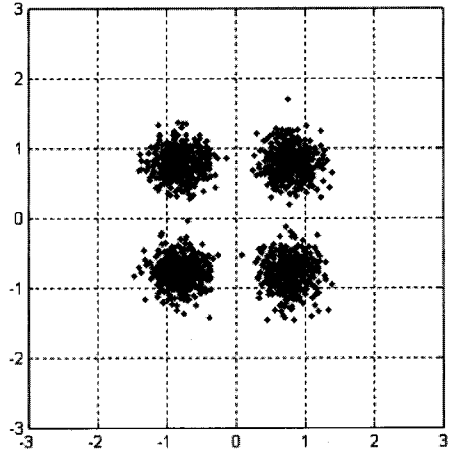


그림 14. PD 기법을 적용한 수신 신호의 성상도
Fig. 14. Received signal constellation with PD.

사전 왜곡 기법을 통해 TWTA의 비선형적 특성을 선형적으로 보정함으로써 대역 외 전력 스펙트럼 방출 또한 줄일 수 있다. 그림 15의 PSD(Power Spectral Density)에서 볼 수 있듯이 동일한 IBO로 설정된 증폭기의 OFDM 입력 신호에 대해 사전 왜곡기를 거친 신호는 대역 외 스펙트럼 방출이 크게 낮아져 ICI가 감소된다. 사전 왜곡 기법을 적용하지 않은 (A)의 경우보다 적용한 (B)의 경우의 스펙트럼에서 신호 대역 외로 벗어난 부엽(side lobe)이 크게 줄어든 것을 확인할 수 있다.

한편 IBO에 따라서 TWTA의 포화점을 초과하는 OFDM 신호의 피크의 수가 달라지기 때문에 IBO를

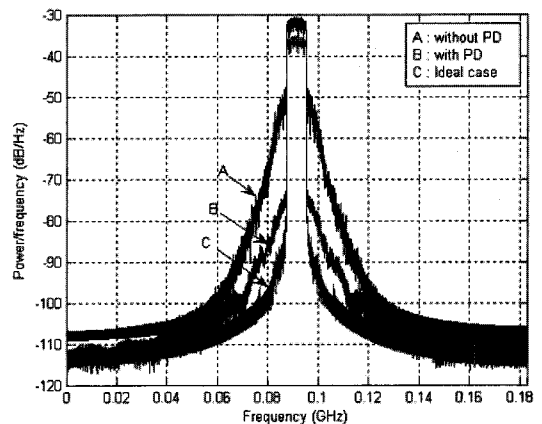


그림 15. 증폭기를 통과한 신호의 스펙트럼
Fig. 15. PSD of the output signals through PA.

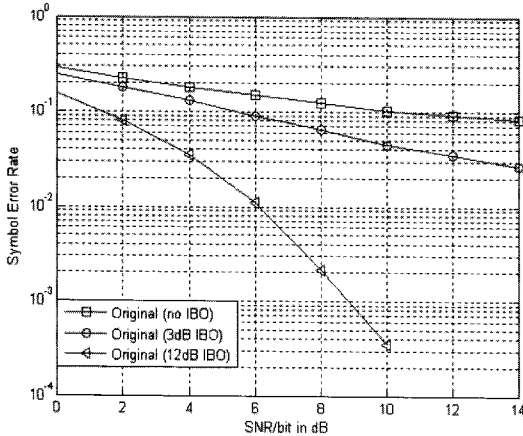


그림 16. Input backoff에 따른 BER 성능 곡선
Fig. 16. BER curve for the different input backoffs.

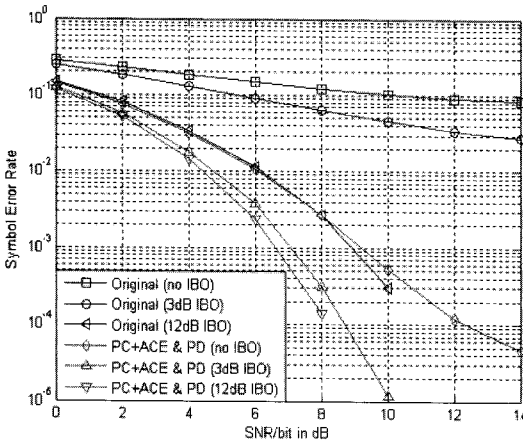


그림 17. 여러 보상 기법들을 적용한 BER 성능 곡선
Fig. 17. BER curve with compensation techniques.

높게 설정할수록 신호가 왜곡이 작아진다. 그림 16은 IBO의 값을 조정하면서 PD를 거치지 않고 TWTA를 통과한 신호의 SER 성능 곡선이다.

일반적인 IBO 기준인 3 dB로 IBO를 설정해 줄 때 에러율 10^{-1} 기준으로 4 dB 가량 성능이 향상되며 IBO를 12 dB로 설정해 줄 때는 그보다 훨씬 큰 9 dB SER 성능 향상이 되는 것을 볼 수 있다. 그러나 TWTA에 IBO를 높게 설정해 줄수록 BER 성능 향상은 되지만, 전력 증폭기의 평균 증폭 동작점을 낮추는 것이므로 증폭 효율을 감소시키게 된다.

그림 17은 제안된 시스템 모델을 적용해 얻은 SER 곡선과 기존의 시스템 모델에서 일정 IBO를 적

용해 얻은 SER 곡선을 비교한 것이다. 붉은 실선의 곡선에서 알 수 있듯이 사전 왜곡 기법을 적용하면 IBO를 낮게 잡아도 높은 에러율 감소 성능이 나타난다.

사전 왜곡기를 사용하지 않은 시스템에서 IBO=12 dB로 설정된 TWTA를 통과한 신호의 SER 성능과 제안하는 시스템에서 IBO=0 dB로 설정된 TWTA를 통과한 신호의 SER 성능이 거의 동일한 것을 확인할 수 있다. 따라서 출력 신호의 에러율로 비교할 때 제안하는 시스템에서 IBO=0 dB로 설정한 TWTA 증폭 효율은 아무 기법을 적용하지 않은 시스템의 TWTA에 IBO=12 dB로 적용했을 때의 증폭 성능과 동일한 증폭 효율을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 위성 WiBro 시스템의 기반 기술로 사용되는 OFDM 시스템의 가장 큰 문제점인 높은 PAPR을 BER 성능 감소 없이 효율적으로 줄일 수 있는 기법과 사전 왜곡 기법을 함께 사용하여 전력 증폭기의 증폭 효율을 높이는 동시에 TWTA의 비선형적 특성 때문에 발생하는 대역 내 비선형 왜곡과 대역 외 전력 스펙트럼 방출을 줄일 수 있는 시스템을 소개하였다.

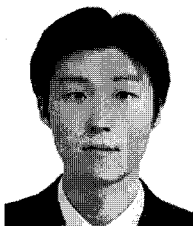
피크 제거와 능동 성장도 확장의 결합 기법은 피크 제거 기법만 사용하는 경우보다는 CCDF 성능이 다소 저하되지만 성장도를 보정함으로써 PAPR이 감소된 OFDM 신호의 BER 성능을 원래 신호의 BER 성능과 동일하게 유지할 수가 있다. 따라서 평균 전력보다 높은 피크의 수가 줄어들어 TWTA의 평균 동작점을 높일 수 있으므로 TWTA의 입력 신호의 IBO를 낮출 수 있다. 또한 TWTA의 비선형적 왜곡 문제를 해결하기 위해서 사전 왜곡 기법을 추가로 적용함으로써 아무 기법도 적용하지 않은 시스템보다 12 dB IBO를 설정한 것과 거의 같은 BER 성능을 얻을 수 있다.

따라서 제안된 피크 제거 기법과 능동 성장도 확장 기법 그리고 사전 왜곡 기법을 모두 OFDM 시스템에 적용하면 높은 PAPR을 낮추어서 전력증폭기의 증폭 효율을 향상시키고 동시에 TWTA의 비선형 왜곡을 줄여 BER 성능을 크게 높일 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] Dong-Soo Song, Pyung-Joo Park, Myung-Hwan Seo, and Byung-Seub Lee, "New OFDM schemes robust to doppler and par effects for broadband mobile internet services via satellite transponder", 통신위성우주산업연구회 논문지, 2(1), pp. 7-13, 2007년 7월.
- [2] Richard van Nee, Ramjee Prasad, *OFDM Wireless Multimedia Communications*, Artech House Boston London, pp. 119-126, 2000.
- [3] Sukhdeep Mahil, Abu B. Sesay, "Rational function based predistorter for traveling wave tube amplifiers", *IEEE Trans. on Broadcasting*, vol. 51, no. 1, pp. 77-83, Mar. 2005.
- [4] Hugo Durney Wasaff, Josep Sala Alvarez, "Adaptive pre-distortion for nonlinear high power amplifiers in OFDM systems", *Signal Processing & Communications*, pp. 99-108, Feb. 2004.
- [5] Adel A. M. Saleh, "Frequency-independent and frequency-dependent nonlinear models of TWT amplifiers", *IEEE Trans. on Communication*, vol. com-29, no. 11, pp. 1715-1720, Nov. 1981.
- [6] Lei Wang, Kyong kuk Cho, Dong weon Yoon, and Sang Kyu Park, "A recoverable peak cancellation technique for PAPR reduction of OFDM signals", *IEEE Trans*, Department of Electronics and Computer Engineering, Hanyang University, pp. 1124-1127, Jun. 2006.
- [7] Andreas Saul, "Generalized active constellation extension for peak reduction in OFDM systems", *IEEE Trans, DoCoMo Euro-Labs*, pp. 1974-1979, May 2005.
- [8] Brian Scott Krongold, Douglas L. Jones, "PAR reduction in OFDM via active constellation extension", *IEEE Trans. on Broadcasting*, vol. 49, no. 3, pp. 258-268, Sep. 2003.

박 평 주



2008년 2월: 한국항공대학교 정보통신공학과 (공학사)
 2008년 3월~현재: 한국항공대학교 정보통신공학과 석사과정
 [주 관심분야] 디지털 신호 처리, OFDM

이 병 섭



1979년 2월: 한국항공대학교 전자공학과 (공학사)
 1981년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학석사)
 1992년 2월: New Jersey Institute of Technology (공학박사)
 1992년~현재: 한국항공대학교 항공전자 및 정보통신공학부 교수
 [주 관심분야] 디지털 신호 처리, 위성 통신, Adaptive Array

서 명 환



2008년 2월: 한국항공대학교 정보통신공학과 (공학사)
 2008년 3월~현재: 한국항공대학교 정보통신공학과 석사과정
 [주 관심분야] 디지털 신호 처리, 바이오 레이더