

위성 WiBro의 HPA 비선형 왜곡특성 및 보상기술

이병섭 | 박평주 | 서명환 | Robin Shrestha

한국항공대학교

요약

본고에서는 위성을 이용하여 WiBro(Wide Broadband) 서비스를 제공하는데 있어서 WiBro 신호를 위성중계기를 통해 송수신할 경우, OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 신호가 갖고 있는 높은 PAPR(Peak-to-Average Power Ratio) 특성으로 인해 발생할 수 있는 전력증폭기의 비선형왜곡 현상에 대해서 기술하였다. 그리고 이를 효과적으로 극복할 수 있는 여러 방법들을 소개하고 모의실험을 통해 그 유효성을 확인하였다.

I. 서론

Mobile WiMax로 불리는 WiBro 서비스는 국내 굴지의 IT 업체와 통신 사업자의 국제적인 노력으로 국제 표준으로 채택되어 한국이 주도하는 차세대 광대역 이동무선 시스템으로서 자리매김하고 있다. 한편으로 한국전자통신연구원(ETRI)을 주축으로 초고속 철도 관련기관과 KT전문가로 구성된 위원회를 구성하여 초고속 열차와 위성을 이용한 WiBro 시스템 구축에 대한 기술적, 사업적 타당성을 심도 있게 검토해왔다. 그 결과 초고속 열차가 수출산업으로써 경쟁력을 갖기 위해서는 글로벌 이동통신망 시스템의 탑재가 요구되며 특히 급진전되고 있는 동북아를 관통하여 유럽으로 연결되는 철도망을 고려할 경우, 넓은 통신 커버리지를 확보할 수 있는 위성을 이용한 위성 WiBro가 기술적, 경

제적인 면에서 이에 부응하는 광대역 이동무선 시스템 중 하나로 거론되고 있다.[1]

WiBro 시스템의 물리계층 표준으로 사용되고 있는 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)은 현재 3세대 휴대전화 통신 시스템의 기반인 WCDMA(Wideband Code Division Multiple Access)와 함께 폭발적으로 증가하는 이동통신 수요를 수용할 수 있는 효과적인 통신방식으로 평가되고 있다. OFDM 방식은 한정된 주파수 자원을 효율적으로 이용하면서 데이터를 고속으로 전송할 수 있을 뿐만 아니라 FFT/IFFT에 의해 단순하고 신뢰성 높은 변복조 방식을 사용하는 장점으로 인해 이미 디지털 오디오/비디오 방송(DAB/DVB) 및 디지털 지상파 방송(DMB)과 무선 LAN 등에서 폭넓게 적용되고 있다.

본고에서는 이러한 배경을 바탕으로 위성을 이용하여 OFDM신호를 전송하는 경우, 타 통신시스템의 신호에 비해 상대적으로 높은 PAPR로 인해 위성 중계기의 고출력전력증폭기(HPA-High Power Amplifier)에서 발생하는 비선형 왜곡특성에 대해서 기술하고 이에 대한 대처방안에 대하여 알아본다.

II. 위성 WiBro의 HPA비선형 왜곡특성

OFDM은 WiBro 시스템에서 데이터를 전송하기 위한 기반 기술로서 송신 데이터를 다수의 직교(orthogonal)하는 협대역 반송파로 다중화시키는 변조 방식이다. 다시 말해, 고속

의 전송률을 가진 직렬 데이터 열을 저속의 전송률을 가진 많은 수의 병렬 데이터 열로 나누고, 이들을 다수의 부반송파(subcarrier)에 분할하여 동시에 나란히 전송하는 다중 반송파 전송방식을 말한다.

따라서 OFDM신호는 고속의 직렬 데이터 심볼을 저속의 병렬 데이터로 변환하여 주파수영역에서 N 개의 부반송파에 실은 뒤 IFFT(Inverse Fast Fourier Transform) 과정을 거쳐 시간 영역의 신호로 변환된다. 이 때 n 번째 부반송파의 데이터 심볼 $X(n)$ 이 IFFT를 거친 시간영역의 OFDM 신호 $x(t)$ 는 식 (1)과 같이 표현된다. 여기서 T 는 OFDM 유효심볼 주기이다.[2]

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

이렇게 OFDM 시스템에서 데이터를 실은 부반송파가 IFFT를 거쳐 OFDM신호로 생성되는 과정에서 부반송파 신호들이 동일한 위상으로 중첩되는 경우에 높은 PAPR(Peak-to-Average Power Ratio)를 갖게 되는 성질이 있다. PAPR은 식(1)과 같이 표현되는 신호 파형의 평균값 대비 최대 진폭값의 전력비율을 의미한다.

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

OFDM 신호의 높은 PAPR 특성은 다중반송파 시스템의 큰 단점 중 하나로서 ADC(Analog to Digital Converter) 및 DAC(Digital to Analog Converter)의 복잡도를 증가시킬 뿐 아니라 신호 송출시 전력증폭기의 포화 영역에서 동작하게 함으로써 증폭기의 성능을 크게 떨어뜨린다.[3]

위성 중계기의 주요 역할은 상향 링크를 통해 지상에서 전송된 신호를 증폭하여 하향링크로 재전송하는 기능이다. 정지궤도 Ku밴드(12-18GHz)의 경우 적도상공 고도 36,000km에 달하는 이격거리로 인해서 약 200dB 가량의 매우 큰 경로 손실이 발생한다. 따라서 위성중계기에서 주로 사용하는 TWTA(Traveling Wave Tube Amplifier)와 같은 고효율전력 증폭기에서는 이를 보상하기 위해 사용 가능한 모든 전력을 활용하여 신호를 증폭해야 하지만 여러 가지 원인으로 인해 사용할 수 있는 전력에 한계가 있다. 이러한 전력 제한 요소 중 하나로 전력증폭기의 비선형 특성에 의한 신호왜곡 및

간섭증가가 있다. 위성중계기의 전력증폭기는 입력신호에 대해서 출력 신호의 전력이 비선형적으로 비례하여 증폭되는 성질을 가지고 있기 때문에 위성 중계기의 최대 출력을 내기 위해 전력증폭기를 포화점에서 운용할 경우 신호가 왜곡되고 다른 채널의 주파수 스펙트럼에 영향을 주어 간섭을 증가시키므로 신호의 성능을 떨어뜨리는 결과를 가져온다. 따라서 위성에서는 중계기의 포화전력점으로부터 일정한 전력을 감소(back-off)시켜 선형증폭점에서 운용함으로써 이러한 간섭 발생을 미연에 방지한다.

일반적인 변조방식으로 변조된 신호의 PAPR은 3dB 정도이므로 이 신호를 위성 중계기에 입력할 경우 전력증폭기에서 back-off 또한 3dB정도로 설정하여 비선형 왜곡을 최소화할 수 있는 반면에, WiBro시스템의 OFDM 신호와 같이 큰 PAPR을 갖는 신호의 경우에는 전력증폭기에 3dB 가량의 back-off를 적용하는 운용전략에 문제점이 발생하게 된다. 그 이유는 OFDM 신호의 PAPR이 부반송파의 수에 비례하여 증가하므로 3dB로 back-off된 전력증폭기의 동작점을 OFDM신호의 평균전력에 일치시킨다 해도 여전히 높은 PAPR로 인해 중계기가 포화되어 비선형 간섭이 발생하기 때문이다.

특히 위성 WiBro는 Ka대역(20-30GHz)으로 구현될 가능성이 크며, Ka대역은 강우 등 기후변화에 의한 신호 감쇠가 크기 때문에 위성중계기의 전력제한적인 상황은 더욱 악화될 가능성이 있다.

따라서 위성WiBro시스템에서 위성 중계기를 통해 OFDM 신호를 효율적으로 전송하기 위한 방안이 필히 요구되며 다음 장에서는 기술된 문제를 개선하기 위해 제안된 몇 가지 기법을 살펴보고자 한다.

III. 비선형왜곡 보상기법

1. 신호 왜곡기법

PAPR 감소기법에는 신호왜곡기법이라 불리는 클리핑(Clipping) 및 선형 피크 제거기법(Linear Peak Cancellation) 등이 있으며 이는 신호 진폭이 일정 크기를 초과하는 진폭을 일정 레벨 이하로 낮추어 OFDM신호의 높은 PAPR을 감

소시키는 가장 간단한 방법에 속한다.

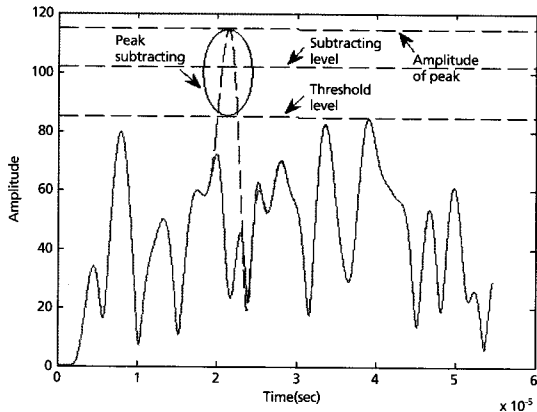
클리핑 기법은 OFDM 신호의 큰 진폭을 일정 레벨 이하가 되도록 일괄적으로 잘라냄으로써 가장 단순하면서도 쉽게 적용할 수 있지만 신호의 왜곡을 유발하여 BER(Bit Error Rate) 성능이 감소된다는 단점을 가지고 있다.

이러한 클리핑 기법의 단점을 보완하면서 최대 진폭의 레벨을 낮추는 기법으로 선형 피크 제거기법이 있다. 이 기법은 OFDM 신호의 일정 임계 레벨을 초과하는 진폭만을 선택해서 참조신호의 크기만큼을 빼주는 기법이다. 참조신호는 식 (3)로 주어지며 $r_n = |x(t)|$, l 은 피크제거 레벨, l_{th} 은 진폭의 임계 레벨, $a = \max(r_n) - 1$, $\rho = w \cdot a$ ($0 < w < 1$)을 나타낸다.[4]

$$ref(n) = \begin{cases} a, & r_n > l + \rho \\ 0, & r_n \leq l + \rho \end{cases} \quad (3)$$

이 참조신호의 진폭은 식(4)와 같이 선형 피크 제거기법에 적용하며 (그림 1)에서와 같이 임계 레벨을 초과하는 진폭을 감소시키는 것을 볼 수 있다.

$$r_{pc}(n) = \begin{cases} r_n - a & r_n > l_{th} \\ r_n & r_n \leq l_{th} \end{cases} \quad (4)$$



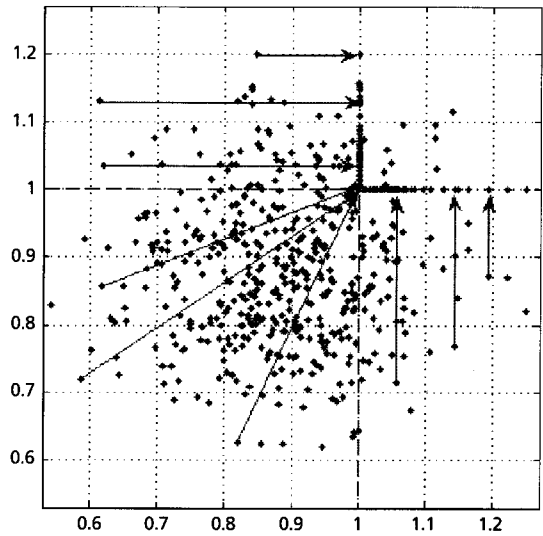
(그림 1) 선형 피크 제거 기법

2. BER성능감소 보상기법

2.1 능동 성상도 확장(Active Constellation Extension) 기법

앞서 제시한 선형 피크 제거기법을 적용하면 OFDM 신호의 높은 PAPR을 감소시킬 수 있지만 이로 인해 BER성능이 어느 정도 감소할 수밖에 없다. 이러한 BER 성능감소를 보상하기 위한 방법으로 능동 성상도 확장 기법이 있다.

OFDM 신호는 데이터가 주파수 영역에서 실린 후 IFFT 과정을 거쳐 시간 영역의 신호로 바뀌는 구조를 가지고 있는데, 이 기법은 시간 영역에서 높은 피크가 제거된 신호를 다시 주파수 영역으로 변환하고 (그림 2)에서 보듯이 OFDM 데이터 심볼을 결정경계선(decision boundaries)의 안쪽 영역으로 심볼을 확장시킴으로써 PAPR을 낮추면서도 성능의 열화는 최소화하도록 고안된 방법이다.[5]



(그림 2) 능동 성상도 확장기법

이와 같이 능동 성상도 확장 기법을 적용하면 선형 피크 제거 기법으로 인해 BER 성능이 저하되는 단점을 보완할 수 있고, 또한 대역 외 전력 방출을 줄일 수 있다.

2.2 위상 재조정(Phase Realignment) 기법

위상 재조정 기법은 능동 성상도 확장 기법과 마찬가지로 신호 왜곡기법을 적용함으로써 인하여 저하된 BER성능을 보완할 수 있는 기법이다.

이 위상 재조정 기법에서 OFDM심볼의 초기 위상 ψ_i 과 재조정된 위상 $\varphi_p(n)$ 은 식 (5)와 같이 표시된다.[6]

$$\Psi[\cdot] = \left[-3\frac{\pi}{4}, -\frac{\pi}{4}, 3\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{4}\right] \quad (5)$$

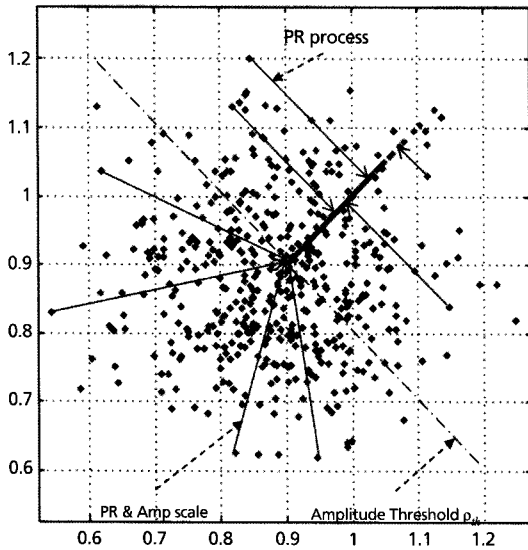
$$\varphi_{pr}(n) = \Psi\left[\left|\varphi_{clp}(n) - \Psi[\cdot]\right| = \min\left|\varphi_{clp}(n) - \Psi[\cdot]\right|\right]$$

여기서 $\varphi_{clp}(n)$ 은 피크가 제거된 OFDM 심볼의 위상을 의미한다. 위상이 재조정된 심볼의 크기를 식으로 표시하면 다음과 같다.

$$\rho_{pr}(n) = \begin{cases} \rho_{th}, & \text{if } \rho_{clp}(n) < \rho_{th} \\ \rho_{clp}(n), & \text{else} \end{cases} \quad (6)$$

여기서 ρ_{clp} 은 피크가 제거된 OFDM 심볼의 크기를 나타내고, ρ_{th} 은 임계레벨을 나타낸다. 식 (5)와 식 (6)를 가지고 위상이 재조정된 심볼 $x_{pr}(n)$ 을 식 (7)로 나타낼 수 있고, 위상 재조정 기법은 (그림 3)과 같이 구현된다.

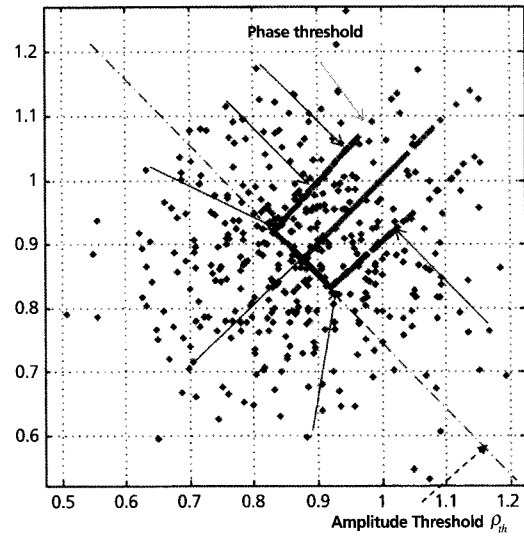
$$x_{pr}(n) = \rho_{pr}(n)e^{j\varphi_{pr}(n)} \quad (7)$$



(그림 3) 위상 재조정 기법

식 (8)은 위상 재조정기법에서 재조정된 위상 φ_{pr} 에 잔여위상 φ_{th} 을 고려해서 위상을 확장시킴으로써 OFDM신호의 PAPR 감소성능을 보다 더 향상시킬 수 있는 수정 위상 재조정(Modified Phase Realignment) 기법을 나타낸다. 이 수정 위상재조정기법은 (그림 4)와 같이 구현된다.

$$\varphi_{mpr}(n) = \begin{cases} \varphi_{pr}(n) + \varphi_{th}, & \text{if } \varphi_{pr}(n) > \varphi_{pr}(n) + \varphi_{th} \\ \varphi_{pr}(n) - \varphi_{th}, & \text{if } \varphi_{pr}(n) < \varphi_{pr}(n) - \varphi_{th} \\ \varphi_{clp}(n), & \text{else} \end{cases} \quad (8)$$



(그림 4) 수정 위상 재조정 기법

3. 전력증폭기 비선형성 보상기법

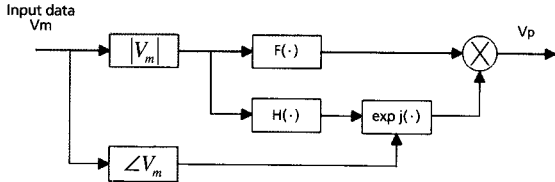
위성중계기의 고출력전력증폭기는 입력신호에 대해 출력 신호의 진폭 및 위상이 비선형적으로 증폭되는 성질을 가지고 있다. 고출력전력증폭기의 비선형성은 신호의 대역 내 비선형 왜곡과 대역 외 전력 스펙트럼 방출의 원인이 되므로 이를 방지하기 위해 사전왜곡(pre-distortion) 기법 중 하나인 Rational filter를 사용해서 비선형 왜곡을 보상할 수 있다. 이는 신호를 전송하기에 앞서 전력증폭기의 비선형 특성을 미리 파악하여 신호를 역으로 왜곡시킨 뒤 전력증폭기에 통과시키는 방법이다.

Rational filter의 진폭과 위상은 전력증폭기를 통과한 입력 신호의 진폭과 위상의 역함수 관계에 있다. 식 (9)과 (10)에서 보는 바와 같이 진폭 $F(\cdot)$ 와 위상 $H(\cdot)$ 을 나타낸다.[7]

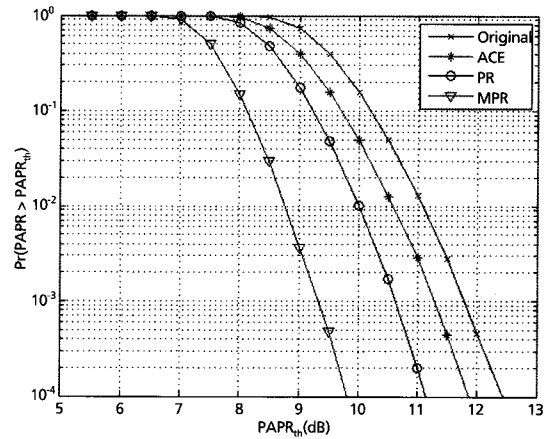
$$F(r(t)) = \left| \frac{-\alpha_A - \sqrt{\alpha_A^2 - 4\beta_A r(t)^2}}{2\beta_A r(t)^2} \right| \quad (9)$$

$$H(F(r(t))) = -\frac{\alpha_A F(r(t))^2}{1 + \beta_A F(r(t))^2} \quad (10)$$

Rational filter 기반의 사전왜곡 기법은 (그림 5)와 같이 구현된다.



(그림 5) Rational filter 기반의 사전 왜곡기법 블록도



(그림 6) PAPR 감소기법의 CCDF

IV. 시뮬레이션 결과

앞서 설명한 위성 WiBro 시스템의 중계기에서 발생하는 신호 왜곡의 보상 기법에 대한 모의실험은 WiBro 시스템을 모델로 하여 수행하였다. 이 시스템 특성은 다음 표와 같다.

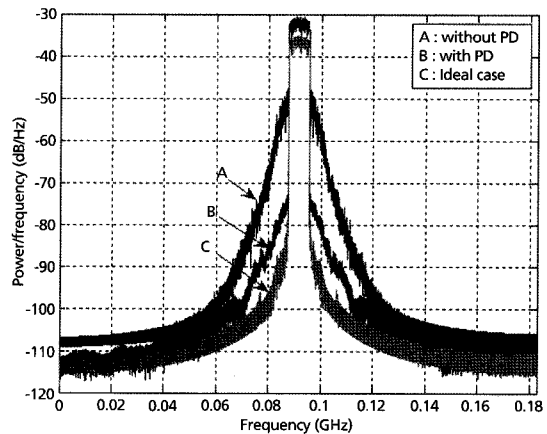
<표 1> 시스템 파라미터

파라미터	값
채널 대역폭	9MHz
유효 채널 대역폭	8.75 MHz
FFT 크기	1,024
부반송파 수	864
부반송파 대역폭	9.7656kHz
반송파 주파수	2.4 GHz
샘플링 주파수	365.7MHz
샘플링 간격	2.73ns

(그림 6)은 WiBro 시스템을 모델로 하여 WiBro신호의 PAPR을 감소시키기 위해 본문에서 설명한 신호 왜곡 기법과 정상도 보정 기법을 적용하고, 각각을 보완 누적 분포 함수(Complementary Cumulative Distribution Function)로 나타내어 도출한 결과이다. 이는 신호의 진폭이 x축의 임계 PAPR 레벨을 초과할 확률을 나타낸 것이다.

위상 재조정(PR) 기법은 능동 정상도 확장(ACE) 기법과 비

교하여 위상 재조정 신호의 크기와 위상을 조절함으로써 피크 제거로 인한 PAPR 감소 특성이 달라지게 되므로 PAPR 감소 성능이 향상되게 된다. 이와 같이 위상 재조정 기법에서 위상을 임계레벨을 고려해서 위상을 확장시키면 위상 재조정 기법보다 결과적으로 PAPR 감소 성능이 우수하게 나오는 것을 확인할 수 있다.



(그림 7) 사전왜곡 기법의 전력 스펙트럼 밀도

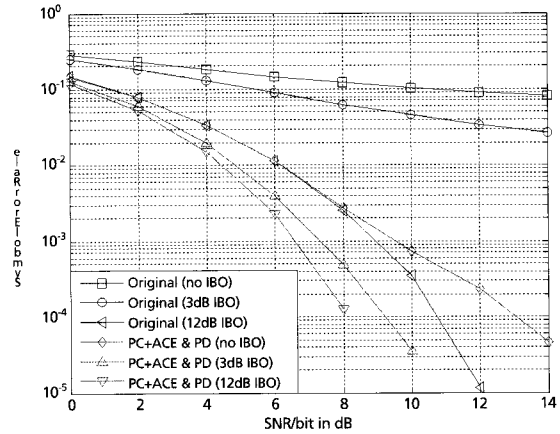
(그림 7)은 위성 WiBro의 TWTA의 비선형 왜곡을 제거하기 위해 Rational filter를 사용하여 대역 외 전력 스펙트럼 방출을 감소시킨 결과이다.

여기서 'A'는 WiBro시스템에서 사전 왜곡 기법을 사용하지 않은 신호를 전력증폭기에 통과시켰을 때의 전력 스펙트럼이고, 'B'는 Rational filter를 적용한 신호의 전력 스펙트럼이며, 'C'는 TWTA를 통과하기 전 원래 신호의 전력 스펙트럼을 각각 나타낸다. 앞서 해석적인 방법을 통해 설명한 바와 같이 사전 왜곡 기법을 이용하여 TWTA를 거친 신호의 비선형 왜곡을 역함수 관계로 사전에 방지함으로써 전력증폭기 출력 신호의 대역 외 전력 방출이 감소되는 것을 보여준다. A와 B를 비교하였을 때, 주파수 대역 외부로 방출되는 전력 스펙트럼이 27dB정도 감소된 것을 볼 수 있다.

(그림 8)과 9는 2.4GHz WiBro 시스템에서 높은 PAPR과 TWTA의 비선형 왜곡을 보상하기 위해 신호 왜곡 보상기법을 적용한 경우와 back-off를 조정한 경우의 BER 시뮬레이션 결과이다. (그림 8)에서 보면 OFDM 신호의 높은 PAPR은 능동 성장도 확장 기법을 이용해서 감소시키고, 비선형 왜곡은 Rational filter로 사전 왜곡을 통해 방지함으로써 상당한 수준으로 BER성능이 개선된 것을 확인할 수 있다. 또한 IBO(Input Back-Off)를 3dB에서 12dB로 설정하면 전력증폭기를 선형동작점에서 운용하는 것이므로 BER성능이 크게 향상되는 것을 모의실험 결과로 알 수 있다.

(그림 9)에서는 위상 재조정 기법과 사전왜곡 기법을 이용해서 신호의 왜곡을 보상하는 경우와 마찬가지로 IBO를 조정하는 것으로 BER 성능이 향상되는 것을 확인할 수 있다. 위상 재조정 기법과 사전 왜곡 기법을 적용한 경우 역시 신호 왜곡 보상기법을 사용하지 않고, IBO만 12dB로 설정함

으로써 얻은 BER성능과 비슷한 결과를 얻을 수 있다. 모의 실험 결과를 통해 IBO를 높게 설정하여 TWTA 전력 증폭 효율성이 저하되는 문제점을 신호 왜곡 보상기법을 사용함으로써 보상할 수 있다는 것을 알 수 있다.

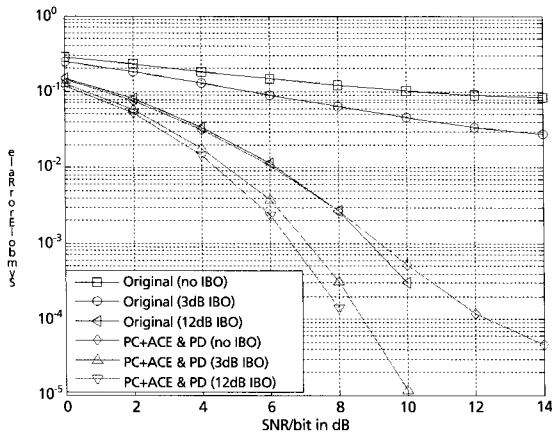


(그림 9) PR기반 신호 왜곡 보상기법의 BER

V. 결 론

위성을 이용한 WiBro시스템을 구현하는데 있어서 OFDM 신호의 높은 PAPR로 인해 위성중계기의 고출력전력증폭기에서 신호의 비선형 왜곡이 발생할 수 있다. 이 문제를 해결하기 위해 제안된 OFDM 신호의 비선형 왜곡 보상기법들을 소개하고 WiBro 시스템 모델에 이를 적용한 시뮬레이션을 통해 전력증폭기에 back-off만을 적용한 경우와 보상기법들을 적용한 경우의 성능 개선 정도를 비교해보았다.

OFDM 신호의 높은 PAPR 특성으로 인해 전력증폭기에서 back-off를 12dB로 매우 높게 설정하는 경우와 제안된 비선형왜곡 감소 기법들을 적용한 경우의 성능이 거의 동일한 것을 확인할 수 있다. 이는 증폭기의 평균 증폭 동작점을 12dB 가량 끌어올릴 수 있을 뿐만 아니라 대역 외 전력스펙트럼 방출 또한 방지할 수 있음을 보여준다. 그러므로 OFDM 신호의 높은 PAPR 특성을 다양한 방법으로 극복함으로써 위성 WiBro 시스템에서 전력증폭기의 비선형 문제를 해결하여 시스템의 효율을 크게 높일 수 있다.



(그림 8) ACE기반 신호 왜곡 보상기법의 BER



- [1] 이병섭, "위성 WiBro 신호전송 및 보상기법," TTA Journal, 2007. Vol.109 pp.56-63
- [2] Richard van Nee and Ramjee Prasad, "OFDM Wireless Multimedia Communications," Artech House Boston London, pp. 119-126, 2000
- [3] 박평주, 서명환, 이병섭, "위성 WiBro 시스템에서 전력 증폭기의 효율성 향상과 비선형성 개선을 위한 PAPR 감소 기법과 사전 왜곡 기법 연구" 한국전자과학회논문지, 2008. 제19권 제12호, pp. 1303-1312
- [4] 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, June 2006.
- [5] Brian Scott Krongold and Douglas L.Jones, "PAR Reduction in OFDM via Active Constellation Extension," IEEE Trans. On Broadcasting vol. 49, no.3, pp. 258-268, Sep. 2003.
- [6] Robin, M.H,Seo, G.W.Go, B.S.Lee, "PAPR reduction technique and Pre-distortion Robust to Nonlinear Distortion of Satellite WiBro," JC-SAT 2008, pp. 183-191, Nov. 2008
- [7] Sukhdeep Mahil and Abu B. Sesay, "Rational Function Based Predistorter for Traveling Wave Tube Amplifiers," IEEE Trans. On Broadcasting vol. 51, no.1, pp. 77-83, March. 2005.

약 력



이 병 섭

1979년 한국항공대학교 전자공학과 졸업
 1981년 서울대학교 전자공학과 석사
 1992년 New Jersey Institute of Technology 박사
 1992년 ~ 현재 한국항공대학교 항공전자 및 정보통신공학부 교수
 관심분야: 위성통신, 신호처리, adaptive array



박 평 주

2001년 ~ 2008년 한국항공대학교 정보통신공학사
 2008년 ~ 현재 한국항공대학교 정보통신공학과 석사과정
 관심분야: 통신공학, DSP, Noise Cancellation



서 명 환

2000년 ~ 2008년 한국항공대학교 정보통신공학사
 2008년 ~ 현재 한국항공대학교 정보통신공학과 석사과정
 관심분야: 통신공학, Bio-radar



Robin Shrestha

2006년 National College of Engineering, Tribhuvan University, Nepal.
 2007년 한국항공대학교 정보통신공학과 석사과정
 관심분야: 통신공학

