

수신기 포함 페루프 전치왜곡기 설계와 성능 평가

복 준 영*, 조 병 각*, 백 광 훈*, 유 흥 균^o

Design and Performance Evaluation of Receiver Feedback Closed Loop Pre-Distortion System

Junyeong Bok*, Byung Gak Jo*, Gwang Hoon Baek*, Heung-Gyoon Ryu^o

요 약

고전력 증폭기의 비선형 특성은 통신 시스템의 성능을 저하시키는 주요한 요인이다. 일반적인 전치왜곡기는 고전력 증폭기의 비선형 문제를 효과적으로 보상가능 하다. 그러나 고속 데이터 전송 시에 발생하는 메모리 효과는 보상하지 못하는 문제점이 있다. 메모리 효과를 효과적으로 보상하기 위해서 송신 단에서 다양한 적응형 전치 왜곡기 방식이 제안되었다. 위성 통신 시스템에서는 기존의 적응형 전치왜곡기를 사용하기 위해서는 위성에 적응형 회로를 설계해야 되는 부담이 있다. 본 논문에서는 메모리 효과를 가진 고전력 증폭기의 비선형 문제를 보상하기 위해서 수신기 포함 페루프 전치왜곡기를 제안한다. 제안한 시스템은 위성에서 전치왜곡기를 사용하지 않고 지상국에서만 전치왜곡기를 사용함으로써 위성의 복잡도와 설계비용을 낮출 수 있을 것으로 예상된다.

Key Words : Predistortion, memory effect, receiver feedback, memory polynomial, HPA

ABSTRACT

The receiver performance is degraded by nonlinear memory problem in communication system. The pre-distorter techniques are an effective technique to compensate for the nonlinear distortion of the HPA without memory effects. However, memory effect of HPA can no longer be ignored when data signal is transmitted in high speed. Many adaptive pre-distorter schemes have been studied to compensate for memory effect problem of HPA in transmitter. The complexity and cost of satellite will increase when using adaptive pre-distorter in satellite communication system. In this paper, we propose receiver feedback closed loop pre-distortion technique in order to compensate for nonlinear problem of HPA with memory problem. The purpose of this paper is to reduce complexity and cost of satellite design by using only pre-distorter at terrestrial station.

I. 서 론

통신 시스템의 목적은 더욱 많은 데이터를 빠르고 정확하게 전송하는 것이다. 최근 통신 기술의 비약적인 발전으로 인하여 고속 데이터 전송이 가능하게 되었다. 고속의 데이터 전송으로 인하여 데이터 전송 용

량이 증가함에 따라서, 송신신호의 PAPR (peak to average power ratio) 값이 증가하고 전송 신호의 대역폭이 넓어지게 되었다. 높은 PAPR 값과 넓은 전송 대역폭으로 인하여 고전력 증폭기(high-power amplifier)에서 발생하는 비선형 문제는 통신 시스템의 성능을 결정하는 중요한 요인이다.

※ 본 연구는 2012년도 국방과학연구소의 위탁연구비 지원에 의해 수행되었다(계약번호 UD110028ED).

◆ 주저자 : 충북대학교 전자공학과, bgy84@nate.com, 준회원

◦ 교신저자 : 충북대학교 전자공학과, ecomm@cbu.ac.kr, 정회원

* 국방과학연구소

논문번호 : KICS2012-07-299, 접수일자 : 2012년 7월 1일, 최종논문접수일자 : 2012년 9월 19일

위성 통신 시스템에서 고전력 증폭기는 장거리 데이터 전송을 위해서 전송 신호를 높은 전력으로 송출하는 중요한 역할을 한다. 그러나 전력 증폭기의 비선형 특성으로 인해 채널 간 간섭 및 혼변조 등과 같은 심각한 왜곡 현상이 발생되어 신호의 품질을 저해하는 요소로서 작용하기도 한다. 고전력 증폭기의 비선형 왜곡 특성은 AM/AM 과 AM/PM 왜곡 특성으로 나뉜다. 고전력 증폭기의 비선형 왜곡 특성을 해결하기 위해서 다양한 전치 왜곡 기법이 연구 되었다¹⁻³⁾.

전치 왜곡 방식은 LUT(look up table) 기반의 전치 왜곡 방식과 다항식 기반의 방식으로 분류된다. LUT 기반의 전치 왜곡 방식은 메모리에 미리 왜곡된 값을 저장해 놓고 입력 신호에 따라서 메모리에 저장된 사전 왜곡된 신호를 전력 증폭기에 전달하는 방식이다. LUT 기반 전치왜곡기는 많은 메모리가 필요하다는 단점이 있지만, 최근 반도체 기술의 발전으로 인해서 메모리 문제는 더 이상 문제가 되지 않는다.

메모리 효과란, 전력 증폭기의 출력이 현재의 입력뿐만 아니라 이전 입력 신호에 영향을 받는 현상이다. 메모리 효과는 전력 증폭기의 매개 변수들을 불안정하게 만든다. 메모리 효과로 인하여 고전력 증폭기의 출력 신호는 상호 변조 왜곡 성분으로 인해 신호의 크기나 위상 차이가 나타난다. 메모리 효과를 보상하기 위해서 송신 단에서 추정 및 보상에 대한 연구가 진행되었다⁴⁻⁶⁾.

송신 단에서 비선형 특성을 추정하기 위해서는 전력 증폭기의 출력 신호인 아날로그 신호를 다운 컨버터와 ADC 를 사용하여 베이스 밴드 신호로 변경하기 위한 추가적인 회로를 필요로 한다. 위성의 경우 추가적인 회로는 위성의 가격을 증가시키는 문제점을 가진다.

위성 통신 시스템은 채널에 대한 정보를 제어 채널을 사용하여 서로 수신 받을 수 있다. 채널 정보는 지상 전용망의 피드백 채널을 통해서 전송할 경우 위성 통신 시스템에서는 서로의 채널 정보를 공유 할 수 있다. 피드백 정보는 데이터 정보에 비해서 상당히 적은 데이터 량이 전송 된다. 본 논문에서는 비선형 특성에 대한 정보를 피드백 채널을 이용하여 보상 가능한 방법에 대한 연구를 한다. 또한, 메모리 효과를 고려한 전력 증폭기가 가지는 왜곡 특성을 분석 하고 해결 방안을 제안한다. 제안한 시스템은 수신기에서 메모리효과를 가지는 전력증폭기의 비선형 특성을 추정하고,

피드백 신호를 송신측에 전송하여 전력 증폭기의 비선형 특성을 사전 등화 방식으로 보상하는 수신기 포함 페루프 사전 등화 방식을 제안한다.

II. 고전력 증폭기의 비선형 왜곡 특성

2.1. Rational 모델

위성 중계기의 비선형 증폭기가 가지는 비선형 왜곡 특성을 모델링 하는 것은 중요하다. 본 논문에서는 비선형 왜곡 특성으로 Rational 모델링 기법을 사용하였다. Rational 모델링 기법을 사용하여 위성이 가지는 AM/AM($A_r(r)$), AM/PM($P_r(r)$) 비선형 왜곡 특성은 아래와 같은 식으로 표현 할 수 있다.

$$A_r(r) = \frac{A_1 r^3 + A_2 r^2 + A_3 r + A_4}{r^3 + B_1 r^2 + B_2 r + B_3} \quad (1)$$

$$P_r(r) = \frac{C_1 r^3 + C_2 r^2 + C_3 r + C_4}{r^4 + D_1 r^3 + D_2 r^2 + D_3 r + D_4} \quad (2)$$

$A_r(r)$ 는 전력 증폭기의 AM/AM 왜곡 특성, $P_r(r)$ 는 전력 증폭기의 AM/PM 왜곡 특성, r 은 전력 증폭기의 입력 신호에 대한 진폭 크기이다. 식 (1), (2) 에서 사용되는 각 계수는 위성에서 사용되는 중계기의 비선형 특성에 대한 측정값을 Curve fitting 방식을 통해서 얻은 것이다. 각 계수는 아래 표 1과 같은 값을 가지게 된다.

표 1. Rational 모델의 계수
Table 1. The coefficient of Rational model.

$A_1 = 1.452$	$A_2 = -2.207$	$A_3 = 3.498$	$A_4 = 0.01165$
$B_1 = 1.568$	$B_2 = -2.626$	$B_3 = 2.801$	
$C_1 = 0.1216$	$C_2 = -0.47$	$C_3 = 0.3606$	$C_4 = -0.01987$
$D_1 = -5.888$	$D_2 = 11.7$	$D_3 = -8.349$	$D_4 = 2.53$

Rational 모델의 AM/AM, AM/PM 왜곡 특성을 입력 신호 전력에 대해서 표현하면 아래 그림 1과 같은 결과 값을 가진다.

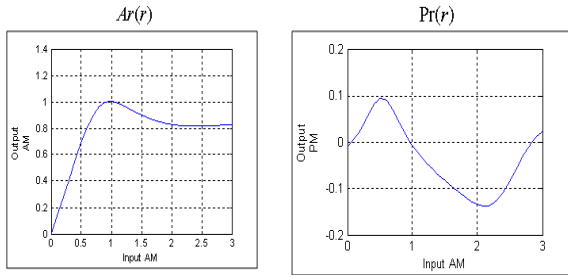


그림 1. Rational 모델 입출력 진폭 특성.
Fig. 1. Characteristic of input and output amplitude in Rational model.

2.2. 메모리 효과를 고려한 고전력 증폭기

고속의 데이터를 전송 할 경우 전력 증폭기를 통과 하게 될 경우 메모리 효과가 발생된다. 메모리 효과란 증폭기의 현재 입력 값이 아닌 이전 값들이 현재의 값에 영향을 주는 것을 말한다. 이때, 메모리 효과는 주파수의 변화에 따른 진폭 및 위상 성분이 변화 되는 현상이다. 전력 증폭기에서는 물리적인 특성 변화로 인하여 메모리 효과가 발생된다. 물리적인 특성의 변화는 주로 열에 의한 변화와 전기적인 영향으로 인해서 발생된다. 열에 의한 물리적인 특성 변화는 전력 증폭기의 열로 인해서 발산된 전력이 궤환 신호에 의해서 발생하는 현상으로 증폭기의 이득에 변화를 주게 된다.

다른 입력 신호의 제곱의 향으로 생성되기 때문에 낮은 포락선 주파수 성분을 가지며, 이러한 문제를 해결하기 위해서 고전력 증폭기의 열 배출 능력을 향상시키는 것이 바람직하다. 전기적인 영향으로 인한 메모리 효과는 직류 바이어스와 임피던스 정합회로의 주파수 특성 및 포락선 주파수에 따른 전력 증폭기의 임피던스 변화에 의해서 발생된다. 전력 증폭기의 전력 증폭을 위해서 주변 회로에 인덕터와 커패시터로 구성되는 바이어스 회로가 필요하며, 바이폴라 접합트랜지스터를 사용하는 경우 바이어스 회로에 궤환 회로가 포함되어 일정한 시간 지연을 가지게 되어서 메모리 효과를 가지게 된다. 이러한 메모리 효과는 홀수의 다항식 차수로 아래의 식과 같이 표현 할 수 있다.

$$P_{memory}(n) = \sum_{k=1, k=odd}^K \sum_{q=1}^Q c_{kq} r(n-q) |r(n-q)|^{k-1} \quad (3)$$

c_{kq} 는 전력 증폭기의 계수, r 는 전력 증폭기의 입력 신호에 대한 진폭 크기이다. 메모리 효과를 가지는 고전력 증폭기의 계수 c_{kq} 는 각각 k 와 q 에 의해 표현할 수 있다. 고전력 증폭기 계수 c_{kq} 는 표 2 와 같으며 실제

Class AB 파워 앰프로부터 추출된다^[7].

표 2. 메모리 효과를 고려한 증폭기 계수.
Table 2. The coefficient of HPA with memory effect.

$c_{10} = 1.0513 + 0.0904j$	$c_{30} = -0.0542 - 0.2900j$	$c_{50} = -0.9657 + 0.7028j$
$c_{11} = -0.0680 - 0.0023j$	$c_{31} = 0.2234 + 0.2317j$	$c_{51} = -0.2451 - 0.3735j$
$c_{12} = 0.0289 + 0.0054j$	$c_{32} = 0.0621 - 0.0932j$	$c_{53} = 0.1229 + 0.1508j$

III. 수신기 포함 페루프 전치왜곡기

일반적인 전치왜곡기는 메모리 효과를 고려한 고전력 증폭기의 비선형 왜곡 특성을 정확하게 추정 및 보상 할 수 없다. 메모리 효과에 의해서 현재 신호의 왜곡 특성뿐만 아니라 그 이전 입력 신호 영향으로 인해서 비선형 왜곡이 추가적으로 발생하기 때문이다.

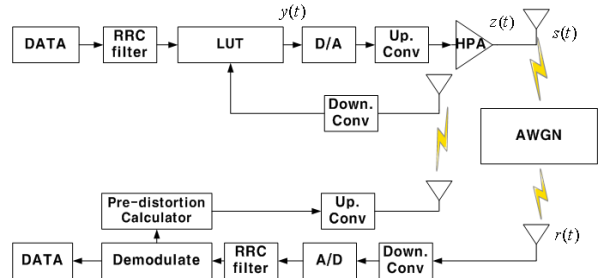


그림 2. 수신기 포함 페루프 전치왜곡기.
Fig. 2. Receiver feedback closed loop pre-distorter.

그림 2는 수신기 포함 페루프 전치왜곡기에 관한 블록도 이다. 제안된 전치왜곡기는 수신단에서 비선형 왜곡을 추정한다. 추정된 비선형 특성에 대한 정보는 송신 단에 전송된다. 전치왜곡기의 입력 신호는 LUT 을 통과한 출력 값이다. LUT을 통해서 왜곡된 신호 $y(t)$ 는 진폭과 위상으로 아래 식과 같이 표현 할 수 있다.

$$y(t) = |y(t)|e^{j\theta} \quad (4)$$

전치 왜곡된 신호는 고전력 증폭기를 통과 하게 된다. 고전력 증폭기의 AM/AM 왜곡 특성과 AM/PM 왜곡 특성에 의해서 전송 신호가 왜곡된다. 고전력 증폭기의 비선형 왜곡 특성에 의해서 왜

곡된 신호 아래의 식과 같이 표현 할 수 있다.

$$z(t) = Ar[|y(t)|] \times |y(t)| e^{j(\theta + Pr(|y(t)|))} \quad (5)$$

Ar 는 AM/AM 왜곡 특성, Pr 는 AM/PM 왜곡 특성이다. 송신 단에서 전송 되는 신호는 아래 식과 같이 표현할 수 있다.

$$s(t) = z(t)e^{j2\pi f_c t} \quad (6)$$

$z(t)$ 는 전치 왜곡된 신호, f_c 는 반송파 주파수이다. 송신 신호는 AWGN을 통해 수신 신호 아래 식과 같이 표현할 수 있다. 수신된 신호는 아래 식과 같이 표현 할 수 있다.

$$\begin{aligned} r(t) &= s(t) + n(t)e^{-j2\pi f_c t} \quad (7) \\ &= z(t)e^{j2\pi f_c t} + n(t)e^{-j2\pi f_c t} \\ &= z(t) + N(t) \end{aligned}$$

수신된 신호는 프리앰블 신호와 비교를 하게 된다. 이때 두 신호의 오차 값을 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$e(n) = [d(n) - r(n)] \quad (8)$$

전치왜곡기에 대한 오차 정보를 피드백 시켜서 송신단에 전송 하게 된다. 이때, 수신된 신호와 원하는 신호에 대한 오차 정보를 사용하여 NLMS 알고리즘을 통해 LUT 을 갱신 한다. 실제 수신된 값과 비선형 모델의 의한 값을 비교하여 그 차이만큼의 전치왜곡기의 LUT 값을 변경한다. LUT 에 저장된 값은 아래의 NLMS 알고리즘을 사용하여 값을 변경한다.

$$a(n) = a(n-1) + \frac{2u}{\|x(n)\|^2 + \delta_{NLMS}} e(n)x(n) \quad (9)$$

u 는 가중치 값이며, $\delta_{NLMS} = \sigma_x^2$ 는 입력 신호의 분산 값, $x(n)$ 은 입력 신호이다. LUT에 저장된 값은 NLMS 알고리즘에 의해서 변경 된다.

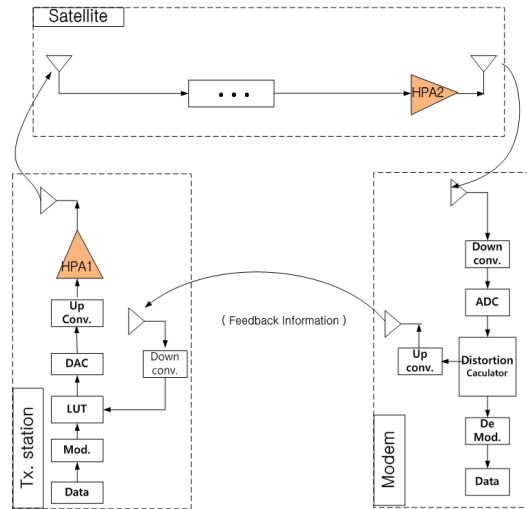


그림 3. 위성 통신을 위한 수신기 포함 페루프 전치왜곡기.
Fig. 3. Receiver feedback closed loop pre-distorter for satellite communication.

그림 3은 위성 통신 시스템에 적용한 수신기 포함 페루프 전치왜곡기의 블록도이다. 그림 3과 같이 지상국인 Tx.station 에서는 제안한 전치왜곡기를 사용한다. 제안된 시스템을 사용하여 전치 왜곡된 신호는 송신단의 전력 증폭기를 통과해 위성으로 전달 된다. 위성에서 수신된 신호는 위성이 가진 전력 증폭기를 이용하여 각각의 모뎀으로 전송된다. 모뎀에서는 수신된 신호를 사용하여 지상국과 위성의 전력 증폭기들이 가지는 비선형 특성에 대해서 다시 한번 계산하게 된다. 수신기에서 추정된 왜곡 특성에 대한 적은 피드백 정보를 전송해 준다. 본 논문에서는 제안된 수신기 포함 페루프 전치왜곡기를 사용하여 그 동안 각기 따로 전치 왜곡을 하는 방식을 떠나서 전체 위성 통신 시스템의 비선형 특성을 단일 전치왜곡기로 보상 가능하도록 하는 기법이다.

IV. 시뮬레이션 및 결과 분석

본 논문에서는 시뮬레이션을 위해서 위성 통신에서 고려되는 고전력 증폭기의 비선형 특성 모델인 Rational 모델과 메모리 효과를 가지는 Polynomial 모델을 사용하였다. 아래 표3은 시뮬레이션 환경에 대해서 설명하고 있다. 송수신 단에서는 RRC 필터를 사용하였다. 필터 지연은 8 샘플을 사용 하였고, 필터의 roll of factor 값은 0.35를 사용 하였다. 필터는 선형적인 영역에서 동작한다고 가정하였으며, 이에 따른 필터에서의 비선형 특성은 고려하지 않았다.

표 3. 시뮬레이션 파라미터

Table 3. Simulation parameters

Parameters	Values
HPA Model	Rational model, Memory polynomial
Modulation	QPSK, 16APSK
Data rate	1.024 Mbps
Carrier Frequency	2.048 MHz
Filter	RRC filter
Filter delay	8 - sample
Roll off factor	0.35

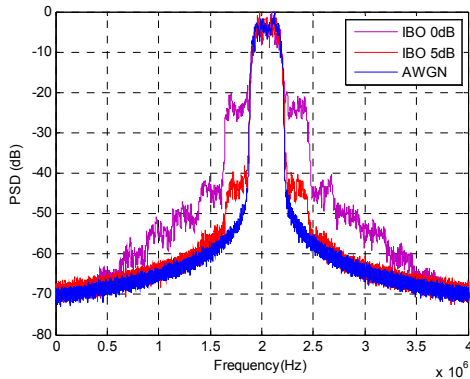


그림 4. IBO 변화에 따른 Rational 모델의 스펙트럼.
Fig. 4. Power spectral density after Rational HPA by IBO.

전력 증폭기는 일정 입력 전압이상에서 비선형 왜곡이 심하게 나타난다. 따라서 전력 증폭기의 선형성이 유지되는 구간에서만 전력 증폭기를 동작하기 위해서 백오프 기법을 사용한다. 백오프 기법에는 IBO (input back off) 와 OBO(output back off)로 나뉘며, 본 논문에서는 전력 증폭기의 최대 출력을 제공하는 입력 전력과 원하는 선형성을 제공하는 입력 전력 사이의 비율로 정의하는 IBO를 고려하였다. $IBO = 10 \log \frac{P_{in-sat}}{P_{in}}$ 로 정의 되며, P_{in} 은 증폭기의 입력 전력이고, P_{in-sat} 는 증폭기의 입력 포화 전력이다. 전력 증폭기에서 백오프를 많이 할수록 비선형 왜곡 특성이 줄어들지만, 이 경우 전력 효율은 감소하는 문제점을 가진다. 그림 4는 IBO 변화에 의한 Rational 모델의 스펙트럼을 나타낸다. Rational 모델은 TWTA 모델에 비해서 AM/PM 특성에 의한 비선형 왜곡 특성이 약하다. 그림 4에서 볼 수 있듯이 IBO를 증가하게 되면 비선형 특성이 약화되어 스펙트럼 방출이 낮아지는 것을 확인할 수 있다.

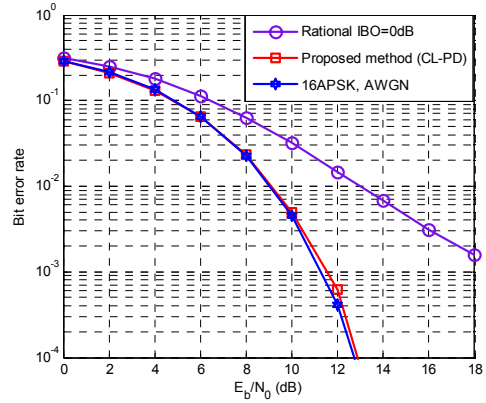


그림 5. 수신기 포함 페루프 전치왜곡기의 성능 분석.
Fig. 5. Comparison of BER performance with and without the proposed scheme.

그림 5은 제안된 수신기 포함 페루프 전치왜곡기 사용 유무에 따른 수신 BER 성능을 비교 하였다. 단일 HPA 만을 고려할 경우(Rational 모델, IBO=0dB) 제안된 전치 왜곡 방식은 비선형 왜곡을 정확하게 보상 하였다. 시뮬레이션 결과, 위성 통신 시스템에서 제안된 전치왜곡기 방식은 BER = 10^{-3} 을 만족 할 경우, SNR이 약 6dB 개선되는 것을 확인 할 수 있으므로, 전체 전력 효율이 6dB 향상 된다. 제안된 방식은 Rational 모델에 대해서 효율 적으로 보상 가능하다.

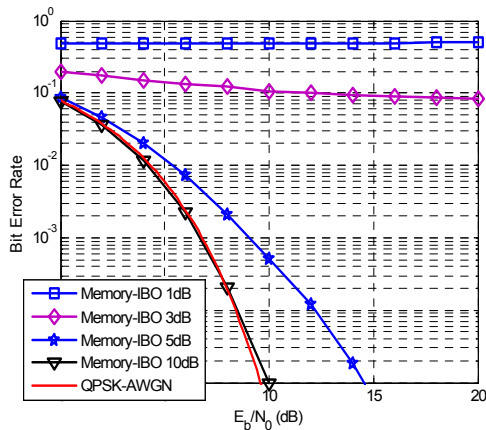


그림 6. IBO 에 따른 BER 성능 비교.
Fig. 6. Comparison of BER performance according to IBO.

그림 6은 메모리 효과를 고려한 전력 증폭기의 IBO 에 따른 스펙트럼을 나타낸다. IBO 를 크게 할수록 전력 증폭기의 비선형 왜곡 특성이 약해지는 것을 볼 수 있다. 비선형 특성이 약해질수록 전력 증폭기는 선형 영역에서 동작하기 때문에 대역외 스펙트럼 방사 전력 또한 낮아진다. IBO 의 증가는

채널 간 간섭 및 혼변조 왜곡 성분을 약하게 하지만 전력 효율역시 약해지는 단점을 가진다. 전력 효율을 향상을 위해서 Memory 효과가 있는 전력 증폭기에 대해서 적절한 전치왜곡방식이 필요하다.

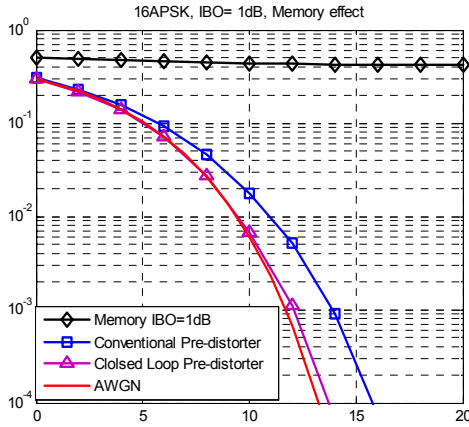


그림 7. 일반적인 전치 왜곡기와 제안된 전치왜곡기의 BER 성능 비교
Fig. 7. Comparison of BER performance with CLPD and conventional.

그림 7은 기존의 사전 등화 방식과 제안된 수신기 포함 페루프형 전치왜곡기를 사용한 경우에 BER 성능을 비교 하였다. 기존의 전치왜곡기는 단순히 LUT에 저장된 값을 이용한 전치 왜곡 방식이다. LUT에 저장된 값은 현재의 값만을 고려한 비선형 오차가 저장되어있다. LUT에 저장된 값에 의해서 비선형 왜곡 특성을 보상하는 기존 방식과 수신기에서 측정된 피드백 정보를 송신단에 재전송하는 페루프형 전치왜곡기의 성능을 분석하였다. 제안한 방식은 기존의 사전 등화 방식에 비해서 송신단의 부담을 줄여주기 위해서 수신 단에서 처리하는 것이 그 특징이다. 또한, 제안된 수신기 포함 페루프 사전 등화 방식 시스템은 메모리 효과를 가진 전력 증폭기의 비선형 왜곡 특성을 보상 할 수 있다. 그림 8의 결과 제안된 시스템은 BER=10⁻⁴을 만족하는 성능에서 약 2dB의 성능 향상을 가져온다.

그림 8는 제안된 수신기 포함 전치왜곡기를 적용한 위성 통신 시스템의 수신 BER 특성을 분석한 것이다. 그림 3의 블록도와 같이 HPA1과 HPA2가 각각 Ratioanl model에 의해 비선형 왜곡 특성을 가질 경우, 제안된 수신기 포함 전치왜곡기는 두 개의 비선형 특성에 대해서 적응적으로 보상 가능함을 보인다. 제안된 시스템이 가지는 장점은 위성의 비선형 특성을 위상에서 보상하지 않고 지상국에서 전치 왜

곡함으로써 위성의 설계를 간단히 하는데 그 목적이 있다. 위성의 Ratioanl 모델에 IBO를 약 2dB 주고 제안된 전치 왜곡 방식을 사용하게 되면 비선형 왜곡에 대한 특성으로 인한 SNR 저하가 1dB 발생하기 때문에, 전력 효율이 비선형 왜곡 특성이 없을 경우에 비해서 약 1dB 저하 되는 것을 확인 할 수 있다.

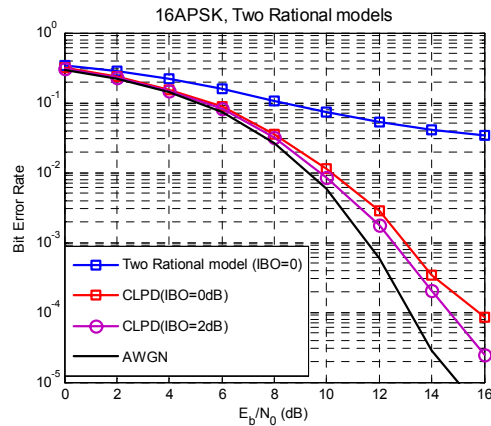


그림 8. 위성통신에서 제안된 시스템의 성능 분석.
Fig. 8. Analysis of BER performance of proposed system in satellite system.

V. 결 론

본 논문에서는 비선형 왜곡 문제를 보상하기 위해서 수신 단에서 수신 정보를 피드백 하여 송신 단에서 비선형 왜곡 문제를 보상 할 수 있는 수신기 포함 페루프 사전 등화 방식을 제안한다. 시뮬레이션 결과 제안된 시스템은 메모리 효과를 가지는 고전력 증폭기의 비선형 왜곡 특성을 효과적으로 보상 할 수 있었다. 또한, 단순한 현재의 입력 값만을 보상하는 전치왜곡기에 방식에 비해서 BER=10⁻⁴을 만족할 경우 2dB의 SNR 이득을 가지기 때문에 전력 효율이 2dB 향상 된다. 위성 통신 시스템의 경우 비선형 특성을 보상하기 위해서 위성에서 추정 및 보상이 동시에 진행 된다. 이러한 설계방식은 위성에 추가적인 회로 설계를 요구하게 된다. 제안된 시스템을 사용할 경우 수신 단에서 비선형 오차를 추정하며 이러한 정보를 송신단인 지상국에 전송한다. 따라서 위성에서 비선형 전치왜곡기를 간단하게 설계 할 수 있을 것으로 예상된다. 제안된 시스템을 사용하여 고전력 증폭기 이외에 LNA, 수신기 등에서 발생하는 비선형 문제를 포괄하는 비선형 개선

방법에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

References

- [1] D. S. Han, Taewon Hwang, "An adaptive pre-distorter for the compensation of HPA nonlinearity," *IEEE Trans. on Broa.*, vol. 46, no. 2, pp. 152-157, June, 2000.
- [2] J. X. Qiu, David K. Abe, Thomas M. Antonsen, Jr, Bruce G. Danly, Baruch Levush, Robert E. Myers, "Linearizability of TWTAs using predistortion techniques," *IEEE Trans. on Elec*, vol. 52, no. 5, pp. 718-727, May. 2005.
- [3] H. H. Chen, C. H. Lin, Po-Chiun Huang, Jiunn-Tsair Chen, "Joint polynomial and look-up-table predistortion power amplifier linearization," *IEEE Trans. on Circ*, vol. 53, no. 8, pp. 612-616, Aug. 2006
- [4] Bo Ai, Z. X. Yang, C. Y. Pan, S. G. Tang and T. T. Zhang, "Analysis on LUT based predistortion method for HPA with memory," *IEEE Trans. on Broad*, vol. 53, no.1, pp. 127-131, Mar. 2007.
- [5] L. Hao, D. H. Kwon, D. Chen, Y. Chiu, "A fast digital predistortion algorithm for radio-frequency power amplifier linearization with loop delay compensation," *IEEE Journal of selected topics in signal processing*, vol. 3, no. 2, pp. 374-383, June 2009.
- [6] X. Hu, G. Wang, Z. C. Wang and J. R. Luo, "Predistortion linearization of an x-band TWTA for Communications Applications," *IEEE Transaction on, Electron Devices*, vol. 58, no. 6, pp. 1768-1744, June 2011.
- [7] Oualid Hammi, Mayada Younes, Fadhel M. Gannouchi, "Metrics and Methods for Benchmarking of RF Transmitter Behavioral Models With Application to the Development of a Hybrid Memory Polynomial Model," *IEEE Trans. on Broad*. vol. 56, no.3, pp.350-357, Sep. 2010.

복 준 영 (Junyeong Bok)



이동 통신 시스템

2010년 2월 충북대학교 전자공학과(공학사)
 2012년 2월 충북대학교 전자공학과(공학석사)
 2012년 3월~현재 충북대학교 전자공학과 박사과정
 <관심분야> 무선 통신 시스템,

조 병 각 (Byung Gak Jo)



모뎀

2000년 2월 아주대학교 전기전 자공학부(공학사)
 2002년 2월 아주대학교 전기전 자공학부(공학석사)
 2002년 1월~현재 국방과학 연구소 선임 연구원
 <관심분야> 위성 통신 시스템,

백 광 훈 (Gwang Hoon Baek)



네트워크 모뎀

1988년 2월 경북대학교 전자공학과(공학사)
 1990년 2월 경북대학교 전자공학과(공학석사)
 1990년 1월~현재 국방과학 연구소 책임 연구원
 <관심분야> 위성 통신 시스템,

유 흥 균 (Heung-Gyoon Ryu)



1988년~현재 충북대학교 전자공학과 교수
 2002년 3월~2004년 2월 충북대학교 컴퓨터정보통신연구소 소장
 1996년~현재 IEEE, IET 논문 심사위원
 2002년 한국전자과학회 학술상 수상
 2008년 ICWMC 2008 국제학술대회 "Best Paper Award" 수상
 <관심분야> 무선 통신 시스템, 위성통신, B3G/4G 이동통신 시스템, 통신회로 설계 및 통신 신호 처리