비선형 전력 증폭기의 포화영역에서 강인한 디지털 전치왜곡 기법

홍순일 · 정의림*

국립한밭대학교

A Robust Digital Pre-Distortion Technique in Saturation Region for Non-linear Power Amplifier

Soon-Il Hong · Eui-Rim Jeong*

Hanbat National University

E-mail : sihong@hanbat.ac.kr · erjeong@hanbat.ac.kr (*교신저자)

요 약

무선 통신 시스템에서 전력 증폭기는 신호를 원거리로 송신하기 위해 필수적인 부품이다. 일반적으로 전력증폭기는 비선형 특성을 가지고 있는 소자이며, 입력 전력이 높을수록 심한 비선형 특성을 보인다. 또한 이러한 비선형 왜곡은 신호품질을 저하시키고 인접 채널 간섭을 유발하게 된다. 전력증폭기의 비선형 특성을 선형화하기 위한 다양한 기술들이 알려져 있는데, 그 중에서 디지털 전치왜곡 방식이 디지털 신호처리를 이용하여 효과적으로 전력증폭기를 선형화 하는 것으로 알려져 있다. 하지만, 전력 증폭기가 포화 영역에서 동작 할 경우 심한 비선형 왜곡의 영향으로 전력증폭기의 선형화가 제대로 이루어지지 않는 문제가 있다. 본 논문에서는 포화 영역에서 디지털 전치왜곡 성능 개선을 다루는데, 계수를 구하는 적응형 알고리즘에서 왜곡이 심한 포화영역의 입력 신호에서는 적응형 알고리즘을 동작시키지 않고 비포화 영역의 신호에서는 알고리즘을 동작시킴으로써 전치왜곡의 성능을 개선하는 방안을 제안한다. 제안하는 알고리즘을 검증하기 위해 MATLAB을 사용하여 컴퓨터 모의실험을 수행하였고, 기존의 디지털 전치왜곡 방식과의 비교 분석도 수행하였다.

ABSTRACT

Power amplifier is an essential component for transmitting signals to a remote receiver in wireless communication systems. Power amplifier is a non-linear device in general, and the nonlinear distortion becomes severer as the output power increases. The nonlinearity results in spectral regrowth, which leads to adjacent channel interference, and decreases the transmit signal quality. To linearize power amplifiers, many techniques have been developed so far. Among the techniques, digital pre-distortion is known as the most cost and performance effective technique. However, the linearization performance falls down abruptly when the power amplifier operates in its saturation region. This is because of the severe nonlinearity. To relieve this problem, this paper proposes a new adaptive predistortion technique. The proposed technique controls the adaptive algorithm based on the power amplifier input level. Specifically, for small signals, the adaptive predistortion algorithm works normally. On the contrary, for large signals, the adaptive algorithm stops until small signals occur again. By doing this, wrong coefficient update by severe nonlinearity can be avoided. Computer simulation results show that the proposed method can improve the linearization performance compared with the conventional digital predistortion algorithms.

키워드

전력 증폭기, 비선형 왜곡, 디지털전치왜곡(Digital Pre-Distortion), RMS(Recursive Least Squares)

Ⅰ. 서 론

최근 무선 통신은 기술의 발달함에 따라 통신 시스템의 필수적 부품인 전력 증폭기의 성능 개선에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다. 특히 전력 증폭기에 대한 선형성과 효율은 전체적인 통신 시스템 성능을 나타내는 지표라고 할 수 있다. 일반적으로 전력 증폭기는 비선형 특성을 가지고 있는 소자이며, 이 비선형 왜곡이 심하면 신호 품질이 저하되고 인접대역 간섭이 증가하게 된다. 따라서 비선형 특성이 많이 보이는 포화 영역에서 구동하지 못하고 선형특성으로 동작하는 낮은 전력에서 동작시킨다. 낮은 전력에서 동작하는 경우 선형성은 유지되지만 전력 증폭기는 10~20% 정도의 낮은 효율을 가진다. 전력 증폭기의 선형성을 유지하며 효율을 개선하기 위하여 피드포워드(feedforward), 피드백(feedback), 아날로그/디지털 전치왜곡(analog/digital predistortion)등과 같은 다양한 방식들이 제안되었으며 상용화 되고 있다.[1] 이 중 대표적인 방식인 디지털 전치왜곡 방식은 간단한 구조와 적은 구성요소, 적은 구현 비용으로 우수한 선형화 성능과 높은 전력효율성으로 효과적인 기술로 알려져 있다[2]. 디지털 전치왜곡은 전력 증폭기의 입력하는 신호와 출력되는 신호를 이용하여 비선형 전력 증폭기의 역함수 특성을 갖는 전치 왜곡기를 구현하여 역함수 특성으로 왜곡된 신호를 전력 증폭기에 입력함으로써 비선형 전력 증폭기를 선형화 하는 기술이며, Lookup Table 방식과 다항식 기반 방식으로 분류할 수 있다.

디지털 전치왜곡 기법 중 다항식을 기반으로 하는 전치왜곡 방식은 대체로 우수한 선형화 성능을 보인다. 하지만 입력 신호의 크기가 포화전력에 가깝게 점차 커지면 선형화 성능이 급격하게 나빠지는 문제점을 가지고 있다. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여 전치왜곡기의 입력 신호의 크기가 정해진 문턱 값보다 작은 경우 정상적인 전치왜곡 알고리즘을 동작시켜 전치왜곡 계수 값을 갱신하며, 문턱 값보다 큰 크기의 신호가 입력되면 전치 왜곡 계수 값을 갱신하지 않고 기존 전치왜곡 계수 값을 적용하는 방식을 제안한다.

Ⅱ. 본 론

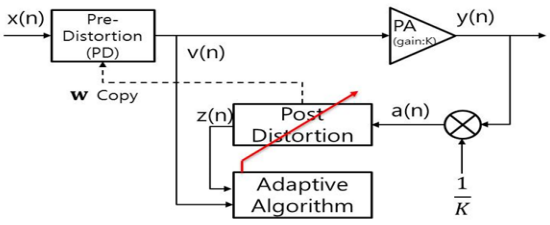

그림 1. 간접 학습 방식의 전치 왜곡기 블록도

본 논문에서는 간접 학습 방식의 전치 왜곡 방식을 고려한다(그림 1 참조). 디지털 전치 왜곡기 법은 적응형 알고리즘에 전치 왜곡기에 의해 왜곡된 N개의 송신신호 v(n)과 사후 왜곡기에 의해 왜곡된 N개의 피드백 신호 z(n)을 입력하여 v(n)과 z(n) 사이의 오차가 최소값으로 수렴하도록 전치 왜곡 계수 값 $\boldsymbol{w}$를 갱신하며, $\boldsymbol{w}$를 갱신하는 적응형 알고리즘은 RLS (recursive least squares) 방식을 이용한다. 이 알고리즘은 $\boldsymbol{w}$와 $\boldsymbol{P}$ 두 벡터를 표 1과 같은 초기값을 갖고 알고리즘이 동작을 한다. 즉, 최초에 이 알고리즘을 동작시킬 때에는 아무런 정보도 없으므로 $\boldsymbol{w}$는 모든 원소가 '0'인 벡터를 초기값으로 사용하고, $\boldsymbol{P}$는 (Q+1)-by-(Q+1)의 크기를 가지는 단위행렬로 초기화 한다. 적응형 알고리즘의 동작 후 수렴된 $\boldsymbol{w}$ 값은 전치 왜곡기(PD)에 복사되어 입력신호 x(n)에 적용하여 전치 왜곡 신호 v(n)을 출력한다. 즉, 전치 왜곡기는 다항식을 이용하여 구현하며, 전치 왜곡기 입력 x(n)과 전치 왜곡기 출력 v(n)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v(n) = x(n)\sum_{q=0}^{Q} w_q^* |x(n)|^{2q} = \boldsymbol{w}^{\boldsymbol{H}}\boldsymbol{x}(n) \cdots\cdots (1)$$

위 수식에서 두 벡터 $\boldsymbol{w}, \boldsymbol{x}(n)$의 크기는 (Q+1)-by-1이며, 다음과 같이 정의한다.

$\boldsymbol{w} = [w_0, w_1, ..., w_Q]^T$이고 입력신호를 왜곡시켜주는 전치 왜곡 계수를 나타낸다. 또한, $\boldsymbol{x}(n) = [x(n), x(n)|x(n)|^2, ..., x(n)|x(n)|^{2Q}]^T$이다. 이러한 과정을 통해 만든 전치 왜곡기의 출력 v(n)을 전력 증폭기에 입력함으로써 비선형 전력증폭기를 선형화한다.

표 1. 간접학습 구조의 전치왜곡 알고리즘

초기화:

$\mathbf{w} = [0,0,...,0]^T$, $\mathbf{P} = \mathbf{I}_{Q+1}$

전치왜곡 계수를 구하는 적응형 알고리즘:

for n=1,⋯,N

{

$\mathbf{u} = [y(n), y(n)|y(n)|^2, ..., y(n)|y(n)|^{2Q}]^T$

$z(n) = \mathbf{w}^H\mathbf{u}$

$\boldsymbol{\kappa} = \dfrac{\lambda^{-1}\mathbf{P}\mathbf{u}}{1+\lambda^{-1}\mathbf{u}^H\mathbf{P}\mathbf{u}}$

$e(n) = v(n) - z(n)$

if ($|v(n)| \le$ max_W)

{

$\mathbf{w} = \mathbf{w} + \boldsymbol{\kappa}e^*(n)$ ····· (1)

$\mathbf{P} = \lambda^{-1}\mathbf{P} - \lambda^{-1}\boldsymbol{\kappa}\mathbf{u}^H\mathbf{P}$ ····· (2)

}

}

디지털 전치 왜곡 방식은 입력 신호의 전력이 포화영역에 포함하고 있지 않으면 최적의 전치 왜곡 계수 $\boldsymbol{w}$값을 얻을 수 있으며, 전력 증폭기를 선형화 할 수 있고 효율을 증가 시킬 수 있다. 하지만, 입력 신호의 전력이 전력 증폭기의 포화 영역에 포함 될 경우, 사후 왜곡기를 통해 갱신된 계수 $\boldsymbol{w}$값이 발산할 수 있다. 이렇게 발산되는 경우, 사후 왜곡기를 통해 갱신된 계수 $\boldsymbol{w}$값을 전치 왜곡기에 적용할 때 입력 신호가 포화 영역에 포함한 신호뿐만 아니라 포화 영역에 포함되지 않는 신호 또한 선형화가 제대로 이루어지지 않는다.

제안하는 디지털 전치 왜곡 방식은 입력신호의 크기가 전력 증폭기의 최대 출력 이상의 값 일 경우 전치 왜곡 계수 값 $\boldsymbol{w}$값을 갱신하지 않고 유지하는 방안을 제안하고 있다. 즉, 전력 증폭기의 최대 출력 값이 'A'인 경우 문턱 값을 'A'로 설정하여 입력신호의 크기가 문턱 값 'A'보다 작을 경우에는 표 1의 (1), (2)과정을 수행하여 $\boldsymbol{w}$값을 갱신하며 입력 신호의 크기가 문턱 값 'A'보다 클 경우에는 이전의 $\boldsymbol{w}$값을 유지하여 포화 영역 이외의 신호에 대해서 선형성을 보상할 수 있는 전치 왜곡 계수 $\boldsymbol{w}$값을 구하도록 한다.

Ⅲ. 모의실험 및 결과

제안하는 디지털 전치 왜곡 기법의 성능을 컴퓨터 모의실험을 통하여 확인하였다. 모의실험 환경은 다음과 같다. 전력 증폭기의 입력신호인 송신 신호로 64-QAM(Quadrature Amplitude Modulation)으로 변조되며 대역폭이 20MHz인 LTE 상향링크 신호를 사용되었고 입력신호가 포화영역에 포함되게 하기 위해 송신신호 크기의 최대값이 1.6이 되도록 하였다. 비선형 전력 증폭기 모델로 Saleh 모델을 이용하였다[3]. 전력 증폭기의 특성을 결정하는 각각의 계수 값을 다음과 같이 설정하였으며, 입력 신호의 크기가 1.7이상의 경우에는 출력 값이 최대 출력 값인 '1'로 출력되도록 하였다. 또한, 전력 증폭기의 이득은 '1'이라고 가정하였으며, 수식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$y(n) = v(n) \times \frac{K_1}{1+K_2|v(n)|^2} e^{j\frac{K_3|v(n)|^2}{1+K_4|v(n)|^2}} \cdots\cdots\cdots (2)$$

$$K_1 = 1.1,\ K_2 = 0.3, K_3 = 1,\ K_4 = 1$$

그림 2, 3에서 (a)는 전력 증폭기의 이상적인 출력에 대한 AM-AM 특성과 AM-PM 특성을 보여주고 있으며, (b)는 모의실험에 사용된 전력 증폭기 모델의 AM-AM 특성과 AM-PM 특성을 보여주고 있다.

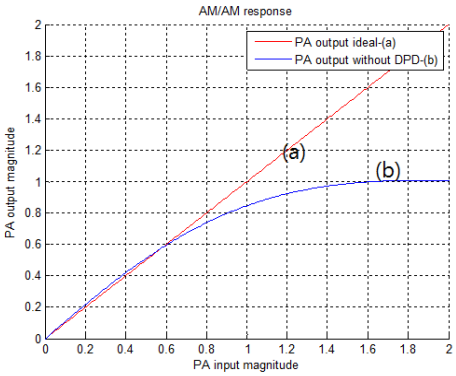

그림 2. AM-AM 특성

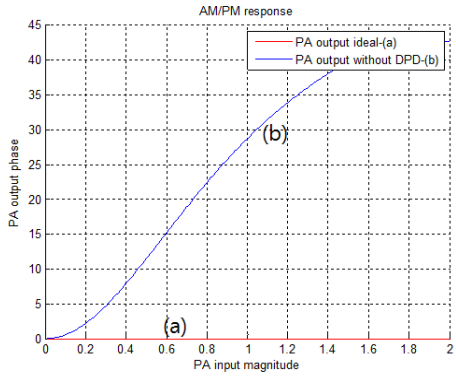

그림 3. AM-PM 특성

디지털 전치 왜곡기의 모델은 RLS 알고리즘을 적용하였으며 최고 차수가 15인 다항식으로 적용하였고, 간접학습방식을 사용하였다. 적응형 알고리즘에서 전치왜곡 계수를 갱신하는데 사용되는 변수 λ값은 '1'로 적용하였다. 제안하는 디지털 전치 왜곡기에서 문턱 값 'A'는 전력 증폭기의 출력의 최대 크기 값인 '1'로 설정하였다.

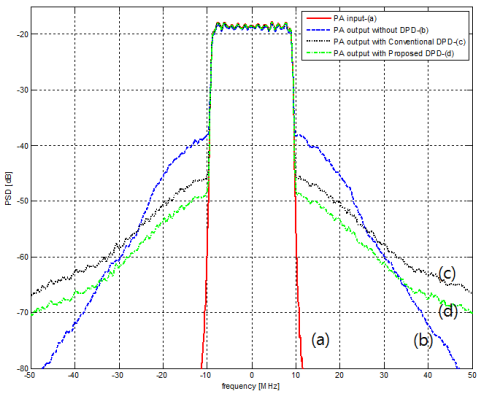

그림 4. 전력 증폭기의 스펙트럼

그림 4는 기존의 전치왜곡 방식과 제안된 전치

왜곡 방식을 적용하였을 때의 스펙트럼을 보여주고 있다. 빨간색은 전력 증폭기의 입력신호 스펙트럼(a)이고 파란색은 디지털 전치왜곡을 적용하지 않았을 때의 스펙트럼(b)이다. 검정색은 기존 방식을 적용하였을 때의 스펙트럼(c)이며 연두색은 제안한 방식을 적용하였을 때의 스펙트럼(d)이다.

모의실험을 통해 전력 증폭기의 입력신호의 크기가 포화영역에 포함될수록 기존 디지털 전치왜곡 기법을 적용하였을 경우가 아무것도 적용하지 않았을 경우보다 인접대역의 전력 스펙트럼 밀도가 10dB정도 떨어졌으며, 제안하는 방식을 적용하였을 때는 기존의 방식보다 4dB 개선되었음을 확인할 수 있다. 즉, 비선형 전력 증폭기의 입력신호 크기가 포화영역에 분포해 있을 경우에는 기존의 방식보다 제안하는 방식이 적절할 수 있다.

Ⅳ. 결 론

전력 증폭기의 특성은 시간과 전력, 온도에 따라 변하기 때문에 지속적으로 비선형 특성을 추적하면서 역함수 특성을 찾아 증폭기의 선형성을 보장하여야 한다. 특히 전력 증폭기의 입력 범위가 포화 상태 범위의 입력 신호를 포함 할 경우, 포화 영역에서의 입력 신호 영향으로 인해 포화 상태의 입력 신호는 물론이고 이 외의 입력 신호에도 영향을 끼친다. 본 논문에서는 입력신호 크기가 포화영역에 분포하고 있을 때 디지털 전치왜곡 방식에서 전치왜곡 계수를 갱신하는 과정을 제한함으로써 전력 증폭기의 성능을 개선할 수 있음을 보여준다.

참고문헌

[1] S. C. Cripps, "RF power amplifiers for wireless communications," Artech House Microwave Library, 2006.

[2] R. Marsalek, P. Jardin, and G. Baudoin, “From post-distortiion to predistortion for power amplifiers linearization,” IEEE Commun. Letters, vol. 7, pp. 308-310, July 2003.

[3] A. A. M. Saleh, “Frequency-independent and frequency-dependent nonlinear models of TWT amplifiers,” IEEE Trans. Commun., vol. COM-29, no. 11, pp. 1715-1720, Nov. 1981.