

# 비선형왜곡감소를 위한 보간 적용 전치왜곡기 연구

권 오 주, 이 중 성, 이 은 형  
국방과학 연구소

## A predistorter using interpolator for reduction of nonlinear distortion

Oh Ju Kwon, Jung Sung Lee and Eun Hyung Lee

Agency for Defense Development

E-mail : koj@add.re.kr

### Abstract

This paper proposes LUT based predistorter using interpolator to reduce nonlinear distortion which was generated by HPA. We minimized performance degradation from the reduced LUT size with linear interpolation. We updated LUT using LMS algorithm using input data as reference data. As a result, it is shown that when the size of the LUT is 8, linear interpolation is the most outstanding performance in the view of performance and H/W complexity.

### I. 서론

단일 반송파 방식에 비해 주파수 왜곡과 비선형왜곡에 민감한 OFDM방식은 역푸리에 변환(IFFT : Inverse Fast Fourier Transform)을 통과한 신호의 크기가 동일위상인 경우 높은 최대전력대 평균전력비(PAPR:Peak-to-Average Power Ratio)를 유발하므로 고출력증폭기(HPA : High Power Amplifier)를 통과할 경우 증폭기의 비선형 특성으로 인하여 채널간 간섭, 혼변조 등과 같은 심각한 비선형 왜곡을 발생시킨다. 비선형 증폭기의 동작점을 선형영역으로 백오프시키는 방법을 사용하여 비선형 특성을 감소시킬 수 있으나, 이러한 방법은 송신신호의 출력 감소를 발생시키므로 시스템 성능저하, 채널 페이딩 마진 감소 등의 원인이 된다.<sup>[1]</sup>

고출력증폭기에 의한 왜곡을 감소시키는 방법은 수신

단에서 비선형 등화기를 사용하여 보상하는 방법, 고출력 증폭기에 의해 발생하는 비선형 왜곡의 양만큼 고출력증폭기의 입력 전단에서 신호를 미리 왜곡시켜 고출력 증폭기의 특성을 선형화 시키는 전치왜곡방법(predistortion)이 있다. 비선형 왜곡은 송신단의 고출력 증폭기에 의해 주로 발생되므로 송신단에서 전치왜곡기를 사용하여 비선형왜곡을 감소시키는 방법이 주로 사용되어왔다.

Nagata가 제안한 룩업테이블(LUT:Look Up Table)을 이용한 매핑 전치왜곡기는 구조가 간단하고 성능이 우수한 방법으로 메모리 특성이 없는 모든 고출력증폭기에 적용 가능하지만 LUT의 크기는 입력신호를 나타내는 비트 수에 의존하기 때문에 입력 데이터 비트수가 증가함에 따라 LUT의 복잡도가 증가하고 LUT을 갱신하기 위해 많은 시간이 소요되는 단점이 있다.<sup>[2]</sup>

Cavers는 LUT의 크기를 줄이기 위해 복소신호 대신에 신호의 크기만을 이용하여 LUT의 값을 결정하는 이득기반 전치왜곡기(gain based predistorter)를 제안하였다.<sup>[3]</sup> 이득기반 전치왜곡기의 성능은 매핑전치왜곡기의 성능과 유사하고 LUT의 복잡도를 줄일 수 있지만, 여전히 LUT크기가 커서 초기 LUT 작성에 요구되는 시간이 길다는 단점이 있다.

본 논문은 LUT 갱신시간을 줄이기 위해 LUT의 크기를 최소화하는 방법으로 보간기와 LUT을 결합한 전치왜곡기를 제안한다. LUT을 보간하는 방법으로 최소근접(nearest interpolation), 선형 보간(linear interpolation), 큐빅 보간(Cubic interpolation)을 적용하여 성능을 비교, 분석한다. 그리고, 시간에 따른 고출력 증폭기 특성을 정확히 표현하기 위해 최소평균자승

(LMS:Least Mean Square) 알고리즘을 사용하여 LUT을 갱신한다. LMS 알고리즘을 사용하여 LUT을 갱신할 때 LUT의 크기가 작기 때문에 발생하는 LUT 갱신 오차를 줄이기 위해 보간기를 적용하여 LUT을 갱신한다.

## II. 비선형왜곡

직교진폭변조(QAM:Quadrature Amplitude Modulation) 방식을 이용한 OFDM기저대역 시스템을 그림 1에 나타냈다.

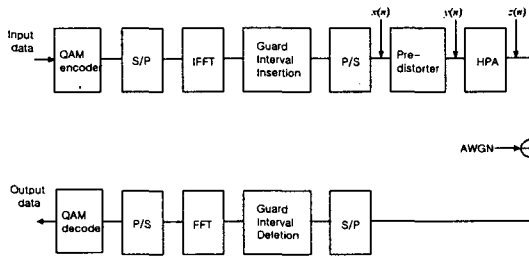


그림 1. OFDM 시스템

입력 데이터는 IFFT를 거친 후, 식(1)과 같은 변조신호  $x(n)$ 으로 표현된다.

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} d(k) e^{i2\pi kn/N} = \rho_n e^{i\theta_n} \quad (1)$$

여기서  $\rho_n$ ,  $\theta_n$ 은 입력신호의 크기 및 위상을 나타낸다.

변조신호  $x(n)$ 은 전치왜곡기를 통과한 후에 식 (2)와 같은 전치왜곡 신호  $y(n)$ 으로 변한다.

$$y(n) = R_n e^{i\psi_n} = \rho_n p_n e^{i(\theta_n + \zeta_n)} \quad (2)$$

여기서,  $R_n$ 은 전치 왜곡된 신호의 크기이며,  $p_n$ ,  $\zeta_n$ 은 전치왜곡기의 전치왜곡이득 및 위상이다. 전치 왜곡된 신호  $y(n)$ 은 TWTA와 같은 고출력증폭기에 의해 식 (3)과 같이 증폭되어 전송된다.

$$z(n) = A(R_n) e^{i(\psi(R_n) + \theta_n)} = A(\rho_n p_n) e^{i(\psi(\rho_n p_n) + \theta_n + \zeta_n)} \quad (3)$$

여기서  $A(R_n)$ ,  $\psi(R_n)$ 은 증폭기 AMAM 특성, AMPM 특성을 나타낸다. 본 논문은 Saleh가 제안한 TWTA 고출력증폭기 입력력관계를 식 (4)와 같이 메모리 없는 비선형 시스템으로 표현한다.

$$A(R_n) = \frac{1.9638 \cdot R_n}{1 + 0.9945 \cdot R_n^2} \quad \psi(R_n) = \frac{2.5293 \cdot R_n^2}{1 + 2.8168 \cdot R_n^2} \quad (4)$$

## III. 전치왜곡기

전치왜곡기 입력값  $x(n)$ 이 비선형왜곡없이 출력값  $z(n)$ 과 동일한 값을 갖기 위해 전치왜곡기의 이득 및 위상  $p_n$ ,  $\zeta_n$ 은 다음 조건을 만족해야한다.

$$A(\rho_n p_n) = \rho_n \quad (5)$$

$$p_n = \frac{A^{-1}(\rho_n)}{\rho_n} \quad (6)$$

$$\psi(\rho_n p_n) + \theta_n + \zeta_n = \theta_n \quad (7)$$

$$\zeta_n = -\psi(A^{-1}(\rho_n)) \quad (8)$$

여기서  $A^{-1}(\rho_n)$ 은 고출력증폭기 출력이  $\rho_n$ 일 때의 입력 값이다. 따라서, 전치왜곡기의 이득  $p_n$ 은 입력신호 크기  $\rho_n$ 과 고출력증폭기 출력신호크기가  $A^{-1}(\rho_n)$ 인 고출력증폭기의 입력신호의 비로 구할 수 있다. 그리고, 전치왜곡기의 위상  $\zeta_n$ 은 고출력증폭기 출력 신호크기가  $A^{-1}(\rho_n)$ 인 고출력증폭기 입력신호의 위상왜곡값을 나타낸다. 즉, 전치왜곡기의 이득 및 위상값을 입력값과 입력값에 대한 고출력증폭기 비선형왜곡된 출력값으로 구할 수 있다.

따라서, 본 논문은 전치왜곡 이득 및 위상을 구하기 위해 고출력증폭기의 AMAM과 AMPM으로 구성된 초기 LUT을 작성한다. 그리고, 변조된 입력신호의 크기 값, LUT 및 보간기를 이용하여 전치왜곡기의 이득 및 위상을 구한다. 고출력증폭기 특성이 시간에 따라 변하므로 AMAM 및 AMPM으로 구성된 LUT을 LMS 알고리즘과 보간기를 이용하여 갱신한다.

초기 LUT은 식 (4)로부터 다음과 같이 구한다. 입력신호 크기를 정규화하고 LUT의 크기  $N_t$ 를 정한 후, 입력신호크기 간격을  $1/(N_t-1)$  간격(0,  $1/(N_t-1)$ ,  $2/(N_t-1), \dots, 1$ )로 나누어 LUT의 입력신호 전압 레벨을 구한다.  $n/N_t$  ( $n=0, \dots, N_t-1$ )를 식 (4)의 입력값으로 활용하여 구한 AMAM, AMPM특성값을 초기 LUT로 사용한다. 초기 LUT를 구한 후, 입력신호  $x(n)$ 에 대한 전치왜곡 이득 및 위상을 그림 2와 같이 구한다. 입력신호  $x(n)$ 의 크기값  $\rho_n$ 을 구한 후, 입력값  $\rho_n$ 과 동일한 AMAM 출력값에 해당하는 입력값  $\rho_n p_n$ 을 그림 2(a)와 같이 구하여 전치왜곡이득값을 구한다. 전치왜곡 위상은  $\rho_n p_n$ 에 해당하는 출력값  $\zeta_n$ 로부터 그림 2(b)와 같이 구한다.

LUT 엔트리 사이값에 해당하는 입력신호크기  $\rho_n$ ,  $\rho_n p_n$ 과 출력위상을 LUT 엔트리 사이값에 정확히 표현하기 위해 본 논문은 최소근점보간법, 선형보간법, 큐빅보간법 중에서 성능 및 하드웨어 복잡도를 고려하여 가장 성능이 우수한 보간 방법을 전치왜곡에 적용하고자 한다. 최소근점 보간법은 출력값에서 가장 인접한 점을 출력값으로 할당하며, 선형보간은 입력값이 포함된 축

구간의 비율과 찾고자하는 출력값이 포함되는 구간사이의 비율을 이용하여 출력값을 구한다.

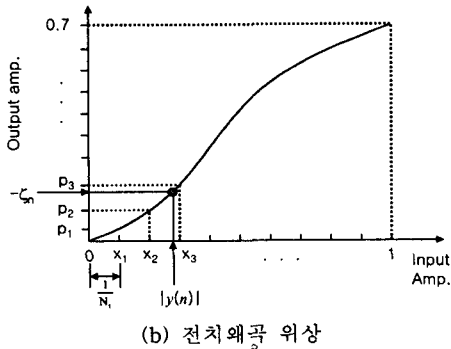
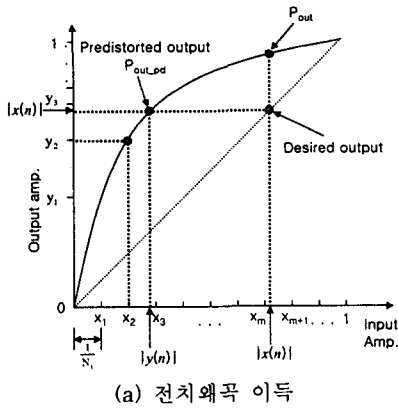


그림 2. 전치왜곡 위상 및 이득

최소근점보간법을 이용하여 구한 전치왜곡 이득 및 위상은 식 (9)와 같다. 입력신호크기값  $\rho_n$ 을 가장 근접한 LUT값  $x_n$ 에 할당하고,  $x_n$ 에 해당되는 고출력증폭기 입력값  $x_3$ 를 구하여 이득을 구하고  $x_3$ 가 입력일 때 출력 위상  $P_3$ 를 구한다.

$$\text{gain} = \frac{x_3}{x_n}, \quad \text{phase} = e^{-jP_3} \quad (9)$$

최소근점보간법을 이용하여 이득 및 위상을 구할 경우 입력값  $\rho_n$ 을 LUT의 입력전력 레벨에서 가장 근접한  $x_n$ 값에 할당하는 과정에서 오차가 발생하고,  $x_n$ 에 대응하는 AMAM 출력값을 찾는 과정에서  $x_n$ 과 동일한 값이 LUT AMAM에 없으므로 가장 근접한 값  $y_3$ 에 할당함으로 오차가 발생한다. 이득을 구할 때 발생된 오차가 포함된  $x_3$ 값을 이용하여 위상값을 구하므로 위상값 또한 오차가 발생한다. 따라서, 전치왜곡신호의 이득과 위상을 구할 때, LUT에 입력신호를 할당하는 대신에 선형 혹은 큐빅 보간법을 적용하여 입력신호 자체를 이용하여 이득 및 위상을 구한다.

입력신호 자체를 이용하는 방법으로 입력신호크기값을 가장 근접한 LUT값에 할당하지 않고 선형 보간 혹은

큐빅 보간법을 적용하여 입력신호크기와 근사한 값을 구하여 아래 식과 같이 이득 및 위상을 구한다.

$$g(n) = \frac{|y(n)|}{|x(n)|}, \quad p(n) = e^{-j\phi_n} \quad (10)$$

여기서  $\rho_n$ 은 입력신호의 크기이고,  $\rho_n P_n$ 은 AMAM 출력값이  $\rho_n$ 일 때의 고출력증폭기 입력값이다.

고출력증폭기의 특성은 시간이 지남에 따라 천천히 변하므로 고출력증폭기의 특성을 나타내는 LUT을 갱신한다. LUT을 구성하는 AMAM특성과 AMPM특성은 서로 독립적이므로 분리하여 각 특성을 갱신할 수 있다. 고출력증폭기, 고출력증폭기의 특성을 나타내는 LUT 및 LUT의 사이값을 보간하는 보간기로 모델링하고 하드웨어 구현이 용이한 LMS 알고리즘을 적용하여 고출력증폭기 특성을 갱신한다.<sup>[4]</sup> 입력신호  $y_n$ 을 기준신호로 이용하므로 기준신호 발생을 위한 별도의 하드웨어가 필요하지 않다.

고출력증폭기를 통과한 출력값  $z(n)$ 과 고출력증폭기를 모델링한 LUT을 통과한 출력값  $\hat{z}(n)$  사이의 오차는 식 (11)과 같다.

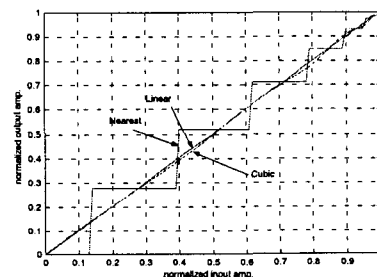
$$e(n) = z(n) - \hat{z}(n) \quad (11)$$

#### IV. 실험결과

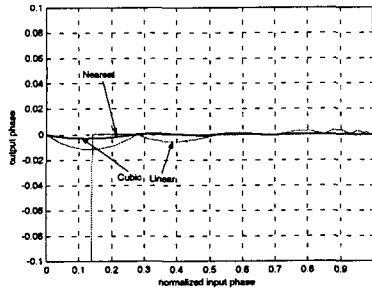
제안한 전치왜곡기를 OFDM시스템에 적용하여 Monte Carlo 시뮬레이션 기법으로 성능을 평가한다. 직병렬 변환기를 거쳐 256개의 16QAM 심벌블록이 OFDM 변조기에 입력되고, 256 포인트 IFFT를 통해 각 부채널로 변조된다. 비선형 왜곡을 보상하기 위한 전치 왜곡기의 영향만을 관찰하기 위해 다중경로 페이딩 영향을 무시한 AWGN 채널로 가정한다.

LUT의 크기를 변화시키면서 최소근점보간법, 선형보간법, 큐빅 보간 보간 방법에 대한 입출력신호의 크기 및 위상차를 비교하였다.

선형 보간의 경우는 LUT크기가 4일 경우 입출력신호크기는 선형특성을 나타내고, 큐빅 보간의 경우는 LUT 크기가 8일 경우 선형특성을 나타낸다(그림 3(a)). 입출력신호크기 특성은 LUT의 크기와 성능을 고려할 때 선형보간 방법이 가장 우수하였다.



(a) 입출력 크기차



(b) 입력력 위상차

그림 3. LUT 크기 8일 때 입력력 신호크기 및 위상차

큐빅 보간과 선형보간의 경우 LUT 크기가 8일 경우 입력력 위상이 거의 같다(그림 3(b)). 입력력신호위상 특성은 LUT의 크기와 성능을 고려할 때 선형보간 및 큐빅보간의 성능이 우수하였다.

제안한 전치왜곡기의 성능을 평가하기 위해 부가백색 잡음을 -5dB에서 15dB로 변화시키면서 LUT의 크기에 대한 SER를 구하였다(그림 4).

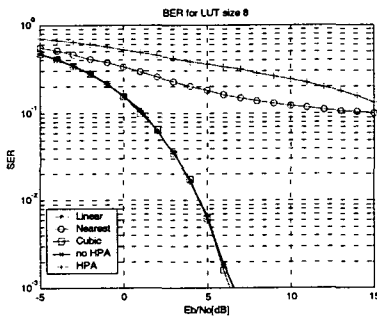


그림 4. 최소근접, 선형, 큐빅보간의 SER 성능(LUT=8)

LUT 크기가 8이상일 때, 선형 보간 및 큐빅 보간의 성능은  $10^{-3}$  SER에서  $E_b/N_0$ 가 대략 6.5dB로 고출력증폭기 왜곡이 없는 경우와 성능이 동일하였다. SER를 기준으로 성능열화가 발생하지않는 최소 LUT의 크기는 선형보간 혹은 큐빅보간을 사용하였을 때 8임을 알 수 있다.

그림 5는 시간이 경과함에 따라 고출력증폭기의 특성이 변화하므로 고출력증폭기의 특성을 모델링하는 LUT 갱신에 관한 성능을 선형 보간에 대해 실험한 것이다. OFDM 심벌수를 1000까지 증가하면서 LUT의 갱신을 MSE로 비교, 평가하였다. 갱신 스텝크기를 크기 및 위상갱신에 0.01을 적용하였다. 선형보간의 경우는 LUT크기가 8일 때 반복횟수 50회 정도에서 MSE는 대략 -52dB이었으며, LUT의 크기가 16일때에는 대략 반복횟수 300회 정도에서 -64dB가 되었다.

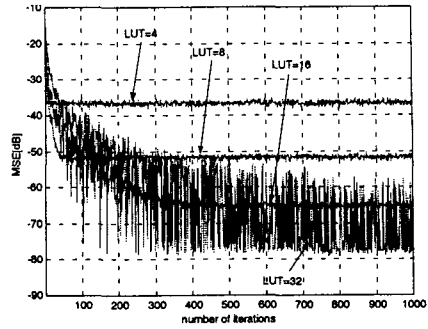


그림 5. 선형보간일 때 MSE

## V. 결론

고출력증폭기로 인해 발생하는 비선형 왜곡을 감소하기 위해 보간기를 이용한 LUT 기반 전치왜곡기를 제안하고 최소근접보간, 선형 보간 및 큐빅보간기를 고려한 전치왜곡기의 성능을 구하였다. 보간기를 LUT에 적용함으로써 LUT 크기가 8일 때 비선형왜곡 영향이 없었고, 반복횟수 50회정도에서 MSE를 대략 -50dB정도 달성할 수 있었다.

하드웨어 복잡도를 고려할 때 LUT의 크기가 8인 선형보간방법의 성능이 가장 우수함을 알 수 있었다.

## 참고문헌

- [1] L. C. Cimini Jr., "Analysis and simulation of a digital mobile channel using orthogonal frequency-division multiplexing," *IEEE Tran. on Comm.*, Vol. 33, No. 7, pp.665-675, Jul. 1985
- [2] Y. Nagata, "Linear Amplification Technique for Digital Mobile Communications," *Proc. IEEE VTC '89*, pp.159-164, 1989
- [3] James K. Cavers, "Amplifier Linearization Using a Digital Predistorter with Fast Adaptation and Low Memory Requirements," *IEEE Tran. on Vehicular Tecnology*, Vol. 39, No. 4, pp.374-382, Nov. 1990
- [4] Simon Haykin, *Adaptive Filter Theory*, NJ : Prentice-Hall, 1991