

# 간단한 제곱근 근사를 이용한 Look-Up Table 기반 디지털 전치 왜곡 기법

\*손예슬    \*\*김현준    \*\*\*윤인우    \*\*\*\*김준태

건국대학교

\*kys221@konkuk.ac.kr

## Look-Up Table Based Digital Pre-Distortion Technique Using Simple Square-root Approximation

\*Son, Ye-Seul    \*\*Kim, Hyun-Jun    \*\*\*Yun, In-Woo    \*\*\*\*Kim, Jun-Tae

Konkuk University

### 요약

이동통신 시스템의 OFDM(Orthogonal frequency division multiplexing) 신호는 큰 PAPR(Peak to Average Power Ratio)을 가지기 때문에 비선형 특성을 가지는 전력 증폭기의 효율 감소를 가져온다. 이러한 전력 증폭기의 비선형 특성을 개선하여 효율을 증가시키기 위해서 전력 증폭기의 역 특성을 가지는 디지털 전치 왜곡기가 이용된다. 본 논문에서는 제곱근 근사를 이용한 Look-up Table(LUT) 기반의 디지털 전치왜곡(Digital Pre-Distortion :DPD) 기법을 제안한다. 제안하는 방식은 복소 이득(Complex Gain) LUT 구조에서 입력신호의 크기를 구할 때, 기존의 테이블을 이용하여 제곱근 연산을 하는 방식보다 좋은 성능을 내면서 근사를 위한 테이블의 메모리를 필요로 하지 않는다. 또한 간단한 쉬프트 연산 등을 이용하므로 DSP 또는 MCU 기반의 DPD를 구현할 때 간단하게 구현 될 수 있다는 장점을 갖는다. 컴퓨터 모의실험을 통해 제안하는 제곱근 근사 방식을 이용한 DPD와 기존의 방식을 사용한 DPD를 비교함으로써 제안하는 방식이 기존 방식보다 좋은 성능을 내면서도 보다 효율적으로 구현될 수 있음을 검증하였다.

### 1. 서론

현대 이동통신 시스템 중 하나인 OFDM 시스템은 상호 직교성을 갖는 복수의 반송파를 사용하여 주파수 이용 효율을 높이고 심볼간 간섭(Intersymbol Interference : ISI)을 줄일 수 있으며 고속으로 구현 가능하다[1]. 하지만 OFDM 신호는 큰 PAPR을 가지기 때문에 비선형 특성을 가지는 전력 증폭기에 인가되었을 때 전력 효율이 감소하고 주파수 영역에서 왜곡을 발생시켜 통신 성능을 저하시키고 많은 열을 발생시켜 높은 냉각 비용을 발생시킨다. 따라서 전력 증폭기의 비선형 특성을 개선하는 것은 중요한 이슈이다. 이러한 전력 증폭기의 비선형 특성을 개선하기 위해 사용하는 방법 중 하나가 DPD 기법이다[2]. DPD는 디지털 영역에서 전력 증폭기의 비선형 특성의 역 특성을 가지는 신호를 생성하며 이를 전력 증폭기의 입력 신호로 인가함으로써 전력 증폭기의 비선형 특성을 개선시킬 수 있다.

DPD 구현 방식에는 LUT 방식과 다항식 방식이 있다[2]-[6]. 다항식 방식은 전력 증폭기의 역 특성을 가지는 계수를 찾아 비선형 함수로 DPD를 구현하는 방법이고, LUT 방식은 전력 증폭기의 역 특성을 갖도록 값을 출력하는 LUT를 생성하여 DPD를 구현하는 방법이다. 다항식 방식의 경우 올바른 계수와 비선형 함수를 이용할 경우 좋은 성능을 보이지만 연산량이 많고 구현이 복잡하다는 단점을 가진다. 반면에 LUT 방식은 테이블 양자화 과정에서 DPD의 성능이 감소하게 되지만 다항식 방식보다 쉽고 간단하게 구현할 수 있다는 장점이 있다.

그림 1은 LUT 방식 중 하나인 복소 이득 LUT의 구조이다[3]. 복

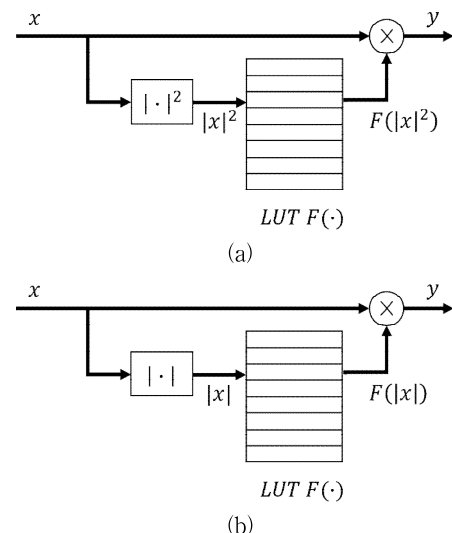


그림 1. (a) LUT의 주소로 입력신호의 거듭제곱을 사용하는 경우 (b) 입력신호의 크기를 사용하는 경우

소 이득 LUT방식은 입력신호의 거듭제곱 또는 크기의 구간을 LUT의 주소로 하여 출력신호를 결정한다[5][6]. 입력신호의 거듭제곱을 LUT의 주소로 사용하는 경우 신호가 높은 크기 영역에 집중된다. 따라서 같은 LUT 크기에서 LUT의 주소로 입력신호의 크기를 사용하는 경우가 더 좋은 성능을 가진다. 그러나 입력신호의 크기를 사용하는 경우에

는 제공근 연산이 필요하므로 시스템의 복잡도가 증가한다. 따라서 제공근 연산의 복잡도를 감소시키기 위해 제공근을 테이블을 이용하여 근사하는 방법이 소개되었다[6]. 이 근사 방법은 실제 제공근 연산을 통해 구하는 경우와 비등한 성능을 가지지만 제공근을 계산하기 위한 테이블의 메모리가 필요하다는 단점이 있다. 본 논문에서는 복소 이득 LUT 방식에서 입력신호의 크기를 사용하기 위해 테이블을 사용하지 않는 제공근 근사 방법[7]을 이용하여 기존의 방법과 비등한 성능을 가지면서 메모리 없이 간단하게 구현될 수 있는 방식을 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 서론에 이어 2장에서는 본 논문에서 사용할 테이블이 없는 제공근 근사 방법에 대하여 소개하고, 3장에서는 2장에서 소개한 방법을 적용한 DPD 구조를 설명한다. 마지막으로 4장에서는 컴퓨터 모의실험을 통해 제안하는 방법을 적용한 DPD 성능을 기존의 방법을 적용한 DPD와 비교하여 검증하였다.

## 2. 간단한 제공근 근사 방법

본 논문에서 사용할 제공근 근사 방법은 구간적 선형 근사 (Piecewise Linear Approximation)를 기반으로 하여 테이블 없이 간단하게 구현 가능한 방법으로 [7]에서 소개되었으며 그 동작 원리는 다음과 같다.

어떠한 입력신호  $x$ 가  $2N$ -bit의 양수일 때  $x$ 의 범위를  $N$ 개의 구간으로 나눈다. 이 구간은  $i$ 를 0에서  $N-1$ 까지의 수라고 할 때  $2^{2i}$ 에서  $2^{2i+2}$ 에 해당한다. 이 구간의 양 끝 점과 중간점의 한 점  $2^{2i+1}$ 을 제공근 연산한 것 대해서 3개의 출력 값을 통해 각 점을 이으면 그림 2와 같다. 이 때  $2^{2i+1}$ 의 경우 제공근 연산을 근사하여 다음 식 (1)과 같이 표현하였다.

$$2^{(2i+1)/2} = \sqrt{2} \cdot 2^i \approx (1+1/2) \cdot 2^i = 2^i + 2^{i-1} \quad (1)$$

그림 2에서의 직선  $\gamma$ 와  $\delta$ 를 함수  $f(x)$ 로 표현하면 다음과 같다.

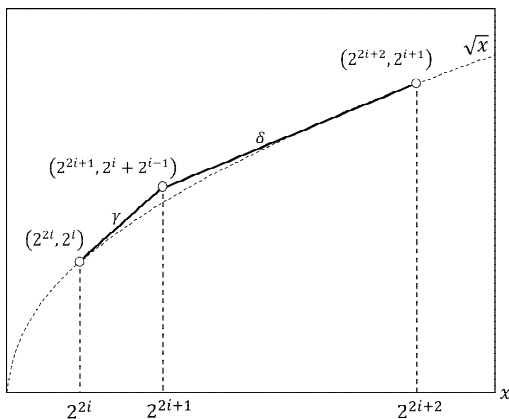


그림 3.  $2^{2i} \leq x < 2^{2i+2}$  구간에 대하여 구간적 선형 근사를 한 그림

$$f(x) = \begin{cases} (2^{2i+1} + (x - 2^{2i}))2^{-i-1} & 2^{2i} \leq x < 2^{2i+1} \\ (2^{2i+2} + 2^{2i+1} + (x - 2^{2i+1}))2^{-i-2} & 2^{2i+1} \leq x < 2^{2i+2} \end{cases} \quad (2)$$

이 때  $x$ 가  $2^{2i+1}$ 보다 작다면  $x - 2^{2i}$ 은  $x_{2i-1:0}$ 이라고 할 수 있다. 또  $x$ 가  $2^{2i+2}$ 보다 작다면  $x - 2^{2i+1}$ 은  $x_{2i:0}$ 이라고 할 수 있다. 이를 적용하면  $2^{2i+1} + x_{2i-1:0}$ 와  $2^{2i+2} + 2^{2i+1} + x_{2i:0}$ 은 2진수 비트 패턴으로  $\{2b10, x_{2i-1:0}\}$ 과  $\{2b11, x_{2i:0}\}$ 으로 간소화 할 수 있

다. 이를 정리하면 식 (3)과 같다.

$$f(x) = \begin{cases} \{2b10, x_{2i-1:0}\} \cdot 2^{-i-1} & x_{2i+1} = 0 \\ \{2b11, x_{2i:0}\} \cdot 2^{-i-2} & x_{2i+1} = 1 \end{cases} \quad (3)$$

식 (3)을 이용하면 테이블 없이 간단한 연산만을 이용하여 제공근을 근사할 수 있다.

또, 이 근사식에서  $x$ 가  $2^{2i+1}$ 일 때의 계산 값이  $\sqrt{x}$ 와 가장 큰 차이를 보이는데, 이 차이를 줄이면서 전체적인 평균 차이는 큰 변화가 없도록 (3) 식에 31/32를 곱해줌으로써 좀 더 나은 성능을 낼 수 있다.

## 3. 제안하는 DPD 구조

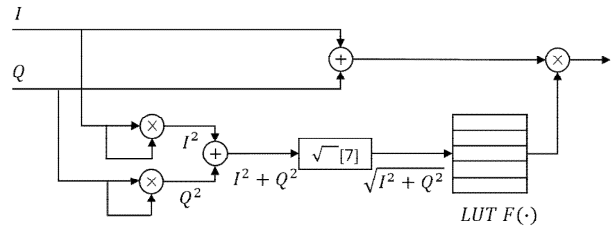


그림 3. 제안하는 DPD 구조

제안하는 DPD 구조는 그림 3과 같다. 복소 이득 LUT의 구조에서 입력 신호로 들어오는 IQ 데이터를 각각 자기 자신과 곱한 뒤, 그 결과인  $I^2$ 와  $Q^2$ 을 더하여 입력신호의 거듭제곱으로 만든다. 이를 2장에서 소개한 제공근 근사방법을 이용하여 입력신호의 크기로 만든 뒤 이를 LUT의 주소로 사용한다. 그 다음 LUT의 출력신호를 입력신호와 곱한 값이 DPD의 출력이 된다.

이 구조를 사용함으로써 LUT은 크기와 근사한 값을 주소 값으로 이용하게 되며 따라서 입력신호의 거듭제곱을 LUT의 주소로 사용할 때 보다 더 좋은 성능을 낼 수 있다. 또한 실제 제공근 연산이나 기존의 테이블을 이용하는 제공근 근사 방법에서 비해 간단하게 제공근을 근사함으로써 전체 시스템의 복잡도를 낮출 수 있다.

## 4. 모의실험 결과

4장에서는 3장에서 제안하는 DPD 구조를 이용하여 컴퓨터 모의 실험을 시행하였다. 이 모의실험은 OFDM 신호를 입력신호로 하며, LUT의 크기는 128개를 적용하고, 보간법으로는 최근방 이웃 보간법 (Nearest neighbor interpolation)을 사용하였다.

모의실험 결과로 LUT 주소로 실제 제공근 연산을 사용하는 경우, 테이블을 이용하여 제공근 근사를 하여 크기를 사용하는 경우와 제안하는 간단한 제공근 근사 방법을 사용한 경우의 DPD 성능을 전력 증폭기의 출력신호를 비교하여 검증하였다. 먼저, 이상적인 전력 증폭기의 출력신호와 모의실험 결과를 비교하여 계산한 오류 벡터 크기 (Error Vector Magnitude :EVM)를 표 1에 나타내었다.

표 1의 값을 확인해 보면 제안하는 DPD 구조를 사용한 경우 실제 제공근 연산을 이용한 DPD의 경우와 0.17dB의 미세한 차이를 보이며, 기존의 테이블을 이용한 제공근 근사와 비교하면 3.56dB의 차이로 더 좋은 성능을 보인다.

LUT 주소로 사용한 방법	EVM(dB)
크기	-53.62
테이블을 이용한 제공근 근사	-49.89
간단한 제공근 근사	-53.45

표 1. 기존의 방법들과 제안하는 방법의 EVM

power amplifiers," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 45, no. 4, pp. 707-719, 1996.  
 [7] In-Cheol, P. A. R. K., and K. I. M. Tae-Hwan. "Multiplier-less and table-less linear approximation for square-related functions." *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems* 93.11 (2010): 2979-2988.

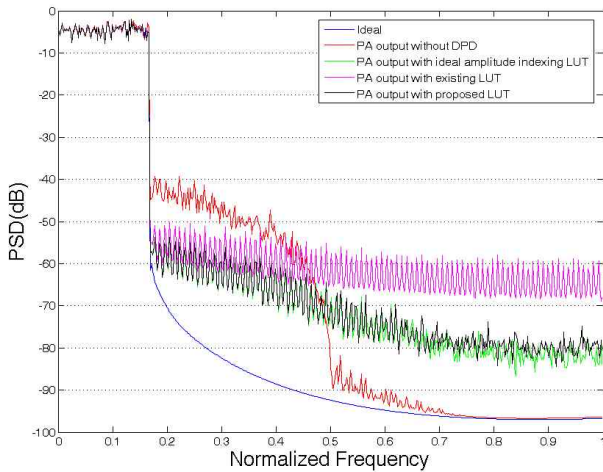


그림 4. 스펙트럼 성능 비교

그림 4는 DPD를 적용한 전력 증폭기 출력 스펙트럼을 비교한 그림이다. 파란색 선은 이상적인 출력신호를 나타내며, 빨간색 선은 DPD를 적용하지 않은 전력 증폭기의 출력이다. 초록색 선은 실제 제공근 연산을 사용한 DPD를 적용한 전력 증폭기의 출력이고 분홍색 선은 기존의 테이블을 이용한 제공근 근사를 사용한 DPD를 적용한 전력 증폭기의 출력이며, 검은색 선이 제안하는 DPD 구조를 적용한 전력 증폭기의 출력이다. 검은색 선과 분홍색 선을 비교해 보면 검은색 선이 전력증폭기 출력의 왜곡을 5dB 정도 더 개선하고 있음을 확인할 수 있으며, 검은색 선과 초록색 선을 비교해 보면 비등한 성능을 내고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 제안하는 DPD 구조를 사용한다면 더 간단하게 이상적인 크기를 사용했을 때와 비등한 성능을 낼 수 있다.

### ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술연구진흥센터의 정보통신·방송 연구개발사업의 일환으로 수행하였음. [R0101-16-0189, 네트워크가 결합된 매체 독립형 차세대 융합방송 시스템 및 모니터링 시스템 개발]

### 참 고 문 헌

[1] Nee, Richard van, and Ramjee Prasad. OFDM for wireless multi media communications. Artech House, Inc., 2000.  
 [2] Wood, John. Behavioral Modeling and Linearization of RF Power Amplifiers. Artech House, 2014.  
 [3] J. K. Cavers, "Amplifier linearization using a digital predistorter with fast adaptation and low memory requirements," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 39, no. 4, pp.374-382, 1990.  
 [4] Ding, Lei. Digital predistortion of power amplifiers for wireless applications. Diss. Georgia Institute of Technology, 2004.  
 [5] Cavers, James K. "Optimum table spacing in predistorting amplifier linearizers." *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 48.5 (1999): 1699-1705.  
 [6] L. Sundström, M. Faulkner, and M. Johansson, "Quantization analysis and design of a digital predistortion linearizer for RF