

디지털 사전 왜곡기를 이용한 선형화기의 구현

한재희, *정태식, *남상욱, *이광복, **이승준
*서울대학교 전기공학부, **LG정보통신

Implementation of a Linearizer using Digital Predistorter

Jae-Hee Han, *Tasik Chung, *Sangwook Nam, *Kwang bok Lee, **Seung-June Yi

*School of Electrical Engineering, Seoul National University

**LG Information & Communications, Ltd.

요 약

전력 증폭기의 3차나 5차 비선형성은 인접 통신 채널에 직접적인 영향을 미치므로 선형화 기법을 이용하여 출력단의 혼변조 신호를 감쇄시켜야 한다. 본 논문에서는 전력 증폭기의 입력 신호를 기저대역에서 왜곡시켜 전력 증폭기를 선형화 시키는 디지털 사전 왜곡기를 구현하였다. 측정에 앞서, 모의 실험을 통하여 시스템 변수에 따른 선형화기의 성능을 예측하고, 1차원 참조표(look-up table)를 사용한 사전 왜곡기의 측정 결과, 약 9 dB의 ACPR 개선 효과를 얻을 수 있었다.

I. 서론

이동 통신용 부품의 비선형 특성은 부품의 성능 평가에 있어 중요한 항목 중의 하나이다. 특히, RF 전력증폭기의 3차나 5차 비선형성은 인접 통신채널에 혼신을 유발하므로 무선통신 시스템의 표준 규격으로 엄격히 규제되고 있다. 따라서, 전력 증폭기의 비선형 출력을 감쇄시키기 위해서는 출력 back-off 방법이나 적합한 선형화 기법 등을 사용해야 한다.

전력증폭기의 선형화 기법으로는 feedforward 방식, 궤환(feedback) 방식과 사전 왜곡(predistortion) 방식 등이 있다. Feedforward 방식은 전력증폭기의 비선형 출력 신호의 혼변조 성분을 이용하여 선형화하는 방법으로, 개선도는 뛰어나지만 용적이 크고 효율이 낮으며 회로가 복잡하다는 단점이 있다. 궤환 방식은 전력 증폭기의 출력 신호의 혼변조 성분을 되먹임시켜 선형화하는 방법으로, 제작은 용이하지만 대역폭이 좁고 외부 조건에 따라 발전할 가능성이 있다. 사전 왜곡 방식은 전력 증폭기의 비선형 특성의 역전달 특성을 갖는 사전 왜곡기를 전력증폭기의 전단에 연결하여 전체 시스템을 선형화하는 방법으로, 구현이 간단하고 비교적 우수한 성능을 얻을 수 있다. 사전 왜곡 방식은 크게 RF 대역에서 비선형 소자를 이용한 아날로그 방식과 기저대역에서 디지털 신호처리를 이용한 디지털 방식이 있다. 특히, 디지털 방식은 아날로그 방식에

비하여 전력 증폭기의 정확한 역함수의 구현이 가능하므로 이에 대한 관심이 고조되고 있다[1]-[4].

II. 디지털 사전 왜곡기

전력 증폭기의 비선형 전달특성을 함수 $G(\cdot)$ 로 가정하면, 식 1과 같이 표현할 수 있다.

$$V_o = \alpha G(V_i) \quad (1)$$

여기서, α 는 전력 증폭기의 선형 이득이고, 대문자로 표시된 것은 복소 엔벨로프(complex envelope) 신호를 나타낸다. 따라서, 그림 1에서와 같이 $G^{-1}(\cdot)$ 의 전달특성을 갖는 사전 왜곡기를 전력 증폭기의 전단에 연결하면 전체 시스템의 출력은 선형 증폭된 입력과 같다[4].

$$\begin{aligned} V_o &= \alpha G(G^{-1}(V_i)) \\ &= \alpha G(V_i) = \alpha V_i \end{aligned} \quad (2)$$

이러한 사전 왜곡기의 전달 특성 $G^{-1}(\cdot)$ 는 입력 신호의 크기만의 함수이므로, 1차원 참조표(look-up table)를 이용한 사상으로 구현할 수 있다[1]. 구체적으로 입력 신호의 최대 값을 정해진 기준에 따라 N 등분하여 각 구간에 해당하는 크기를 참조표의 주소로 사용한다. 이 때 참조표의 i 번째 요소에 의해 사상된 출력 신호는 식 3과 같다.

$$V_d = \beta_i e^{j\phi_i} V_i \quad (3)$$

그림 2는 입출력 신호의 패적을 복소 평면에서 도시한 것으로, 구간 V_m 에 해당하는 입력 신호는 위상에 무관하게 동일한 참조표에 의해 사상된다[2].

III. 적응 추정기

식 3에서 입력과 출력이 일치하도록 하는 β_i 와 ϕ_i 를 해석적인 방법으로 구하기는 어렵다. 또한, 전력증폭기의 전달 특성은 시간, 온도 등과 같은 외부 조건의 함수이므로, 시간에 따른 정확한 β_i 와 ϕ_i 값을 얻기 위해서는 적응 알고리즘을 이용한 추정이 필수적이다. 그림 3은 간단한 사전 왜곡 방식 선형화기의 블록도이다. 입력 신호가 V_i 이고, 그 크기가 참조표의 i 번째 주소에 해당된다 할 때, 전체 시스템의 오차 V_e 는

$$\begin{aligned} V_e &= V_i - V_f = r_e \cdot e^{j\phi} \\ &= V_i - G(\beta_i e^{j\phi_i} V_i) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} r_e &= |V_i| - |V_f| \\ \phi_e &= \angle V_i - \angle V_f \end{aligned}$$

와 같고, V_e 가 최소가 되도록 하는 LMS(least-mean-squares) 알고리즘의 반복식을 유도하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \beta_i(n+1) &= \beta_i(n) + \mu_i |V_i| r_e(n) \\ \phi_i(n+1) &= \phi_e(n) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, β_i 는 비례 계수(scaling factor), ϕ_i 는 회전 계수(rotating factor)라 한다. μ_i 는 적응 이득 상수(adaptive gain constant)로 적응 알고리즘의 수렴 속도와 안정도를 결정하는 중요한 변수로, 안정도가 보장되는 μ_i 의 범위는 식 6과 같다[5].

$$0 < \mu_i < \frac{1}{|V_i|^2} \quad (6)$$

IV. 디지털 사전 왜곡기의 구현

본 논문에서 구현한 디지털 사전 왜곡 방식의 선형화 시스템은 그림 4와 같이 기저대역에서 디지털 신호처리를 이용하여 입력신호를 사전 왜곡시키기 위한 디지털 영역과 사상된 신호를 RF 대역으로 주파수 이동시키기 위한 아날로그 영역으로 분리할 수 있다. 디지털 영역은 입력 신호를 왜곡시켜주기 위한 디지털 신호 처리장치(DSP: Digital Signal Processor)와 디지털 신호 처리장치

를 제어하기 위한 개인용 컴퓨터로 구성되어 있다. 아날로그 영역에는 사전 왜곡된 신호를 880 MHz 대역으로 주파수 이동시키기 위한 IQ 변조기와 기저대역 변환 신호를 추출하기 위한 IQ 복조기가 있고, 선형화시킬 RF 전력 증폭기로 구성되어 있다. 또한, 신호를 양 영역으로 변환시켜주기 위하여 디지털-아날로그 변환기(DAC)와 아날로그-디지털 변환기(ADC)를 사용하였다. DSP는 TI사의 TMS320C44이고, DAC와 ADC 모두 12 비트 해상도(resolution)를 갖는다.

어셈블리어 프로그램은 훈련 단계에서 적응 알고리즘을 이용하여 참조표를 갱신하고, 사전 왜곡 단계에서 입력 신호의 크기에 따라 참조표의 주소를 계산하고 해당 참조표의 값을 호출하여 출력을 계산한다. 그림 5는 어셈블리어 프로그램 흐름도를 포함한 디지털 영역의 구성도이다.

추정에 앞서, 모의 실험을 통하여 시스템 성능을 분석하였다. 그림 6은 참조표의 크기에 따른 전력 증폭기의 ACPR(Adjacent Channel Power Ratio)이고, 그림 7은 DAC의 해상도에 따른 ACPR을 예측한 것이다. 그림에 나타난 기준선은 IS-95 표준을 따른 것이다. 위의 모의 실험 결과를 바탕으로 시스템의 변수를 결정하고 사전 왜곡기를 구현하여 성능을 측정하였다. 그림 8과 같이 대역폭이 357.142 KHz이고 펄스 정형 필터(pulse shaping filter)를 통과한 신호를 발생시켜 전력 증폭기에 인가하였을 때, 그림 9와 같은 비선형 주파수 특성을 나타냈다. 동일한 전력 증폭기를 사용하여 크기가 100인 참조표를 갱신하고 사전 왜곡기를 동작시켰을 때의 측정 결과는 그림 10과 같다. 따라서, 사전 왜곡기를 동작시킬 경우 약 9 dB의 ACPR 개선 효과를 얻을 수 있었다.

V. 결론

본 논문에서는 디지털 방식의 사전 왜곡기를 고찰하고, 1차원 참조표를 이용한 디지털 사전 왜곡기를 제작하였다. 전력 증폭기의 출력 ACPR이 IS-95 표준을 만족시킬 수 있도록 모의 실험을 통하여 필요한 변수값을 결정하고, 이를 바탕으로 전력 증폭기 선형화 시스템을 구현하였다. 실험 결과, DAC와 ADC의 해상도가 12 비트이고 참조표의 크기가 100 일 때, 약 9 dB의 ACPR 개선 효과를 얻을 수 있었다.

본 논문에서 제시한 실험 결과는 구현된 특정 시스템에 국한된 것으로, 본 논문에서 고려하지 않은 제반 문제, 예를 들어 변복조기에서 발생하는 오차나 외부잡음에 의한 오차 등과 같은 문제를 해결한 최적화된 시스템에서는 개선된 결과를 얻을 수 있을 것이다. 따라서, 향후 이러한 문제에 관한 연구가 수반되어야 할 것으로 예측된다.

참고 문헌

- [1] J. K. Cavers, "Amplifier Linearization Using a Digital Predistorter with Fast Adaptation and Low Memory Requirements," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 39, no. 4, pp. 374-382, Nov. 1990.
- [2] A. S. Wright and W. G. Durtler, "Experimental Performance of an Adaptive Digital Linerized Power Amplifier," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 41, no. 4, Nov. 1992.
- [3] M. Faulkner and M. Johansson, "Adaptive Linearization Using Predistortion - Experimental Results," *IEEE Trans. on Veh. Technol.*, vol. 43, no. 2, pp. 323-332, May 1994.
- [4] Lars Sundström, M. Faulkner and M. Johansson, "Quantization Analysis and Design of a Digital Predistortion Linearizer for RF Power Amplifiers," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 45, no. 4, Nov. 1996.
- [5] Bernard Widrow and Samuel D. Stearns, *Adaptive Signal Processing*, Prentice-Hall, 1985.

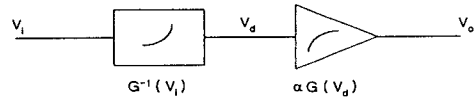


그림 1. 사전 왜곡 방식의 선형화 시스템

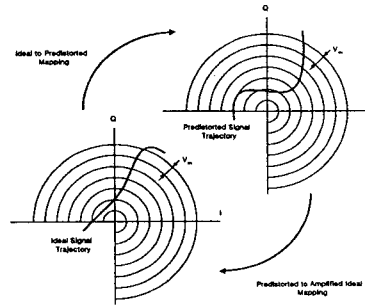


그림 2. 사전 왜곡기를 이용한 입출력 신호의 사상

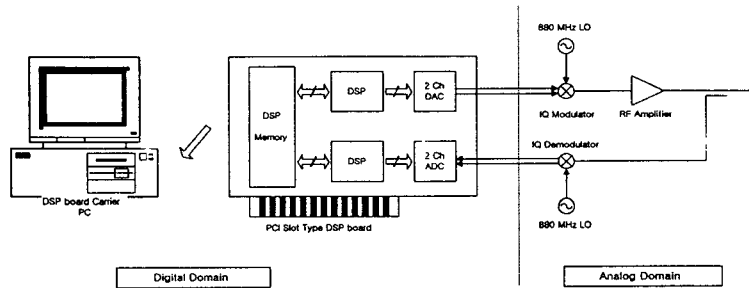


그림 4. 디지털 사전 왜곡 방식 선형화 시스템 구성도

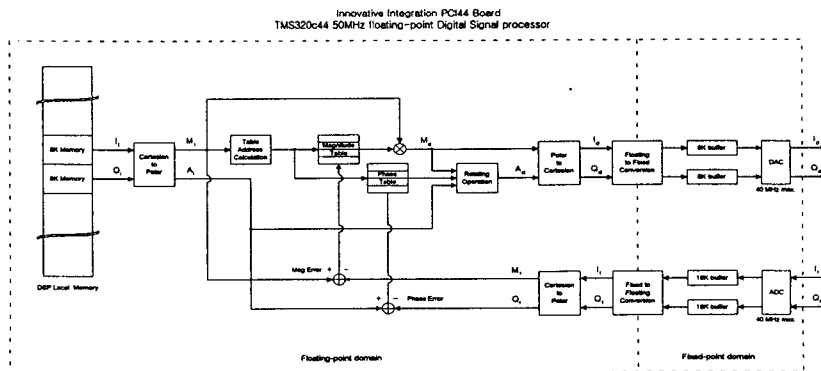


그림 5. 디지털 영역 구성도

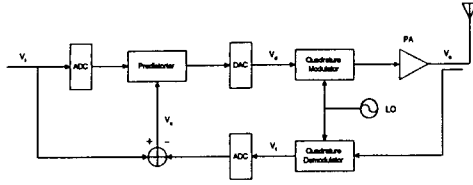


그림 3. 간단한 사전 왜곡 선형화 시스템의 블럭도

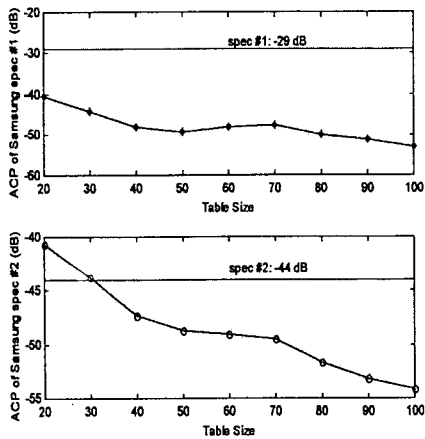


그림 6. 참조표의 크기에 따른 ACPR

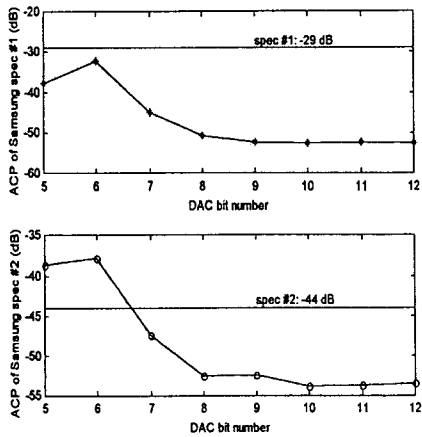


그림 7. DAC의 해상도에 따른 ACPR

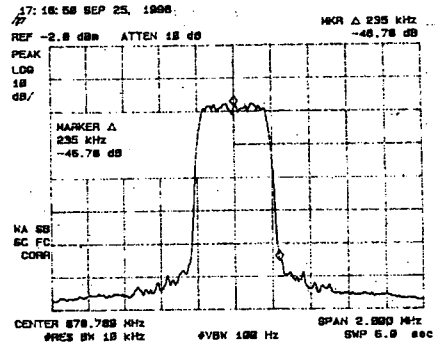


그림 8. 입력 신호의 주파수 특성

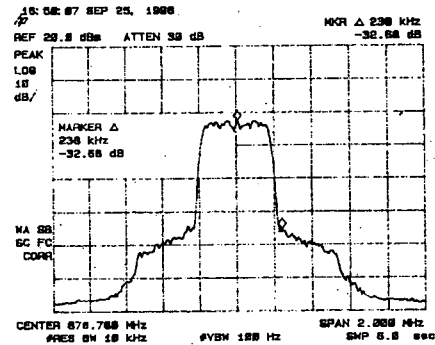


그림 9. 비선형 출력의 주파수 특성

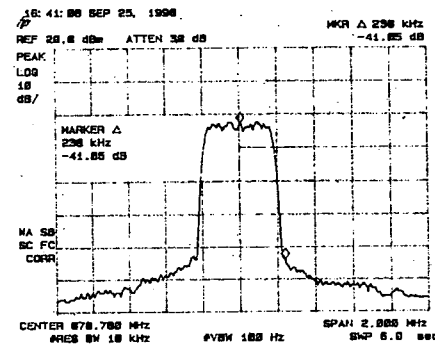


그림 10. 선형화된 출력의 주파수 특성