

통신용 송신기의 디지털 Pre-distorter

한동석[†], 김용정[‡], 김대진^{††}, 김창주[†]

[†]경북대학교 공과대학 전자전기공학부

전화: (053) 950-6609, 팩스: (053) 950-5505, 전자우편: dshan@ee.kyungpook.ac.kr

^{††}전남대학교 공과대학 전자공학과

[†]한국전자통신연구원 무선방송연구소

Digital Pre-distorter for Communication Transmitters

Dong-Seog Han[†], Yong-Jung Kim[†], Dae-Jin Kim^{††}, Chang-Joo Kim[†]

[†]School of Electronic & Electrical Engineering, Kyungpook National University

Phone: (053)950-6609, Fax: (053)950-5505, E-mail: dshan@ee.kyungpook.ac.kr

^{††}Department of Electrical Engineering, Chonnam National University

[†]Radio & Broadcasting Technology, ETRI

Abstract

The high power amplifier (HPA) for broadcasting transmitter systems has nonlinear property in terms of input signal power. Hence, it produces AM/AM and AM/PM modulation to the modulated signal. Therefore, the non-linearity results in bandwidth expansion and nonlinear distortion to in-band signal.

In this paper, we propose a simple gain-based pre-distorter that requires less computational burden and less time for the full initialization of the pre-distorter ROM table.

I. 서론

방송의 경우에 높은 송신 전력을 유지하기 위해서는 고전력 증폭기(HPA: high power amplifier)를 사용하여 신호를 증폭시켜야 한다. 그러나 HPA는 입력신호가 큰 영역에서 비선형 특성을 보인다. 출력신호의 비선형 효과는 위성, 이동통신, 라디오 릴레이 링크, 레이다 등에 상당한 영향을 미친다. 방송에서는 HPA의 비선형 효과는 대역폭을 증가시키고 다른 응용에 비하여 고전력을 요구하므로 더욱 문제가 된다.

비선형 증폭기에 의한 효과는 진폭 왜곡과 위상 왜곡으로 나타나는데 입력 전력레벨에 따라 진폭의 증폭도가 달라지게 되고 이것을 AM/AM 왜곡이라고 한다. 그리고 입력 전력레벨에 따라 입력 위상과 HPA 출력 위상이 달라지게 되어 위상왜곡을 유발하게 되고 이것을 AM/PM 왜곡이라 한다. AM/AM과 AM/PM 왜곡의 효과는 전송신호를 왜곡시키고 대역폭을 넓혀 이웃채널과의 간섭을 유발시킨다[1][2].

HPA의 비선형 특성을 감소시키는 방법은 HPA가 고입력 신호에서 비선형 왜곡이 가장 심하므로 입력신호레벨을 감소시켜 HPA의 모든 입력가능 신호 전력레벨을 이용하지 않는 방법을 사용하는 것이다. 그러나 이것은 HPA의 특성을 100% 활용할 수 없는 매우 비효율적인 방법이다. 이 방법을 보완하는 방식이 HPA의 비선형 증폭 특성을 가진 고전력 입력 부분의 특성

을 선형화 시키는 pre-distortion 기술을 사용하는 것이다. Pre-distorter는 HPA에 입력되는 신호에 HPA의 왜곡을 보상하기 위하여 HPA와 특성이 반대인 왜곡을 미리 줌으로써 HPA의 특성을 선형화 시키는 것이다.

본 논문에서는 기저대역에서 완전디지털로 구현가능하고 증폭기의 형태에 무관한 pre-distorter를 제안한다. 그리고 HPA의 시간에 따라 변화하는 특성에 적응하는 pre-distorter의 구조를 제안한다. 제안한 pre-distorter의 성능을 분석하기 위하여 미국형 HDTV 변조방식인 8 VSB 전송 시스템에 적용하였다.

II. HPA 모델링

비선형 HPA는 AM/AM 및 AM/PM 왜곡 특성에 의하여 특징 지워지는데 HPA의 RF 입력 $x(t)$ 는 다음과 같이 모델링 된다.

$$x(t) = R_x(t) \cos[\omega_0 t + \theta_x(t)] \quad (1)$$

HPA의 출력 $y(t)$ 는

$$y(t) = G[R_x(t)] \cos[\omega_0 t + \theta_x(t) + \psi[R_x(t)]] \quad (2)$$

가 된다. 여기서 G 와 ψ 는 각각 AM/AM, AM/PM 왜곡 특성을 나타낸다. 그리고 $R_x(t)$ 는 신호의 진폭, ω_0 는 반송파 주파수, $\theta_x(t)$ 는 변조된 신호의 위상이다. 본 논문에서 사용한 HPA의 특성은 그림 1과 같은 특성을 가지고, 이것은 이탈리아 Itelco사에서 방송용 송신기의 HPA로 사용한 모델이다[1]. 단, pre-distorter의 성능을 검증하기 위하여 모든 입력 레벨에 대한 HPA의 특성 데이터가 부족하기 때문에 least-square의 관점에서 HPA의 AM/AM 특성과 AM/PM 특성을 나타내는 입력신호레벨에 대한 다항식을 찾아내어 사용한다. 그림 1(a)에서 점선으로 나타낸 AM/AM 모델은 다음과 같다.

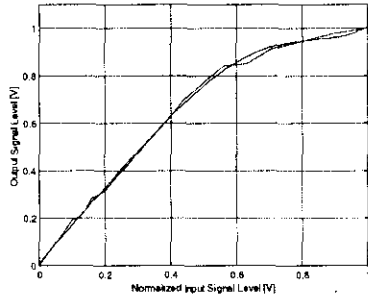
$$y(x) = 4.8442x^5 - 10.0932x^4 + 6.2297x^3 - 1.7695x^2 + 1.7863x + 0.0081 \quad (3)$$

여기서 x 는 입력신호의 진폭이고 y 는 HPA의 출력 진폭이다. 본 연구에서는 편의를 위하여 HPA의 이득을 $K=1$ 이 되도록 하였다. 그림 1(b)에서 점선으로 나

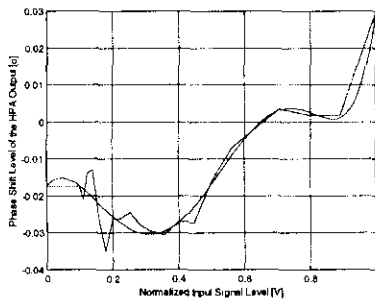
타면 AM/PM 모델은 다음과 같다.

$$y(x) = 1.8937x^7 - 3.8650x^6 + 4.4057x^5 - 5.5358x^4 + 4.4653x^3 - 1.4186x^2 + 0.1017x - 0.01731 \quad (4)$$

여기서 x 는 입력신호의 진폭이고 y 는 HPA를 통과하면서 발생한 위상 천이 [°]를 나타낸다.



(a) AM/AM 특성



(b) HPA의 AM/PM 특성

그림 1. HPA의 특성 (실선: 실제 HPA의 특성, 점선: 다항식으로 근사화한 HPA)

III. 기존의 연구

그림 2는 일반적인 적응 pre-distorter의 블록도이다. Pre-distorter는 HPA의 출력신호 $v_a(t)$ 의 기저대역 신호 $v_f(t)$ 를 이용하여 변조기에 입력되는 신호 $v_m(t)$ 를 미리 왜곡된 신호 $v_d(t)$ 로 바꾸는 역할을 한다. $v_f(t)$ 는 $v_a(t)$ 의 진폭과 위상이 변화되고 지연된 신호이다. 변조와 복조시에는 coherent 복조를 위하여 변복조시에 동일한 발진기를 사용한다. 그리고 지연시간에 의한 위상천이 효과를 상쇄하기 위하여 위상 천이기가 필요하다.

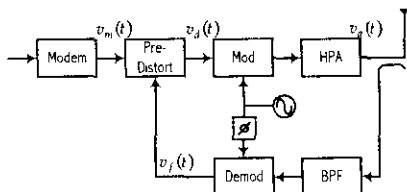


그림 2. 적응 pre-distorter의 구조

지금까지 알려진 대표적인 pre-distorter로는 그림 3의 look-up table(LUT)을 이용한 방법이다[2]. 이 방법은 HPA가 memoryless 특성이라면 HPA의 종류에 상관없이 적용할 수 있는 방법이다.

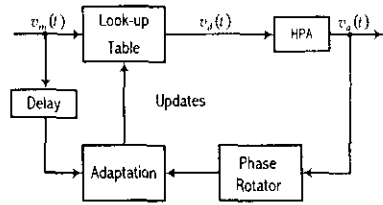


그림 3. Mapping pre-distorter

그러나 $v_m(t)$ 를 표현하기 위한 비트의 수가 크면 클수록 LUT의 크기가 커진다는 문제점을 안고 있다. 그리고 이렇게 큰 용량의 LUT을 전부 마련하려면 상당한 시간이 걸리게 되므로 실시간 처리에 매우 부적합하다.

Mapping pre-distorter의 문제점을 해결하기 위하여 그림 4와 같은 새로운 pre-distorter가 제안되었다[3]. 이 방법은 모든 입력을 LUT의 주소로 하지 않고 LUT은 입력신호의 전력에 대응하는 이득값만을 기억시킴으로써 LUT의 크기를 상당히 줄인 새로운 방법이다. $v_d(t)$ 와 $v_a(t)$ 는

$$v_a = v_d G(|v_d|^2) = v_d G(x_d) \quad (5)$$

의 관계를 가지고 있다. 여기서 x_d 는 $|v_d|^2$ 을 나타내고 $G(x_d)$ 는 HPA의 복소 이득으로 HPA의 AM/AM, AM/PM 특성을 나타낸다. 그리고 $G(x_d)$ 는 입력신호의 순간 전력에만 의존하고 위상과는 전혀 무관한 특성을 가진다.

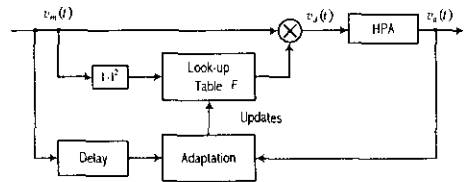


그림 4. 이득을 이용한 pre-distorter

그림 4에서 입출력 관계는 다음과 같다.

$$v_d = v_m F(|v_m|^2) = v_m F(x_m) \quad (6)$$

여기서 x_m 은 $|v_m|^2$ 이다. Pre-distorter의 복소이득 F 는 입력신호의 전력에 상관없이 pre-distorter와 HPA의 결합이득이 어떤 일정한 이득 K_d 가 되도록 한다.

IV. 제안 알고리즘

본 장에서 제안하는 알고리즘은 기존의 알고리즘들이 완전한 LUT의 갱신을 위하여 많은 시간이 소요된다는 단점을 제거하기 위한 것이다. 통신 송신장비에서 HPA의 비선형성을 보상하기 위한 LUT을 작성해야 할 시점은 신호의 송신 시작 직전이고 LUT의 갱신은 방송 중 HPA의 시간에 따른 변화를 적응적으로 추적

하여 보상할 때에 필요하다. Pre-distorter의 구조는 그림 4와 마찬가지로 신호의 크기에 근거한 HPA의 왜곡 보상 방법을 사용한다.

HPA의 비선형 왜곡을 보상하기 위한 본 논문에서 제안하는 LUT의 갱신 방법은 다음과 같다.

● **Step 1. HPA의 특성 파악**

먼저, 초기 갱신 시간을 단축시키기 위하여 발생 가능한 신호전력의 최소 레벨에서부터 발생 가능한 최대 레벨에 이르기까지 선형적으로 증가하는 훈련신호(training signal)를 발생시켜 입력에 대한 출력의 특성 테이블을 구한다. 표 1에 입력신호 레벨에 대한 HPA의 출력특성인 그림 1을 도표로 나타낸 것으로 입력레벨을 정규화시켜 32개의 레벨로 나누어 고려한 것이다. 이 때 훈련신호의 레벨간 간격 Δ 는

$$\Delta = (V_{max} - V_{min}) / N_i \quad (7)$$

로 한다. 여기서 V_{max} 와 V_{min} 은 HPA를 거치기 전 기저대역에서의 최대 및 최소전압 레벨이다. 그리고 N_i 는 LUT의 사이드로 주소공간의 갯수이다.

표 1. HPA의 입력전압에 대한 출력특성

번호	HPA 입력신호	HPA의 출력전압레벨	HPA의 출력 위상
1	0.0000	0.0081	-0.9884
2	0.0323	0.0641	-0.8768
3	0.0645	0.1175	-0.8874
4	0.0968	0.1692	-0.9799
5	0.1290	0.2199	-1.1203
6	0.1613	0.2701	-1.2805
7	0.1935	0.3199	-1.4379
8	0.2258	0.3696	-1.5743
9	0.2581	0.4191	-1.6761
10	0.2903	0.4683	-1.7340
11	0.3226	0.5170	-1.7421
12	0.3548	0.5647	-1.6984
13	0.3871	0.6113	-1.6043
14	0.4194	0.6561	-1.4640
15	0.4516	0.6989	-1.2845
16	0.4839	0.7391	-1.0753
17	0.5161	0.7764	-0.8478
18	0.5484	0.8104	-0.6148
19	0.5806	0.8407	-0.3896
20	0.6129	0.8672	-0.1857
21	0.6452	0.8898	-0.0154
22	0.6774	0.9083	0.1112
23	0.7097	0.9231	0.1874
24	0.7419	0.9343	0.2117
25	0.7742	0.9426	0.1895
26	0.8065	0.9485	0.1349
27	0.8387	0.9530	0.0736
28	0.8710	0.9573	0.0450
29	0.9032	0.9629	0.1052
30	0.9355	0.9714	0.3306
31	0.9677	0.9848	0.8213
32	1.0000	1.0056	1.7051

● **Step 2. 초기 LUT의 작성**

두 번째 단계에서는 HPA 입력에 대한 출력의 역함수를 구하는 것이다. HPA의 AM/AM 특성이 일차 방정식이 아니기 때문에 HPA의 이득이 1 되기를 원하는 경우, 다음과 같은 방법으로 LUT의 계수를 결정한다. HPA의 입력레벨이 0.9355에 대하여 출력이 0.9355가 되려면 표 1로부터 HPA의 출력이 0.9355가 되도록 하는 입력을 찾는다. 이 경우에 해당하는 입력은 24번째 입력 데이터 0.7419가 되고 LUT의 30번째 주소에 대한 이득은 $0.7419/0.9355=0.793$ 이 된다. 그러므로 변

조된 신호 레벨이 0.9355라면 LUT의 30번째 주소영역 레벨에 해당하고 pre-distorter의 이득이 0.793이므로 pre-distorter 출력은 $0.793 \times 0.9355 = 0.7419$ 가 되고 이것이 HPA를 통과하면 표 1로부터 0.9343이 됨을 알 수 있다. 이 신호는 약간의 왜곡은 있지만 pre-distorter를 거침으로 상당한 AM/AM 왜곡을 줄일 수 있음을 알 수 있다. AM/PM 왜곡에 대한 특성을 보정하기 위해서는 AM/AM 왜곡을 보상할 때와 마찬가지로 0.9355 입력에 대하여 HPA의 출력이 0.9355와 가장 근접한 데이터를 찾아낸다. 이것은 24번째 입력 0.7419가 된다. 이 경우 위상은 0.2117도 천이가 일어난다. 그러므로 pre-distorter 입력신호에 대하여 미리 $\exp(-j0.2117^\circ)$ 의 위상천이를 시키면 된다. 이 경우 HPA를 통과 하더라도 위상특성이 서로 상쇄가 되어 위상오차가 사라진다.

● **Step 3. LUT의 적용 갱신**

Step1과 2 단계를 거쳐 구한 LUT을 사용하여 pre-distorter의 역할을 수행하면서 실제 전송데이터를 변조하는 과정에서 생성된 실제 데이터를 이용한 LUT의 갱신을 수행한다. 이 방법은 LUT을 위한 모든 가능한 입력에 대한 신호가 발생될 때까지 데이터를 저장하여 표 1과 같은 새로운 pre-distorter와 HPA의 특성이 결합된 입력력 간의 AM/AM, AM/PM 특성을 발견한다. 그리고 Step 2를 거쳐 새로운 LUT을 갱신할 수 있다. 또는 [4]에서 제시한 Secant 알고리즘을 이용할 수 있다.

V. 컴퓨터 모의실험 결과

그림 5-10은 IV장에서 제안한 pre-distorter의 성능을 보여 주는 것이다. 본 논문에서 고려한 LUT의 크기는 32 ~ 512까지이다. Pre-distorter와 HPA를 합성한 AM/AM 특성을 살펴보면 LUT의 크기가 128 이상이면 거의 선형성을 유지함을 알 수 있다. AM/PM 특성에 대해서도 마찬가지로 LUT의 사이즈가 128 이상이면 거의 0가 됨을 알 수 있다.

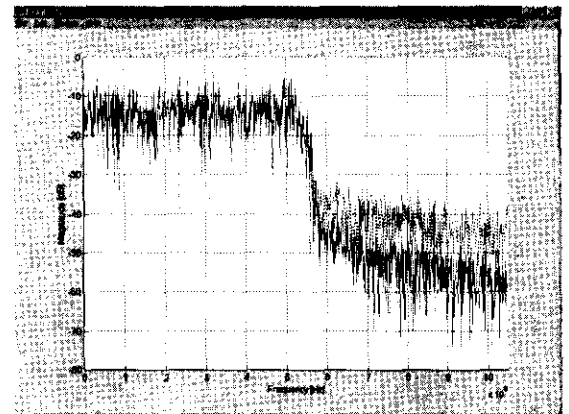


그림 6. LUT의 크기가 64일 때 HPA 출력 스펙트럼

(점선: pre-distorter 를 채용하지 않은 경우, 실선: pre-distorter 를 채용한 경우)

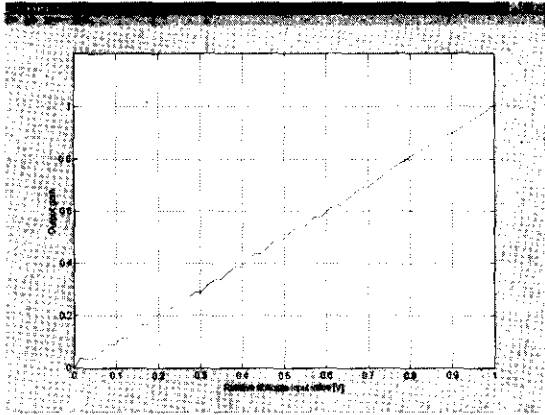


그림 7. LUT의 크기가 64일 때 pre-distorter와 HPA의 합성 AM/AM 특성

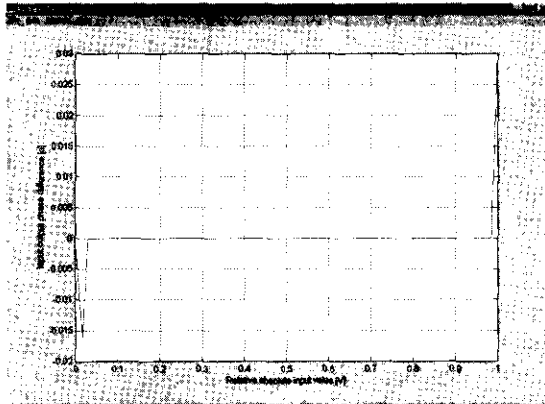


그림 8. LUT의 크기가 64일 때 pre-distorter와 HPA의 합성 AM/PM 특성

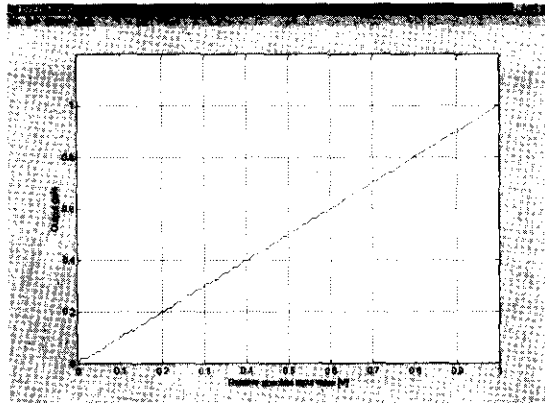


그림 9. LUT의 크기가 128일 때 pre-distorter와 HPA의 합성 AM/AM 특성

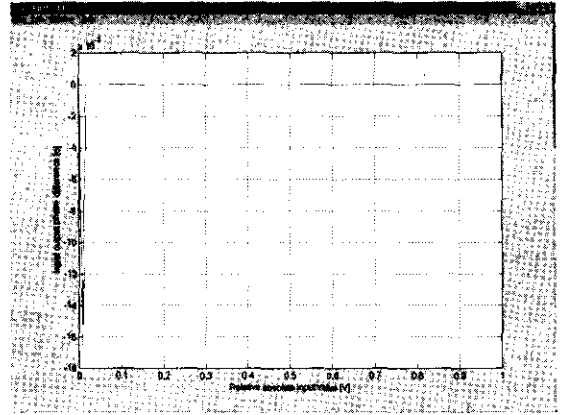


그림 10. LUT의 크기가 128일 때 pre-distorter와 HPA의 합성 AM/PM 특성

V. 결론

본 논문에서는 통신용 송신기의 HPA에 의한 신호의 비선형 왜곡의 문제점을 해결하기 위한 pre-distorter의 알고리즘을 제안하였다. 제안한 알고리즘은 변조된 신호를 송신하기 전에 신호의 전력이 0에서부터 최대크기까지 선형 증가하는 훈련신호를 이용하여 HPA의 출력특성을 관측하고, pre-distorter의 LUT을 갱신하는 방법이다. 이것은 기존의 방법에 비하여 상당히 짧은 시간에 LUT을 초기화할 수 있다는 장점이 있고 LUT의 크기는 128 이상 정도이면 된다는 것을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] S. Andreoli et. al., "Linearizing Digital RF Amplifier,"
- [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 Trans. On Vehicular Tech.*, Vol. 39, No. 4, pp. 374-382, 1990.
- [4] James K. Cavers, "Adaptation Behavior of a Feedforward Amplifier Lineariser," *IEEE Trans. On Vehicular Tech.*, Vol. 44, No. 1, pp. 31-40, 1995.