디지털 전치 왜곡기의 성능 향상을 위한 고전력 증폭기의 모델링 기법

김현준* 윤인우* 손예슬* 김준태* 김중일**
*건국대학교 **진명통신
*khkim38@konkuk.ac.kr

Modeling of High Power Amplifier for Improving the Performance of Digital Pre-Distorter(DPD)

Kim, Hyun-Jun Yun, In-Woo* Son, Ye-Seul* Kim, Jun-Tae* Kim, Joongil**
*Konkuk University, ** Jinmyung Communications

요약

무선 통신 시스템에서 장거리 신호송출을 위해 사용하고 있는 고전력 증폭기(HPA, High Power Amplifier)는 증폭기의 비선형성 때문에 송출신호에 왜곡을 야기시키며 이 때문에 선형구간만을 사용하게 되어 그 전력 효율이 떨어지게 된다. 이 비선형 특성을 해결하기 위하여 디지털 사전 왜곡기(DPD, Digital Pre-distorter)를 HPA 의 앞단에 채용하여 송출신호를 선형화 시키고 효율도 높이게 된다. 이 DPD는 대부분 HPA를 특정 모델이라고 가정하고 최적화 알고리즘을 통해 설계되는데 HPA의 모델에 대한 가정이 맞지 않을 경우 설계된 DPD의 성능이 떨어질 수 있다. 따라서 HPA의 모델을 정확하게 아는 것은 DPD 설계에 있어서 중요한 이슈가 된다.

본 논문에서는 실제 상용되는 HPA에 대해 이미 알려진 다양한 HPA의 모델 중에서 가장 적합한 모델을 선정하고 또한 그 모델의 계수를 얻어내는 방법을 소개한다. 이렇게 얻어진 HPA의 모델정보는 최적의 DPD 설계에 사용될 수 있다. 각 HPA 모델에 대한 파라메터를 구함에 있어서 알려진 최적화 방법 이외에 직접 적용이 어려운 경우에는 기존 방식을 수정하고 그 방식을 사용하였다. 실제 HPA 의 입출력 신호를 실시간 수집하고 컴퓨터 모의실험을 수행하여 동일한 HPA 입력 신호에 대해 실제 HPA의 출력과 찾아낸 최적 모델의 출력을 비교 분석함으로써 실제 찾아낸 모델이 가장 정확하게 상용 HPA를 모델링 하고 있음을 확인하였다.

1. 서론

최근 세계적으로 무선 통신에서 다량의 데이터전송이 요구됨에 따라 4G, LTE, Mobile WiMax, DVB-T, 그리고 DVB-T2등 OFDM 변조 기법을 기반으로 한 고속의 통신 기술에 대한 연구가 활발하게 진행되어 왔다[1],[2].

OFDM변조 기법으로 처리된 신호는 먼 곳까지 도달할 수 있도록 고전력 증폭기(HPA, High Power Amplifier)를 거치게 된다. 그러나 OFDM변조 기법은 다중 반송파 방식을 사용하기 때문에 PAPR(Peak to Power Ratio)이 커진다는 문제점이 있다. 또한 HPA에는 비선형 특성이 존재하는데, 이 특성 때문에 HPA의 입력신호의 전력이 커지게 되면 주파수 영역에서 왜곡이 생기게 되고, 원하는 증폭율만큼 출력 전력이 나오지 않는다. 이러한 문제점 때문에 비선형 구간 바로 전 까지만 입력신호를 인가해야하고, 결과적으로 최대 출력의 크기가 작아지게 되면서 전력 효율이 떨어지게 된다.

위와 같은 HPA의 비선형성을 해결하기 위한 방법 중 하나로 디지털 사전 왜곡기(DPD, Digital Pre-distorter)에 관한 연구가 수행되었다[3],[4],[5]. DPD는 HPA의 선형 구간을 최대화 시켜주는 기술로, 입력된 신호를 디지털 신호 처리를 통해 사전에 왜곡시켜 HPA의 선형성을 보완시키는 기법이다. 이 기법을 통해서, HPA의 비선형 구간에서도 선형적인 신호를 송신하는 것이 가능해진다.

일반적으로 DPD는 모델 기반(Model Based)으로 만들어지고 있는데[4], 사용되는 모델의 종류에는 위너모델(Wiener Model), 해머슈타인(Hammerstein)모델, 그리고 위너-해머슈타인(Wiener-Hammerstein)모델 등이 있다. 모델 기반 방식은 실제로 사용하는 HPA를 특정 모델로 가정하고, 그 모델의 역 특성을 갖는 DPD를 만든다. 따라서 DPD의 성능을 높이기 위해서는 HPA가 어떤 블록 모델과 가장 가까운지를 알아내는 것이 중요한 이슈가 된다.

본 논문에서는 현재까지 제안된 모델 기반 시스템의 계수를 구하는 최적화 알고리즘들을 통해 실제 HPA의 모델이 어떤 것인지 알아내는 방법을 제안한다. 최적화 알고리즘으로는 이미 소개되어있는 NG(Narendra-Gallman)방식, Optimal two stage(O2S) 방식[3]과, 기존 방식을 수정하여 본 논문에서 소개하는 Modified Narendra-Gallman(MNG)방식과 Wiener-Hammerstein(WH) 방식을 사용하였다.

그리고 실제 HPA 의 입출력 신호를 실시간 수집하고 컴퓨터 모의실험을 수행하여 동일한 HPA 입력 신호에 대해 실제 HPA의 출력과 찾아낸 최적 모델의 출력을 비교 분석함으로써 실제 찾아낸 모델이 가장 정확하게 상용 HPA를 모델링 하고 있음을 확인하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 본 논문에서 사용하는 모델링 알고리즘들에 대한 소개를 간략하게 한다. 3장에서는

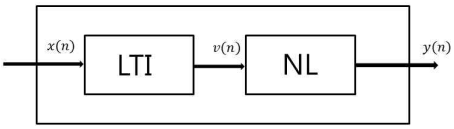
2장에서 소개한 여러 알고리즘을 적용해서 나온 결과들을 종합해서 각 성능들을 비교 분석한다. 4장에서는 결과를 요약하여 서술한다.

2. 모델링 알고리즘

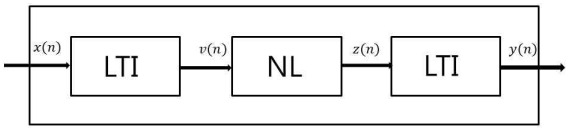
해머슈타인 모델의 HPA의 계수를 구하는 알고리즘에는 NG 알고리즘과 O2S 알고리즘이 있다. NG 알고리즘은 최소자승법(Least Square Method)을 사용해서 HPA의 계수를 구하는 알고리즘이며, O2S 알고리즘은 최소자승법과 특이값 분해(SVD, Singular Value Decomposition)을 사용해서 HPA의 계수를 구한다[5].

앞에서 언급한 NG, O2S 알고리즘은 헤머슈타인 모델을 모델링 하기 위한 알고리즘으로 위너 모델을 모델링하기에는 적합하지 않다. 따라서 위너 모델을 모델링 할 수 있도록 NG 알고리즘을 수정하여 만든 MNG 알고리즘을 소개한다.

그림2-1은 위너 모델의 구조이다. 위너 모델은 메모리 효과를 갖는 선형 시불변 시스템(LTI, Linear Time Invariant) 필터와 비선형 특성을 갖는 Nonlinearity(NL)부분으로 나뉜다. 위너 모델을 다항식으로 나타내면 식 (1),(2)와 같다.



<그림2-1> 위너 모델



<그림2-2> 위너 해머슈타인 모델

$$(n) = \quad {}_{=1} a_p v(n-p) + \sum_{q=0}^{Q} b_q x(n-q) \tag{1}$$

$$y(n) = \sum_{k=0}^{(K-1)/2} c_{2k+1} v(n)\,|v(n)|^{2k} \tag{2}$$

여기서 P 와 Q+1은 계수 a, b의 개수를 나타내고, K는 NL의 차수를 나타낸다. MNG 알고리즘은 먼저 NL의 계수중 $c_1 = 1$, 나머지는 0으로 만들어놓는 상태에서 아래 식 (3)에서 식 (4)를 최소자승법을 사용해 구한다.

$$= UA \tag{3}$$

$$Y = [y_{out}(0)\ \ y_{out}(1)\ \ \cdots\ \ y_{out}(N-1)\ \ y_{out}(N)]^T$$
$$U = \ z_1, \cdots, z_P, u_0, \cdots, u_Q]$$
$$z_i = [0_i^T, y(1)\ \cdots\ , y(N-i)]^T$$
$$u_i = [0_i^T, x(1)\ \cdots\ , x(N-i)]^T$$
$$A = [a_1, \cdots, a_P, b_0, \cdots, b_Q]^T$$
$$A = (U^H U)^{-1} U^H Y \tag{4}$$

여기서 y_{out}은 실제 HPA의 출력이다. 그리고 0_i는 i×1인 제로 벡터이다. 위의 방법으로 구한 계수 A를 이용해 식(5)에서 식(6)을 최소 자승법을 사용해 구한다.

$$Y = VC \tag{5}$$
$$Y = [y(0)\ \ y(1)\ \ \cdots\ \ y(n-1)\ \ y(n)]^T$$
$$V = [v_1, \cdots, v_K]$$
$$v_i = [b_0 x(1)|b_0 x(1)|^{(i-1)}, \cdots, v(n)|v(n)|^{(i-1)}]^T$$
$$C = [c_1, \cdots, c_K]^T C = (V^H V)^{-1} V^H Y \tag{6}$$

위너-헤머슈타인 모델로 HPA를 모델링 하기 위해서 MNG알고리즘을 수정하여 만든 WH 알고리즘을 소개한다.

그림2-2는 위너-헤머슈타인 모델의 구조이다. 위너-해머슈타인 모델은 위너 모델에 LTI 부분이 추가된 구조로, WH 알고리즘은 MNG 알고리즘에 두 번째 LTI의 계수를 구하는 부분을 추가한 것이다. 이 구조를 식으로 표현해 보면 식 (7),(8),(9) 와 같이 표현된다.

$$v(n) = \sum_{p=1}^{P} a_p v(n-p) + \sum_{q=0}^{Q_1} b_q x(n-q) \tag{7}$$

$$z(n) = \sum_{k=0}^{(K-1)/2} c_{2k+1} v(n)|v(n)|^{2k} \tag{8}$$

$$y(n) = \sum_{p=1}^{P_2} d_p y(n-p) + \sum_{q=0}^{Q_2} e_q z(n-q) \tag{9}$$

P_1, P_2는 각각 a,d의 개수이고, Q_1+1, Q_2+1은 각각 d,e의 개수이다. 이 식들중에 두 번째 LTI의 계수를 구하기 위해 사용하는 부분을 행렬로 만들어서 식(10)에서 식(11)을 최소 자승법을 사용해 구한다.

$$Y = WG \tag{10}$$
$$Y = [y_{out}(0)\ \ y_{out}(1)\ \ \cdots\ \ y_{out}(n-1)\ \ y_{out}(n)]^T$$
$$W = [z_1, \cdots, z_{P_2}, u_0, \cdots, u_{Q_2}]$$
$$z_i = [0_i^T, y(1)\ \cdots\ , y(N-i)]^T$$
$$u_i = [0_i^T, z(1)\ \cdots\ , z(N-i)]^T$$
$$G = [d_1, \cdots, d_{p_2}, e_0, \cdots, e_{Q_2}]\ G = (W^H W)^{-1} W^H Y \tag{11}$$

3. 모델링 알고리즘의 성능

본 논문에서 제안한 HPA 모델 선정 및 그 계수를 얻어낸 결과의 성능을 확인하기 위해서 실제 상용 HPA 의 입출력 신호를 실시간 수집하였다. 수집과정은 FPGA 보드를 사용하여 변조부를 설계하고 그 디지털 출력을 메모리에 저장함과 동시에 D/A 변환하여 IF 신호로 만든 후 RF 신호로 주파수 천이하여 HPA 에 입력시켜 주고, HPA 의 커플링 된 신호를 동일 믹서를 사용하여 IF 대역으로 내리고 A/D 를 수행한 후 메모리에 저장하였다. 그리고 저장된 HPA 의 입력 및 출력 데이터를 PC 로 다운로드 하는 방법을 사용하였다.

컴퓨터 모의실험에서는 수집된 상용HPA의 입출력 데이터를 사용하여 앞에서 소개한 네 가지 알고리즘을 이용하여 HPA를 모델링 하였다. 모델링 결과는 HPA의 출력 값과 비교하여 오류 벡터 크기(EVM, Error Vector Magnitude)로 분석하였고 전력 스펙트럼 밀도(PSD, Power Spectral Density)로 아래 <표 3-1>에 나타내었다.

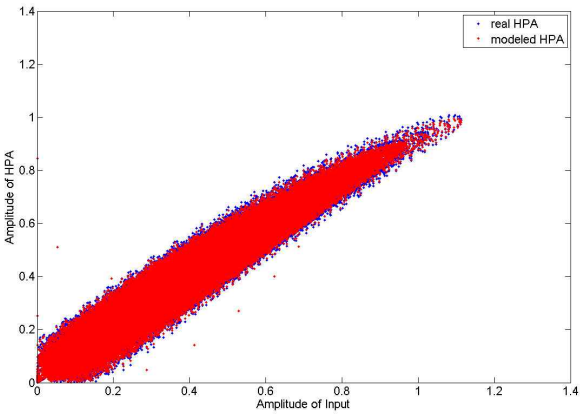
알고리즘	오류 벡터 크기
NG	-27.9406dB
O2S	-25.1026dB
MNG	-33.0072dB
WH	-28.9885dB

<표 3-1>오류 벡터 크기

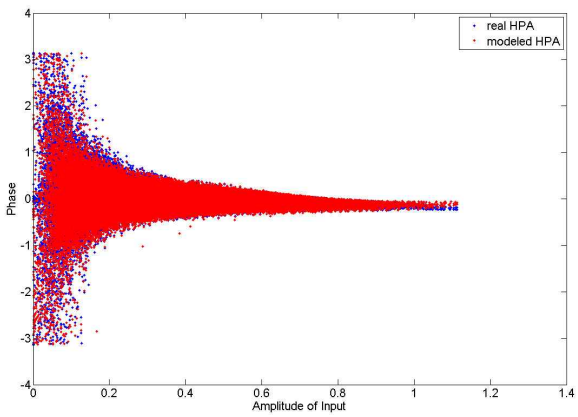
위 표에서 보는 바와 같이 위너모델로 모델링 한 HPA가 실제 HPA와의 차이가 가장 작음을 알 수 있다. 따라서 위너 모델로 모델링을 할 경우 실제 HPA와 가장 비슷한 HPA가 모델링 된다는 것을 확인할 수 있다.

<그림 3-1>은 위너 모델로 모델링한 HPA와 실제 HPA의 AM-AM 그래프를 그려본 것이다. <그림3-1>에서 보는 바와 같이, 파란색이 실제 HPA의 AM-AM 그래프이고, 빨간색이 MNG 알고리즘으로 모델링한 HPA의 AM-AM 그래프이다. 두 그래프가 유사한 것을 확인할 수 있다.

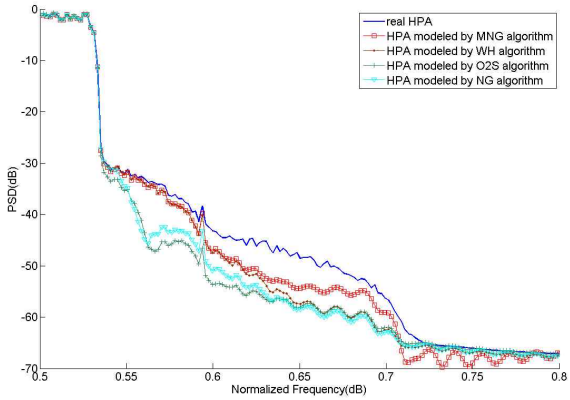
<그림 3-2>는 AM-PM 그래프이다. <그림 3-2>에서 보는 바와 같이 실제 HPA와 모델링한 HPA의 그래프 모양이 매우 유사한 것을 볼수 있다. <그림 3-3> 은 실제 HPA와 지금까지 소개한 알고리즘들로 모델링한 HPA들의 전력 스펙트럼 밀도를 보인 그림이다. <그림 3-3>을 보면 빨간색이 MNG알고리즘, 갈색은 WH 알고리즘, 하늘색은 NG 알고리즘, 초록색은 O2S 알고리즘으로 모델링한 HPA의 전력 스펙트럼 밀도이다. 그리고 파란색은 실제 HPA의 전력 스펙트럼 밀도이다. <그림3-3>에서, EVM 이 가장 작게 나온 위너모델이 전력 스펙트럼 밀도에서도 실제 HPA와 가장 유사한 것을 볼 수 있다.



<그림3-1> AM-AM 그래프



<그림3-2> AM-PM 그래프



<그림 3-3> 전력 스펙트럼 밀도

4. 결과 요약

지금까지 실제 HPA를 모델링하는 알고리즘을 살펴보고, HPA의 입출력이 주어졌을때 어떤 모델인지를 추정 하는 방법을 소개하였다. 그 다음, 기준 신호를 실제 HPA의 출력값으로 정한뒤, 각 알고리즘으로 추정한 결과의 EVM 값을 dB 스케일로 나타내었고, 그 결과 위너 모델이 본 논문에서 다루는 실제 HPA의 특성과 가장 잘 맞아 떨어지는 모델이라는 결론을 얻을 수 있었다. 본 논문에서 위너 모델이라고 결론을 내린 것은 오롯이 앞서 소개한 실제 HPA에 국한된 것이며, 다른 HPA에 대해서는 다른 모델이 가장 적합한 모델이 될 수 있다. 이 점을 유의하면서 실제 HPA특성이 어떤 모델에 가장 근접한지 알아 낼 수 있다면, HPA의 선형성 문제를 해결하는데 큰 도움이 될 것이라 예측한다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술연구진흥센터의 정보통신·방송 연구개발사업의 일환으로 수행하였음. [B0717-16-0021, 차세대 지상파 방송표준을 지원하는 3kW급 송신기 개발]

참고문헌

[1]Reimers, Ulrich. "DVB-T: the COFDM-based system for terrestrial television."*Electronics &communication engineering journal* 9.1 (1997): 28-32.

[2]Eizmendi, Inaki, et al. "DVB-T2: The second generation of terrestrial digital video broadcasting system." *IEEE Transactions on Broadcasting* 60.2 (2014): 258-271.

[3]Braithwaite, R. Neil. "General principles and design overview of digital predistortion." *Digital Processing for Front End in Wireless Communication and Broadcasting, F. Luo (Ed.), Cambridge University Press, Cambridge, UK* (2011): 143-191.

[4]Wood, John. *Behavioral Modeling and Linearization of RF Power Amplifiers*. Artech House, 2014.

[5]Ding, Lei. *Digital predistortion of power amplifiers for wireless applications*. Diss. Georgia Institute of Technology, 2004.