

논문 2007-44TC-10-22

# 전력증폭기 모델링을 위한 최소 샘플링 주파수 연구

## (Minimal Sampling Rate for Quasi-Memoryless Power Amplifiers)

박 영 철\*

(Youngcheol Park)

## 요 약

무선 단말기용 전력증폭기의 모델링을 위한 최소 샘플링 주파수에 대해 실험 및 시뮬레이션을 통해 연구하였다. 비선형 소자의 모델링은 소자의 비선형성 해석 및 디지털 전치왜곡기 등의 응용분야에서 활용되나, 소자 모델링용 샘플링 주파수에 대한 그동안의 연구 결과에 의하면 최소한 입력신호의 Nyquist 조건이 만족될 경우 주어진 비선형 소자의 모델링이 가능하다고 보고되어 왔다. 하지만 광대역 신호용 소자 모델링의 경우 A/D 변환기 주파수 성능이 충분하지 못하거나 구현이 매우 난해하며, 높은 샘플링 주파수로 인한 전력소모가 무선단말에 적용하기에는 무시하지 못할 수준이다. 따라서 본 연구에서는 단말기용 메모리스 전력증폭기의 선형화 기술에 사용되기 위한 샘플링 주파수에 있어, 입력 신호의 Nyquist 조건 이하로 샘플링하여 전력증폭기의 모델링에 성공적으로 적용할 수 있는 방법에 대해 제안한다. 이 경우 전체 시스템의 광대역 주파수 응답이 보장되어야 하며, 이를 위해 광대역 샘플러 및 시간 영역에서의 비선형 모델링이 제안되었다. 시뮬레이션 결과 샘플링 주파수 조건에 상관없이 동일한 AMAM, AMPM 비선형성을 해석할 수 있었으며, 880MHz, 23dBm 무선단말용 전력증폭기에 적용하여 측정된 결과 또한 샘플링 조건의 변화에 대해 모델링 결과는 0.8dB 이내의 변화를 보임을 알 수 있었다. 샘플링 시스템은 크기신호 복원을 위한 포락선 검출기, 복소신호 추출을 위한 위상천이기 및 광대역 샘플러 등으로 구성되었으며, QPSK 신호를 인가하여 전력증폭기의 비선형성 검출에 활용하였다. 이 시스템은 단말용 전치왜곡기에 활용하여 단말 출력 성능 개선에 활용 될 수 있다.

## Abstract

In this paper, minimum sampling rates and method of nonlinear characterization were suggested for low power, quasi-memoryless PAs. So far, the Nyquist rate of the input signal has been used for nonlinear PA modeling, and it is burdening Analog-to-digital converters for wideband signals. This paper shows that the input Nyquist rate sampling is not a necessary condition for successful modeling of quasi-memoryless PAs. Since this sampling requirement relieves the bandwidth requirements for Analog-to-digital converters (ADCs) for feedback paths in digital pre-distortion systems, relatively low-cost ADCs can be used to identify nonlinear PAs for wideband signal transmission, even at severe aliasing conditions. Simulation results show that a generic memoryless nonlinear RF power amplifier with AMAM and AMPM distortion can be successfully identified at any sampling rates. Measurement results show the modeling error variation is less than 0.8dB over any sampling rates.

**Keywords :** Power Amplifier, pre-distortion, sampling, behavioral modeling

## I. 서 론

광대역 무선 통신 시스템에 있어 전체 시스템의 비선형성 해석은 신호의 선형성 보장, 시스템 효율화, 복원

신호의 오류 최소화에 반드시 필요한 절차라고 할 수 있다. 특히 전력증폭기의 경우 전체 출력 시스템의 효율이 전력증폭기의 효율에 밀접한 영향을 받기에 선형화를 통한 효율제고가 필요하며, 디지털 전치왜곡기에 활용되기 위한 정확한 비선형성 모델링이 반드시 필요한 상황이다. RF 전력증폭기의 경우 디지털 전치왜곡기가 효율성, 시간 및 온도 변화에 따른 증폭기의 성능 열화를 추적할 수 있는 적응성, 아날로그 전치왜곡기 대비 넓은 대역폭 등의 장점으로 인해 보편화 되고 있다

\* 정희원, 한국의국어대학교 전자정보공학부  
(School of Electronic Engineering, Hankuk  
University of Foreign Studies)

※ 본 연구는 한국의국어대학교 교내학술연구비의 지원에 의하여 이루어진 것임.

접수일자: 2007년6월20일, 수정완료일: 2007년10월12일

[1~2]. 따라서 이에 필요한 A/D 변환기의 성능 또한 중요한 이슈가 되며, 특히 샘플링 능력은 추후의 기저대역 신호해석에 매우 큰 영향을 미치기에 많은 연구가 진행되고 있다<sup>[3~4]</sup>. 그동안 비선형 모델링을 위한 최소 샘플링 주파수는 입력신호의 Nyquist 조건을 만족해야 하는 것으로 보고되어 왔다(입력 Nyquist 샘플링)<sup>[5~6]</sup>. 이는 일반적으로 디지털 전치왜곡기에 적용되는 출력 신호의 Nyquist 샘플링(출력 Nyquist 샘플링)에 비해 비약적으로 완화된 조건이기는 하나, 최근의 OFDM 신호 적용 및 UWB 등으로 인한 전송신호의 광대역화 추세로 볼 때 여전히 A/D변환기에 무리한 조건을 부과한다고 할 수 있다. 최근 들어 일부 연구에서 입, 출력 샘플의 확률적 분포에 의한 비선형 모델링 방법이 제안되기는 했으나<sup>[7~8]</sup>, 이 방법은 기기의 위상왜곡 정보는 추출하지 못하는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 메모리 성분이 없는 무선 단말용 전력증폭기의 비선형모델링에 있어 Nyquist 샘플링에 영향을 받지 않고 모델링을 수행할 수 있는 방법에 대해 제안하며 880MHz 전력증폭기에 적용한 결과로서 모델링 성능을 확인한다. 이로써, 신호 대역폭이 수 MHz~ 수 십MHz이고 사용가능한 A/D 변환기의 성능이 제한적인, 차세대 이동통신단말의 전력증폭기 모델링 및 선형화 기술에 활용할 수 있을 것이다.

## II. 전력증폭기의 비선형성 해석

### 1. 메모리리스 RF 전력증폭기모델

일반적인 RF 전력증폭기에 인가되는 대역제한 신호는 다음과 같이 정의 될 수 있다.

$$x(t) = \text{Re}\{x_L(t) \cdot e^{j\omega_c t}\} \quad (1)$$

여기서,  $x_L(t)$ 는 복소 기저대역신호이며, 전력증폭기의 출력신호는 다음과 같은 Volterra 형태로 표현된다.

$$y(t) = \sum_{k=0}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} h_{2k+1}(\tau_1, \dots, \tau_{2k+1}) x(t-\tau_1) \dots x(t-\tau_{2k+1}) d\tau_1 \dots d\tau_{2k+1} \quad (2)$$

이 때, 단말용 전력증폭기와 같이 증폭기가 quasi-memoryless 특성을 갖는 경우 위의 식의 Volterra kernel은 아래의 임펄스 응답으로 변환된다.

$$h_{2k+1}(\tau_1, \dots, \tau_{2k+1}) = a_{2k+1} \delta(\tau_1, \dots, \tau_{2k+1}) \quad (3)$$

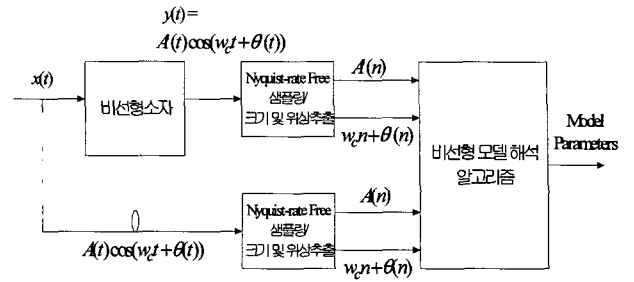


그림 1. 비선형 전력증폭기의 모델링 개념도  
Fig. 1. Block diagram of the Behavioral Modeling system for the nonlinear PAs.

또한, 이 신호가 샘플링 주기  $T$ 의 샘플러를 통과하면 아래와 같은 형태의 입력 및 출력 신호로 표현 될 수 있다.

$$x_{discrete}(t) = \text{Re} \left[ \sum_{k=-\infty}^{\infty} x_L(t) \cdot e^{j\omega_c t} \cdot \delta(t - kT) \right] \quad (4)$$

$$y_{discrete}(t) = \text{Re} \left\{ \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} a_{2m+1} |x_L(t)|^{2m} x_L(t) e^{j(\omega_c t)} \cdot \delta(t - kT) \right\} \quad (5)$$

이는 다항식형태로 표현된 Volterra 모델로서, 최종적인 모델링을 위해 크기 왜곡(AMAM) 및 위상 왜곡(AMPM)을 각각  $F(|x_L(t)|)$ ,  $G(|x_L(t)|)$ 으로 정의 할 수 있다.

$$F(|x_L(t)|) = \left[ \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{m=0}^k a_{2m+1} \hat{a}_{2k+1-2m} |x_L(t)|^{2(m+1)} \right]^{0.5} \quad (6)$$

$$G(|x_L(t)|) = \tan^{-1} \left[ \frac{\sum_{m=0}^{\infty} \text{Im}\{a_{2m+1} |x_L(t)|^{2m+1}\}}{\sum_{m=0}^{\infty} \text{Re}\{a_{2m+1} |x_L(t)|^{2m+1}\}} \right] \quad (7)$$

여기서,  $F(|x_L(t)|)$ ,  $G(|x_L(t)|)$ 을 도출하기 위한 계수  $a_{2m+1}$ 는 샘플링 주기  $T (=2\pi/\omega_s)$ 에 독립적임을 확인할 수 있으며, 이를 비선형 모델링에 활용 할 수 있다.

### 2. 비선형 모델 추출

시간영역에서 표현된 (4)와 (5)는  $X(w)$ 와  $Y(w)$ 를  $x(t)$ 와  $y(t)$ 의 Fourier 변환이라고 할 때 아래와 같이 간략화 된다.

$$X_{discrete}(w) = \frac{1}{T} \sum_{k=-\infty}^{\infty} X(w - kw_s - w_c) + \frac{1}{T} \sum_{k=-\infty}^{\infty} X(-w + kw_s - w_c) \quad (8)$$

$$Y_{discrete}(w) = \left[ \begin{aligned} &\frac{1}{T} \sum_{i=0}^{\infty} \left[ \sum_{k=-\infty}^{\infty} Y_{2i+1}(w - kw_s - w_c) \right. \\ &\quad \left. + \sum_{k=-\infty}^{\infty} Y_{2i+1}(-w + kw_s - w_c) \right] \end{aligned} \right] \quad (9)$$

여기서  $Y_{2i+1}(w)$ 는  $2i+1$ 차 비선형 응답의 Fourier 변환함수로, (3)의 조건을 적용하면 다음과 같이 표현된다.

$$Y_{2i+1}(w) = a_{2i+1} \prod_{k=1}^{2i+1} X(w) = a_{2i+1} X_{2i+1}(w) \quad (10)$$

$$Y_{discrete}(w) = \frac{1}{T} \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \left[ \begin{aligned} &a_{2i+1} X_{2i+1}(w - kw_s - w_c) \\ &+ a_{2i+1} X_{2i+1}(-w + kw_s - w_c) \end{aligned} \right] \quad (11)$$

일반적인 A/D변환기의 경우 샘플링회로에 이어 anti-aliasing 필터를 배치함으로써 원래 신호의 이미지를 제거하며, 이와 같은 입력 Nyquist 조건기준의 anti-aliasing 필터를 (11)에 적용할 경우,

$$Y_{discrete}(w) = \frac{1}{T} \sum_{i=0}^{\infty} \left[ \begin{aligned} &a_1 X(w - w_c) + a_1 X(-w - w_c) \\ &+ a'_{2i+1} \sum_{|k| \geq 2} X'_{2i+1}(w - kw_s - w_c) \\ &+ a'_{2i+1} \sum_{|k| \geq 2} X'_{2i+1}(-w + kw_s - w_c) \end{aligned} \right] \quad (12)$$

의 신호로 변형된다. 여기서  $X'_{2i+1}$ 는 1차 이상의 비선형 응답이 anti-aliasing filter에 의해 변형된 신호이다. 따라서  $w_s$ 가 낮아질수록 aliasing이 심해지고 결과적으로  $|a_{2i+1} X_{2i+1} - a'_{2i+1} X'_{2i+1}|$ 의 모델링 에러 또한 증가되는 것으로 표현될 수 있다. 그러므로 정확한 파라미터 추출을 위해서는 주파수 축에서의 필터링을 배제하고 샘플러 등을 포함한 적용되는 기기들의 주파수용

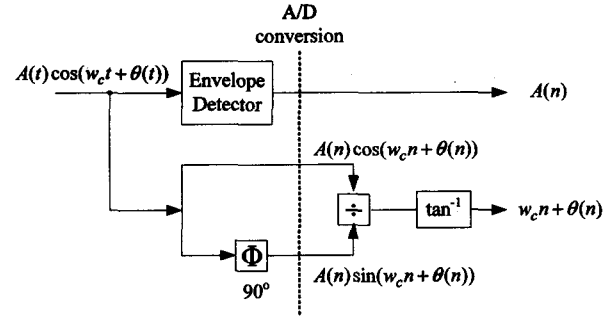


그림 2. A/D 변환기의 크기 및 위상 복원 블록  
Fig. 2. Detailed diagram of the sampling circuit.

답이 균일하게 확보될 수 있도록 설계되어야 하며, 얻어진 샘플들은 시간 영역에서 왜곡정보를 추출해야 한다. 즉, 시간 영역에서 크기왜곡 함수 추출을 위해서는 포락선 검출기를 활용하여  $x_L(t), y_L(t)$ 을 추출한다.

위상왜곡의 경우 그림2에서와 같이 복소신호 샘플링과 arctan함수를 통하여 위상정보를 복원한다.

$$x_{complex}(t) = x_{in-phase}(t) + j x_{quad-phase}(t) \quad (13)$$

$$w_c n + \theta(n) = \tan^{-1} \frac{\text{Im}\{x_{complex}(n)\}}{\text{Re}\{x_{complex}(n)\}} \quad (14)$$

위와 같이 시간영역에서 채집된 신호로부터 MMSE 방식을 이용하여 크기 및 위상 왜곡 함수를 주파수 영역에서의 aliasing 정도와 상관없이 생성할 수 있다.

### III. 시뮬레이션

메모리리스 전력증폭기의 비선형성 모델링을 위해 1 Mbps QPSK 신호로 시뮬레이션 하였다. 전력증폭기의 입출력 신호는 샘플링 블록을 통과한 후 5차 비선형 모델링에 이용된다. 주파수 영역에서의 aliasing을 조절할 수 있도록 샘플링 주기가 조절되었으며, 두 가지 샘플링 조건에 의한 주파수 영역에서의 스펙트럼은 그림 3과 그림 4에 표현되었다. 그림 3은 Nyquist 조건을 만족하는 샘플링 환경에서의 입출력 신호 스펙트럼이다. 이때의 IF 반송주파수는 5MHz이며, 샘플링 주파수는 24MHz이다. 반면 그림 4는 Nyquist 조건 이하로 샘플링 된, 증폭기의 입출력 단에서 심한 aliasing이 발생했을 때의 스펙트럼이다. 역시 반송주파수는 5MHz이고, 샘플링 주파수는 3MHz이다. 이 경우 그림에서와 같이 심각한 aliasing이 발생하여 주파수 영역으로부터 신호

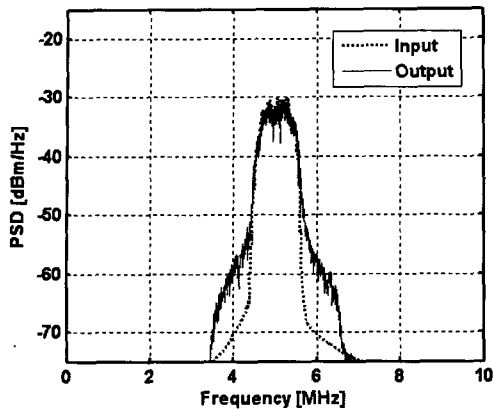


그림 3. Nyquist 조건 충족 시 입력력 신호 스펙트럼의 Fig. 3. Input and Output Spectra of data sampled with full Nyquist rate.

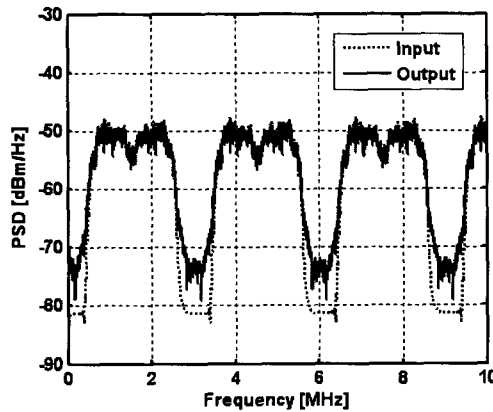


그림 4. 입력 Nyquist 조건 이하로 샘플 되어 aliasing 발생된 상태의 입력력 신호 스펙트럼 Fig. 4. Input and Output Spectra of data sampled below one half the input Nyquist rate.

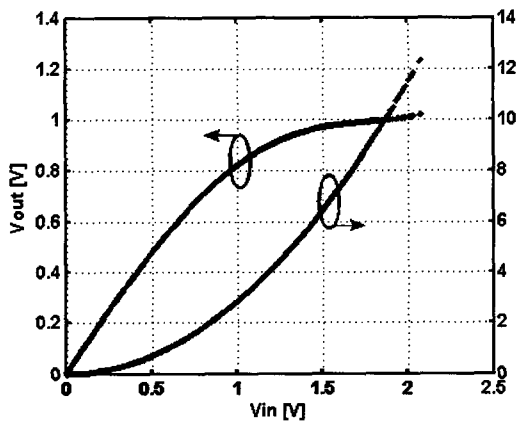


그림 5. 입력 Nyquist 조건을 만족할 경우 및 만족하지 못하는 경우의 동일한 AMAM, AMPM 모델링 결과 Fig. 5. Identical AMAM, AMPM responses when sampling frequencies are above and far below the Input Nyquist Rates.

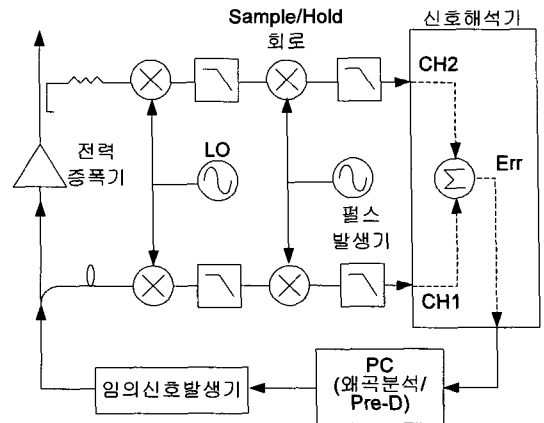


그림 6. 비선형 전력증폭기의 샘플링 주기에 의한 모델링 영향 분석 테스트 셋업 Fig. 6. Block Digagram of a Sampling Testbed for Nonlinear PA Modeling.

복원이나 비선형성 모델링은 불가능한 상태이다. 그러나 앞 절의 방법으로 위의 두 가지 경우에 대해 크기 및 위상왜곡을 추출한 결과는 그림 5에서와 같이 동일한 형태를 보여주고 있다.

#### IV. 실험

23mW Class AB GaAs RF 전력증폭기의 비선형 모델링을 위해 1.25MHz 대역폭의 QPSK신호를 880MHz에서 발생시켜 입력하였다. 증폭기의 입력 및 출력신호는 IF 주파수로 변환된 후, narrow-aperture 샘플러를 통하여 기저대역으로 변환되어 AMAM, AMPM 등의 비선형 왜곡 함수 추출 알고리즘에 적용되었다.

그림 6은 구축된 샘플링 시스템의 구성도를 나타낸다. 본 구성에서 aliasing의 정도는 샘플링 주기를 정교하게 제어할 수 있는 광대역 디지털 오실로스코프를 이용하여 제어하였다. 결과적으로, 그림 7~그림 10은 두 가지 조건의 샘플링 주기에 따른 AMAM, AMPM 모델링 결과를 나타내고 있다. 그림 7은 샘플링 주파수가 9.8MHz로 입력 Nyquist 조건인 1.25MHz의 약 8배인 경우의 AMAM 샘플링 결과와 모델링 결과를 나타낸다. 반면에 그림 8의 샘플링 주파수는 0.98MHz로 입력 Nyquist 조건의 0.8배에 해당하며, 입출력 신호 스펙트럼 모두에서 aliasing이 발생하는 조건에서의 AMAM 샘플 데이터 및 이의 모델링 결과를 나타내고 있다. 이 그림에서, 샘플링 주파수의 차이를 표현하기 위해 그래프에 표시된 데이터의 수는 차이가 있으나, 전체적인 외관상으로서의 모델링 결과는 두 가지 샘플링의 경우

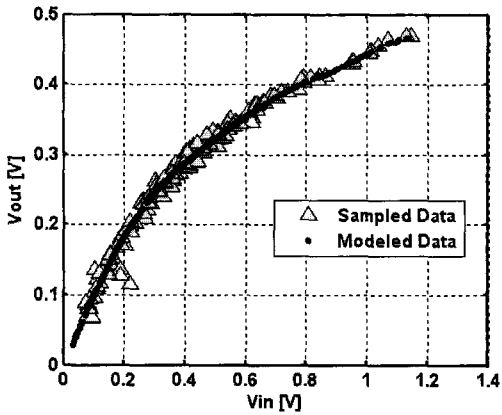


그림 7. 샘플링 주기가 입력 Nyquist 조건의 10 배인 경우의 AMAM모델링 결과 및 측정 데이터  
 Fig. 7. AMAM responses of measured and modeled data when  $f_s$  is 10 times the input Nyquist rate.

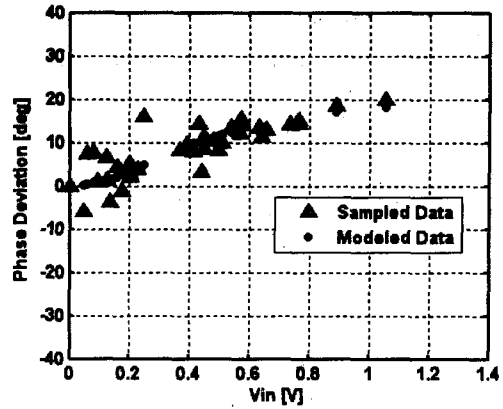


그림 10. 샘플링 주기가 입력 Nyquist 조건의 0.8 배인 경우의 AMPM모델링 결과 및 측정 데이터  
 Fig. 10. AMPM responses of measured and modeled data when sampling frequencies are 0.8 times the input Nyquist rate.

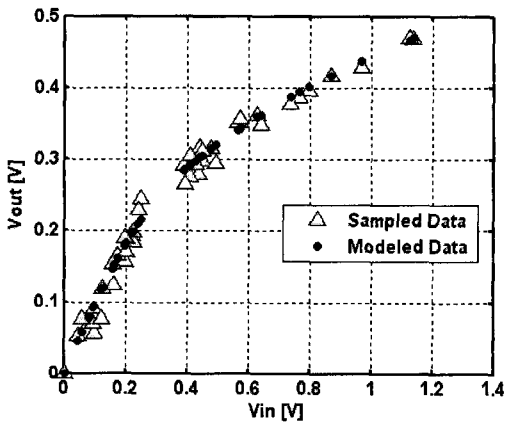


그림 8. 샘플링 주기가 입력 Nyquist 조건의 0.8 배인 경우의 AMAM모델링 결과 및 측정 데이터  
 Fig. 8. AMAM responses of measured and modeled data when  $f_s$  is 0.8 times the input Nyquist rate.

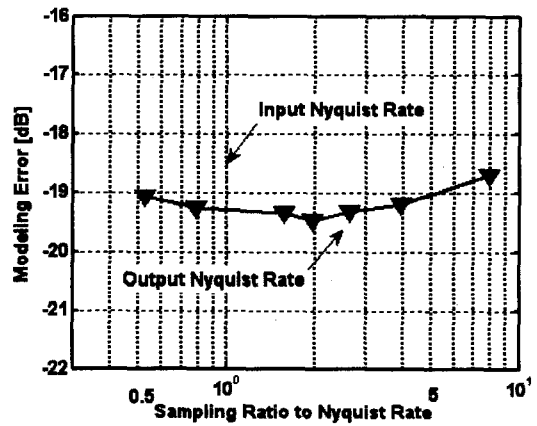


그림 11. 샘플링 주파수의 변화에 따른 모델링 에러 함수의 변화  
 Fig. 11. Modeling Error over Sampling ratio to the Input Nyquist rate.

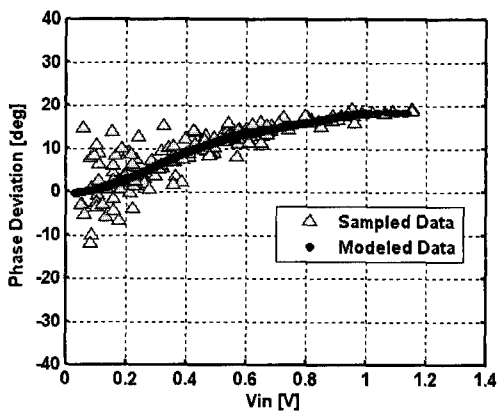


그림 9. 샘플링 주기가 입력 Nyquist 조건의 10 배인 경우의 AMPM모델링 결과 및 측정 데이터  
 Fig. 9. AMPM responses of measured and modeled data when  $f_s$  is 10 times the input Nyquist rate.

차이가 없음을 알 수 있다. 마찬가지로, 그림 9, 그림 10 으로부터 AMPM의 비선형왜곡 또한 같은 결론을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

샘플링 주기에 의한 모델링 성능을 확인하기 위해  $p$  차 비선형 모델  $\tilde{y}(n)$ 과 채취된 샘플  $y(n)$ 간의 오차함수를 다음과 같이 정의한다.

$$error(T) = 10 \log_{10} \left[ T \sum_{n=1}^L \{ (y(nT) - \tilde{y}(nT)) \} \right] \quad (15)$$

이 오차함수를 이용하여 각 샘플링 주파수 별로 비선형 모델의 정확성을 가늠할 수 있으며, 그 결과가 그림 11에 표시되었다. 위 결과로부터 샘플링 주파수의 변화에 대해 모델링 오차함수의 변화는 약 0.8dB 이내 임을 확인할 수 있다.

## V. 결 론

본 논문에서는 입력 Nyquist 조건을 충족하지 않는 샘플들로부터 정확한 비선형 전력증폭기의 모델링 계수를 추출하는 방법에 대해 제안하였다. 지금까지, 비선형 모델링을 위해서는 최소한 입력신호의 Nyquist 조건이 충족되어야 한다고 보고되었으나, 무선 단말과 같이 상대적으로 낮은 전력을 송출하는 시스템에 있어서는 quasi-memoryless 조건을 충족하며, 이를 이용하여 샘플링 조건에 영향을 받지 않는 샘플링 방법 및 그로부터 크기 및 위상왜곡 함수를 추출하는 방법을 제안하였다. 낮은 샘플링 주파수로 부터 발생하는 aliasing으로 인해 주파수 영역에서의 정보의 손실은 불가피하나, 복소 샘플링을 통해 시간영역에서 신호를 처리함으로써 주파수 영역에서의 손실을 회피하는 것이 가능함을 알 수 있다. 이와 같은 샘플링 시스템은 포락선검출기, 90° 위상천이기, narrow-aperture 샘플러 등을 이용하여 구현할 수 있다.

결과적으로, 23dBm 무선 단말용 전력증폭기의 시뮬레이션 및 측정 결과로부터 비선형 모델은 샘플링 주파수와 상관없이 유사한 결과를 얻을 수 있음을 증명하였다. 또한 샘플링 주파수의 변화에 대한 비선형모델 출력과 수집된 데이터의 유사성을 확인하기 위해 오차함수를 계산하였으며, 샘플링 주파수에 따른 모델링 오차의 변화량이 0.8dB이내인 안정적인 모델을 얻을 수 있음을 확인하였다.

## 참 고 문 헌

- [1] P. B. Kenington, *High-linearity RF Amplifier Design*. Norwood, MA: Artech House, pp.398-402, 2000.
- [2] S. P. Stapleton, "Amplifier linearization using adaptive digital predistortion," *Applied Microwave & Wireless*, pp.72-77, Feb. 2001.
- [3] Singerl, P., and Koepl, H.: "Volterra Kernel Interpolation for System Modeling and Predistortion Purposes", in *Proc. ISSCS 2005*, pp.251-254, Lasi, Romania, 2005.
- [4] J. Tsimbinos, and K. V. Lever, "Sampling frequency requirements for identification and compensation of nonlinear systems," in *Proc. ICASSP*, vol. III, pp.513-516, Adelaide, US, 1994.
- [5] W. A. Frank, "Sampling requirements for Volterra system identification," *IEEE Signal Processing Lett.*, vol. 3, no. 9, pp.266-268, Sept. 1996.

- [6] R. J. Martin, "Volterra system identification and Kramer's sampling theorem," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol.47, no. 11, pp.3152-3155, Nov. 1999.
- [7] Huang, X., and Caron, M.: "Performance of a type-based digital predistorter for solid-state power amplifier linearization", in *Proc. ISCAS 2005*, pp.1710-1713, Kobe, Japan, 1994.
- [8] Huang, X., Tardif, P., and Caron, M.: "Experimental Results of a Type-Based Predistorter for SSPA Linearization", in *Proc. ISCAS 2004*, pp.429-432, Vancouver, Canada, 2004.

## 저 자 소 개



박 영 철(정회원)

2004년 미국 Georgia 공과대학교  
전기전자공학과  
(공학박사)

2004년~2007년 삼성전자 정보  
통신 총괄 책임연구원

2007년~현재 한국외국어대학교  
전자공학과 조교수

<주관심분야: RF 전력증폭기 및 microwave 주파수체배기 설계 및 모델링, 디지털 전치왜곡기>