

# OFDM 시스템에서 구간 선형 근사 기반의 고출력 증폭기 특성 추종 및 이를 이용한 적응적인 고정점 반복 사전왜곡기의 구현

안효주<sup>†</sup>, 신요안<sup>†°</sup>, 임성빈<sup>†</sup>

<sup>†</sup>삼성전자(주)

<sup>†</sup>숭실대학교 정보통신전자공학부

<sup>°</sup>전화 : 02-820-0632 / 팩스 : 02-821-7653

## Implementation of an Adaptive Fixed Point Iteration Predistorter in OFDM Systems Based on Identification of High Power Amplifier Characteristics Using Piecewise Affine Approximation

Hyo-Joo Ahn<sup>†</sup>, Yoan Shin<sup>†°</sup> and Sungbin Im<sup>†</sup>

<sup>†</sup>Samsung Electronics Co.

<sup>†</sup>School of Electronic Engineering, Soongsil University

<sup>°</sup>E-mail : yashin@logos.soongsil.ac.kr

본 연구는 2000년도 정보통신부 대학 정보통신 연구센터 육성·지원 사업에 의한 결과입니다

### 요약

차세대 초고속 무선 전송을 위한 OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) 방식에서는 전송 신호의 진폭이 큰 PAPR (peak-to-average power ratio)을 갖게 되어 송신기에서 사용되는 고출력 증폭기의 비선형성에 의해 큰 왜곡을 받게 된다. 이러한 왜곡의 보상을 위하여 우리는 고정점 반복 (fixed point iteration)에 기반한 사전왜곡기 (predistorter)를 제안하였으나, 이는 고출력 증폭기의 특성이 변화하지 않는다는 가정에서 구현되었다. 본 논문에서는 구간 선형 근사에 기반하여 고출력 증폭기의 시변 특성을 추종하는 새로운 기법과 이렇게 근사된 고출력 증폭기 특성을 이용하는 적응적인 고정점 반복 사전왜곡기의 구현을 제안한다. 모의 실험 결과, 제안된 고출력 증폭기 근사 방법은 랜덤한 증폭기 특성 변화를 매우 효과적으로 추종하며 이러한 근사 결과를 이용한 고정점 반복 사전왜곡기는 우수한 성능을 보임을 확인하였다.

### 1. 서론

최근 들어 수십 Mbps 급 무선 LAN, 무선 ATM 등의 차세대 초고속 무선 전송을 위해 널리 연구되고 있는 OFDM 시스템은 QAM이나 PSK 등으로 변조된 신호들을 여러 개의 직교 부반송파를 이용해서 전송하는 방식이다[1]. OFDM 시스템은 단일 반송파를 사용하는 시스템과 비교할 때 심한 다중 경로 페이딩 채널 환경에 강인하다는 점 및 변조-복조를 FFT (fast Fourier transform) 알고리즘을 이용하여 효율적으로 구현할 수

있다는 장점이 있다[1]. 하지만 단일 반송파 시스템과는 다르게 OFDM 시스템에서는 출력 신호가 큰 PAPR의 다중 레벨 진폭 특성을 갖게 되어 무선 통신 환경에서 TWTA (traveling wave tube amplifier)[2]와 같은 고출력 증폭기의 비선형 특성으로 인하여 단일 반송파 전송 방식보다 심각한 비선형 왜곡이 발생하게 된다[3]. 이러한 비선형 왜곡을 보상하기 위한 방법 중 하나로 송신기의 고출력 증폭기 전단에 사전왜곡기를 사용하는 방법[3,4]이 있다. 사전왜곡기는 미리 신호를 왜곡한 후 고출력 증폭기에 입력하여 증폭기의 출력이 원래 신호가 증폭기 동작점에서의 이득만큼 증폭된 신호가 되도록 하는 과정을 수행한다. 이러한 사전왜곡기로서 우리는 고정점 반복에 기반한 새로운 방법을 제안하였다 [5,6]. 제안된 방법은 사전 왜곡 과정을 비선형 변환의 고정점을 찾는 문제로 인식하고 contraction mapping 정리[7]를 이용하여 사전 왜곡된 신호를 반복적으로 구하는 방법이다. 하지만 이 방법에서는 증폭기의 비선형 특성을 반복식 내에서 이용하므로써, 만약 증폭기 특성이 변화하고 이를 제대로 추종하지 못하는 경우 성능의 열화가 발생한다.

본 논문에서는 구간 선형 근사에 기반하여 고출력 증폭기의 시변 특성을 추종하는 새로운 기법과 이렇게 근사된 고출력 증폭기 특성을 이용하는 적응적인 고정점 반복 사전왜곡기의 구현을 제안한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 절은 OFDM 시스템과 고출력 증폭기인 TWTA의 비선형 특성에 대하여 설명한다. 3 절에서는 우리가 참고문헌 [5,6]에서 제안한 고정점 반복 사전왜곡기를 설명한다. 4 절에서는 고출력 증폭기의

시변 특성에 대한 구간 선형 근사 기반의 추종 방법과 이를 이용한 적응적인 고정점 반복 사전왜곡기의 구현에 대하여 논하고, 이의 성능을 평가하기 위한 모의 실험 결과 및 결론을 5 절에서 기술한다.

## 2. OFDM 시스템과 TWTA의 비선형 특성

OFDM 시스템은 한 사용자의 신호를 직렬-병렬 변환 후 다중 부반송파를 이용하여 동시에 전송하는 방식이다. 그림 1은 부가성 백색 가우시안 잡음 (AWGN) 채널에서 고출력 증폭기 (HPA)를 사용하는 이산 시간 기저대역 OFDM 시스템의 블록도를 도시한다. 여기서,  $N$ 개의 부반송파를 사용하는 경우 OFDM 변조 신호  $x[n]$ 은 QAM 심벌 시간  $T_s$  sec 간격으로 표본화한 시스템에서 식 (1)과 같이 표현 될 수 있다[1].

$$x[n] \equiv x(n T_s) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] e^{+j2\pi k \frac{n}{N}} \quad (1)$$

$(n = 0, \dots, N-1)$

식 (1)은 PSK (혹은 QAM) 변조된  $N$  개 심벌  $X[k]$ 의 IDFT (inverse discrete Fourier transform)와 동일하며, 따라서 IFFT를 이용하여 효과적으로 디지털 방식으로 구현할 수 있다. OFDM 시스템의 수신단은 송신단의 역과정을 수행하여 송신 데이터를 검출하게 되는데, 특히 복조를 위해 송신단에서는 변조를 위해 사용된 IFFT의 역연산인 FFT를 수행하여 복조를 수행한다.

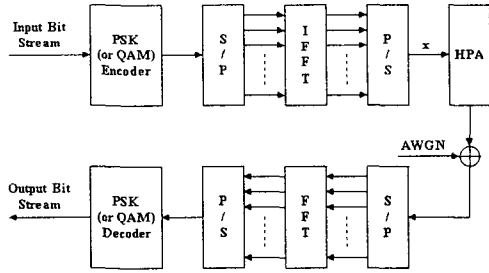


그림 1 : AWGN 채널에서 고출력 증폭기를 사용하는 이산 시간 기저대역 OFDM 시스템의 블록도.

송신단에서 신호는 IFFT 블록과 직렬 변환기를 통과한 후 TWTA와 같은 고출력 증폭기에 의해 전송에 필요한 출력으로 증폭되며, 이 과정에서 전송 신호의 출력을 높이기 위해 증폭기의 포화 영역에서 동작하게 된다. 이러한 포화 영역에서의 동작으로 비선형 왜곡을 피할 수 없게 된다. 특히 OFDM 시스템의 송신 신호는 Rayleigh 분포를 갖는 매우 큰 PAPR의 다중 레벨 진폭 특성을 갖게 되며[3], 따라서 정진폭 특성을 갖는 시스템에 비해 더욱 심각한 비선형 왜곡의 영향을 받게 된다.

본 연구에서는 고출력 증폭기로서 JWTA를 고려하였다. TWTA의 기억성이 없는 비선형 특성은 Saleh의 2-파라미터 모델을 사용할 경우 정규화된 입력 신호의 진폭  $r$ 에 대해 다음 식 (2)와 같은 진폭변조-진폭변조

(AM-AM) 변환 특성  $A(r)$ 과 진폭변조-위상변조 (AM-PM) 변환 특성  $\phi(r)$ 로 표현될 수 있다[2].

$$A(r) = \frac{1.9638 r}{1 + 0.9945 r^2}, \quad \phi(r) = \frac{2.5293 r^2}{1 + 2.8168 r^2} \quad (2)$$

이러한 고출력 증폭기의 비선형성은 출력 신호 레벨을 선형 영역으로 충분히 back-off 시킴으로써 감소시킬 수 있으나, 이는 송신 신호의 출력을 과도하게 감소시키게 되며 따라서 TWTA의 출력을 최대한 이용하기 위해서는 비선형성의 보상이 필요하게 된다.

## 3. 고정점 반복 사전왜곡기

사전왜곡기를 이용하여 고출력 증폭기의 왜곡을 보상하는 경우, 그림 1의 OFDM 시스템에서 OFDM 변조 신호  $x[n]$ 이 증폭기로 입력되기 전에 사전왜곡기에서 미리 왜곡된 후 증폭기로 입력되어 증폭기의 출력이 원래 신호가 증폭기 동작점에서의 이득만큼 선형 증폭된 신호가 되도록 하는 과정을 수행한다. 본 논문에서는 우리가 [5,6]에서 제안한 고정점 반복 사전왜곡기를 고려하며, 여기서는 이에 대하여 간략히 정리하기로 한다.

임의의 변환  $T(\cdot)$ 에 대해 다음 식 (3)의 조건을 만족하는 입력  $z$ 를 고정점 (fixed point)이라 한다.

$$z = T(z) \quad (3)$$

일반적으로 임의의 변환에 대해 고정점은 유일할 필요는 없으며 또한 존재하지 않을 수 있다. 하지만 임의의 입력  $x, x'$ 에 대해 변환  $T(\cdot)$ 가 다음 식 (4)의 조건을 만족하면, contraction mapping 정리[7]에 의하여 변환  $T(\cdot)$ 에 대한 유일한 고정점을 찾을 수 있다.

$$\|T(x) - T(x')\| \leq \gamma \|x - x'\|, \quad 0 \leq \gamma < 1 \quad (4)$$

여기서  $\gamma$ 를 Lipschitz 상수라 한다. 만약  $T(\cdot)$ 가 식 (4)를 만족하는 contraction mapping이면 다음 조건을 만족하는 유일한 고정점  $x_f$ 가 존재한다[7].

$$x_f \equiv \lim_{k \rightarrow \infty} x_k = \lim_{k \rightarrow \infty} T^k(x_0) \quad (5)$$

여기서  $x_{k+1} = T(x_k)$  ( $k = 0, 1, \dots$ )이고  $x_0$ 는 임의의 입력이다.

한편,  $t = nT_s$ 에서의 TWTA 출력 신호  $\hat{x}[n]$ 는 다음 식 (6)과 같이 표현될 수 있다.

$$\hat{x}[n] \equiv N(x[n]) = A(r_n) e^{j(\theta_n + \phi(r_n))} \quad (6)$$

여기서,  $x[n] \equiv r_n e^{j\theta_n}$  ( $n = 0, \dots, N-1$ )은 식 (1)로 표현된  $t = nT_s$ 에서의 OFDM 변조 신호이고,  $A(\cdot)$ 와  $\phi(\cdot)$ 는 식 (2)에서와 같은 고출력 증폭기의 비선형 진폭 및 위상 변환을 각각 나타낸다. 사전왜곡기는 사전에 왜곡된 신호를 증폭기에 가함으로써 출력이 원래 신호와 선형 이득 특성을 유지하도록 하여야 한다. 결국, 사전왜곡기와 TWTA 결합에 의하여 TWTA의 출력이 다음 식 (7)과 같은 형태가 되도록 사전왜곡기가 설계되어야 한다.

$$\hat{x}[n] = N(x_f[n]) = g x[n] \quad (7)$$

여기서,  $g$ 는 back-off 레벨에 의해 결정된 TWTA 동작점에서의 선형 이득이며,  $x_j[n]$ 은 사전왜곡기의 출력이다.

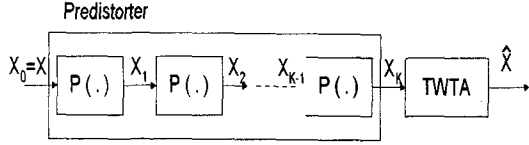


그림 2 : 고정점 반복 사전왜곡기의 구조[5,6].

그림 2는 식 (5)의 고정점 반복에 기반하여 [5,6]에서 제안된 사전왜곡기의 구조를 보여 준다. 이 그림에서 변환  $P(\cdot)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$x_{k+1}[n] \equiv P(x_k[n])$$

$$\equiv x_k[n] + \alpha [g x_0[n] - N(x_k[n])] \quad (8)$$

$$(k = 0, \dots, K-1)$$

여기서,  $\alpha$ 는 수렴 상수,  $x_0[n] \equiv x[n]$ ,  $N(\cdot)$ 은 식 (6)으로 표현된 증폭기 특성이다.

#### 4. 증폭기 시변 특성에 대한 구간 선형 근사 기반의 추종 방법과 이를 이용한 적응적인 고정점 반복 사전왜곡기

그림 2의 고정점 반복 사전왜곡기의 변환  $P(\cdot)$ 에서는 증폭기의 비선형 특성인  $N(\cdot)$ 을 이용한다. 하지만 이러한 비선형 특성을 정확히 모델링하는 것은 어려우며, 또한 일반적으로 증폭기는 온도의 변화, 공급 전원의 불안정, 소자의 노후 등으로 인해 특성이 시간에 따라 변화하게 된다. 따라서 이러한 특성  $N(\cdot)$ 의 변화를 고려하지 않고 식 (8)의 반복식을 적용할 경우 고정점 반복 사전왜곡기의 성능이 크게 열화된다. 따라서 증폭기의 시변 특성을 추종하고 이러한 추종 결과를 사전왜곡기에 적용하는 적응적인 방법을 고려하여야 한다. 본 연구에서는 증폭기의 시변 특성을 구간 선형 근사하는 방법을 제안한다. 제안 시스템은 초기에 증폭기 모델을 설정하며 주기적 혹은 갱신이 필요할 때마다 증폭기의 특성을 계속해서 추종하여 이렇게 추종된 증폭기 모델에 따라 고정점 반복 사전왜곡기를 동작시킨다. 그림 3은 이러한 제안 시스템의 구조를 도시한다.

**초기 증폭기 모델의 설정 :** 제안된 추종 방식에서는 초기에 고풍력 증폭기의 AM-AM 특성  $A(r)$ 과 AM-PM 특성  $\phi(r)$  각각을 초기화 데이터를 이용하여 근사한다. 이 때 각각의 특성 곡선에 대한 입력 진폭을 10개의 구간  $I_i \equiv (0.1(i-1), 0.1i]$  ( $i = 1, \dots, 10$ )으로 분할한 후 각 구간별로 크기가  $0.1i$ 이고 위상인 0인 실수데이터  $N_i$ 개를 증폭기에 인가하여, 증폭기 출력 진폭과 위상을 측정한다. 본 연구에서는 OFDM 변조기

에서 512개의 부반송파 사용을 가정하여 심벌 블록이 512가 되므로  $N_1 = \dots = N_9 = 50$ 이고  $N_{10} = 62$ 로 정하였다. 증폭기의 시변 특성에 의해 동일 입력에 대해서 증폭기 출력에 변화가 있으며, 따라서 각 구간별로 측정된 증폭기 출력 진폭  $A_{i,j}$  및 위상  $\phi_{i,j}$ 에 대해 아래와 같은 평균을 구한다.

$$A_i \equiv \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} A_{i,j}, \quad \phi_i \equiv \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} \phi_{i,j} \quad (9)$$

입력 진폭이  $r_0 \equiv 0$ 일 때, 증폭기 출력 진폭  $A_0 \equiv 0$ , 위상  $\phi_0 \equiv 0$ 이라는 가정에 식 (9)의 각 구간별 평균값을 이용하여 증폭기 특성에 대한 구간 선형 근사식  $y_{AM,i}$ 와  $y_{PM,i}$  ( $i = 1, \dots, 10$ )를 아래와 같이 구한다.

$$y_{AM,i} = \frac{A_i - A_{i-1}}{r_i - r_{i-1}} x_i + A_i - \frac{A_i - A_{i-1}}{r_i - r_{i-1}} r_i \quad (10)$$

$$y_{PM,i} = \frac{\phi_i - \phi_{i-1}}{r_i - r_{i-1}} x_i + \phi_i - \frac{\phi_i - \phi_{i-1}}{r_i - r_{i-1}} r_i \quad (11)$$

단 여기서  $x_i \in (0.1(i-1), 0.1i]$ 로  $i$ 번째 구간의 가능한 입력 진폭을 나타내고,  $r_i \equiv 0.1i$ 이다.

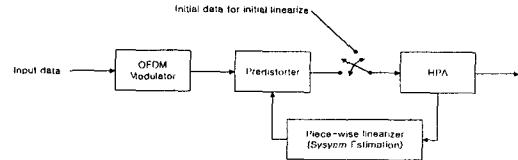


그림 3 : 제안된 근사 방법을 이용하는 적응적인 사전 왜곡기의 구조.

**실제 데이터에 대한 모델 갱신 :** 위와 같은 방법에 의해 초기에 구간 선형 근사된 증폭기 모델을 이용하여 고정점 반복 사전왜곡기 (식 (8))을 동작한다. 이러한 초기화 과정 후 실제 데이터에 대하여 다음 방법에 의해 모델을 갱신한다. 먼저  $N \equiv 512$ 개 실제 심벌로 구성된 하나의 심벌 블록에 대하여 심벌의 진폭을 측정하고 해당되는 구간  $I_i$  ( $i = 1, \dots, 10$ )의  $N_i$ 개 값들을 이용하여 현재 심벌 블록에 대한 구간별 입력 진폭, 출력 진폭, 출력 위상의 평균을 구한다. 이렇게 구한 평균값들을  $r_{new,i}$ ,  $A_{new,i}$ ,  $\phi_{new,i}$ 라 할 때 실제 구간 선형 근사를 위한 데이터  $r_i$ ,  $A_i$ ,  $\phi_i$ 는 아래 식과 같이 이전 심벌 블록에 대한 평균값  $r_{old,i}$ ,  $A_{old,i}$ ,  $\phi_{old,i}$ 과 재차 평균을 구해 얻어진다. 만약 출력 back-off 레벨[5,6] 등의 변화에 의해 현재 블록에 대한 데이터가 없는 경우는 이전에 사용되었던 값들을 이용한다.

$$r_i = \begin{cases} (r_{new,i} + r_{old,i})/2, & r_{new,i} \neq 0 \\ r_{old,i}, & r_{new,i} = 0 \end{cases} \quad (12)$$

$$A_i = \begin{cases} (A_{new,i} + A_{old,i})/2, & A_{new,i} \neq 0 \\ A_{old,i}, & A_{new,i} = 0 \end{cases} \quad (13)$$

$$\phi_i = \begin{cases} (\phi_{new,i} + \phi_{old,i})/2, & \phi_{new,i} \neq 0 \\ \phi_{old,i}, & \phi_{new,i} = 0 \end{cases} \quad (14)$$

이 값들을 이용하여 식 (10), (11)을 통해 실제 데이터에 대한 구간 선형 근사된 증폭기 모델을 구하여 고정점 반복 사전왜곡기를 위한 식 (8)에 적용적으로 이용한다.

## 5. 모의 실험 결과 및 결론

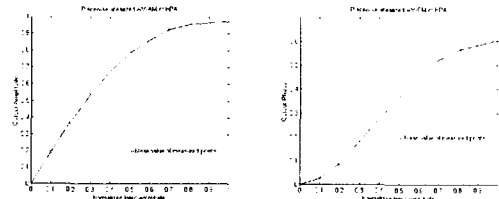
제안된 근사 방식과 이를 이용한 고정점 반복 사전왜곡기의 성능을 모의 실험을 통해 평가하였다. 이를 위해 페이딩이 완전히 보상된 AWGN 채널을 가정하였으며 TWTA를 증폭기로 고려하였다. OFDM 시스템에서 최대 크기가  $3\sqrt{2}$ 인 16-QAM을 변조 방식으로서 고려하였고, 부반송파 변조 및 복조를 위해  $N=512$ -point IFFT/FFT를 이용하였다. 사전왜곡기의 고정점 반복 수는  $K=20$ 으로 정하였고, 사전왜곡기 상수  $\alpha$ 는 0.85로 선택하였다[6]. 증폭기의 시변 특성을 표현하기 위해 식 (2)의 Saleh의 AM-AM 및 AM-PM 모델에 의한 값을 기준으로 특성값들이  $[-\Delta, +\Delta]$ 의 범위에서 균일 분포를 따라 매 심벌마다 랜덤하게 변동한다고 가정하였다. 본 연구에서는  $\Delta$  값으로 0.05 혹은 0.1을 이용하였다. 그림 4에서는 실제 데이터를 이용하여 근사된 TWTA의 (a) AM-AM 및 (b) AM-PM 특성 곡선의 예를 도시하며, 식 (2)의 모델에 의한 특성 곡선과 유사한 결과를 나타냄을 알 수 있다. 그림 5에서는 이러한 근사 결과를 고정점 반복 사전왜곡기에 적용했을 때, 출력 back-off가 5.56 dB일 때의 신호대잡음비  $E_b/N_0$  (dB)에 따른 비트오율 성능을 나타낸다. 여기서 그림 (a)는  $\Delta$ 가 0.05일 때, 그리고 (b)는  $\Delta$ 가 0.1일 때의 결과를 나타낸다. 비교를 위해 사전왜곡기를 적용하지 않은 일반적인 OFDM 시스템 ("General OFDM System")과 시간에 따라 변화하는 증폭기의 출력값을 그대로 고정점 반복 사전왜곡기에 이용하는 경우 ("Fixed Point Iteration")를 함께 도시하고 있다. 이로부터 사전왜곡기를 사용하지 않는 경우 error floor가 발생하는 열악한 성능을 보임을 알 수 있으며, 증폭기의 시변 출력을 근사 없이 그대로 이용하는 경우 랜덤한 변동이 smoothing 없이 그대로 고정점 반복 사전왜곡기에 사용되므로써 제안 방식에 비해 성능 열화가 발생한다. 이러한 성능 차이는  $\Delta$ 가 클수록, 즉 특성 변화가 심할수록 더욱 크게 발생하며 이러한 결과로부터 본 제안 방식을 통해 적응적인 사전왜곡기의 효과적인 구현이 가능하다는 사실을 알 수 있다.

## 참고 문헌

- [1] J. Gingham, "Multicarrier modulation for data transmission: An idea whose time has come," *IEEE Commun. Mag.*, pp. 5-14, May 1990.
- [2] A. Saleh, "Frequency-independent and frequency-dependent nonlinear models of TWT amplifiers,"

*IEEE Trans. Commun.*, pp. 1715-1720, Nov. 1981.

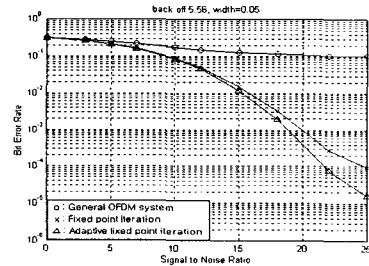
- [3] M. Benedetto and P. Mandarini, "An application of MMSE predistortion to OFDM systems," *IEEE Trans. Commun.*, pp. 1417-1420, Nov. 1996.
- [4] 전원기, 장경희, 조용수, "OFDM 시스템에서의 비선형 왜곡 보상을 위한 적응 데이터 사전 보상기," *한국통신학회논문지*, pp. 40-52, 1997년 1월.
- [5] M.-C. Kim, Y. Shin and S. Im, "Compensation of nonlinear distortion using a predistorter based on the fixed point approach in OFDM systems," *Proc. VTC '98*, pp. 2145-2149, Ottawa, May 1998.
- [6] 김만재, 신요안, 임성빈, "OFDM 시스템에서 사전왜곡기를 이용한 심벌간 간섭과 비선형 왜곡의 보상," *Telecommun. Review*, pp. 246-259, 1999년 4월.
- [7] D. G. Luenberger, *Optimization by Vector Space Method*, John Wiley & Sons, 1969.



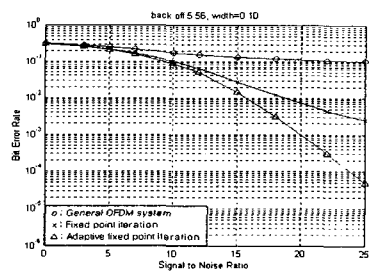
(a) AM-AM 특성

(b) AM-PM 특성

그림 4 : 실제 데이터를 이용하여 구간 선형 함수 근사된 증폭기의 특성 곡선.



(a)  $\Delta = 0.05$



(b)  $\Delta = 0.1$

그림 5 : 출력 back-off 레벨이 5.56 dB일 때 비트오율 성능.