

다중사용자 환경에서 비선형 전력증폭기로 인한 DS/CDMA의 순방향 성능 분석

Performance of DS-CDMA forward Link Due to Nonlinear Power Amplifier in Multiuser Environment

최성호* · 목진담* · 손동철** · 김성철*** · 정희창* · 조경록**

Seong-Ho Choi* · Jin-Dam Mok* · Dong-Cheul Son** · Seong-Cheol Kim**
· Hee-Chang Chung* · Kyoum-Rok Cho**

요 약

본 논문에서는 CDMA시스템의 성능분석시 RF 측면에서의 요구사항인 낮은 전력소비를 만족시키기 위해 증폭기의 효율을 높이기 위한 비선형 전력 증폭기를 사용함에 있어서 증폭기의 비선형성 즉 AM-AM, AM-PM의 특성으로 인한 순방향의 성능 저하에 대한 분석을 하였다. CDMA 송수신기를 구성하여 시간영역에서의 왜곡된 신호의 파형, 신호성좌 특성을 통해 증폭기의 진폭, 위상 비 선형성으로 인해 심볼간 간섭이나 위상 왜곡 등의 현상이 나타남을 알 수 있었다. 또한 주파수 영역에서의 전력스펙트럼밀도의 분석을 통해 진폭특성의 비선형성으로 인해 평균신호전력이 28 dBm일 때 ± 1.98 MHz 에서의 대역외 방사성분은 선형전력 증폭기에 비해 약 3~4 dB 이상이 증가하였으며 스퓨리어스 성분의 경우 비선형 전력증폭기를 사용하였을 경우 선형 증폭기를 사용한 경우에 비해 약 15 dB 이상의 축대과 재생이 큰 것을 알 수 있었다. 이러한 현상으로 인해 타 사용자와 이웃채널사용자의 간섭전력의 증가로 인한 BER 성능이 저하됨을 볼 수 있었다. 이러한 분석방법은 전력증폭기의 비선형성뿐만 아니라 혼합기나 스위치 등과 같은 다른 비선형 부품의 특성으로 인한 성능분석에도 적용할 수 있다.

Abstracts

In this paper the system performance degradation resulting from nonlinear transmitter power amplifier which is essential to increase the efficiency is analyzed in a forward link CDMA system. The power amplifier is modeled by power series model which includes only odd-order terms. The effects of power amplifier's nonlinearity such as intersymbol interference, phase distortion on the RF system performance were visualized by examining the distorted time domain waveforms, signal vector constellation. And through the investigation of the power spectrum density of the transmitted signal, spectral regrowth or sideband regrowth which is result from amplitude distortion can be seen. All these characteristics result in BER performance degradation due to other user interferences and intersymbol interference. The analysis technique described here applies not only to power amplifier but also to any other nonlinear components such as mixers and switches. Also the effects of adjacent channel interference and supurious emission can be analysed between different systems.

* 한국전자통신연구원 기술기준연구팀

** 충북대학교 정보통신공학과

*** 우송대학교 전자공학과

· 논문 번호 : 981010-098

· 수정완료일자 : 1999년 4월 21일

I. 서 론

현재의 이동 통신 서비스는 궁극적인 무선 통신 방법으로 마이크로 셀룰러 무선 통신 시스템에 기반을 둔 IMT-2000(FPLMTS 등)의 개발이 급속도로 진행되고 있다. 또한 정보화 사회가 진전되면서 미래의 정보통신 서비스형태는 현재의 음성서비스 뿐 아니라 초고속 데이터 및 화상통신 등과 같은 멀티미디어 시대로의 요구가 강하게 대두되고 있다. 이와 같은 무선 멀티미디어 통신서비스를 위해서는 대용량의 시스템이 필요하며 가변 및 고속의 데이터율의 처리가 용이해야 한다.

이러한 디지털 이동통신 환경에서 사용 가능한 주파수 대역폭과 송신전력은 일반적으로 제한되어 있으며, 이 두 요소는 신호품질 및 가입자 수용용량과 직결되는 사항이다. 따라서 점점 더 늘어날 가입자를 수용하고 서비스 품질을 개선하기 위해선 보다 효과적인 신호 전송기술이 요구된다. 이를 위해 크게 기저대역과 RF 측면 두 부분으로 나누어 연구가 활발히 진행되고 있다. 기저대역 측면에서는 신호 주파수 대역과 전송 신호의 전력에 있어 보다 효율적인 변조 기법 및 코딩 기법에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 소스코딩, 채널코딩, 신호변조 등은 확산대역통신 뿐만이 아닌 다른 모든 통신방법에서 전송신호의 품질향상을 위해 이미 오래전부터 세계적으로 연구되어져 왔으며, 현재에도 여러 통신환경에 대한 코딩 및 변조 기법이 연구되고 있다.

RF 측면에서보면 주파수 대역의 효율을 고려할 경우 선형 전력 증폭기를 사용해야 하는데 이 경우 낮은 전력소비, 단말기의 소형화 등을 만족시키기에는 부적합하다. 이와 같은 요구를 만족시키기 위해서는 전력 증폭기의 효율을 높여 주어야 하는데 전력 증폭기의 효율을 높이면 신호의 왜곡이 발생하게 된다. 즉 증폭기의 특성이 비 선형성을 가지게 된다^[1]. 이러한 비선형 특성으로 인해

셀룰라 및 개인 휴대 통신 시스템에 있어서 상호 변조왜곡으로 인한 co-channel 간섭, 이웃채널 간섭 등과 측대파 재생 등의 현상을 초래한다. 이러한 비선형 왜곡을 보상해 주기 위한 연구가 많이 진행되었으며 지금도 많은 연구가 진행되고 있다. 가장 널리 연구되고 있는 방법은 Cartesian 왜환 방법과 Pre-distortion 방법이다^{[2]~[4]}.

본 논문에서는 이러한 방법이 연구되어져야할 필요성을 인식하기 위해 증폭기의 비선형성 즉 AM-AM, AM-PM의 특성으로 인한 직접대역확산 시스템의 순방향의 성능분석을 위해 시간영역에서의 진폭특성, signal constellation(신호성좌) 등의 특성과 주파수 영역에서의 측대파 재생을 등을 선형, 비선형 특성에 따라 비교 분석하였다. 또한 다중사용자나 이웃하는 채널사용자의 간섭전력의 증가로 인한 BER 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위해서 II장에서는 성능 분석을 위한 시스템을 살펴보고 III장에서는 앞서 언급한 특성들의 시뮬레이션 결과를 보였고 V장에서 결론을 맺었다.

II. 시스템 분석

2-1 시스템 모델

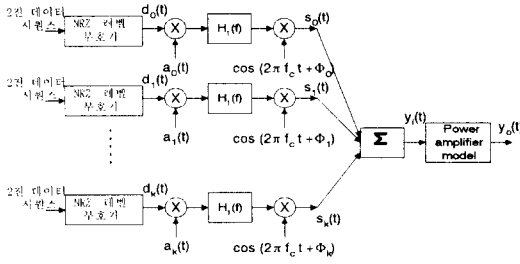
그림 1로부터 K 명의 사용자가 있다고 할 경우 각 사용자의 송신신호는 다음과 같다.

$$s_k(t) = \sqrt{E_c} d_k(t) a_k(t) \cos(2\pi f_c t + \phi_k) \quad (1)$$

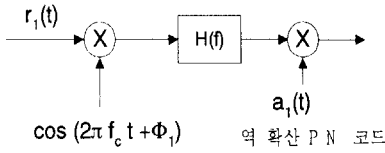
여기서 $d_k(t)$ 는

$$d_k(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} d^{(k)}(i) P_T(t - iT) \quad (2)$$

와 같이 표현되는 데이터신호로 $d^{(k)}(i)$ 는 k 번째 사용자의 i 번째 심볼의 데이터로 1, 혹은 -1의 값을 가지며 $P_T(t)$ 는 크기가 1이며 지속시간이 T 초인 구형 펄스이며 또한 $a_k(t)$ 는



(a) 송신기



(b) 수신기

그림 1. 직접 대역확산 송 수신기의 블록도

Fig. 1. DS/SS transceiver block.

$$a_k(t) = a_k(t - \tau_k) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} a^{(k)}(i) P_{T_c}(t - iT_c) \quad (3)$$

와 같이 표현되는 k 번째 사용자에게 할당된 확산신호를 나타내며 $a^{(k)}(i)$ 는 k 번째 사용자의 i 번째 칩 데이터로 1, 혹은 -1의 값을 가지는 의사 잡음 시퀀스를 사용한다. $P_{T_c}(t)$ 는 크기가 1이며 지속 시간이 T_c 초인 구형 펄스이다. 각각의 데이터는 N 개의 칩에 의해 확산된다. 즉 $T = NT_c$ 이다. 또한 비선형 증폭기의 입력신호 $y_i(t)$ 는 다음과 같다.

$$y_i(t) = \sum_{k=1}^K s_k(t) = \Delta \sqrt{E_c} \sum_{k=1}^K d_k(t) a_k(t) \cdot \cos(2\pi f_c t + \phi_k) \quad (4)$$

여기서 Δ 는 사용자수에 따른 인자로 지수 함수적인 특성을 갖는다. 전력증폭기의 비선형성에 대한 모델은 멱급수 전개식의 홀수항으로 이루어진 3차비선형 모델을 적용하였다^[5]. 즉 증폭기의 출력은 다음과 같다.

$$y_0(t) = A_1 y_i(t) + A_3 y_i^3(t) \quad (5)$$

사용자 1에 대한 수신기에서의 영향을 고려하면 사용자 1에 수신되는 신호는 다음과 같다.

$$r_1(t) = n(t) + A_1 \Delta y_i(t) + A_3 y_i^3(t) \quad (6)$$

수신단에서 발생된 PN코드는 수신된 PN코드와 완벽하게 동기화 이루어져 있다고 가정하고 데이터가 0인 경우를 가정하면 복조기의 출력성분은 다음과 같이 원하는 출력 P 와 칩간 상호간섭 I , 배경잡음 N , 선형 타사용자 간섭 ML , 비선형 타 사용자 간섭 MNL 성분 등으로 구성된다.

$$Z_1 = \int_0^T r_1(t) a_1(t) \cos(2\pi f_c t + \phi_1) dt = P + N + I + ML + MNL$$

원하는 신호의 평균은 식 (7)과 같이 표현된다.

$$E[y_n(k) | d_n(k)] = \sqrt{E_c(k)} d_n(k) \cdot \int_{-\infty}^{\infty} |H(f)|^2 df \quad (7)$$

칩간 상호 간섭신호의 평균은 0이며 분산은 식 (8)와 같이 표현된다.

$$V_I = E_c(k) \sum_{m \neq 0} \left[\int_{-\infty}^{\infty} \cos(2\pi m f T_c) |H(f)|^2 df \right]^2 \quad (8)$$

배경잡음의 분산은 다음과 같다.

$$V_N = \frac{N_o}{2} \quad (9)$$

또한 선형성에 의한 타사용자의 간섭으로 인한 분산값은 식 (10)과 같이 표현된다^[6].

$$V_{ML} = \frac{E_c T^2}{12 N^3} \sum_{k=2}^K R_{k,1} \quad (10)$$

여기서

$$R_{k,1} = \sum_{l=1}^{N-1} 2A_k(l)A_1(l) + A_k(l)A_1(l+1) \quad (11)$$

또한 비 선형성에 의한 상호변조 왜곡에 의한 타 사용자의 간섭으로 인한 분산은 다음과 같다.

$$V_{MNL} = \left(E_c \frac{A_3}{4} \right)^2 \sum_{m=1}^6 \hat{V}_m \quad (12)$$

여기서

$$\hat{V} = E \left[\int_0^T X_m(t_1)A_1(t_1) \cos(2\pi f_c t_1) dt_1 \cdot \int_0^T X_m(t_2)A_1(t_2) \cos(2\pi f_c t_2) dt_2 \right] \quad (13)$$

이다. 결국 다중사용자 간섭으로 인한 비선형성으로 인한 오차확률은 식 (14)와 같이 표현된다.

$$P_b = Q \left(\sqrt{\frac{2E_b}{I_o}} \right) \quad (14)$$

여기서 $I_o = V_N + V_I + V_{ML} + V_{MNL}$

2-2 측대파 재생(스푸리어스 전력방사)

이 특성은 변조 신호 진폭특성이 변하기 때문에 비선형 증폭기를 통과함으로써 나타나는 현상으로서 이 특성은 송신 전력 스펙트럼밀도를 살펴봄으로서 분석이 가능하다. 전력 스펙트럼밀도는 식 (15)와 같은 전력증폭기의 출력의 자기상관함수를 구하고 이 결과를 식 (16)과 같이 이산 푸리에 변환을 함으로써 구할 수 있다.

$$R_{yy}(m) = \frac{1}{N-1} \sum_{k=0}^{\infty} y^*(k) y(k+m) \quad (15)$$

$$S_Y(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} R_{YY} \exp(-j2\pi kn/N) \quad (16)$$

여기서 시뮬레이션에 사용된 $N=8192$ samples 이다.

III. 시뮬레이션결과

증폭기의 비선형특성을 관찰하기위해 혼합기의 비선형특성으로 인한 왜곡의 영향은 고려하지 않았다.

3-1 시간영역에서의 결과분석

앞서도 언급하였듯이 증폭기의 비선형성으로 인해 발생한 왜곡의 특성을 시간영역에서의 파형을 관찰함으로써 살펴볼 수 있다. 그림 2는 선형 전력증폭기의 I-channel 성분의 입출력 파형에 해당한다. 비선형 전력증폭기의 입출력 파형의 특성은 그림 3과 같다.

그림 4와 그림 5는 각각 비선형 전력증폭기의 입, 출력 신호星座 (signal constellation)를 보여주고 있다. 결과를 보면 알 수 있듯이 위상왜곡으로 인해 신호점의 좌표가 회전, 혹은 퍼져있음을 알 수 있다. 이와 같은 위상왜곡은 코드동기획득과정에서 동기획득시간에 영향을 미칠 뿐만 아니라 심하면 비트오차를 유발하기도 한다.

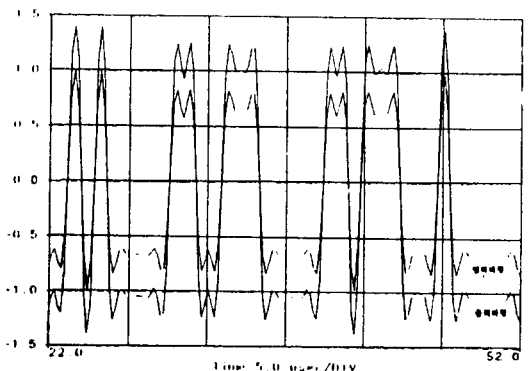


그림 2. 선형증폭기의 I-channel 입출력 파형

Fig. 2. I-channel signal for QPSK modulated base-band waveform in linear region.

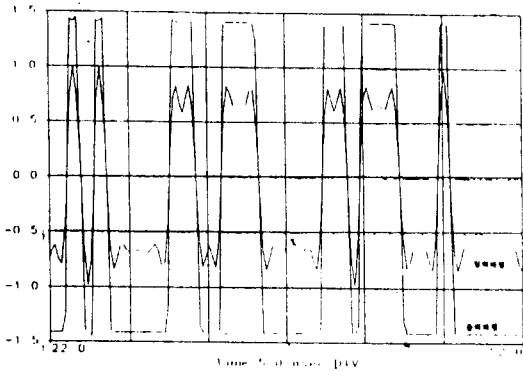


그림 3. 비선형증폭기의 I-channel 입출력 파형
 Fig. 3. I-channel signal for QPSK modulated baseband waveform in non-linear region.

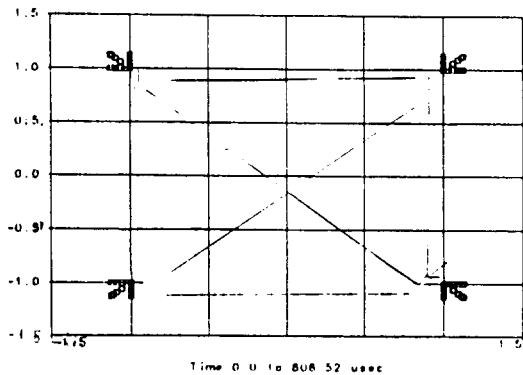


그림 4. 증폭기 입력에서의 신호성좌
 Fig. 4. Signal constellations at power amplifier input.

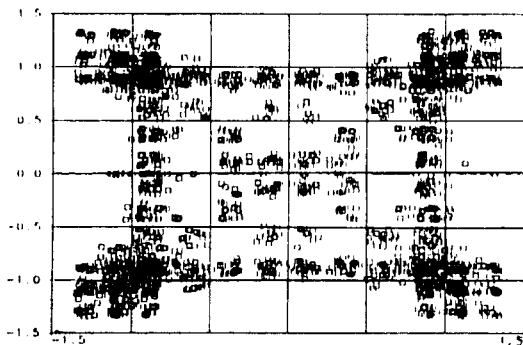


그림 5. 증폭기 출력에서의 신호성좌
 Fig. 5. Signal constellations at power amplifier out-put.

3-2 주파수 영역 분석

기저대역 신호의 여파는 $\alpha = 0.22$ 인 Raised cosine LPF를 이용하였다. 비선형 전력 증폭기를 사용하였을 때의 증폭기 입·출력에서의 전력스펙트럼밀도를 그림 6에 나타내었다. 그림에서 보면 알 수 있듯이 증폭기가 비선형 영역에서 동작하기 때문에 여파된 측대파 신호의 재생 현상이 심하게 나타남을 볼 수 있다. 측정된 신호의 평균전력은 28 dBm 이다. 대역의 방사성분과 스퓨리어스 성분을 관찰하기 위하여 분해 대역폭을 30 kHz로 하여 평균전력을 측정하였다. 전력스펙트럼은 그림 7와 같다. 중심주파수로부터 각각 ± 750 kHz와 ± 1.98 MHz에서의 전력은 평균전력에 비해 각각 약 -43 dBc/30 kHz, -50 dBc/30 kHz로 측정되었다. 중심 주파수로부터 3.125 MHz 이상 벗어난 지역에서의 스퓨리어스 방사성분의 전력은 -35 dBm 이다.

반면에 전력증폭기가 선형영역에서 동작하도록 증폭기를 설계한 경우 증폭기 입 출력에서의 전력 스펙트럼밀도는 그림 8과 같다. 그림에서 보면 알 수 있듯이 증폭기가 선형영역에서 동작할 경우 측 대파 재생현상은 거의 일어나지 않음을 알 수 있

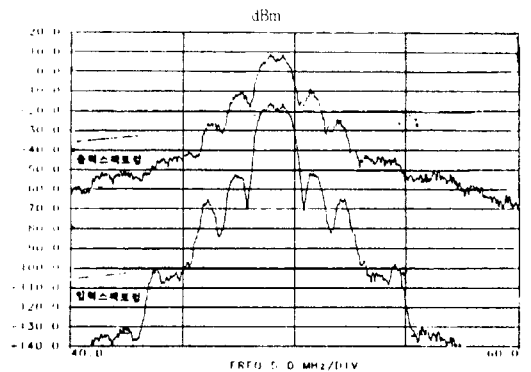


그림 6. 비선형 증폭기의 비선형 영역에서의 입출력 전력스펙트럼
 Fig. 6. Power spectrum density at in-output of the nonlinear power amplifier.

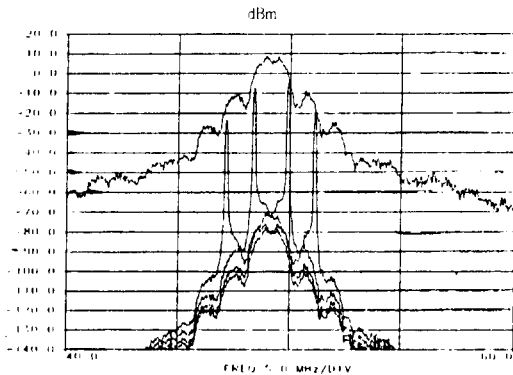


그림 7. 측대파 재생현상 측정을 위한 비선형 증폭기의 출력 전력스펙트럼

Fig. 7. Power spectrum density for measuring side-lobe regeneration.

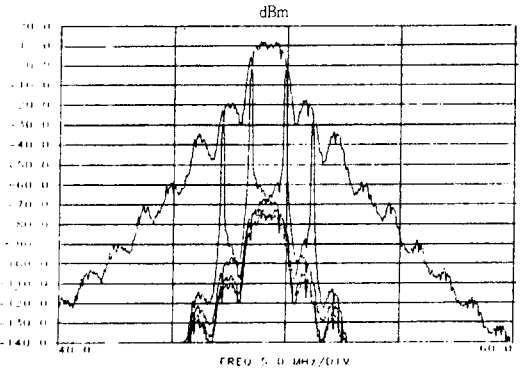


그림 9. 측대파 재생현상 측정을 위한 선형 증폭기의 출력 전력스펙트럼

Fig. 9. Power spectrum density for measuring side-lobe regeneration.

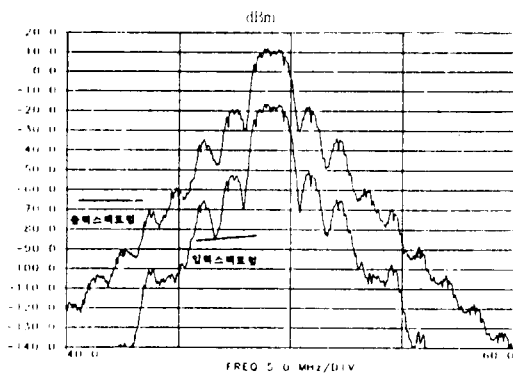


그림 8. 선형 증폭기의 입출력 전력스펙트럼

Fig. 8. Power spectrum density at in-output of the linear power amplifier.

다. 대역의 방사성분과 스퓨리어스 성분을 관찰하기 위하여 비선형증폭기의 경우와 같은 방법으로 평균전력을 측정하였다.

전력스펙트럼은 그림 9와 같다. 중심주파수로부터 각각 ± 750 kHz와 ± 1.98 MHz에서 측정된 전력은 각각 -44 dBc/30 kHz, -55 dBc/30 kHz 이다. 중심주파수로부터 3.125 MHz 이상 벗어난 지역에서의 스퓨리어스 방사성분의 전력은 -50 dB 이다.

두 결과를 살펴보면 ± 1.98 MHz에서의 대역의

방사성분은 선형전력증폭기에 비해 비선형전력증폭기의 경우 약 3~4 dB 이상이 증가하였으며 스퓨리어스 성분의 경우 비선형 전력증폭기를 사용하였을 경우 선형 증폭기를 사용한 경우에 비해 약 15 dB이상의 측대파 재생이 큰 것을 알 수 있다. 결과적으로 증폭기가 비선형 영역에서 동작할 경우 스퓨리어스 성분의 재생으로인한 인접채널 및 다른 서비스영역에 미치는 영향이 심함을 알 수 있다. 이러한 측대파 재생 현상은 AM-AM 비선형성의 특성으로 인해 발생된다.

3-3 BER 성능분석

시간 영역과 주파수 영역에서 살펴본 결과에 의해 시스템의 성능분석의 중요 파라미터인 비트에러확률을 선형, 비선형 영역에서 사용자수에 따라 분석한 결과는 다음 그림 10, 11과 같다.

그림의 결과를 보면 알 수 있듯이 증폭기가 선형영역에서 동작할 경우 사용자수가 증가함에 따라 성능의 저하가 심하게 일어나지 않는 반면 비선형영역에서 동작할 경우 측대파의 재생과 신호성분의 왜곡의 영향으로 사용자수가 증가함에 따라 성능의 저하가 선형영역에서보다 심하게 됨을

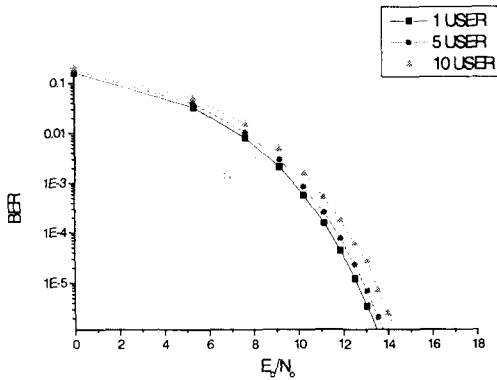


그림 10. 선형영역에서의 사용자수에 따른 BER 성능
Fig. 10. BER performance in linear region.

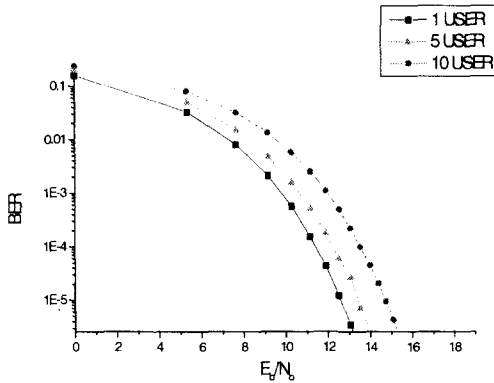


그림 11. 비선형 영역에서의 사용자수에 따른 BER성
능
Fig. 11. BER performance in non-linear region.

알 수 있다. 또한 선형영역에서와 비 선형영역에서
의 단일 사용자일 경우 10^{-3} BER을 고려할 경우
약 0.5 dB의 성능저하가 생기나 열명의 사용자일
경우 약 2 dB의 성능저하를 가져옴을 알 수 있다.
낮은 신호 대 잡음비에서 보다 높은 신호 대 잡음
비에서의 성능의 저하가 심함을 알 수 있다. 이는
낮은 신호 대 잡음비에서보다 높은 신호 대 잡음
비에서 비 선형성이 두드러지게 나타남을 알 수
있다.

IV. 결 론

전력증폭기의 비선형성으로 인한 순방향 시스템
의 성능저하에 대한 분석을 하였다. 직접대역확산
송수신기를 구성하여 시간영역에서의 왜곡된 신호
의 파형, 신호성좌(signal vector constellation) 특
성을 통해 증폭기의 진폭, 위상 비 선형성으로 인
한 심볼간 간섭이나 위상 왜곡등의 현상이 나타남
을 알 수 있었다. 또한 대역의 방사성분과 스푸리
어스 방사성분의 측정을 위해 주파수 영역에서의
전력스펙트럼밀도의 분석을 함으로서 증폭기가 선
형영역에서 동작할 때 확대파 재생 현상을 완하
시킬수 있음을 볼 수 있었다. 또한 증폭기가 선형
영역에서 동작할 경우 사용자수가 증가함에 따라
성능의 저하가 심하게 일어나지 않는 반면 비 선
형영역에서 동작할 경우 확대파의 재생과 신호성
분의 왜곡의 영향으로 사용자수가 증가함에 따라
성능의 저하가 선형영역에서보다 심하게 됨을 알
수 있다. 이와 같은 분석을 통해 직접대역확산 시
스템의 순방향에 있어서의 전력 증폭기의 비선형
성, 다중사용자간섭으로 인한 영향을 알 수 있다.
이러한 분석방법은 전력증폭기의 비선형성뿐만 아
니라 혼합기나 스위치 등과 같은 다른 비선형 부
품의 특성으로 인한 성능분석에도 적용할 수 있을
것으로 생각된다. 또한 서로 다른 시스템 상호간의
이웃채널간섭이나 불요파 방사등의 영향을 분석하
는데도 도움이 될 것으로 생각된다. 전력증폭기의
특성을 선형화 하는 방법과 이러한 비선형 특성을
극복하기위한 다양한 일정 진폭특성을 갖는 변조
방법들이 연구되어야 할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] A.A.M. Saleh, "Frequency independent and Frequency dependent nonlinear models of TWT Amplifiers," *IEEE Trans. on Communications*, vol. COM29, no. 4, pp.1715-1720, Nov., 1981.
- [2] A.A.M. Saleh and J. Salz, "Adaptive line-

arization of power amplifiers in digital radio systems," *Bell Syst. Tech J.*, vol. 62, no. 4, pp. 1091-1033, April, 1983.

- [3] Michael Faulkner and Mats Johansson, "Adaptive linearization using predistortion-experimental results," *IEEE Trans. on VTC.*, vol. 43, no. 2, pp. 323-332, May, 1994.
- [4] James K. Cavers, "The effect of Quadrature Modulator and Demodulator Errors on adaptive digital predistorters for amplifier linearization," *IEEE Trans. on VTC.*, vol. 46, no. 2, pp. 456-466, May, 1997.

최 성 호

1989년: 광운대학교 컴퓨터공학과(공학사)
 1991년: 광운대학교 대학원 컴퓨터공학과(공학석사)
 1991년 2월~1994년 8월: 리버티시스템(주) 연구소 주임 연구원
 1994년 8월~현재: 한국전자통신연구원 기술기준연구팀 선임연구원
 [주 관심분야] ATM, IMT-2000, 전파통신 기술기준 및 표준화

북 진 담

1980년: 연세대학교 공과대학 전자공학과(공학사)
 1982년: 연세대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
 1981년 7월~현재: 한국전자통신연구원 기술기준연구팀 책임연구원
 [주 관심분야] 전파특성, 이동통신 무선인터페이스, IMT-2000, LMDS, 전기통신 기술기준 및 전파법규

손 동 철

1983년: 경북대학교 전자공학과(공학사)
 1985년: 경북대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
 1998년: 충북대학교 대학원 정보통신과 수료
 1983년~1998년: 한국전자통신연구원 근무
 1998년: 순천청암대 전임
 1998년~현재: 한국전자통신연구원 초빙연구원
 [주 관심분야] 다층셀구조, IMT-2000

- [5] Kevin W. Schneider and William H. Tranter, "Efficient simulation of multicarrier digital communication systems in nonlinear channel environments," *IEEE Journal on SAC.*, vol. 11, no. 3 pp. 328-339, April, 1993.
- [6] Michael B. Pursley, "Performance evaluation for phase-codes spread-spectrum multipleaccess communication-Part I: System analysis," *IEEE Trans. on Comm.*, vol. COM25, no. 8, pp. 795-799, August, 1977.
- [7] John G. Proakis, *Digital Communications*, McGraw-Hill, New York, 2nd edition, 1989.

김 성 철

1983년: 고려대학교 전자과(공학사)
 1985년: 고려대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
 1997년 8월: 고려대학교 대학원 전자공학과(공학박사)
 1989년~1994년: 삼성전자(주) 주임 연구원
 1997년 3월~현재: 우송대학교 전임강사
 [주 관심분야] PCN, WLL, IMT-2000, CDMA의 traffic model과 프로토콜

정 희 창



1980년: 고려대학교 공과대학 전자공학과(공학사)
 1989년: 아주대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
 1997년: 아주대학교 대학원 전자공학과(공학박사)
 1980년 4월~현재: 한국전자통신연구원 기술기준연구팀 팀장

[주 관심분야] 전파통신 기술기준 및 표준화

조 경 록

1977년: 경북대학교 전자공학과(공학사)
 1989년: 일본 동경대 대학원 전자공학과(공학석사)
 1992년: 일본 동경대 대학원 전자공학과(공학박사)
 1979년~1986년: 금성 TV연구센터 근무
 1993년~현재: 충북대 정보통신공학과 부교수
 1999년 1월~현재: Oregon State University 객원교수
 [주 관심분야] 논리합성, 고속회로설계, 마이크로프로세서, 셀룰러시스템 설계분야