

다중 코드 CDMA 시스템에서 PAPR 저감 기법

PAPR Reduction Method in Multi-Code CDMA System

이 강 미 · 김 상 우 · 유 흥 균

Kang Mi Lee · Sang-Woo Kim · Heung-Gyoon Ryu

요 약

본 논문에서는 Multi-code CDMA(code division multiple access) 시스템에서 발생하는 높은 PAPR(Peak to average power ratio)을 저감하고, 신호가 HPA에서 비선형 왜곡을 감소시키기 위한 방법으로, SLM(Selected Mapping) 및 PTS(Partial Transmit Sequence) 기법과 함께 전치왜곡 기법의 혼합 기법을 제안한다. 제안된 기법에서 SLM 및 PTS 방법을 위해 사용된 위상 회전 정보는 별도의 채널을 통해 전송되고, 이러한 위상 회전 정보의 채널 통과에 따른 에러율은 시스템의 성능에 큰 영향을 미친다. 따라서 본 논문에서는 위상 회전 정보의 에러율을 고려한 이론적인 BER 수식을 제시하며, 이는 시뮬레이션을 통해 나타난 시스템의 BER 성능과 거의 같게 나타난다. 결국 PTS 및 SLM 방법을 전치왜곡기와 병행한 제안된 혼합 기법은 신호의 PAPR을 줄이고, HPA의 비선형 특성을 보상함으로써 시스템의 BER 성능을 향상시킨다.

Abstract

In this paper, we propose the hybrid methods of SLM(selected mapping) and predistortion, and PTS(partial transmit sequence) and predistortion to reduce PAPR(peak to average power ratio) and to decrease the nonlinear distortion of the nonlinear HPA(high power amplifier) in the multi-code CDMA(code division multiple access) system. The phase rotation factors are transmitted as side information in PTS and SLM methods play an important role in the BER performance. So, we present the theoretical BER equation when the errors of side information are considered in the multi-code CDMA communication system. Simulation results show that PAPR is reduced and nonlinear distortion is compensated by hybrid methods. Therefore BER performance is enhanced.

Key words : Nonlinear HPA, Power Efficiency, PAPR, Multi-Code CDMA

I. 서 론

MC-CDMA는 이동 멀티미디어 서비스를 위한 고속의 데이터 통신을 가능케 하는 새로운 기술로 주목 받고 있다. MC-CDMA 시스템에서 입력 신호는 직/병렬 변환을 거친 후 여러 개의 병렬 브랜치로 나눠지고, 이 병렬 데이터들은 WHT(Walsh Hadamard transform)를 통해 그 각각을 구별할 수 있는 하나의 data stream으로 나타난다^[1]. 그러나 WHT는 여러 개

의 병렬 데이터를 각기 다른 직교 sequence로 확산하고 서로 합하는 과정으로, 큰 PAPR을 갖는 신호를 출력하게 된다. 이러한 신호는 HPA를 통과하면서 비선형 왜곡에 의한 심각한 시스템 성능 저하를 야기할 뿐만 아니라 HPA의 전력 효율을 크게 저하시킨다. 따라서 PAPR을 저감하고, HPA의 비선형 특성을 보상함으로써 HPA의 전력효율을 증가시키는 것은 매우 중요하다^[2]. 이러한 문제는 OFDM 시스템에서 또한 유사하게 나타나며^{[3],[4]}, 따라서 OFDM 시스

「본 연구는 과학기술부, 한국과학재단 지정 청주대학교 정보통신연구센터의 지원에 의한 것임.」

충북대학교 전자공학과 및 컴퓨터정보통신연구소(Dept. of Electronic Engineering and Research Institute of Computer, Information & Communication, Chungbuk National University)

· 논문 번호 : 20040427-056

· 수정완료일자 : 2004년 6월 10일

템에서의 PAPR 저감 기법은 MC-CDMA 시스템에서도 쉽게 적용될 수 있다.

PAPR을 저감하는 방법으로 기존의 연구들을 살펴보면 clipping 방법, pre-coding 방법, SLM 그리고 PTS 방법 등이 있다^{[4]~[6]}. Clipping 방법은 기준 이상의 신호는 잘라버리는 방법으로, 쉽게 PAPR을 줄일 수 있다는 장점과 함께 clip noise로 인한 BER의 상승과 같은 단점을 갖는다. Pre-coding 방법은 정보신호가 WHT를 거치기 이전에 PAPR이 작아지도록 coding하는 방법을 의미한다. 이 방법은 신호의 왜곡 없이 PAPR을 크게 줄일 수 있는 반면, 병렬 브랜치 수가 증가함에 따라 코드율이 급격히 낮아져 대역 효율이 매우 나빠진다. SLM과 PTS는 정보신호의 위상을 조절하여 PAPR을 저감하는 방법으로 OFDM에서 많이 연구되었다. SLM 방법은 동일한 입력 신호에 몇 가지 서로 다른 위상 변화를 준 뒤에 가장 낮은 PAPR을 가지는 신호를 선택하여 전송하는 방법이며, PTS 방법은 입력신호를 몇 개의 sub-block으로 나눈 후 PAPR이 감소하도록 각각의 sub-block에 PAPR이 작아지도록 위상 회전 요소를 곱하여 전송하는 방법이다. 이 SLM 및 PTS 방법은 최적의 위상회전 요소를 찾기 위한 계산량이 많아지는 단점을 갖지만, 신호의 왜곡 없이 PAPR을 줄인다는 점에서 매우 효과적인 방법이다.

본 논문에서는 Multi-code CDMA 시스템에서 발생하는 높은 PAPR을 저감하고, 신호가 HPA를 거치면서 나타나는 비선형 왜곡을 감소시키기 위한 방법으로, 본 논문은 SLM 기법과 predistortor 그리고 PTS 기법과 predistortor의 혼합기법을 제안하였습니다. 제안된 혼합 기법에서 SLM 및 PTS 방법을 위해 사용된 부가 정보, 즉 위상 회전 정보는 별도의 채널을 통해 전송되고, 이러한 위상 회전 정보의 채널 통과에 따른 에러율은 성능에 큰 영향을 미치므로, 본 논문에서는 위상 회전 정보의 에러율을 고려하여 MC-CDMA 시스템의 이론적인 BER 수식을 제시한다. 시스템 성능분석은 시뮬레이션 결과를 및 제시한 수식적 분석을 통해 나타나며, 사용된 변조 방식은 QPSK이며, PAPR 저감 효과는 CCDF로 나타낸다.

II. 시스템 모델과 PAPR

그림 1은 MC-CDMA 시스템의 송신단 구성도이다.

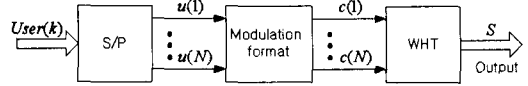


그림 1. MC-CDMA 시스템의 송신단
Fig. 1. Transmitter of MC-CDMA system.

사용자의 신호는 직/병렬 변환으로 N 개의 병렬 신호가 되고, 변조 과정을 거친 데이터 심볼 $\{c_j, n=1 \dots N\}$ 가 된다. 이것의 벡터 표현은 $C=[c_1 \ c_2 \ c_3 \ \dots \ c_N]$ 이다. 변조된 신호는 $N \times N$ Walsh Hadamard sequence matrix, $H_{N \times N} \in \{-1, +1\}$ 에 의해 WHT(Walsh Hadamard transform) 변환된다. 여기서 $H_{N \times N}$ 은 $H_{i \times 1}=(1)$ 을 기본으로 다음과 같이 확장된다.

$$H_{N \times N} = \begin{pmatrix} H_{N/2 \times N/2} & H_{N/2 \times N/2} \\ H_{N/2 \times N/2} & -H_{N/2 \times N/2} \end{pmatrix} \quad (1)$$

WHT 출력은

$$S = C \cdot H_{N \times N} \quad 1 \leq i \leq N, \quad (2)$$

이고, WHT 출력신호는 $-N \sim +N$ 의 크기를 갖는 멀티 레벨 신호가 되어, dynamic range가 넓어진다. 즉, PAPR이 높은 신호가 되어 비선형 HPA에 의한 성능 저하가 예상되므로, PAPR을 줄이고, 비선형 왜곡을 감쇄할 수 있는 방법이 요구된다.

신호의 순시전력의 discrete 형태는 $P_n = |s_n|^2$ 이므로, $0 \leq n < N$ 일 때, P_n 의 피크 전력은 $\text{Max}(P_n)$ 로 나타낼 수 있고, P_n 의 평균전력은 N 임을 알 수 있다. 따라서 PAPR은 다음과 같다.

$$PAPR = \frac{1}{N} \max_{0 \leq n < N} P_n \quad (3)$$

즉, N 이 증가하면, PAPR은 커진다.

III. PAPR 저감 기법

MC-CDMA의 높은 PAPR을 줄이기 위해 본 논문에서는 PAPR 저감 기법 중에 위상 회전방식인 SLM과 PTS 방법을 적용한다.

3-1 SLM 방법

그림 2는 SLM 방법이 적용된 MC-CDMA의 송신단이다.

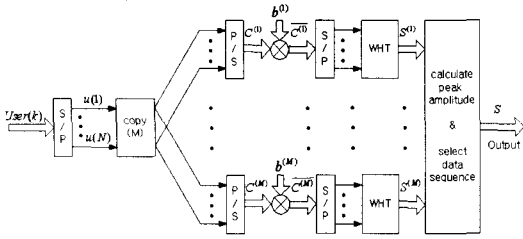


그림 2. SLM 방법이 적용된 MC-CDMA의 송신단
Fig. 2. Transmitter of MC-CDMA system using SLM.

사용자의 신호는 직/병렬 변환되고, 변조과정을 거친 후, M 개로 copy된다. Copy된 신호, $C^{(i)} = [c_1^{(i)} c_2^{(i)} \dots c_M^{(i)}]$ 가 서로 다른 위상 벡터, $B^{(i)} = [b_1^{(i)} b_2^{(i)} \dots b_M^{(i)}]$ 와 곱해진 다음 WHT 과정을 거친 후 더해진 출력 신호는 다음과 같다. 여기서 위상 벡터는 +1이나 -1로 랜덤하게 발생된다.

$$S^{(i)} = \overline{C^{(i)}} \cdot H_{N \times N} \quad 1 \leq i \leq M \quad (4)$$

$$\overline{C^{(i)}} = [\overline{c_1^{(i)}} \overline{c_2^{(i)}} \dots \overline{c_M^{(i)}}], \quad \overline{c_j^{(i)}} = c_j^{(i)} \cdot b_j^{(i)}, \quad 1 \leq i \leq M, \quad 1 \leq j \leq N \quad (5)$$

이때 M 개의 $S^{(i)}$ 중 가장 낮은 PAPR을 갖는 것을 선택하여 전송한다. 또한 가장 낮은 PAPR을 갖게 하는 위상 회전 정보는 수신단에서 정보를 복원하기 위해 반드시 보내져야 한다.

3-2 PTS 방법

그림 3은 PTS 방법이 사용된 MC-CDMA의 시스템 송신기 구성도이다. 사용자의 신호는 직/병렬 변환으로 N 개의 병렬신호로 변환되고, 변조과정을 거친 다음, M 개의 sub-block로 나뉘진다. 각 sub-block은 N/M 의 데이터를 갖는다.

$$C^{(i)} = [c_1^{(i)} c_2^{(i)} \dots c_{N/M}^{(i)}] \quad 1 \leq i \leq M \quad (6)$$

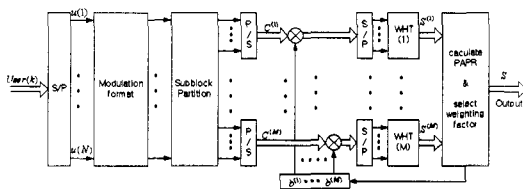


그림 3. PTS 방법이 적용된 MC-CDMA의 송신기
Fig. 3. Transmitter of MC-CDMA system using SLM.

M 개의 sub-block은 서로 다른 위상 벡터, $B^{(i)} = [b^{(1)} b^{(2)} \dots b^{(M)}]$ 와 곱해진 다음 WHT 과정을 거친 후 더해진 출력 신호는 다음과 같다. 여기서 위상 벡터는 처음에 +1로 고정시키고 PAPR을 계산하고, M 중 하나를 -1로 바꾸고 PAPR을 계산한다. 이 값이 처음 값보다 작으면 -1로 고정하고, 크면 다시 +1로 바꾼다. 이렇게 feedback 과정을 거치고 나면 M 개의 위상 벡터는 PAPR을 최소화 시키는 최적의 위상 벡터가 된다.

$$S^{(i)} = C^{(i)} \cdot b^{(i)} \cdot H_{N \times (N/M)} \quad 1 \leq i \leq M \quad (7)$$

이때 출력신호의 PAPR이 작아지도록 위상 벡터를 조절하여 가장 낮은 PAPR을 갖는 신호를 전송한다. 또한 SLM과 같이 최적의 위상 회전 정보는 수신단에서 정보를 복원하기 위해 반드시 보내져야 한다.

IV. HPA와 Predistorter

HPA의 입력 신호(complex envelope)와 출력신호는 다음과 같이 쓸 수 있다^[2].

$$v(t) = r(t) \cdot \exp[j\theta(t)]. \quad (8)$$

$$s(t) = A[r(t)] \cdot \exp[j\{\Phi(r(t)) + \theta(t)\}]. \quad (9)$$

여기서 $A[r(t)]$ 는 진폭의 비선형성, $\Phi[r(t)]$ 는 위상의 비선형성을 가리키고, 각각을 AM/AM 변환, AM/PM 변환이라 부른다. 본 논문에서는 고려한 SSPA(solid state power amplifier)의 AM/AM 특성과 AM/PM 특성은 다음과 같다.

$$A[r(t)] = \frac{r(t)}{\left[1 + \left(\frac{r(t)}{A_0}\right)^{2p}\right]^{1/2p}} \quad (10)$$

$$\Phi[r(t)] = 0 \quad (11)$$

여기서 A_0 는 포화점에서의 출력 전압이고, p 값은 선형 영역에서 포화 영역으로 넘어갈 때의 평탄도를 조절하는데, 이 값이 클수록 선형으로 근사화 된다.

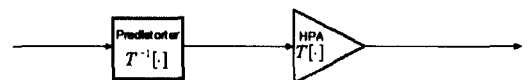


그림 4. 전치 왜곡기와 HPA
Fig. 4. Predistorter and HPA.

그림 4에서 전달함수 $T^{-1}[\cdot]$ 은 증폭될 때 발생하는 비선형성을 보상하기 위해 사용하는 부분이다. 즉, 비선형성을 보상하기 위한 전달함수 $T^{-1}[\cdot]$ 를 찾으면 다음과 같다^[2].

$$r(t) = \begin{cases} \frac{\rho(t)}{2\sqrt{1 - \left(\frac{\rho(t)}{A_0}\right)^2}} & 0 \leq \rho(t) \leq A_0^* \\ r(A_0^*), & \rho(t) > A_0^* \end{cases} \quad (12)$$

$$\theta(t) = 0 \quad (13)$$

(A_0 : 포화점, $A_0^* = 0.99 \cdot A_0$)

V. BER 분석과 논의

SLM 방법이나 PTS 방법은 송신단에서 PAPR을 낮추기 위해 위상회전벡터를 곱하게 된다. 가장 작은 PAPR을 만드는 최적의 위상회전 벡터는 수신단으로 보내져야만 신호의 복원이 가능한데 이것은 별도의 부가 채널을 이용해서 전송된다. 이때 위상회전벡터의 전송 에러가 0이면, 정보신호를 정확하게 복원할 수 있지만, 위상회전벡터의 전송에러가 0이 아니므로 정보신호의 복원에 영향을 미친다^[7].

$$P_e = P_b \cdot (1 - P_{si}) + P_{b/false} \cdot P_s \quad (14)$$

$$P_b = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) \quad (15)$$

$$P_{b/false} = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0 + (N - M) \cdot 2E_b}}\right) \quad (16)$$

여기서 P_b 는 정보 신호의 전송 에러 확률, $(1 - P_{si})$ 는 위상회전 벡터가 correct 할 때의 확률, $P_{b/false}$ 는 위상회전 벡터에 전송에러로 인해 정보신호가 에러가 날 확률, P_{si} 는 위상회전 벡터에 전송 에러 확률이다. 본 장에서는 위에서 논의된 제안 기법의 성능을 기존의 MC-CDMA 성능과 비교 분석한다. 시스템 성능 분석은 CCDF 및 BER 값으로 나타내며, 성능분석을 위한 시뮬레이션 환경은 다음과 같다.

- Size of WHT: $N=32$
- Modulation format: QPSK
- Channel: AWGN
- Amplifier: SSPA with Rapp's coefficient, $p = 1$
- Input Backoff(IBO): 0, 3, 5, 7 dB

- The number of subblock in PTS method: $M_1=8$
- The number of copy blocks in SLM method: $M_2=8$

그림 5는 PAPR을 저감하기 위해 PTS와 SLM 방법을 적용한 CDMA 시스템의 PAPR을 대상으로 한 CCDF이다. $CCDF=10^{-4}$ 일 때 Original CDMA PAPR = 9.7 dB, PTS를 적용한 CDMA의 PAPR은 7.7 dB, 그리고 SLM을 적용한 CDMA의 PAPR은 6.8 dB로 SLM의 PAPR 저감 능력이 가장 우수한 것을 알 수 있다. 그림 6에서는 $p=1$ 인 SSPA를 사용한 original CDMA 시스템의 전치 왜곡의 유무에 따른 BER 성능을 나타낸다. IBO가 많이 할수록 BER 성능이 향상되는 것을 알 수 있다. IBO=3 dB이고, $BER=10^{-4}$ 을 만족할 때, 전치 왜곡기를 사용하면 0.3 dB의 SNR 이득을 얻는다. IBO=7 dB일 때는 선형 HPA를 사용했을

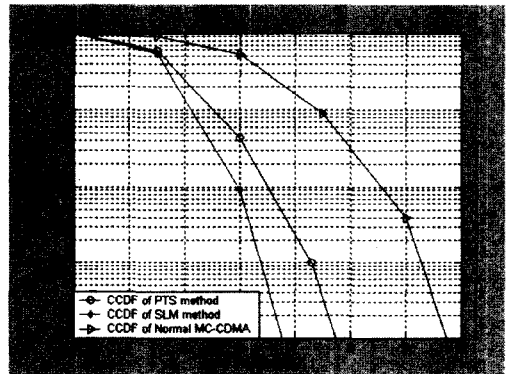


그림 5. CCDF의 비교
Fig. 5. Comparison of CCDF.

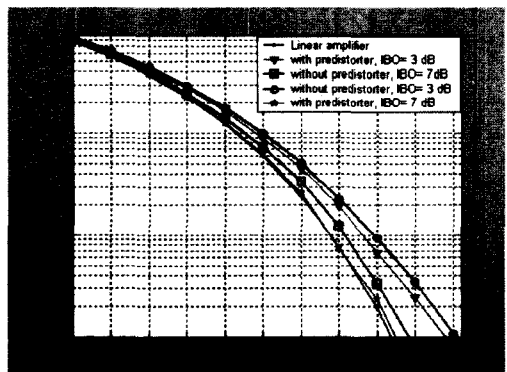


그림 6. 전치왜곡기의 유무에 따른 기존의 MC-CDMA의 BER 성능
Fig. 6. BER performances with and without predistorter.

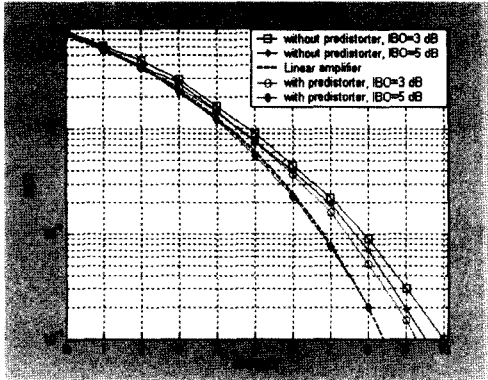


그림 7. PTS 방법에서 전치 왜곡기 유무에 따른 BER 성능
 Fig. 7. BER performances of PTS with and without predistorter.

때와 거의 같다.

먼저 위상회전벡터의 전송에러가 0이라고 가정하고, PTS와 SLM 기법을 적용한다. 그림 7은 PTS 방법을 적용한 MC-CDMA의 전치 왜곡기 유/무에 따른 BER 성능을 보여준다. 전치 왜곡기를 사용하면 IBO=5 dB일 때 선형 HPA를 사용했을 때와 거의 같은 결과를 얻을 수 있다. 그림 8은 SLM 방법을 적용한 MC-CDMA의 전치 왜곡기 유/무에 따른 BER 성능을 보여준다. 전치 왜곡기를 사용하면 IBO=3 dB일 때 선형 HPA를 사용했을 때와 거의 같은 결과를 얻을 수 있다.

다음으로 위상회전정보의 전송에러가 발생했을

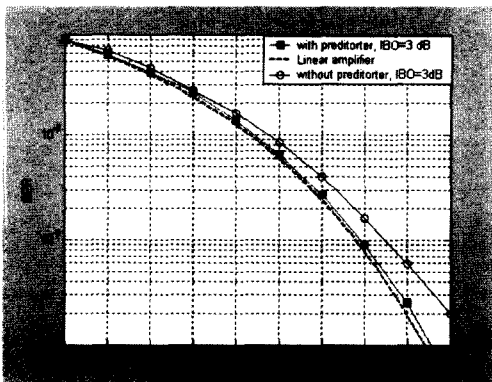


그림 8. SLM 방법에서 전치 왜곡기 유무에 따른 BER 성능
 Fig. 8. BER performances of SLM with and without predistorter.

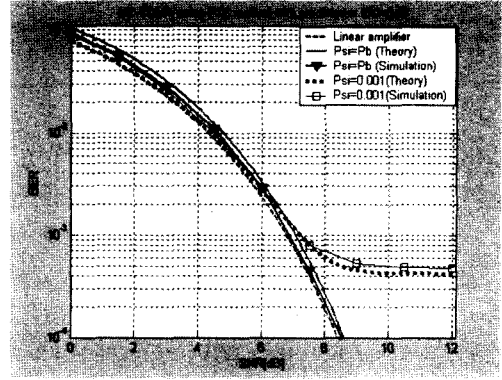


그림 9. PTS 방법에서 위상회전정보의 에러율에 따른 BER 성능
 Fig. 9. BER of PTS according to side information error.

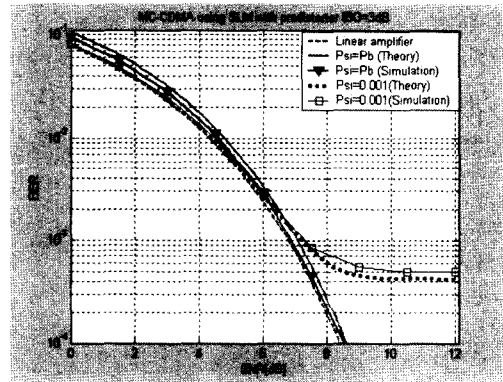


그림 10. SLM 방법에서 위상회전정보의 에러율에 따른 BER 성능
 Fig. 10. BER of SLM according to side information error.

때의 PTS, SLM 기법을 적용한 MC-CDMA의 BER 성능을 살펴보자. 그림 9와 10은 전치 왜곡기를 사용했을 때 PAPR 저감 방법으로 PTS와 SLM을 적용했을 때 위상 회전 정보의 전송에러가 $\Psi_i=0.001$ 일 때 정보 신호의 BER 성능으로, 이론적인 식에 의한 결과와 시뮬레이션에 의한 결과가 거의 같은 것을 볼 수 있다. 또한, $\Psi_i=0.001$ 일 때 $BER=10^{-3}$ 까지는 위상 회전 정보의 전송에러에 거의 영향을 받지 않지만, $BER=10^{-3}$ 이하의 위상 회전 정보의 전송에러로 인해 error floor가 생기는 것을 그림 9, 10에서 볼 수 있다. 위상 회전 정보의 전송에러에 따른 MC-CDMA 시스템의 이론적인 BER 수식이 시뮬레이션

에 의한 결과와 거의 동일함을 확인할 수 있다.

VI. 결 론

본 논문에서는 Multi-code CDMA 시스템에서 발생하는 높은 PAPR을 PTS와 SLM 방법으로 저감하고, 신호가 HPA를 거치면서 나타나는 비선형 왜곡을 보상하기 위하여 새로운 혼합 기법을 제안하였다. 또한, 위상 회전 정보의 전송 어려움을 고려하여 혼합 기법이 적용된 MC-CDMA 시스템의 이론적인 BER 수식을 제시하였으며, 시뮬레이션에 의한 결과와 거의 동일함을 확인할 수 있었다. 선형 HPA를 적용했을 때와 같은 성능을 갖기 위해서 SLM과 전치 왜곡기의 혼합기법을 적용할 때는 3 dB, PTS와 전치 왜곡기의 혼합 기법을 적용할 때는 5 dB, 기존의 MC-CDMA와 전치 왜곡기의 혼합기법을 적용할 때는 7 dB의 IBO가 요구된다. 결국 PTS 및 SLM 방법을 전치왜곡기와 병행한 제안된 혼합 기법은 신호의 PAPR을 줄이고, HPA의 비선형 특성을 보상함으로써 시스템의 BER 성능을 향상시킬 뿐만 아니라 HPA의 전력효율을 증가시켜 보다 고효율의 안전한 데이터 전송을 가능케 한다.

참 고 문 헌

[1] T. Wada, T. Yamazato, M. Katayama and A. Ogawa, "A constant amplitude coding form orthogonal multi-code CDMA systems", *IEICE Trans. Fundamentals*, vol. E80-A, no. 12, pp. 2477-2483, Dec.

1997.

[2] D. Di Zenobio, G. Santella and F. Mazzenga, "Adaptive linearization of power amplifier in orthogonal multicarrier schemes", *Wireless Communication System Symposium*, pp. 225-230, 1995.

[3] R. W. Bauml, R. F. H. Fischer and J. B. Huber, "Reducing the peak-to-average power ratio of multicarrier modulation by selective mapping", *IEE Electronic Letters*, vol. 32, no. 22, pp. 2056-2057, Oct. 1996.

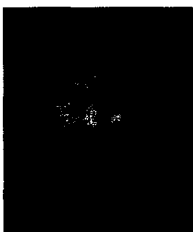
[4] S. H. Muller, J. B. Huber, "OFDM with reduced peak-to-average power ratio by optimum combination of partial transmit sequences", *IEE Electronic Letters*, vol. 33, no. 5, pp. 368-369, Feb. 1997.

[5] O. Vaananen, J. Vankka and K. Halonen, "Effect of baseband clipping in wideband CDMA system", *2002 IEEE Seventh International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications*, vol. 2, pp. 445-449, Sep. 2002.

[6] S. I. Kim, G. Y. Jung, S. Y. Yoon and H. S. Lee, "Enhancement of constant amplitude coding form multicode wideband CDMA systems", *IEICE Trans. on Commun.*, vol. E83-B, pp. 2550-2555, Nov. 2000.

[7] H. Ochiai, H. Imai, "OFDM-CDMA with peak power reduction based on the spreading sequences", *IEEE International Conference on Communication*, vol. 3, pp. 7-11, Jun. 1998.

이 강 미



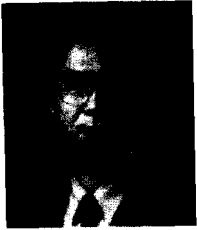
2003년 2월: 충북대학교 전기전자 컴퓨터공학부 (공학사)
 2003년 3월~현재: 충북대학교 전자공학과 석사과정
 [주 관심분야] 디지털 이동통신 시스템, OFDM 시스템 및 통신신호처리 등

김 상 우



2003년 2월: 한밭대학교 전자공학과 (공학사)
 2003년 3월~현재: 충북대학교 전자공학과 석사과정
 [주 관심분야] OFDM 통신시스템, UWB 통신 및 무선 LAN 등

유 흥 균



1988년~현재: 충북대학교 전자공
학과 정교수

1999년~현재: IEEE 논문 심사위원

2002년: 한국전자과학회 학술상 수
상

2002년 3월~현재: 충북대학교 컴퓨
터정보통신연구소 소장

[주 관심분야] 디지털 통신 공학, 이동/위성 통신 시스템,
통신 회로 설계 및 통신 신호 처리