

PTS 방식에서 기준 심볼을 이용한 부가정보 전송

Side Information Transmission using Reference Symbol in PTS Scheme

유 흥 균 · 박 종 현 · 박 진 수*

Heung-Gyoon Ryu · Jong-Hyun Park · Jin-Soo Park*

요 약

Orthogonal frequency-division multiplexing(OFDM)은 무선 환경에서 고속 데이터 전송에 적합한 방식이다. 그러나 높은 peak-to-average power ratio(PAPR)로 인하여 비선형 왜곡의 문제점이 있다. 여러 PAPR 저감 방법 중에서 partial transmit sequences(PTS)는 매우 유연하고 스펙트럼 왜곡이 발생하지 않는 좋은 방식으로 평가된다. 이 방법의 문제점은 최적화된 rotation factor에 대한 부가 정보를 수신기에 전송해야만 데이터를 정확히 복원할 수 있다는 점이다. 본 논문에서는 기존 PTS 방식에서 기준 심볼을 이용하여 부가 정보를 전송하는 기법을 새롭게 제안한다. 이 기법은 rotation factors의 정보를 기준 심볼의 위상으로 표현하는 방법이다. 시뮬레이션 결과를 통해 제안 방식이 종전의 PTS와 동일한 PAPR 저감 성능을 가지면서 정확하게 데이터를 복원하여 요구 BER이 만족됨을 확인하였다. 또한, 제안 방식은 변조 방식에 무관하며, 간단하게 시스템을 구현할 수 있다.

Abstract

Partial transmit sequence(PTS) scheme has been widely studied to reduce the peak-to-average power ratio(PAPR) of Orthogonal frequency-division multiplexing(OFDM) signal since it is flexible and any spectral regrowth is not made. A necessity of the PTS scheme is to transmit the side information about the phase rotation factors for correct OFDM symbol recovery. In this paper, a new side information embedded PTS scheme using the reference symbols is proposed for the PAPR reduction and the BER(bit error rate) performance is analyzed when the erroneous side information is received. In this proposed method, the information about the rotation factors is expressed by the phase of reference symbols. The proposed method maintains the same PAPR reduction performance as the conventional PTS scheme and OFDM symbols are correctly recovered by the side information to meet the required BER level, which is verified via the computer simulation. Also, it is shown that the proposed method can be easily realized and can be used for all kinds of digital modulation formats in the OFDM communication system.

Key words : OFDM, PAPR, PTS, Side Information and Reference Symbol

I. 서 론

OFDM은 주파수 선택적 페이딩 환경에서 고속의 데이터 전송에 적합한 기법이다^[1]. 그러나 carrier의

수가 증가함에 따라 큰 PAPR이 발생하는 문제점을 가지고 있다. 이러한 신호가 HPA와 같은 nonlinear device를 통과하면 신호의 왜곡이 발생한다. PAPR 문제를 해결하기 위한 여러 가지 방법들이

*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)

*청주대학교 정보통신공학부 및 정보통신연구센터(Dept. of Information & Communication Engineering and Regional Research Center for Information & Communication, Chongju University)

· 논문 번호 : 20040127-012

· 수정완료일자 : 2004년 3월 4일

제안되었다. 먼저 가장 간단하게 *PAPR*를 저감할 수 있는 clipping 기법이 있다^[2]. 그러나 이 기법은 out-of-band radiation과 in-band distortion으로 인해 신호 품질이 나빠진다. 다른 방법으로 낮은 peak power의 데이터 시퀀스를 갖도록 하는 block coding 기법이 있다^[3]. 이 기법은 *PAPR*를 3 dB로 제한할 수 있지만, 주파수 효율이 낮고 carrier의 수가 증가할수록 look-up table의 크기가 지수적으로 증가하는 단점이 있다.

위상을 조절하는 *PAPR* 저감 기법으로 selective mapping(SLM)^[4]과 partial transmit sequences(PTS)^[5]가 있다. SLM은 동일한 정보를 여러 phase sequences를 곱하여 이 중에서 가장 낮은 *PAPR*를 가지는 데이터 시퀀스를 선택하여 전송하는 방법이다. PTS는 carrier들을 여러 개의 cluster(또는 subblock)로 나누고 낮은 *PAPR*의 신호가 되도록 최적의 rotation factors(또는 combining sequences)를 곱하여 전송하는 방법이다. 위의 두 가지 방법은 스펙트럼 왜곡이 없고, 효과적으로 *PAPR*를 저감할 수 있으며, 변조방식에 관계없이 적용 가능하다. 그러나 데이터를 복원하기 위해서 rotation factors에 대한 부가 정보를 수신기에 전송해야 한다. L. J. Cimini와 N. R. Sollenberger는 marking algorithm을 이용한 부가 정보 전송 기법을 제안하였다^[6]. 이 방법은 부가 정보를 전송함에 있어서 추가의 반송파 할당 등의 spectral loss가 없다. 그러나 이 방법은 PSK 변조 방식에는 적용 가능하지만, square형의 constellation을 이용하는 QAM 변조 방식에는 적용하기 어려운 단점이 있다. 그리고 최근에 A. D. S. Jayalath와 C. Tellambura는 앞의 OFDM 심볼에 대한 부가 정보를 다음에 오는 OFDM 심볼의 첫 번째 subblock에 넣어 보내는 방식을 제안하였다^[10]. 본 논문은 *PAPR* 저감을 위한 PTS 방식에서 기준 심볼을 이용하여 부가 정보를 전송하는 기법을 제안한다. 이 전송 기법은 rotation factors에 대한 부가 정보를 기준 심볼의 위상으로 표현하는 방법이다. 기존 방식^[6]은 constellation에 변화를 주는 기법으로 변조 방식에 제한을 받는다. 그러나 제안 기법은 모든 변조방식에 적용 가능하고, 간단히 시스템을 구현할 수 있다. 반면 기준 심볼의 삽입에 따른 spectral loss가 있으나, 큰 영향을 주지않는다. 예로 제안방식에서 $N=128$ 이고 $M=4$ 인 경우의 spectral loss는 $M/N = 1/28 = 0.031$ 로 매우 작다.

II. PAPR과 PTS 방식

2-1 PAPR

OFDM에서 N 개의 심볼에 대한 블록은 $\{X_n, n=0, 1, \dots, N-1\}$ 이고, 각각의 심볼은 N 개의 subcarrier들로 변조된다. 즉, $\{f_n, n=0, 1, \dots, N-1\}$ 이며 각 subcarrier는 직교한다. 따라서 $f_n = n\Delta f$ 이고 여기서 $\Delta f = 1/NT$ 이고 T 는 original symbol 구간이다. OFDM 출력 신호는 다음과 같다.

$$x(t) = \sum_{n=0}^{N-1} X_n e^{j2\pi f_n t}, \quad 0 \leq t \leq NT \quad (1)$$

위의 식 (1)의 전송 신호에 대한 *PAP*는 다음과 같이 정의된다.

$$PAP = \frac{\max |x(t)|^2}{E[x(t)]^2} \quad (2)$$

그러나 심볼 당 N 개 sampling하는 Nyquist sampling rate는 continuous-time OFDM 신호의 peak를 놓칠 수 있으므로 *PAPR* 감소를 정확히 측정할 수 없다. 정확한 측정을 위해서 oversampling을 수행하며, 4배 이상의 oversampling하면 원래의 신호와 동일하게 된다. Oversampling은 원래 심볼을 포함하여 $4N$ -point zero-padded IFFT를 사용하면 간단히 구현할 수 있다^[7]. 본 논문에서의 모든 *PAPR* 계산은 4배의 oversampling을 가정하였다.

2-2 PAPR과 CCDF

*PAPR*의 CCDF(complementary cumulative distribution function)의 이론적인 값은 다음과 같다^[8]. N 개 carrier의 OFDM 심볼에 대한 복소 기저대역 신호는 식 (1)이다. 중심극한 정리로부터 N 이 매우 클 때, $x(t)$ 의 실수와 허수값은 Gaussian 분포를 가진다. 따라서 OFDM signal의 크기는 Rayleigh 분포를 가진다. Nyquist sampling rate의 OFDM 심볼당 peak power의 CDF(cumulative distribution function)를 유도할 수 있고, threshold level이 $PAPR_0$ 보다 낮은 *PAPR*이 발생할 확률은 다음과 같다.

$$\Pr(PAPR \leq PAPR_0) = (1 - \exp(-PAPR_0))^N \quad (3)$$

Oversample을 고려한 CDF의 확률은

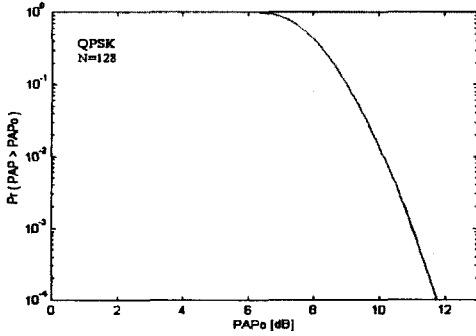


그림 1. OFDM 시스템에서 PAPR의 CCDF
Fig. 1. CCDF of PAPR in the OFDM system.

$$\Pr(PAPR \leq PAPR_0) = (1 - \exp(-PAPR_0))^{2N} \quad (4)$$

이다. OFDM 신호에 대한 PAPR의 CCDF는 다음과 같이 표현한다.

$$\Pr(PAPR > PAPR_0) = 1 - (1 - \exp(-PAPR_0))^{2N} \quad (5)$$

그림 1은 N 이 128인 OFDM 신호에 대한 PAPR의 CCDF이다. α 는 1보다 큰 값으로 여기서 $\alpha = 2.4$ 이다.

2-3 PTS 방식

PTS 방법에서 입력 data block은 여러 clusters(또는 subblocks)들로 나누고, PAPR이 최소가 되도록 조합된다. 데이터 블록이 $\{X_n, n=0, 1, \dots, N-1\}$ 이라 하면, 벡터 표현은 $X = [X_0 X_1 \dots X_{N-1}]^T$ 이다. 다음으로 X 를 M 개의 set으로 나눈다. 이 set의 벡터 표현은 $\{X^{(m)}, m=1, 2, \dots, M\}$ 이라 할 때, X 는

$$X = \sum_{m=1}^M X^{(m)} \quad (6)$$

이다. 여기서 cluster들은 adjacent, interleaved 또는 pseudo-random subblock partition되며, 동일한 크기로 가정한다. PTS 방법의 목적은 M 개의 cluster를 weighted combination하여 최소 PAPR이 되도록 하는 것이다.

$$\hat{X} = \sum_{m=1}^M b^{(m)} X^{(m)} \quad (7)$$

여기서 $\{b^{(m)}, m=1, 2, \dots, M\}$ 은 weighting factors(또는 phase factors)이고, 단순한 회전으로 가정한다. 즉, $b^{(m)}$ 은 $j^{0, \pi, \dots}$ 또는 $e^{j0, \pi, \dots} = \{1, -1, j, -j\}$

이다. 식 (7)이 IFFT를 거쳐 시간영역으로 변환하면 다음과 같다.

$$\hat{x} = \sum_{m=1}^M b^{(m)} x^{(m)} \quad (8)$$

벡터 $x^{(m)}$ 이 partial transmit sequence이다. 이 weighting factor는 \hat{x} 의 PAPR이 최소가 되도록 선택되며 다음과 같다.

$$\{\tilde{b}^{(1)}, \tilde{b}^{(2)}, \dots, \tilde{b}^{(M)}\} = \arg \min_{\{b^{(1)}, b^{(2)}, \dots, b^{(M)}\}} \left(\max_{0 \leq n \leq N-1} \left| \sum_{m=1}^M b^{(m)} x_n^{(m)} \right| \right) \quad (9)$$

이 weighting factor의 조합을 rotation factor(또는 combining sequence)라 한다. 최적화된 전송 신호는

$$\tilde{x} = \sum_{m=1}^M \tilde{b}^{(m)} x^{(m)} \quad (10)$$

이다. 그림 2는 PTS 방식의 송신기 구성도이다.

III. 기준 심볼을 이용한 부가 정보 전송

PTS 방식이 적용된 OFDM 수신 시스템에 정확한 데이터를 복원하기 위해서 rotation factors에 대한 부가정보를 수신기에 전송해야 한다. 본 논문에서는 기준 심볼을 이용하여 부가 정보를 전송하는 기법을 제안한다. 이 기법의 기본 개념은 rotation factors의 정보를 기준 심볼의 위상으로 표현하는 것이다.

3-1 기준 심볼 삽입

먼저 입력 데이터를 subblock partition한다. 다음으로 cluster 별로 기준 심볼이 중복되지 않도록 삽입한다.

$$D = \sum_{m=1}^M D^{(m)}, \quad D = \text{MPSK or MQAM}$$

$$R = \sum_{m=1}^M R^{(m)}, \quad R = e^{j0^\circ} = 1 \quad (11)$$

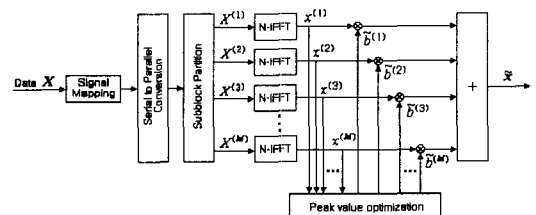


그림 2. PTS 송신기 구성도
Fig. 2. Block diagram of PTS transmitter.

여기서 D 는 데이터 심볼이고, R 은 기준 심볼이며 위상을 0° 로 고정한다. 전송 신호는 다음과 같다.

$$X = D + R = \sum_{m=1}^M (D^{(m)} + R^{(m)}) = \sum_{m=1}^M X^{(m)} \quad (12)$$

식 (12)의 X 는 식 (7)~(10)과 동일한 과정을 수행한다. 그림 3, 4, 5는 기준 심볼을 삽입한 adjacent, interleaved, pseudo-random subblock partition scheme을 보여준다. 각 cluster의 데이터 심볼 및 기준 심볼은 중복되지 않는다. 세 가지 partitioning 방법에 관계없이

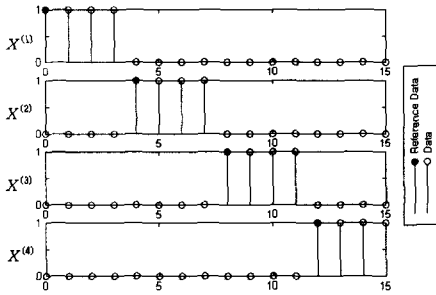


그림 3. 인접 부분블럭 분할 방식
Fig. 3. Adjacent subblock partition scheme.

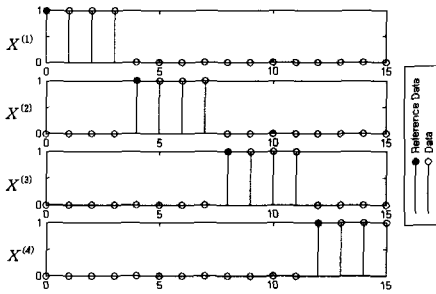


그림 4. 인터리브드 부분블럭 분할 방식
Fig. 4. Interleaved subblock partition scheme.

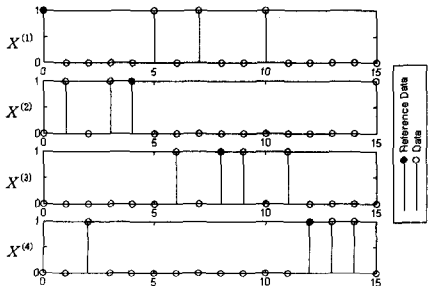


그림 5. 랜덤 부분블럭분할 방식
Fig. 5. Pseudo-random subblock partition scheme.

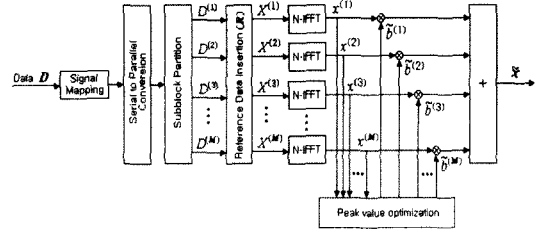


그림 6. 제안 기법의 PTS 송신기 구성도
Fig. 6. Block diagram of proposed PTS transmitter.

기준 심볼의 위치가 일정하면 시스템의 구성이 용이하다. 그림 6은 제안 기법의 PTS 송신기 구성도다.

3-2 기준 심볼 검출과 데이터 복원

Rotation factor의 위상을 수신하여 부가정보를 추출 및 데이터를 복원하는 과정은 다음과 같다. AWGN 채널에서 수신 신호는

$$y = \tilde{x} + n \quad (13)$$

이다. 수신신호를 복조하기 위해 FFT하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Y &= FFT\{\tilde{x} + n\} = FFT\left\{\sum_{m=1}^M \tilde{b}^{(m)} x^{(m)}\right\} + FFT\{n\} \\ &= \sum_{m=1}^M \tilde{b}^{(m)} FFT\{x^{(m)}\} + N = \sum_{m=1}^M \tilde{b}^{(m)} X^{(m)} + N \end{aligned} \quad (14)$$

식 (12)에서 $X^{(m)} = D^{(m)} + R^{(m)}$ 이므로 수신신호는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} Y &= \sum_{m=1}^M \tilde{b}^{(m)} (D^{(m)} + R^{(m)}) + N = \sum_{m=1}^M \tilde{b}^{(m)} D^{(m)} + \sum_{m=1}^M \tilde{b}^{(m)} R^{(m)} + N \\ &= \sum_{m=1}^M \bar{D}^{(m)} + \sum_{m=1}^M \bar{R}^{(m)} + N = \bar{D} + \bar{R} + N \end{aligned} \quad (15)$$

여기서 수신신호는 데이터, 기준 심볼과 잡음으로 구성된다. 송신단에서 기준 심볼의 위상이 $R^{(m)} = e^{j0} = 1$ 이므로 기준 심볼은

$$\bar{R} = \sum_{m=1}^M \bar{R}^{(m)} = \sum_{m=1}^M \tilde{b}^{(m)} R^{(m)} = \sum_{m=1}^M \tilde{b}^{(m)} \quad (16)$$

이다. 따라서 기준 심볼은 $\bar{R} = \sum_{m=1}^M \tilde{b}^{(m)} = \tilde{b}^{(1)} + \tilde{b}^{(2)} + \dots + \tilde{b}^{(M)}$ 이므로 수신된 기준 심볼의 위상은 rotation factors를 나타낸다.

수신 신호를 복원하기 위하여 수신 기준 심볼의 위상을 inverse (\bar{R}) 취하여 수신신호에 곱한다. 여기서 *은 위상의 역회전을 나타낸다.

$$\begin{aligned} \hat{Y} &= (\bar{D} + \bar{R} + N) \cdot (\bar{R}) = \left(\sum_{m=1}^M \bar{D}^{(m)} + \sum_{m=1}^M \bar{R}^{(m)} + N \right) \cdot (\bar{R}^{(m)}) \\ &= \sum_{m=1}^M \tilde{b}^{(m)} D^{(m)} (\bar{R}^{(m)}) + \sum_{m=1}^M \tilde{b}^{(m)} R^{(m)} (\bar{R}^{(m)}) + N (\bar{R}^{(m)}) \\ &= \sum_{m=1}^M \tilde{b}^{(m)} D^{(m)} (\tilde{b}^{(m)}) + \sum_{m=1}^M \tilde{b}^{(m)} R^{(m)} (\tilde{b}^{(m)}) + N (\tilde{b}^{(m)}) \\ &= \sum_{m=1}^M D^{(m)} + \sum_{m=1}^M R^{(m)} + N (\tilde{b}^{(m)}) \end{aligned} \quad (17)$$

이다. 두 번째 항의 기준 심볼을 제거하면

$$\hat{Y} = \sum_{m=1}^M D^{(m)} + N (\tilde{b}^{(m)}) = D + N' = \hat{D} \quad (18)$$

이다. 따라서 데이터를 정확히 복원할 수 있다.

3-3 부가정보 손상에 의한 BER 성능

수신기는 정확히 데이터를 복원하기 위해서 부가 정보를 검출한다^[9]. 이 부가 정보는 시스템의 성능에 중요한 역할을 한다. 부가 정보에 오류가 발생할 경우 bit error 확률을 다음과 같이 구한다. 잘못된 부가 정보의 확률이 P_S 이라 할 때, 전체 시스템의 에러 확률 P 는 다음과 같다.

$$P = P_b \cdot (1 - P_S) + P_{b|False} \cdot P_S \quad (19)$$

P_b 는 AWGN 채널에서 QPSK 변조의 bit error 확률을 나타낸다.

$$P_b = Q\left(\sqrt{\frac{\sigma_s^2}{\sigma_N^2}}\right) = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_o}}\right) \quad (20)$$

$P_{b|False}$ 는 잘못된 부가 정보인 조건에서의 조건부 bit error 확률이다.

$$P_{b|False} = Q\left(\sqrt{\frac{\sigma_s^2}{\sigma_b^2 + \sigma_{False}^2}}\right) = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_o + (N-M)2E_b}}\right) \quad (21)$$

여기서 $\sigma_s^2 = 2E_b$ 이고, false 부가 정보에 의한 잡음의 분산은 $\sigma_{False}^2 = (N - M) \cdot 2E_b$ 이다.

IV. 시뮬레이션 결과와 검토

본 절은 PTS 방식에서 제안 방식의 PAPR 저감 성능과 BER 성능 결과를 보인다. 먼저 PAPR 저감 성능 평가를 위한 시뮬레이션 환경은 다음과 같다. 변조 방식은 QPSK이고, 전체 subcarrier의 수가 128이고, subblock의 수가 4와 8인 경우를 고려하였다. 또한 정확한 PAPR을 계산하기 위하여 4배의 oversampling을 고려하여 4N-point zero-padded IFFT를 사용한다. Subblock partition 방법은 adjacent, interleaved, pseudo-random 방법 모두를 사용하고, 여러 가지 combining 방법 중에서 optimal combining algorithm을 적용한다. 또한 weighting factor는 binary($b^{(m)} = \pm 1$)로 설정하여 총 2^M 개의 탐색을 수행한다.

그림 7은 OFDM, 일반 PTS와 제안 방식에 대한 PAPR의 CCDF를 나타낸다. 여기서 이론 곡선은 OFDM 신호의 이론적인 CCDF로서 식 (5)에서 $\alpha = 2.4$ 인 경우에 얻은 곡선이다. 시뮬레이션 곡선들은 각각 20000개의 OFDM blocks을 발생하여 얻은 곡선이다. 그림에서 oversampling factor를 고려하여 시뮬레이션한 OFDM 신호의 CCDF 곡선이 이론 곡선과 일치함을 알 수 있다. 이 OFDM 신호에 대해 PTS 기법 및 제안 기법을 적용하여 얻은 시뮬레이션 결과들은 신뢰할 수 있다. 위의 결과에서 제안 방식이 일반적인 PTS 방식과 동일한 PAPR 저감 성능이 있음을 알 수 있다.

그림 8은 제안 방식에서 adjacent, interleave와 pseudo-random subblock partitioning 방식에 따른 PAPR의 CCDF 비교이다. PAPR 저감 성능에서 pseudo-random 방법이 가장 우수하고 adjacent 방법이 가장 나쁘며, interleaved 방법은 두 방식의 중간정도의

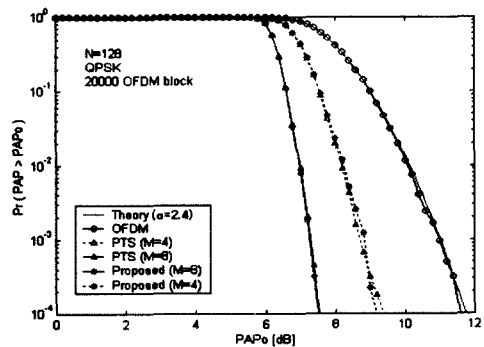


그림 7. 일반 PTS와 제안 방식에 대한 PAPR의 CCDF
Fig. 7. CCDF comparison between two PTS methods.

V. 결 론

본 논문은 *PAPR* 저감을 위하여 기준 심볼을 이용하여 부가 정보를 전송하는 PTS 기법의 OFDM 시스템의 성능을 분석하였다. 제안된 기법은 기존의 PTS 기법을 이용하는 OFDM 시스템과 동일한 *PAPR* 저감 성능을 갖는다. 기존 PTS 방식의 OFDM에서 부가 정보를 전송하지 않는 경우는 만족할 만한 BER 성능을 얻지 못하는 반면, 제안 기법은 d 데이터를 정확하게 복원하여 요구 BER이 만족한다. 본 연구의 제안 방식은 모든 변조 방식에 적용 가능하며, 간단하게 부가정보 삽입 및 추출할 수 있는 시스템이다. 그러므로 제안 기법은 *PAPR* 저감 성능을 유지하면서 쉽게 부가 정보를 전송할 수 있는 방법으로서, 앞으로 초고속 무선 통신 OFDM 시스템에 많이 이용될 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] L. J. Cimini Jr., "Analysis and simulation of a digital mobile channel using orthogonal frequency division multiplexing", *IEEE Trans. on Commun.*, vol. COM-33, pp. 665-675, Jul. 1985.
- [2] R. O'Neill, L. N. Lopes, "Envelope variations and spectral splatter in clipped multicarrier Signals", *Proc. PIMRC '95*, pp. 71-75, 1995.
- [3] A. E. Jones, T. A. Wilkinson and S. K. Barton, "Block coding scheme for reduction of peak to mean envelope power ratio of multicarrier transmission scheme", *IEE Electron. Letters*, vol. 30, no. 25, pp. 2098-2099, Dec. 1994.
- [4] 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 Electron. Letters*, vol. 32, no. 22, pp. 2056-2057, Oct. 1996.
- [5] S. H. Muller, J. B. Huber, "OFDM with reduced peak-to-average power ratio by optimum combination of partial transmit sequences", *IEE Electron. Letters*, vol. 33, no. 5, pp. 368-369, Feb. 1997.
- [6] L. J. Cimini, N. R. Sollenberger, "Peak-to-average

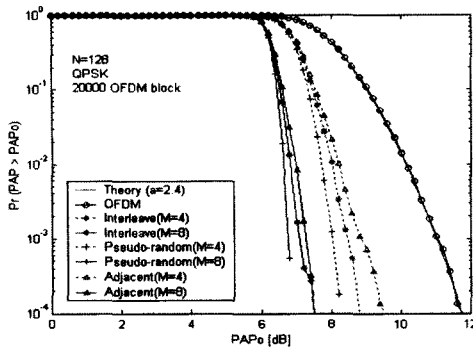


그림 8. 인접, interleave와 pseudo-random 방법의 CCDF
Fig. 8. CCDFs of the 3 kinds of partitioning schemes.

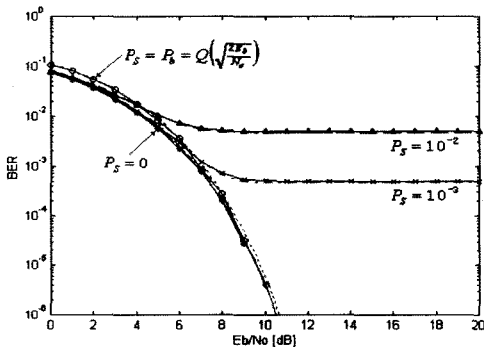


그림 9. 제안 방식의 BER 성능
Fig. 9. BER performance of proposed PTS method.

성능을 가진다.

그림 9는 식 (19)의 error 확률 P 와 시뮬레이션으로 얻은 BER 곡선을 나타낸다. 먼저 그림에서 $P_s = 10^{-2}$, 10^{-3} 인 경우에는 error floor가 생긴다. 반면 식 (20)과 같이 $P_s = P_b$ 인 경우 false 부가 정보에 의한 성능 저하에는 큰 영향이 없다. 또한 $P_s = 0$ 인 경우의 BER은 AWGN에서 QPSK의 error 확률과 같다. 시뮬레이션 결과를 통해서 본 논문에서 제안하는 기준 심볼을 이용하여 부가 정보를 전송하는 PTS 방식의 OFDM 시스템은 기존 PTS 방식의 OFDM 시스템과 비교하여 동일한 *PAPR* 저감 성능을 가지면서 데이터를 정확히 복원함을 확인하였다. 제안된 방식은 기존 연구 결과^[6]와는 달리, 모든 변조방식에 적용 가능하다. 기준 심볼의 부가에 따른 data rate의 loss가 있지만 전체 시스템에 비해 매우 작다. 예로 제안 방식에서 $N=128$ 이고 $M=4$ 인 경우의 spectral loss는 $M/N = 4/128 = 0.031$ 로 매우 작다.

power ratio reduction of an OFDM signal using partial transmit sequences with embedded side information", *GLOBECOM '00. IEEE*, vol. 2, pp. 746-750, 2000.

[7] C. Tellambura, "Phase optimization criterion for reducing peak-to-average power ratio of an OFDM signal", *IEE Electron. Letters*, vol. 34, pp. 169-170, Jan. 1998.

[8] R. van Nee, *OFDM Wireless Multimedia Communication*, Boston, London: Artech House, 2000.

[9] H. Ochiai, H. Imai, "OFDM-CDMA with peak power reduction based on the spreading sequences", *International Conference on IEEE*, vol. 3, pp. 1299-1303, 1998.

[10] A. D. S. Jayalath, C. Tellambura, "Side information in par reduced pts-ofdm signals", *PIMRC 2003, 14th IEEE Proceedings on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, vol. 1, pp. 226-230, 2003.

유 흥 균



1988년~현재: 충북대학교 전자공학과 정교수
1999년~현재: IEEE 논문 심사위원
2002년: 한국전자과학회 학술상 수상
2002년 3월~현재: 충북대학교 컴퓨터정보통신연구소 소장

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

박 진 수



1978년~현재: 청주대학교 정보통신공학부 교수
1999년~현재: 청주대학교 정보통신연구센터 소장
2000년~현재: 한국정보처리학회 충북지부 지부장

[주 관심분야] 디지털 이동통신, 부호이론, 대역확산 통신, Multimedia 통신, 영상통신

박 중 현



2003년 2월: 충북대학교 전자공학과 (공학사)

2003년 3월~현재: 충북대학교 전자공학과 석사과정

[주 관심분야] OFDM 통신시스템, DSP 통신신호처리, 확산 스펙트럼 시스템 등