

정보의 상관도를 이용한 OFDM 신호의 PAPR 저감 기법

A PAPR Reduction Method Using the Correlation of the OFDM Information Signal

김 상 우 · Nguyen Thanh Hieu · 유 흥 균

Sang-Woo Kim · Nguyen Thanh Hieu · Heung-Gyoon Ryu

요 약

본 논문에서는 SLM, PTS 그리고 DSI와 같은 OFDM 시스템에서 발생하는 높은 PAPR 문제를 해결하기 위한 기존의 PAPR 저감 기법들에서 나타나는 부가정보 전송의 필수성, 시스템 복잡도 및 계산량 증가와 같은 단점들을 해결하기 위해 입력되는 정보의 상관도를 이용하는 새로운 PAPR 저감 기법을 제안한다. 제안된 새로운 PAPR 저감 기법의 예로 Method 1과 Method 2를 제시한다. Method 1은 IFFT에 입력되는 병렬 데이터 시퀀스 내의 최소 부분 시퀀스들 간의 상관도를 낮추어 주는 방식이며, 보다 많은 자체 상관도를 저감하기 위해, Method 2는 최소 부분 시퀀스들 간의 상관도 뿐만 아니라 최대 부분 시퀀스들 간의 상관도 또한 낮추어준다. 성능 분석 결과에서, Method 1과 Method 2는 각각 0.5~0.8 dB와 1~1.2 dB의 PAPR 저감 효과를 보였다. 이는 기존의 기법들보다 PAPR 저감 효과는 작게 나타나지만 기존의 기법들이 갖는 여러 단점들을 해결할 수 있는 장점을 갖는다. 또한 보다 자세한 자체 상관도 저감을 통해 보다 큰 PAPR 저감 효과를 기대할 수 있다.

Abstract

In this paper, a new PAPR reduction method using correlation of input data sequence is proposed in order to overcome the serious drawbacks, such as necessity of side information transmission or increase of system complexity and calculation which are the basis of previous SLM, PTS and DSI method. A new PAPR reduction method can be classified into Method 1 and Method 2. Method 1 reduces the correlation between the smallest sub-sequence and neighbor smallest sub-sequence. And, to consider the own correlation in detail, the Method 2 reduces two case of correlation between neighbor smallest sub-sequences and neighbor largest sub-sequences. According to simulation result, Method 1 and Method 2 has about 0.5~0.8 dB and 1~1.2 dB PAPR reduction effect respectively. If more detailed process to reduce the correlation of input data sequence is considered, we can achieve better PAPR reduction performance.

Key words : OFDM, PAPR, Correlation, Nonlinear HPA

I. 서 론

OFDM(orthogonal frequency division multiplexing) 시스템은 높은 전송률 및 대역 효율을 보장할 뿐만 아니라 심각한 fading 채널 및 impulse 간섭에 대하여

잘 견디는 장점을 갖기 때문에 IEEE 802.11a, European HIPERLAN/2과 같은 광대역 무선 LAN(Local area network)의 표준, 지상파 DAB(digital audio broadcasting) 그리고 DVB-T(digital video broadcast)에 사용되어지는 통신 방식이다^{[1]~[4]}. 그러나 OFDM 시

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

· 논문 번호 : 20041229-167

· 수정완료일자 : 2005년 2월 14일

시스템은 많은 부반송파를 이용한 병렬 데이터 전송 과정에서 높은 PAPR(peak to average power ratio)을 유발하며, 이러한 높은 PAPR을 갖는 신호가 비선형 HPA(high power amplifier)를 통과하면 큰 비선형 왜곡이 발생하게 되어 통신 성능을 크게 저하시킨다.

이러한 OFDM 시스템에서의 높은 PAPR 문제를 해결하기 위한 방법으로써 기존에 제시된 연구들로는 clipping, block coding, PTS(partial transmit sequence), SLM(selective mapping) 그리고 DSI(dummy sequence insertion) 기법 등을 예로 들 수 있다. 먼저 clipping 기법은 일정 threshold보다 큰 신호를 잘라내는 방법으로 그 구성은 간단하지만 out-of-band radiation과 in-band distortion이 발생함으로 신호의 품질이 저하된다^[5]. Block coding 방식은 PAPR을 3 dB 이내로 제한할 뿐만 아니라 신호의 왜곡이 없고, 코딩 효과가 있는 방식이다. 그러나 code rate와 대역 효율이 현저히 낮아지고 계산량이 증가하는 단점이 있다^{[6],[7]}. SLM과 PTS는 정보신호의 왜곡 없이 효과적으로 PAPR을 저감할 수 있지만, 여러 개의 IFFT 블록을 사용하여 시스템의 복잡도가 증가할 뿐만 아니라 데이터의 복원을 위해 위상회전 정보를 반드시 전송하여야 하므로 이에 따른 에러가 추가적으로 발생한다^{[8],[9]}. 마지막으로, DSI 기법은 삽입된 dummy 시퀀스가 데이터 복원 과정에는 사용되지 않으므로 부가 정보를 보낼 필요가 없으나, 이 역시 가장 낮은 PAPR을 갖는 데이터 시퀀스를 찾는 과정에서 많은 계산량 및 시간 지연을 요하게 된다^[10].

따라서 본 논문에서는 이러한 SLM, PTS 그리고 DSI 기법과 같은 기존의 연구들에서 나타나는 계산량 및 시스템 복잡도의 증가 그리고 부가정보 전송의 필수성과 같은 단점들을 보완하면서, PAPR을 저감할 수 있는 방법으로 입력되는 정보의 상관도를 이용하는 방법에 대하여 고찰하고자 한다. 이는 입력되는 병렬 정보의 상관도와 OFDM 출력 신호 사이의 연관성을 찾고 이를 이용하여 출력 신호의 PAPR을 낮추고자 하는 방법이다. 여기서 언급하는 자체 상관도는 어떠한 시퀀스를 구성하는 부분 시퀀스들 간의 상관도를 모두 포함하는, 즉 2 bit로 이루어진 부분 시퀀스들 간의 상관도, 뿐만 아니라 4 bit로 이루어진 부분 시퀀스들 간의 상관도, 8 bit, 16 bit 등으로 이루어진 부분 시퀀스들 간의 상관도를 모두

포함하는 개념이다. 본 논문에서는 이렇게 입력 데이터 시퀀스의 자체 상관도를 낮추는 방법의 예로 두 가지 방법을 고려하며, 각각을 Method 1, Method 2라 명명한다.

먼저 Method 1은 입력 시퀀스의 가장 작은 부분 시퀀스, 즉 2 bit로 이루어진 인접 부분 시퀀스 간에 correlation을 낮추어주는 방법이다. Method 2에서는 보다 자세한 correlation 저감을 위해, 상위 N/2 bit의 부분 시퀀스는 Method 1과 같은 방법으로 생성하고 하위 N/2 bit의 부분 시퀀스는 상위 부분 시퀀스와의 논리조합을 통하여 동일한 위치에 dummy bit를 삽입한다. 그러나 Method 2 또한 최소 부분 시퀀스와 최대 부분 시퀀스의 경우만을 고려하였으므로 여전히 입력 시퀀스의 자체 상관도는 크게 존재한다. Method 1과 Method 2에서 삽입된 dummy bit들은 각각의 encoder로 입력되는 병렬 데이터를 논리 조합하여 얻을 수 있으며, 송신단에서 PAPR 저감을 위해 사용될 뿐 수신단에서의 데이터 복원 과정에는 사용되지 않는다.

II. OFDM 시스템

그림 1은 OFDM 통신 시스템의 송신기 구성도를 나타낸다.

먼저, 입력되는 데이터들은 Mapper 및 직/병렬(S/P: serial to parallel) 변환되고, 변환된 병렬 데이터 열은 IFFT 블록으로 입력된다. 이때 IFFT에 입력되는 병렬 데이터는 하나의 시퀀스로 보면, OFDM 시스템에서 출력신호의 PAPR은 이 병렬 입력 시퀀스의 특성에 의해 결정된다. 극단적인 예로, block coding 기법에서 흔히 사용되는 complementary 시퀀스가 IFFT 블록에 입력된다면, 출력신호의 PAPR은 항상 3 dB 이내로 나타난다. 그러나 $[1, 1, \dots, 1, 1]$,

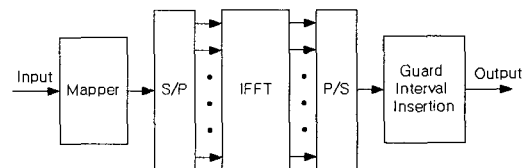


그림 1. OFDM 통신 시스템의 송신기 구성도
Fig. 1. Block diagram of OFDM communication system.

$[1, -1, \dots, 1, -1]$, $[-1, -1, \dots, -1, -1]$ and $[-1, 1, \dots, -1, 1]$ 와 같은 시퀀스들이 입력된다면 출력 신호는 최대 크기의 PAPR을 나타낸다. 즉, IFFT 블록에 입력되는 시퀀스의 자체 상관도는 출력신호의 PAPR에 큰 영향을 미침을 알 수 있으며 이는 다음과 같이 설명할 수 있다.

Complementary 시퀀스는 식 (1) 및 (2)와 같은 확장법에 의해 항상 자체상관도가 '0'이 된다.

$$C_1 = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix},$$

$$C_m = \begin{pmatrix} C_{m-1} & \hat{C}_{m-1} \\ C_{m-1} & -\hat{C}_{m-1} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

$$\hat{C}_{m-1} = \begin{pmatrix} C_{m-2} & -\hat{C}_{m-2} \\ C_{m-2} & \hat{C}_{m-2} \end{pmatrix}. \quad (2)$$

여기서, $m = \log_2 N$ 그리고 N 은 시퀀스의 길이를 나타낸다. 반면, 앞서 언급한 $[1, 1, \dots, 1, 1]$, $[1, -1, \dots, 1, -1]$, $[-1, -1, \dots, -1, -1]$ 그리고 $[-1, 1, \dots, -1, 1]$ 와 같은 시퀀스들은 항상 자체 상관도가 최대값을 갖는다. 결과적으로 IFFT에 입력되는 데이터 시퀀스의 자체 상관도는 출력신호의 PAPR에 큰 영향을 미침을 알 수 있고, 이러한 자체 상관도를 낮추어 줌으로써, 출력신호의 PAPR을 저감할 수 있다.

III. DSI 기법

그림 2는 DSI 기법을 이용한 OFDM 시스템의 송신기 구성도를 나타낸다. 먼저 입력되는 데이터들은 S/P 변환기에 의해 L 개의 병렬 데이터 열로 변환되며, 이는 하나의 시퀀스로 볼 수 있다. 이렇게 변환된 시퀀스에 M 의 길이를 갖는 dummy 시퀀스가 삽입됨으로써 IFFT에 입력되는 병렬 시퀀스의 길이는 $L+M=N$ 으로 변환된다. 이렇게 변환된 데이터들은 IFFT 블록을 거치고, PAPR 비교기에서 PAPR이 계산되며, 그 값이 특정 임계 값보다 작아질 때까지 또는 최소가 될 때까지 다른 dummy 시퀀스 삽입 과정을 반복한 후, 이를 만족하는 작은 PAPR을 갖는 데이터가 출력되면 이를 수신기로 전송한다. 여기서 사용된 dummy 시퀀스는 송신기에서 PAPR 저감을 위해서만 사용될 뿐, 수신기에서의 데이터 복조 과정에는 사용되지 않으므로 SLM이나 PTS에서와 같

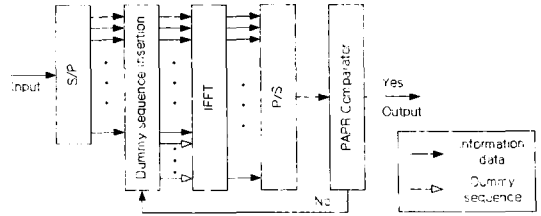


그림 2. DSI 기법을 이용한 OFDM 블록 구성도
Fig. 2. Block diagram of OFDM using DSI method.

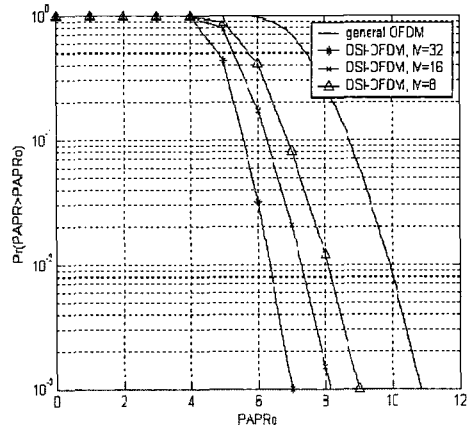


그림 3. DSI 기법의 사용한 PAPR 성능
Fig. 3. CCDFs of the DSI method.

은 부가 정보(side information)를 전송할 필요가 없다.

그림 3은 DSI 기법을 이용한 OFDM 시스템에서 나타나는 PAPR의 CCDF 커브이다. 기존에 연구된 DSI 기법에서는 삽입되는 dummy 시퀀스를 다양하게 하여 각각의 성능을 분석하였지만, 본 논문에서는 이중 가장 성능이 뛰어난 complementary 시퀀스를 사용한 경우를 고려한다. 변조 방식은 기본적인 BPSK이며, 전체 병렬 시퀀스의 길이 $N=64$, 삽입된 dummy 시퀀스의 길이 $M=32, 16, 8$ 을 고려하였다. 결과적으로 보다 긴 dummy 시퀀스를 사용한 경우가 더 뛰어난 PAPR 저감 효과를 갖지만 이에 반해 대역효율은 점차 감소함을 알 수 있다. 이러한 DSI 기법은 앞서 말한 바와 같이 부가 정보를 보내지 않아도 되는 장점을 갖지만, 원하는 값의 PAPR을 갖는 신호를 찾기 위해 시스템이 반복됨으로써 많은 계산량과 실시간 데이터 처리가 어려운 단점을 갖는다.

IV. 상관도를 이용한 PAPR 저감 기법

앞에서 언급한 것과 같이 기존의 연구 중 block coding 기법은 자체 상관도가 매우 낮은 시퀀스로만 IFFT에 입력되도록 함으로써 출력 신호의 PAPR을 낮추어주는 방법이다. 즉, block coding 기법은 complementary 시퀀스와 같이 자체 correlation이 '0'인 신호가 입력되면 출력신호의 PAPR이 크게 줄어들고, 자체 correlation이 높은 신호, 극단적인 예로 [1, 1, ..., 1, 1], [-1, -1, ..., -1, -1], [1, -1, ..., 1, -1] 또는 [-1, 1, ..., -1, 1]과 같이 인접한 부분 시퀀스 사이의 상관도가 최대인 신호가 입력되면 출력신호의 PAPR은 최대 값을 갖게 되는 OFDM의 특성을 이용한 방법이다. 이러한 OFDM의 특성은 입력 신호의 자체 correlation은 출력 신호의 PAPR과 큰 연관성이 있음을 의미하며, 따라서 본 장에서는 입력 데이터의 자체 correlation을 낮추어 줌으로써 PAPR을 저감하는 방법을 고찰하고자 한다.

4-1 Method 1

그림 4는 입력되는 데이터의 자체 correlation을 낮추어 주기 위해 고려된 첫 번째 방법에 대한 블록 구성도를 나타내며, 이를 간단히 'Method 1'이라 칭한다. Method 1은 병렬 입력 데이터 시퀀스의 최소 단위 부분 시퀀스, 즉 2 bit로 이루어진 인접한 부분 시퀀스들 간의 correlation을 낮추어 주는 방법이다. 이를 위해 Method 1은 입력 데이터를 3 bit씩 나누어 각각의 sub-block에 입력하고, 각 sub-block는 입력된 3 bit의 데이터를 조합하여 얻어진 새로운 dummy bit를 삽입하여 자체 상관도가 '0'인 4 bit 데이터를 출력

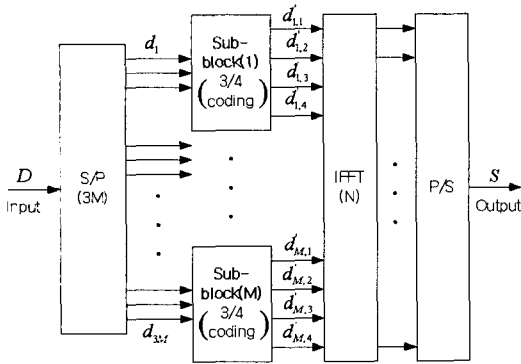


그림 4. Method 1을 이용한 OFDM 시스템의 구성도
Fig. 4. Block diagram of OFDM using Method 1.

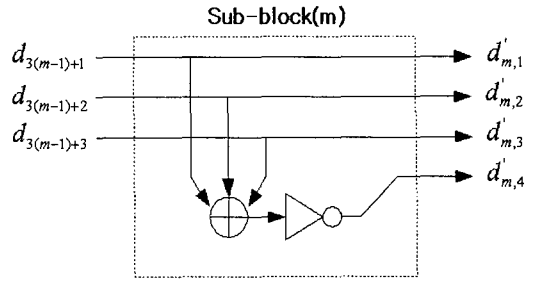


그림 5. Method 1에서 사용된 sub-block 내의 encoding 동작
Fig. 5. Encoding process in sub-block of Method 1.

한다.

각 sub-block으로부터 나온 출력을 그대로 IFFT에 입력함으로써 IFFT 입력단으로 들어가는 데이터 시퀀스는 절대로 최대 correlation을 갖는 신호가 될 수 없다. 여기서 사용된 sub-block의 동작은 그림 5와 같이 나타난다.

이를 수식으로 나타내면 삽입된 dummy bit는 식 (3)과 같이 표현될 수 있다.

$$d'_{m,4} = -(d_{m,1} \oplus d_{m,2} \oplus d_{m,3}) \tag{3}$$

이러한 방법은 입력되는 데이터 시퀀스에서 최소 단위의 부분 시퀀스들 간의 correlation만을 낮추어준 방법이므로 그다지 큰 PAPR 저감 효과를 기대하기는 어렵다. 하지만 삽입된 dummy bit에 대한 정보는 수신단에서 데이터 복원에 사용되지 않으므로 별도의 부가정보 채널을 필요로 하지 않고, 시스템 전체가 하나의 IFFT만을 사용함으로 시스템 복잡도 또한 크게 증가되지 않으면서, PAPR을 저감할 수 있다는 장점을 갖는다.

4-2 Method 2

Method 2에서는 보다 많은 상관도 저감 효과를 얻기 위해 그림 6과 같은 구조를 갖는다. 그림 6에 나타난 Method 2는 입력 데이터 시퀀스를 반으로 나누어 상위 시퀀스는 앞의 Method 1과 같은 과정을 거치고, 하위 시퀀스는 dummy bit가 삽입된 상위 시퀀스 정보와 논리 조합하여 dummy bit를 삽입하게 된다.

이러한 하위 시퀀스에서의 각 sub-block의 동작은

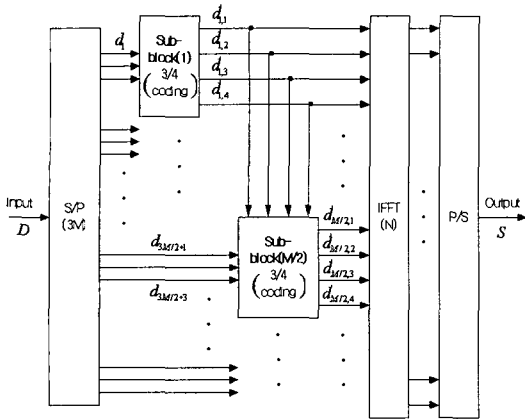


그림 6. Method 2를 이용한 OFDM 블록 구성도
Fig. 6. Block diagram of OFDM using Method 2.

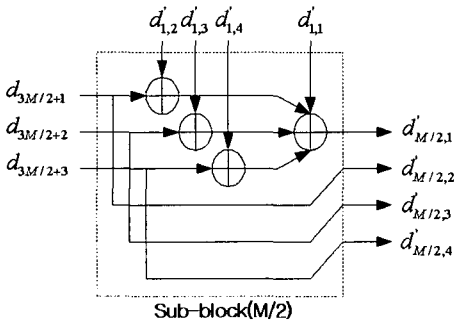


그림 7. 하위 sequence에서의 각 sub-block의 encoding 동작
Fig. 7. Encoding process in sub-block of a low sub-sequence of Method 2.

그림 7과 같이 표현된다.

이를 수식으로 나타내면 식 (4)와 같이 표현된다.

$$d'_{M/2,1} = d'_{1,1} \oplus ((d'_{1,2} \oplus d'_{3M/2+1}) \oplus (d'_{1,3} \oplus d'_{3M/2+2})(d'_{1,4} \oplus d'_{3M/2+3})). \quad (4)$$

이러한 방법은 입력되는 데이터 시퀀스에서 최소 단위의 부분 시퀀스들 간의 correlation을 낮추어줄 뿐만 아니라 최대 단위의 부분 시퀀스들 간의 correlation도 낮추어 준다. 이는 Method 1보다 많은 correlation 관계를 고려해 주었으므로 보다 나은 PAPR 저감 효과를 기대할 수 있지만, 이 역시 단지 두 가지 단위에 대한 correlation만을 고려한 결과이므로 큰 PAPR 저감 효과를 기대하기는 힘들다. 그러나 Method 1과 마찬가지로, 별도의 부가정보 채널

을 필요로 하지 않고, 시스템 전체가 하나의 IFFT만을 사용함으로써 시스템 복잡도 또한 크게 증가되지 않으면서, PAPR을 저감할 수 있다는 장점을 갖는다.

V. 성능 분석 결과 및 고찰

본 장에서는 기존에 연구된 PAPR 저감 기법 및 본 논문에서 제안한 기법들에 대한 PAPR 저감 성능을 확인하고 이에 대한 분석을 하고자 한다. 성능 분석에 사용된 변조 방식은 가장 기본 단위인 BPSK를 사용하였으며, OFDM의 부반송파의 수 N 은 64와 32의 두 가지 경우를 고려하였다.

5-1 PAPR 저감 성능

그림 8은 DSI 기법에서 부반송파의 수 N 에 따라 나타나는 PAPR의 CCDF를 보여준다. 이때 삽입된 dummy 시퀀스의 길이 K 는 본 논문에서 제안하는 방법과 동일한 대역 효율을 나타내기 위해 $N/4$ 으로 삽입하였다. DSI 기법의 경우 dummy 시퀀스의 길이 $K=N/4$ 일 때 PAPR 저감 성능이 약 3 dB 정도 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 K 를 증가시킴으로써 보다 큰 성능을 기대할 수 있을 것이다. 그러나 K 의 증가는 시스템의 대역효율을 낮추고 최적의 dummy 시퀀스를 찾기 위한 계산량 및 지연 시간이 증가하므로 PAPR 저감을 위한 좋은 방법은 되지 못한다.

그림 9와 10은 본 논문에서 제시한 Method 1과 Method 2에서 부반송파에 따라 나타나는 PAPR의

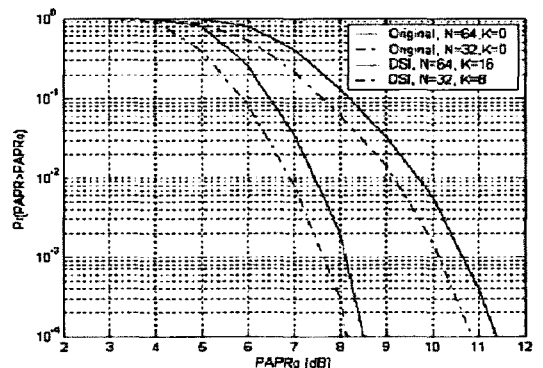


그림 8. DSI 기법에서 나타나는 PAPR의 CCDF($N=64, 32, K=N/4$)
Fig. 8. CCDF of PAPR in DSI method($N=64, 32, K=N/4$).

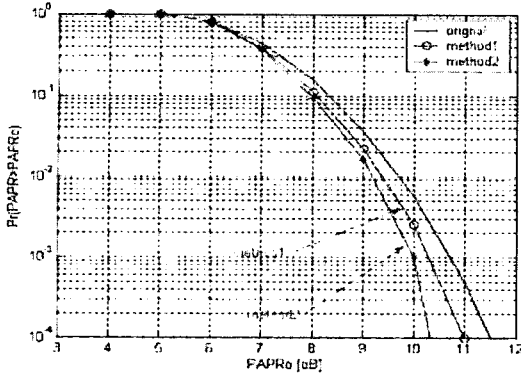


그림 9. Method 1과 Method 2에서 나타나는 PAPR의 CCDF(N=64)

Fig. 9. CCDF of PAPR in Method 1 and Method 2 (N=64).

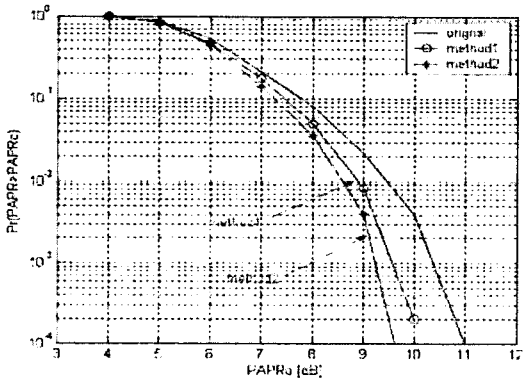


그림 10. Method 1과 Method 2에서 나타나는 PAPR의 CCDF(N=32)

Fig. 10. CCDF of PAPR in Method 1 and Method 2 (N=32).

CCDF를 보이고 있다. Method 1의 경우 약 0.5~0.8 dB, Method 2의 경우 약 1~1.2 dB 정도의 PAPR 저감 효과를 나타냄으로써, 최소 단위의 부분 시퀀스들 간에 correlation만을 고려해준 것보다 최대 단위의 부분 시퀀스들 간에 correlation도 함께 고려해준 것이 더 큰 PAPR 저감 효과를 갖음을 나타낸다. 이러한 결과는 기존의 연구들에 비해 매우 적은 PAPR 저감 효과이지만, Method 1과 Method 2 모두 하나의 IFFT만을 사용하므로 시스템 복잡도가 크게 증가하지 않고, 부가정보(side information) 또한 필요치 않으므로 기존 연구들과의 절대적인 우열을 논하기는 어렵다. 또한, 이들은 입력 데이터 시퀀스의 최소 부

표 1. 계산량의 비교

Table 1. Comparison of calculation quantity.

PAPR 저감 기법	IFFT 블록 수	Peak calculation	Side information 유/무
PTS	M	2^{M-1}	유
SLM	M	M	유
DSI	K	K	무
Method 1	1	0	무
Method 2	1	0	무

분 시퀀스들과 최대 부분 시퀀스들 사이에서의 correlation만을 낮추어준 결과이므로 보다 세밀한 자체 correlation 저감 방법의 연구를 통해 PAPR 저감 성능을 증가시킬 수 있으리라 기대된다.

5-2 계산량 및 Side Information의 유/무 비교

표 1은 앞서 논한 기존의 PAPR 저감 기법과 본 논문에서 제안한 기법들의 계산량 크기를 비교한 것이다. 시스템의 복잡도 및 계산량에 가장 큰 영향을 미치는 것은 IFFT 블록과 peak 추정 연산 및 선택일 것이며, 따라서 이들의 반복횟수 및 사용된 양을 정량적으로 비교함으로써 시스템 복잡도에 대한 비교가 가능하다.

표 1에 나타난 바와 같이 본 논문에서 제안하는 방법은 기존의 PAPR 저감 기법들과는 달리 시스템 복잡도 및 계산량을 크게 증가시키지 않으며, side information 또한 필요로 하지 않는다.

VI. 결 론

본 논문에서는 OFDM 시스템에서 나타나는 높은 PAPR을 저감하는 방법으로 입력 데이터의 correlation을 이용하는 방법의 예를 제시했다. PAPR 저감을 위한 PAPR 저감 방법으로 Method 1, Method 2와 같은 방법을 고려하였다. 이들은 입력되는 병렬 정보의 상관도와 OFDM 출력신호 사이의 상관성을 찾고 이를 이용하여 출력 신호의 PAPR을 낮추고자 하는 방법이다.

Method 1과 Method 2에서 삽입된 dummy bit들은 각각의 encoder로 입력되는 3개의 병렬 데이터를 논

리 조합하여 얻을 수 있으며, 송신단에서 PAPR 저감을 위해 사용될 뿐 수신단에서의 데이터 복원 과정에는 사용되지 않는다. 결국 본 논문에서 제시하는 방법은 기존의 방법들에서 문제점으로 지적되는 부가정보 전달의 필수성 및 시스템 복잡도의 증가와 같은 문제를 갖지 않고 PAPR을 저감시킬 수 있다.

성능 분석 결과 Method 1과 Method 2가 각각 약 0.5~0.8, 1~1.2 dB 정도의 PAPR 저감 효과를 나타냈다. 이는 모두 기존의 PAPR 저감 기법에 비해 그 성능은 매우 떨어지는 것이지만, 복잡도 및 계산량을 크게 증가시키지 않고, 부가 채널 또한 필요치 않으므로 사용자 단말에서의 적용이 용이하다. 또한 보다 자세한 부분 시퀀스들 사이에 상관도를 낮추어 주는 방법을 추가해 주면 보다 나은 PAPR 저감 효과를 나타낼 수 있음을 예상할 수 있으므로 이에 대한 보다 깊은 연구가 필요할 것이다.

참 고 논 문

[1] L. J. Cimini Jr., "Analysis and simulation of a digital mobile channel using orthogonal frequency division multiplexing", *IEEE Trans. on Communications*, vol. COM-19, pp. 665-675, Jul. 1985.
 [2] J. A. C. Bingham, "Multicarrier modulation for data transmission: an idea whose time has come", *IEEE Communications Magazine*, vol. 28, no. 5, pp. 5-14, May 1990.
 [3] R. Van Nee, *OFDM Wireless Multimedia Communications*, Boston, London: Artech House, 2000.
 [4] H. Sari, G. Karam, and I. Jeanclaude, "Transmission

techniques for digital terrestrial TV broadcasting", *IEEE Communications Magazine*, vol. 33, no. 2, pp. 100-109, Feb. 1995.

[5] Xiaodong Li, L. J. Cimini Jr., "Effects of clipping and filtering on the performance of OFDM", *IEEE Trans. On Commun.*, vol. 39, no. 7, pp. 1031-1033, Jul. 1991.
 [6] T. A. Wilkinson, A. E. Jones, "Minimisation of the peak-to-mean envelope power ratio of multicarrier transmission schemes by block coding", *Proc. of IEEE VTC '95*, Chicago, pp. 825-829, Jul. 1995.
 [7] H. Ochiai, H. Imai, "Block Coding scheme based on complementary sequences for multicarrier signals", *IEICE Trans. On Fundamentals*, pp. 2136-2143, Nov. 1997.
 [8] R. W. Bauml, R. F. 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.
 [9] A. D. S Jayalath, C. Tellambura, and H. Wu "Reduced complexity PTS and new phase sequence for SLM to reduce PAP of an OFDM signal", *IEEE VTC 2000*, vol. 3, pp. 1914-1917, 2000.
 [10] Heung-Gyoon Ryu, Jae-Eun Lee, and Jin-Soo Park, "Dummy sequence insertion (DSI) for PAPR reduction in the OFDM communication system", *Consumer Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 50, Issue: 1, pp. 89-94, Feb. 2004.

김 상 우



2003년 2월: 한밭대학교 전자공학과 (공학사)
 2003년 3월~2005년 2월: 충북대학교 전자공학과 (공학석사)
 2005년 3월~현재: 충북대학교 전자공학과 박사과정
 [주 관심분야] OFDM 통신시스템,

UWB 통신 및 무선 LAN 등

Nguyen Thanh Hieu



1999년 6월: 베트남 하노이 국립대학 전자통신공학과 (공학사)
 2003년 6월: 베트남 하노이 국립대학 전자통신공학과 (공학석사)
 2000년 1월~2004년 6월: 베트남 하노이 국립대학 전자통신공학과 강사

2004년 9월~현재: 충북대학교 전자공학과 박사과정
 [주 관심분야] 디지털 통신, OFDM 통신시스템 등

유 흥 균



1988년~현재: 충북대학교 전자공학과 정교수

1999년~현재: IEEE 논문 심사위원

2002년: 한국전자과학회 학술상 수상

2002년 3월~2004년 2월: 충북대학교 컴퓨터정보통신연구소 소장

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