

# 복수 위상 상보 부호 쌍에 의한 OFDM 통신 시스템의 새로운 PAPR 감소 기법

## A New PAPR Reduction Method Using the Multiphase Complementary Codes in the OFDM Communication System

강 병 무 · 김 상 우 · 유 흥 균

Byoung-Moo Kang · Sang-Woo Kim · Heung-Gyoon Ryu

### 요 약

PAPR(Peak to Average Power Ratio)를 줄이는 것은 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 통신 시스템에서 매우 중요하다. 본 방법은 Golay 상보 부호에 의한 PAPR 감소 기법의 한 가지 방법으로서, 부가 신호를 사용하지 않으면서 효과적으로 PAPR을 감소시킬 수 있는 방법이다. 기존의 상보 부호에 의한 PAPR의 감소 기법은 오류 정정 부호를 사용하거나 부가 신호를 사용 데이터 전송율이 감소하게 된다 있다. 본 논문에서는 단지 복수위상 상보부호를 이용하여 4-QAM의 성상도를 16-QAM의 형태로 변환하고 부가신호의 추가 및 부호율 증가에 영향을 주지 않는 PAPR 감소 기법을 제안한다.

### Abstract

It is very important to reduce the PAPR(Peak to Average Power Ratio) in the OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) communication system. The proposed method in this paper is an effective PAPR reduction method using the Golay complementary codes without any side information. There are some PAPR reduction methods with the complementary code pairs or sequences. They are usually a type of the forward error correction codes so that they produce more redundancies and lower down the code rate. Because of this, the information rate may be cut down or more bandwidth must be required. In this paper, we propose a PAPR reduction method that uses the multi-phase complementary code for converting the 4-QAM into 16-QAM constellation. It does not change the code rate and does not require the side information.

Key words : OFDM, PAPR, Golay Complementary Code, Multiphase

### I. 서 론

OFDM 통신 시스템은 하나의 데이터 열이 그보다 훨씬 낮은 빠르기를 갖는 부 데이터 열로 병렬 변환되고 각각 부 반송파들에 의해 전송되는 방식을 사용하기 때문에, 무선 랜(LAN: Local Area Network) 및 디지털 가입자 망과 같은 시스템에서 많이 사용

하고 있고, 주파수 선택적 페이딩(frequency selective fading) 및 협대역 간섭에 좋은 특성을 갖고, 동시에 많은 양의 데이터를 부반송파를 통하여 전송할 수 있다. 반면에 부 채널의 연속된 조합에 의하여, 높은 PAPR(Peak to Average Power Ratio)을 갖는 신호 형태를 나타낸다. 이러한 신호는 HPA(High-Power Amplifier)의 전력 효율을 저하시키고, 특히 HPA의

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

· 논문 번호 : 20050330-038

· 수정완료일자 : 2005년 6월 27일

클리핑(clipping) 효과에 의한 하모닉스(harmonics) 현상으로 부 반송파에 변조된 데이터들의 직교성을 파괴하여 전송 효율을 저하시키는 원인이 된다<sup>[1]</sup>.

상보 부호의 OFDM 신호는 PAPR이 3 dB 이내로 제한될 수 있는데, 이러한 방식은 임의의 데이터들이 상보 부호 열이거나, 상보 부호 쌍의 부분 집합이 아닐 경우 부분 집합으로 만들기 위한 부가 데이터들이 들어가야 한다는 단점이 있다. 이러한 방식에 의한 부가 정보는 데이터의 부호율을 급격히 저하시킨다<sup>[2]~[6],[12]</sup>.

심볼 스크램블링(symbol scrambling) 기법으로 분류되는 선택 매핑(Selected Mapping: SLM)<sup>[7],[11]</sup>과 부분 전송 시퀀스(Partial Transmit Sequence: PTS)<sup>[8]~[10]</sup> 방식이 있다. 이 두 방식은 성능은 비슷하지만 많은 양의 계산을 필요로 한다. 서브 블록(sub block) 수만큼 IFFT를 수행하여야 하며, 각각에 대하여 PAPR을 계산하고, 가장 적은 PAPR을 갖는 서브 블록을 선택하여야 한다.

피크 제거(peak cancellation) 방식<sup>[12]</sup>은 최대 피크 신호에 대하여 같은 크기의 임펄스 신호를 발생시킨 후 FFT(Fast Fourier Transform)를 취하고, 데이터 신호에 대하여 임펄스 신호의 FFT 값을 감산한 후 다시 OFDM 변조를 하여 피크 신호를 제거하는 방식이다. 이 방식은 효과적으로 PAPR을 감소시킬 수 있으나 송신단에서 데이터 신호에 대하여 에러를 유발시키는 결과를 낳게 되므로 오류 정정 부호 혹은 부가 신호를 사용하여야 한다.

본 논문에서는 상보 부호 쌍(complementary pair)을 사용하여, 원래 신호의 PAPR을 감소시킬 수 있는 방식으로, 부가 정보가 필요 없고, 데이터의 부호율에 영향을 주지 않는 효과적인 PAPR 감소 기법을 제안한다. 이것은 Golay 상보 부호에 의한 PAPR 감소 기법의 한 가지 방법으로서, 단지 송·수신단에서 약속된 복수 위상 상보 부호를 이용하여 송신측에서는 4-QAM의 성상도를 16-QAM의 형태로 변환하는 것으로, 부가 신호의 추가 및 부호율 증가에 영향을 주지 않는 PAPR 감소 기법이다.

## II. 복수 위상 상보 부호(Multiphase Complementary Code)

상보 부호는 일반적으로 Golay 상보 부호를 의미한다. 상보 부호 쌍은 각각 부호의 비주기 자기 상관 값의 합이  $k \neq 0$ (식 (3) 참조)에 대하여 0을 갖는 특징이 있다. 즉  $\mathbf{a} = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_{N-1}\}$ ,  $\mathbf{b} = \{b_1, b_2, b_3, \dots, b_{N-1}\}$ 를 상보 부호 쌍이라고 하면, 각각의 비주기 자기 상관 함수는

$$\rho_a(k) = \sum_{i=0}^{N-k-1} a_i a_{i+k}, \quad a \leq k \leq N-1 \quad (1)$$

$$\rho_b(k) = \sum_{i=0}^{N-k-1} b_i b_{i+k}, \quad b \leq k \leq N-1 \quad (2)$$

로 나타낼 수 있고, 비주기 자기 상관 값의 합은

$$\begin{aligned} \rho_a(k) + \rho_b(k) &= 0, \quad k \neq 0 \\ &\leq 2N, \quad k = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

이다<sup>[2],[4]~[6]</sup>. Golay 상보 부호 쌍을 구성하는 집합의 부호열을 Golay 상보 부호 열(Golay complementary sequence)이라 한다. 상보 부호  $\mathbf{a}$ ,  $\mathbf{b}$ 의 원소가 (+1, -1)일 때 우리는 이진 상보 부호라고 하고, 1의  $n(n > 2)$  제곱근일 때 복수 위상(multi phase, poly phase) 상보 부호라 한다. OFDM 통신 시스템에서 상보 부호의 쌍이 전송 데이터로 사용되면 OFDM 신호의 PAPR은 3 dB보다 작거나 같은 특징이 있다<sup>[12]</sup>. 상보 부호의 특징을 살리면 효과적인 PAPR 감소 효과를 가질 수 있다. 또한 임의의 GCP(Golay Complementary Pair: Golay 상보 부호 쌍)은 원소의 개수가 100보다 작은 경우에

$$\begin{aligned} (\text{length}(GCP) < 100) \in \\ \{1, 2, 4, 8, 10, 16, 20, 26, 32, 40, 52, 64, 80\} \end{aligned} \quad (4)$$

의 부호 길이를 가질 수 있다<sup>[6]</sup>. 상보 부호는 식 (4)에서 나타낸 길이 이외에도 상보 부호의 확장을 통해서 크기가 2배로 확장된 또 다른 상보 부호 쌍을 구할 수 있고, 확장 방법은 상보 부호 쌍  $(\mathbf{a}, \mathbf{b})$ 에 대하여

$$(\mathbf{a}, \mathbf{b}) \rightarrow ([\mathbf{a} \mathbf{b}], [\mathbf{a} \bar{\mathbf{b}}]) \quad (5)$$

와 같다<sup>[6]</sup>. 여기서  $[\mathbf{a} \mathbf{b}]$ 는 상보부호  $\mathbf{a}$ 와  $\mathbf{b}$ 를 직렬로 연결한 또 다른 부호를 의미하고,  $\bar{\mathbf{b}}$ 는

$$\bar{\mathbf{b}} = \mathbf{b} \cdot e^{j\pi} = -\mathbf{b} \quad (6)$$

를 의미한다.

### Ⅲ. 복수 위상 상보 부호를 이용한 4-QAM 신호의 16-QAM 표현

복수 위상 상보 부호의 커널(kernel)이 1의 4제곱근으로 되어 있다면 그 커널로 표현된 상보 부호는 4-PSK 혹은 4-QAM 심볼을 갖는 복수 위상 상보 부호가 된다. 그러므로 앞에서 설명한 바와 같이 그러한 심볼들의 OFDM 신호는 3 dB 이내의 PAPR 값으로 제한된다. 즉 4-QAM 심볼은

$$s_i = Ae^{j\frac{\pi}{4}} c_i, \quad c_i \in \{1, -1, j, -j\} \quad (7)$$

로 표현할 수 있는데, 여기서  $c_i$ 가 상보 부호 쌍을 만족하면  $s_i$ 도 상보 부호 쌍을 만족하는 4-QAM 심볼이 된다. 상보 부호의 일괄 위상 회전은 상보 부호의 특징을 유지하며, 일괄 크기 변화도 상보 부호의 특징을 유지한다. 신호  $s_i$ 가 상보 부호 쌍이므로 식 (7)의 OFDM 신호의 PAPR은 3 dB 이내로 제한된다.

본 연구에서  $c_i$ 는 길이가 4인 상보 부호 쌍을 구성하는 커널  $(a, b) = (\{1, -j, 1, j\}, \{1, j, 1, -j\})$ 로부터 식 (5)의 상보 부호 길이 확장 방법으로 16, 32, 64, 128, 256, ... 순으로 확장한 상보 부호 쌍이 된다. 16-QAM 성상도 표현을 갖는 심볼  $u_i$ 를 설계하기 위해서 또 다른 임의의 4-QAM 심볼(여기서는 전송하고자 하는 데이터)을  $t_i$ 라 하고

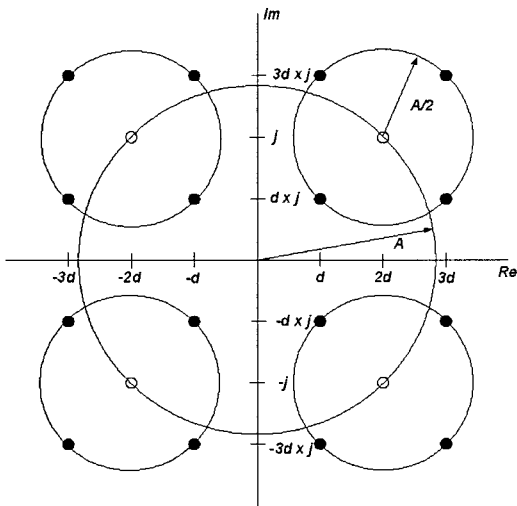


그림 1.  $u_i$ 의 기하학적 구조(○:  $s_i$ , ●:  $u_i$ )  
Fig. 1. Geometrical formation of  $u_i$ .

$$t_i = \frac{A}{2} e^{j\frac{\pi}{4}} d_i, \quad d_i \in \{1, -1, j, -j\} \quad (8)$$

와 같은 형태가 되도록 정보 데이터를 설계한다. 상보 부호 쌍  $s_i$ 를 도입하여

$$\begin{aligned} u_i &= s_i + t_i \\ &= Ae^{j\frac{\pi}{4}} c_i + \frac{A}{2} e^{j\frac{\pi}{4}} d_i \end{aligned} \quad (9)$$

와 같이 되도록 한다.

이와 같은 신호의 성상도는 그림 1에 나타낸 바와 같이 그림 1은 식 (9)를 이용하여 표현된 16-QAM 형태의 성상도를 보여준다. 여기서  $c, d$ 가 상보 부호 쌍이면 식 (9)로 표현되는 16-QAM 심볼도 역시 상보 부호 쌍을 만족하고, 그 심볼의 OFDM 신호도 3 dB 이내의 PAPR을 갖는다. 그러나 실제 통신에서 전송하고자 하는 심볼은 랜덤(random) 신호이므로 상보 부호 쌍이 될 수 없으며, 상보 부호 쌍의 형태로 변환하기 위해서는 많은 양의 부가 정보와 추가 데이터(redundancy)가 필요하게 되고 코드 레이트(code rate)가 떨어지게 된다<sup>[5],[12]</sup>. 또한 기존의 SLM<sup>[7],[11]</sup>, PTS<sup>[8]~[10]</sup>의 방식은 PAPR을 감소시키기 위해서 방식상의 약간의 차이는 있으나,  $N$ 개의 부채널 데이터를 몇개의 클러스터로 구분하여 각각 위상 회전을 시키고, 각각 클러스터에 대하여 IFFT 연산을 수행하여야 하므로 많은 양의 연산량이 필요하고, 그러한 연산을 줄이기 위한 연구들이 진행되고 있다<sup>[11]</sup>. 본 연구에서 제안하는 방식은 이러한 단점들을 해결할 수 있는 방식이라고 할 수 있다. 즉,  $u_i$ 의 구성요소  $s_i$ 는 송수신 단에서 약속된 상보 부호 쌍으로 하고,  $t_i$ 는 전송하고자 하는 랜덤 4-QAM 데이터이다. 이렇게 구성된  $u_i$ 는  $t_i$ 가 상보 부호 쌍이 아니기 때문에 복수 위상 상보 부호 쌍이 되지 않는다.

그러나  $u_i$ 의 OFDM 신호는 PAPR이 감소될 수 있음을 보일 것이고, 그 감소 수준 정도를 기존의 SLM, PTS 방식과 비교하고자 한다. 만일 PAPR 감소 효과가 있을 경우, 그림 2에서처럼 기존의 방식에 비하여, 단순히 1회의 벡터 연산만 추가된 경우이므로, 기존의 SLM, PTS와 계산량 측면에서 많은 이점이 있을 것이다. 제안하고자 하는 방식의 계통도를 그림 2에 나타내었다.

앞에서 알아본 바와 같이  $s_i$ 는 송수신단과 수신단에

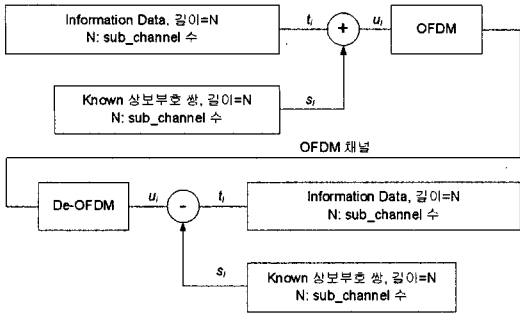


그림 2. 제안된 복수위상 상보 부호를 이용한 PAPR 감소 방식  
 Fig. 2. Proposed PAPR reduction method using multi-phase complementary code.

서 이미 약속된 상보 부호 쌍이고, 부호의 길이는  $N$ 이다.  $t_i$ 는 전송하고자 하는 길이  $N$ 을 갖는 4-QAM 심볼이고, 이 심볼은 랜덤 데이터이기 때문에 상보 부호 쌍은 아니다. 그림 2에서 덧셈 블록은 식 (9)에서 표현된 바와 같이 각각 원소들끼리의 연산이며, 이때 연산결과  $u_i$ 는 참고문헌 [3], [5]에서 보이는 바와 같이 16-QAM의 성상도를 갖는다. 그림 2에서 알 수 있듯이 본 방식은 기존의 SLM, PTS 방식처럼 많은 계산량을 필요로 하지 않고, 단지 1회의 벡터 연산만을 추가로 사용하고, 표준 OFDM 변조 방식(1회의 IFFT 수행)을 사용하는 PAPR 저감 방식을 제안한다.

PAPR의 저감 효과를 알아보기 위해서 제안된 방식의 PAPR을 구해 보도록 하자.  $s_i$ 의 OFDM 신호의 전력을  $P_s$ 라 하고  $t_i$ 의 OFDM 신호의 전력을  $P_t$ ,  $u_i$ 의 OFDM 신호의 전력을  $P_u$ 라 하면 제안방식의 PAPR은

$$\begin{aligned}
 PAPR(u_i) &= 10 \log_{10} \left( \frac{\text{peak}(P_u)}{E(P_u)} \right) \\
 &\leq 10 \log_{10} \left( \frac{\text{peak}(P_s + P_t)}{E(P_s + P_t)} \right) \quad (10)
 \end{aligned}$$

로 표현할 수 있다. 또한 각각 신호의 평균 전력은 그림 1의 성상도 구조에서 다음 식과 같이 간단히 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 E(P_t) &= A^2/4 \\
 E(P_s) &= A^2 \\
 E(P_u) &= [E(P_t) + E(P_s)]/2 \quad (11)
 \end{aligned}$$

여기서  $\text{peak}(\cdot)$ 은 최대값을  $E(\cdot)$ 은 평균값을 나타낸다.

식 (7)에서  $s_i$ 는 상보 부호 쌍 심볼이므로 서두에서 알아본 바와 같이  $s_i$ 의 PAPR은 3 dB 이내로 제한될 수 있기 때문에  $\text{peak}(P_s) \leq 2E(P_s)$ 를 만족한다. 이러한 관계와 식 (11)의 관계를 적용하여 식 (10)을 다시 표현하면

$$\begin{aligned}
 PAPR(u_i) &= 10 \log_{10} \left( \frac{\text{peak}(P_s) + \text{peak}(P_t)}{[E(P_s) + E(P_t)]/2} \right) \\
 &\leq 10 \log_{10} \left( \frac{4 \cdot E(P_t) + \text{peak}(P_t)}{5/2 \cdot E(P_t)} \right) \quad (12)
 \end{aligned}$$

$$PAPR(u_i) \leq 10 \log_{10}(4 + 10^{PAPR(t_i)/10}) - 10 \log_{10}(2.5)$$

$$\therefore PAPR(t_i) = 10 \log_{10} \left( \frac{\text{peak}(P_t)}{E(P_t)} \right) \quad (13)$$

로 나타낼 수 있다. 식 (13)에서 알 수 있듯이 제안된 방식은 기존의 방식에 비하여 PAPR 감소량(-10  $\log_{10}(2.5)$ ): 약 -4 dB)을 갖고 있음을 알 수 있다.

#### IV. 시뮬레이션 결과 및 고찰

시뮬레이션은 크게 두 가지에 대하여 수행하였는데, 첫째는 상보 부호를 사용하지 않는 초기 4-QAM 신호에 대하여  $N=128, 256, 512$ 에 대한 OFDM 신호의 PAPR 값을 구해보고, 그 심볼에 대하여 상보 부호를 적용한 16-QAM 심볼의 각각 감소된 PAPR을 구해 보았다. 또한 식 (13)에서 계산된 이론적 PAPR의 감소 특성과 시뮬레이션에 의한 감소 특성을 서로 일치함을 보였다. 둘째는 식 (8)의  $t_i$ 에 대하여 10가지의 위상 회전 행렬을 갖는 SLM(Selective Mapping)을 적용하여 PAPR을 1차적으로 감소시켜  $u_i$ 의 심볼을 구성하고, 첫째 실험과 동일한 과정으로 시뮬레이션 하였다. 이렇게 시뮬레이션한 이유는 본 제안 방식이 기존의 SLM, PTS 방식에 비하여 무시할 수 있는 계산량을 추가로 갖고 있기 때문에, 본 방식과 기존의 방식을 병행해서 사용하더라도 계산량의 증가는 거의 무시할 수 있는 장점이 있으며, 기존의 PAPR 감소 시스템에서 본 방식을 추가로 사용하였을 경우, 본 방식에 의해서 추가로 획득되는 PAPR의 감소 성능을 알아보기 위해서이다.

그림 3은  $N=128$ 에 대한  $CCDF=P_x(PAPR > PAPR_0)$ <sup>[9]</sup> 시뮬레이션 결과를 보여준다. 마찬가지로 그림 4, 그

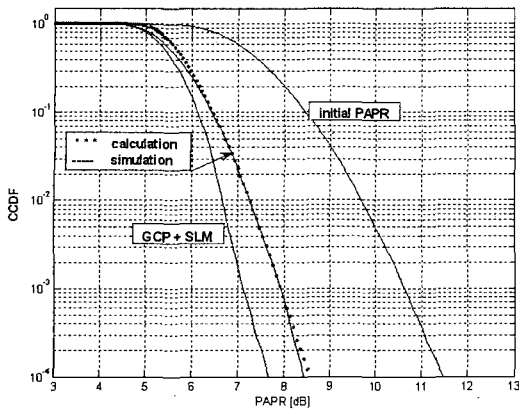


그림 3.  $N=128$  OFDM 신호의 CCDF 특성  
Fig. 3. CCDF of OFDM signal with  $N=128$ .

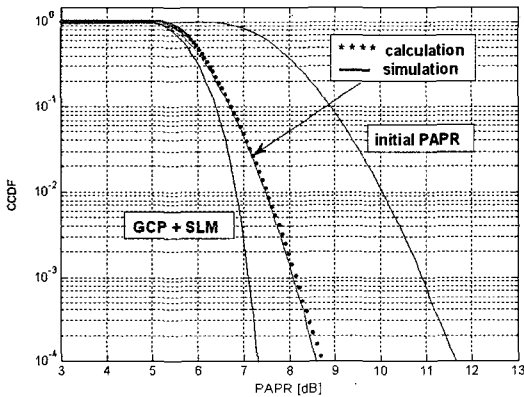


그림 4.  $N=256$  OFDM 신호의 CCDF 특성  
Fig. 4. CCDF of OFDM signal with  $N=256$ .

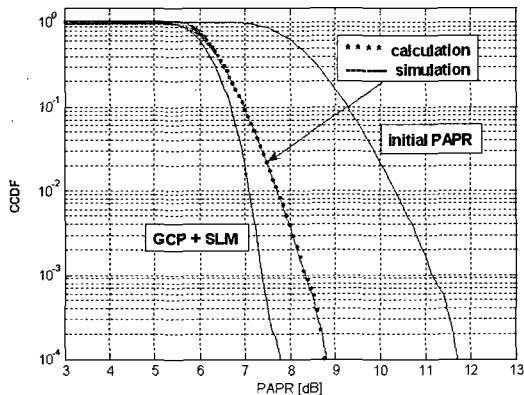


그림 5.  $N=512$  OFDM 신호의 CCDF 특성  
Fig. 5. CCDF of OFDM signal with  $N=512$ .

림 5는 각각  $N=256$ ,  $N=512$ 에 대한 CCDF 시뮬레이

션 결과이다. 결과에 따르면 제안된 방식은 초기 PAPR에 대하여  $CCDF=10^{-4}$ 에서 약 3 dB의 PAPR 감소 효과를 보이고 있고, 두 번째 시뮬레이션 방식인 제안된 방식과 SLM 방식을 병행하여 적용하였을 경우  $CCDF=10^{-4}$ 에서 약 4 dB의 PAPR 감소 효과를 나타낸다. 기존의 다른 PAPR 감소 방식인 SLM 방식과 비교하였을 때 제안된 방식의 경우는  $N=128$ 인 경우 4개의 클러스터를 사용하는 SLM 방식과 같은 성능을 보이고 있으며<sup>[7]</sup>,  $N=512$ 인 경우 4개의 클러스터를 갖는 SLM 방식보다 약 0.5 dB 우수한 성능을 보이고 있다<sup>[8]</sup>. 그리고 기존 방식 PTS 방식과 비교하였을 때  $N=512$ 이고, 3개의 클러스터를 갖는 경우와 대등한 성능을 보이고 있고<sup>[8]</sup>,  $N=256$ 인 경우 16번의 반복횟수를 사용하는 경우와 대등한 성능을 보이고 있다<sup>[9]</sup>. 그러나 본 연구의 두 번째 시뮬레이션 방식인 제안된 방식과 SLM 방식을 병행했을 경우는 제안된 방식보다 약 1 dB 이상의 PAPR 성능 개선이 있었다. 이것은 제안된 방식이 단지 1번의 벡터 연산만으로 얻을 수 있는 결과이기 때문에, 중요한 의미를 갖는다고 할 수 있는 것이다. 즉, 기존의 SLM, PTS 방식은 계산량이 많으므로, 그러한 계산량을 줄이기 위한 많은 연구가 진행되고 있음<sup>[11]</sup>을 서두에서 언급한 바 있었다. 그러나 제안된 방식의 1회 벡터 연산은 SLM, PTS 방식의 연산량에 비하면 무시할 수 있는 계산량이 되지만, 그 결과는 SLM, PTS 방식과 대등한 PAPR 감소 효과를 얻을 수 있음을 보였고, SLM과 병행할 경우는 1 dB 이상의 또 다른 이득이 있음을 보였다. 이것이 두 번째 시뮬레이션의 목적이기도 하다. 제안된 방식은 블록 코딩을 이용하는 PAPR 저감 방식의 최대 단점인 부가 정보의 추가나 대역 증가, 코드율 저하 등의 결정적 단점을 극복한 장점이 있다. 하지만 4-QAM의 정보가 16-QAM 형태로 확장됨으로써 일부 BER의 증가가 있을 수 있다<sup>[13]</sup>.

## V. 결 론

본 연구에서 제안한 복수 위상 상보 부호가 적용된 PAPR 감소 기법은 부가 정보를 사용하지 않고 단지 상보 부호 쌍과 1번의 벡터 연산만을 사용하는 방식으로써 3~4개의 서브 블록을 사용하는 기존의

SLM, PTS 방식과 대등한 PAPR 감소 성능을 보이고 있다. 또한 연산량이 극히 적은 장점을 살려서 제안된 방식과 기존의 SLM 방식과 병행하여 시뮬레이션을 하여본 결과 추가로 1의 PAPR 감소 성능을 얻었다. 본 방식은 클리핑(clipping) 방식에서 흔히 있는 부 채널(sub-channel) 간의 간섭이 없고 채널간의 직교성이 유지되는 장점이 있다. 시뮬레이션 결과에 의하면 상보 부호 쌍을 적용한 본 논문의 방식은 계산량의 증가와, 부가정보의 추가 없이 약 3 dB (CCDF= $10^{-4}$ 에서)의 PAPR 감소 이득을 보았으며, 계산량에 영향을 주지 않는 장점을 살려서 SLM 방식과 병행 사용하여  $N=256$ 일 때 CCDF= $10^{-4}$ 일 때 4.5 dB의 PAPR 감소 효과를 얻을 수 있다.

요약하면, OFDM 시스템에서 부 채널 수( $N$ : IFFT size)와 같은 길이의 송 수신 단에서 약속된 상보 부호 쌍을 이용, 그림 2와 같은 방식의 간단한 방식을 제안하여 초기 PAPR보다 약 3 dB의 감소 성능을 보였고, 3~4개의 서브 블록을 사용하는 기존의 SLM, PTS 방식과 대등한 성능을 보였으며, 기존의 방식과 병행하여 사용될 경우 1 dB의 PAPR 감소 성능을 추가로 얻을 수 있었다.

### 참 고 문 헌

[1] H. G. Ryu, Tran Phuong Hoa, Nguyen Thanh Hieu, and Jin Jianxue, "BER analysis of clipping process in the forward link of the OFDM-FDMA communication system", *IEEE Transaction on Consumer Electronics*, vol. 50, pp. 1058-1064, Nov. 2004.

[2] R. Sivaswamy, "Multiphase complementary codes", *IEEE Trans. on Inform. Theory*, vol. IT-24, no. 5, Sep. 1978.

[3] Chan Vee Chong, Vahid Tarokh, "Two constructions of 16-QAM Golay complementary sequences", *IEEE International Symposium on 2002*, pp. 240, Jun.-Jul. 2002.

[4] James A. Davis, Jon. Jebwab, "Peak-to-mean power

control in OFDM, Golay complementary sequences, and reed-muller codes", *IEEE Trans. on Inform. Theory*, vol. 45, pp. 2397-2417, Nov. 1999.

[5] Chan Vee Chong, R. Venkataramani, "A new construction of 16-QAM Golay complementary sequences", *IEEE Trans. on Inform. Theory*, vol. 49, pp. 2953-2959, Nov. 2003.

[6] M. G. Parker, K. G. Paterson, and C. Tellambura, "Golay complementary sequences", from on line <http://www.isg.rhul.ac.uk/~kp/golaysurvey.pdf>

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

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

[9] L. J. Cimini, Jr., and N. R. Sollenberger, "Peak-to-average power ratio reduction of an OFDM signal using partial transmit sequences", *Proc. IEEE Comm. Letters*, vol. 4, no. 3, pp. 86-88, Mar. 2000.

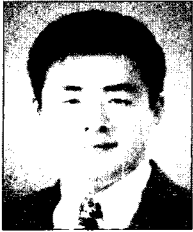
[10] S. H. Han, J. H. Lee, "PAPR reduction of OFDM signals using a reduced complexity PTS technique", *IEEE Signal Proc. Letters*, vol. 11, no. 11, Nov. 2004.

[11] D. W. Lim, J. S. No, C. W. Lim, and H. Chung, "A new SLM OFDM scheme with low complexity for PAPR reduction", *IEEE Signal Proc. Letters*, vol. 12, no. 2, Feb. 2005.

[12] 조용수 역, 무선 멀티미디어 통신을 위한 OFDM 기초, 대영사, 2000년.

[13] 강병무, 김상우, 유흥균, "OFDM 통신 시스템에서 능동 성장도 확장을 이용한 PAPR 감소 기법", 한국전자과학회논문지, 16(6), 2005년 6월.

강 병 무



1990년 2월: 충북대학교 전자공학과 (공학사)  
1999년 8월: 충북대학교 전자공학과 (공학석사)  
1990년 3월~2000년 6월: 국방과학연구소 선임연구원  
2000년 3월~현재: 충북대학교 전자공학과 박사과정

[주 관심분야] 디지털 통신 시스템, 무선/이동 통신, 채널 코딩

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

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