

PAPR 감소와 효과적인 채널 추정을 위한 SC-FDMA 통신 시스템의 파일럿 배치 방법

Pilot Assignment Method for the PAPR Reduction and Effective Channel Estimation in the SC-FDMA Communication System

안 동 건 · 유 흥 균

Dong Geon An · Heung-Gyoon Ryu

요 약

SC-FDMA(Single Carrier-Frequency Division Multiple Access) 통신 시스템에서 채널 추정을 위한 파일럿은 CA-ZAC 시퀀스를 이용하여 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 신호의 높은 PAPR(Peak-to-Average Power Ratio)을 낮추는 방식을 사용한다. 그런데, 채널 추정을 위한 파일럿이 블록 타입으로 전송되므로, 수신단에서 파일럿 블록 사이의 여러 OFDM 심볼들은 시간 영역에서의 보간법을 사용하여 채널 추정하여야 하므로 매우 복잡하고 처리 시간이 길어질 수 있다. 또한 심한 fast fading 채널에서는 이러한 문제점이 더욱 커진다. 한편, 효과적인 고속 채널 추정을 위하여 OFDM 심벌 단위로, 주파수 영역에서 보간법을 수행하는 comb 타입의 파일럿을 사용하게 되면 OFDM 신호의 PAPR이 다시 높아지는 문제가 발생한다. 본 논문에서는 PAPR 감소와 효과적인 채널 추정이 가능한 comb 타입의 파일럿을 배치 방법을 연구하였다. 이를 위하여 CAZAC 행렬 변환된 OFDM 신호에 comb 타입의 파일럿을 배치하고, 추가로 SLM 기법을 사용하였다. 그러나 기본적인 SLM(Selected Mapping) 기법은 위상 회전에 관한 부가 정보 전송이 필요하기 때문에 대역폭의 손실을 가져온다는 단점이 있다. 따라서, 본 연구에서는 파일럿은 SLM 위상 시퀀스와 곱해지지 않으며, SLM 위상 회전 시퀀스에 따라 서로 다른 파일럿을 신호에 삽입하여, 부가 정보를 사용하지 않고 대역폭의 손실이 없는 개선형 SLM 기법을 연구하였다. 시뮬레이션 결과, 4개의 위상 회전 시퀀스를 갖는 SLM을 사용하였을 때, 파일럿 삽입으로 인해 높아진 신호의 PAPR을 원래 수준과 비슷한 성능으로 감소되는 것을 알 수 있다.

Abstract

PAPR of the pilot symbols can be reduced down by the CAZAC sequence in the SC-FDMA communication system. However, it is very complicated and takes quite a long time to compute the interpolation between the OFDM information symbols for the channel estimation because the pilot data are transmitted in the block type. Furthermore, situation will be much more serious in the severe fading channel. Actually the pilot insertion of the comb type is much efficient and convenient for the channel estimation since the calculation of the interpolation can be made in the frequency domain symbol by symbol. But, the PAPR will be regrown when the pilot data are inserted with the information data in the comb type. So, in this paper, we like to study the PAPR reduction and comb type pilot assignment for the efficient channel estimation. Unlike the conventional SLM(selected mapping) method requiring the side information, our improved SLM method is to use the phase rotation sequence into information data without rotating

「이 논문은 2009학년도 충북대학교 학술연구지원사업에 의하여 연구되었음(This work was supported by the research grant of the Chungbuk National University in 2009).」

충북대학교 전기전자컴퓨터공학부(School of Electrical and Computer Engineering, Chungbuk National University)

· 논문 번호 : 20090901-098

· 교신저자 : 유흥균(e-mail : ecomm@cbu.ac.kr)

· 수정완료일자 : 2009년 12월 9일

phase of pilot. We use different pilot data according to the different phase rotation sequence. From the simulation result, it can be confirmed that when SLM method of 4 phase rotation sequence is used, PAPR is almost same to the block type method without pilot.

Key words : OFDM, CAZAC, SLM, PAPR, Pilot Allocation

I. 서 론

OFDM은 multi-path fading channels에 강한 multi-carrier 변조 기술이기 때문에 고속 디지털 통신 분야에 응용되고 있다. 그러나 동기화 에러와 높은 PAPR (Peak-to-Average Power Ratio)은 OFDM 시스템에 있어서 심각한 문제점들이다.

이 중 OFDM의 높은 PAPR의 문제는 무선 시스템의 설계에 있어 매우 중요하다. 시간 영역에서 독립적으로 변조된 많은 sub-carrier를 사용하여 구성되는 OFDM 신호는 sub-carrier가 동위상으로 더해질 때 큰 크기의 신호가 발생하여 PAPR이 크게 나타난다. OFDM 시스템에서 높은 PAPR로 인해 진폭 값에 큰 변화가 발생하고, single carrier 시스템보다 비선형 왜곡에 더 민감하다. 또한 높은 PAPR은 HPA(High Power Amplifier)의 전력 효율을 낮아지게 할 뿐만 아니라 BER(Bit Error Rate) 성능을 감소시키는 원인이 된다^{[1],[2]}.

그 동안 이를 보완하기 위한 연구가 활발히 진행되어 왔으며, 신호 왜곡 기법, 부호화 기법, 위상 회전 기법 등이 있다. 신호 왜곡 기법에는 clipping, peak windowing, peak cancellation 등이 있으며, 간단히 신호의 peak 크기를 감소시킨다. 하지만 sub-carrier의 직교성이 파괴되는 등의 단점을 가진다. 부호화 기법은 큰 PAPR을 갖는 OFDM symbol을 제외시킨 특수한 채널 부호 집합을 사용한다. 하지만 이 방법은 sub-carrier의 수가 증가할수록 PAPR이 감소되는 효과가 떨어진다. 위상 회전 기법에는 SLM(Selected Mapping), PTS(Partial Transmit Sequence), SPW(Sub-block Phase Weighting) 등이 있으며, 이 기법들은 신호의 왜곡 없이 높은 PAPR 저감 효과를 갖지만, 시스템의 복잡도가 증가하거나 처리 지연 시간이 늘어나고, 때에 따라 부가 정보를 전송해야 하는 단점이 있다^[1]. 최근에는 DFT-Spread OFDM 기법이 부각되고 있으며, 이 기법은 상향 링크 전송 시 단말기에서

PAPR을 single carrier 수준으로 감소시킬 수 있어 3GPP LTE(3rd Generation Partnership Project Long Term Evolution)의 상향 링크 전송 표준으로 채택되었으며, SC-FDMA라고 불린다. 그 외에 Pre-distortion 기법, Compression and Expanding 기법 등이 있다.

광대역 통신 시스템에서 무선 채널은 주파수 선택적이고 시변 특성을 가진다. 이러한 이유로 통신 시스템에서는 파일럿이나 훈련 심볼 등을 이용하여 채널을 추정하고, 이를 통하여 채널에서 발생하는 영향을 보상한다^[1]. OFDM 시스템에서 채널의 추정을 위해 사용되는 파일럿은 크게 Block Type, Comb Type으로 배치한다. 먼저, Block Type 파일럿 배치 방식은 slow fading 채널이라는 가정 하에 사용된다. 따라서 decision feedback equalizer에서 또한 채널 전달 함수는 빠르게 변하지 않는다고 가정한다. 그러나, Comb Type 파일럿 채널 추정은 주파수 영역에서 채널을 추정하기 위한 알고리즘과 채널을 보간하기 위한 알고리즘으로 구성되어 있다. 그러므로 Comb Type 파일럿 배치 방식은 각각의 OFDM symbol마다 채널이 변화할 때의 채널 추정이 가능하고, Block Type 파일럿 배치 방식에 비해 fast fading 채널에서 채널의 시간적 변이를 추정하는데 있어서 더 좋은 성능을 가진다^{[3],[4]}.

본 논문에서는 CAZAC 행렬 변환 기법을 통해 OFDM시스템에서 발생한 PAPR을 줄이고, Comb Type 파일럿 배치를 통해 OFDM 시스템의 채널 추정 성능을 향상시키고자 할 때 다시 증가하는 PAPR을 SLM 기법을 이용하여 줄이는 방식을 제안한다. 일반적인 OFDM 시스템에서의 신호를 CAZAC 행렬 변환하였을 때의 PAPR 성능은 DFT를 사용할 때와 동일하다. 그러나 fast fading 채널에서 채널을 추정하기 위해 Comb Type 배치 방식의 파일럿을 삽입하였을 경우, PAPR 성능은 열화된다. 이러한 파일럿 삽입으로 인한 PAPR 성능 열화를 SLM 기법(Method 1)을 통해 개선하였다. 그리고 채널을 정확

하게 추정하기 위해 SLM을 통과할 때 파일럿은 회전되지 않도록 위상 회전 시퀀스를 조절한 SLM 기법(Method 2)을 사용하였다. 또한 SLM 기법의 단점인 부가 정보에 의한 대역폭의 손실을 개선하기 위해서 선택된 위상 회전 시퀀스에 따라 서로 다른 파일럿을 삽입(Method 3)하여 대역폭의 손실 없이도 부가 정보를 사용한 SLM 기법(Method 1, Method 2)과 동일한 PAPR 성능을 갖도록 하였다. 시뮬레이션을 통해 파일럿을 삽입한 CAZAC 행렬 변환된 OFDM 시스템에 SLM 기법을 적용하였을 때 기존 시스템들에 비해 어떠한 PAPR 성능을 갖는지 비교·분석하여, 파일럿을 삽입하면서 발생하는 PAPR 성능의 열화와 CAZAC과 SLM을 사용하면서 얻는 PAPR 성능의 개선 효과를 확인하였다. 또한 각 SLM 기법 Method 1, 2, 3간의 PAPR 성능의 차이를 비교·분석하였다.

II. 시스템의 구성

2-1 CAZAC 행렬 변환된 OFDM 시스템

OFDM 시스템이 M 개의 부 반송파를 가질 때, CAZAC 시퀀스로 이루어진 $M \times M$ 행렬을 이용한 CAZAC 행렬 변환된 OFDM은 DFT spread OFDM과 동일한 PAPR 감소 효과를 갖는다^[5].

$M \times M$ CAZAC 변환 행렬 A 는 길이 $L = M^2$ 이고, $p=1$ 일 때, CAZAC 시퀀스를 재배열해서 아래의 식과 같이 직교 행렬로 만들어진다.

$$A = \begin{bmatrix} C_0 & C_M & \cdots & C_{M(M-1)} \\ C_1 & C_{M+1} & & C_{M(M-1)+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{M-1} & C_{2M-1} & \cdots & C_{M^2-1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 $C_k = \exp[j\pi k^2 / M^2]$, $A_{mn} = c_{m+Mn} = \exp[j\pi (m+Mn)^2 / M^2]$, $A^H A = I$ 이며, $(.)^H$ 는 공액 전치이다. S/P를 거친 뒤의 입력 심볼 시퀀스 x 는 다음과 같다.

$$x = [x_0, x_1, \dots, x_{M-1}] \quad (2)$$

신호 x 는 CAZAC 변환 행렬 A 에 의해 x_A 로 변환된다.

$$x_A = [x_{A0}, x_{A1}, \dots, x_{A(M-1)}] \quad (3)$$

2-2 Comb Type 방식의 파일럿 배치

OFDM 시스템의 송신기에서 입력 비트는 PSK나 QAM 신호로 변환된 후 IFFT를 거쳐 시간 영역 신호로 변환되어 무선 채널로 전송된다. 이 때 무선 채널의 영향으로 수신 신호는 크기와 위상 왜곡이 발생하는데, 채널 추정을 통해 성능 열화를 보상한다. Fast Fading 채널에서는 Comb Type 파일럿이 Block Type 파일럿보다 우수한 채널 추정 성능을 가지므로 본 논문에서는 Comb Type 파일럿 배치 방식을 사용하였다.

본 논문에서는 $M=60$ 개의 부 반송파를 갖는 입력 심볼 시퀀스에 한 심볼을 기준으로 11, 26, 39, 54번 부 반송파 위치에 $L=4$ 개의 파일럿을 배치하여 총 $N(=M+L)$ 개의 부 반송파를 갖도록 구성하였다. 따라서 식 (3)의 CAZAC 변환된 입력 심볼 X 는 파일럿이 삽입되어 식 (4)와 같이 표현된다.

$$X = [x_{A0}, \dots, x_{A9}, P_1^*, x_{A10}, \dots, x_{A23}, P_2^*, x_{A24}, \dots, x_{A35}, P_3^*, x_{A36}, \dots, x_{A49}, P_4^*, x_{A50}, \dots, x_{A59}] \quad (4)$$

여기서 $1 \leq u \leq U$ 이며, 각 복사된 신호에 곱해지는 U 개의 파일럿 시퀀스를 갖는다.

2-3 부가 정보를 사용하지 않는 SLM 기법

그림 1은 파일럿이 배치된 CAZAC 행렬 변환된 OFDM 통신 시스템에 Method 1의 SLM 기법을 적용하였을 때의 전체 블록도이다. Method 1의 SLM 기법은 입력 심볼 시퀀스에 서로 다른 위상 시퀀스를 곱하여 U 개의 서로 다른 데이터 시퀀스를 생성한다. 그리고 심볼 시퀀스들을 IFFT하여 OFDM 신호를 생

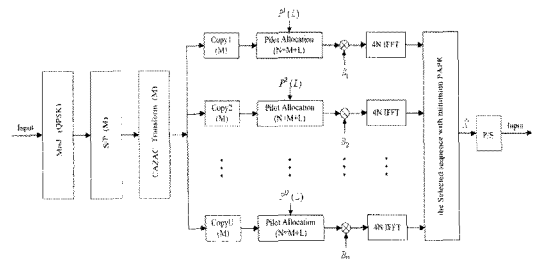


그림 1. Method 1의 SLM을 적용한 OFDM 시스템
Fig. 1. OFDM system using the SLM of method 1.

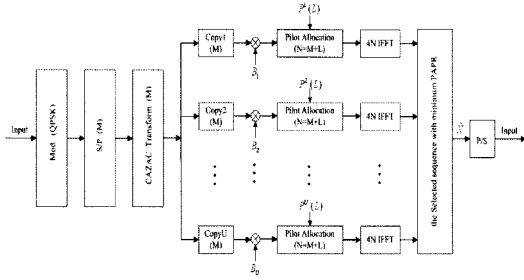


그림 2. Method 2의 SLM을 적용한 OFDM 통신 시스템

Fig. 2. OFDM system using the SLM of method 2.

성한다. 서로 다른 위상 시퀀스가 곱해진 U 개의 신호는 각각의 PAPR을 계산하여 가장 작은 PAPR을 가지는 신호를 선택하여 전송하고, 선택된 신호의 위상 시퀀스 인덱스를 부가 정보로 송신한다. 그러나 부가 정보의 사용으로 인해 추가적인 주파수 대역의 손실을 가져온다. 또한, 삽입된 파일럿이 SLM의 위상 회전 시퀀스에 의해 곱해지므로 정확한 채널을 추정하기 어려운 단점을 지니고 있다. 즉, 파일럿에 위상 회전이 있는 SLM(Method 1) 기법은 ICI (Inter-Carrier Interference) 등이 발생할 수 있는 채널 환경에서 파일럿 자체가 왜곡될 수 있기 때문에 최적의 채널 추정 성능을 얻을 수 없게 된다.

그림 2는 Method 2의 SLM 기법을 적용하였을 때의 전체 블록도이다. Method 2는 Method 1과 비교하여 위상 회전 시퀀스가 곱해진 후에 파일럿을 삽입하여 파일럿이 위상 회전되지 않게 한 것이 특징이다. 따라서 다른 간섭이나 영향이 없다고 가정할 때 수신단에서 파일럿을 통해 올바른 채널의 추정이 가능하다. Method 2와 같이 먼저 위상 회전 시퀀스를 곱하고 그 후 파일럿을 배치하게 되는 경우는 위상 회전으로 인한 1차적인 왜곡을 피할 수 있으며, 수신단에서 FFT 후 바로 파일럿을 통해 채널을 추정할 수 있는 이점이 있다. 그러나, Method 1과 Method 2 모두 선택된 위상 회전 시퀀스의 인덱스를 부가 정보를 통해 전송해야 하므로 추가적인 대역폭의 손실을 가져온다.

따라서 Method 3의 SLM 기법은 표 1과 같이 위상 회전 시퀀스의 정보를 전송하기 위해서 각 복사된 신호에 삽입되는 파일럿 P^u 의 시퀀스를 이용한다.

CAZAC 행렬 변환된 입력 X 를 나타낸 식 (3)을

표 1. 사용된 파일럿 시퀀스의 형태

Table 1. Used pilot sequence pattern.

$U=4$	$U=8$
$P^1 = [1, 1, 1, 1]$	$P^1 = [1, 1, 1, 1]$
$P^2 = [1, 1, -1, -1]$	$P^2 = [1, 1, -1, -1]$
$P^3 = [-1, -1, 1, 1]$	$P^3 = [-1, -1, 1, 1]$
$P^4 = [-1, -1, -1, -1]$	$P^4 = [-1, -1, -1, -1]$
	$P^5 = [-1, 1, -1, 1]$
	$P^6 = [1, -1, -1, -1]$
	$P^7 = [-1, -1, -1, 1]$
	$P^8 = [1, -1, 1, -1]$

간략히 표현하면 다음과 같다.

$$X = [X[1], X[2], \dots, X[M]] \quad (5)$$

입력 심볼 시퀀스 X 는 U 개의 위상 시퀀스에 의해 위상이 변화된다.

위상 회전 시퀀스 B^u 는 다음과 같다.

$$B^u = [b_1^u, b_2^u, \dots, b_M^u]^T \quad (6)$$

SLM 기법의 위상 회전 시퀀스는 Pseudo-random 시퀀스, Walsh-Hadamard 시퀀스^[7], Golay 시퀀스^[8], Shapiro-rudin 시퀀스^[9], OVFS 시퀀스^[10] 등 여러 방법이 소개되고 있다. 본 논문에서는 일반적으로 좋은 성능을 보이는 Pseudo-random 시퀀스를 위상 회전 시퀀스로 사용하였다. Pseudo-random 위상 시퀀스는 식 (6)에서의 위상 회전 시퀀스 B^u 의 각각의 위상 회전 값인 $b_v^u = e^{+j\varphi_v^u}$ 이고, $\varphi_v^u \in [0, \pi]$ 이다. 여기서 $1 \leq v \leq M, 1 \leq u \leq U$ 이고, M 은 입력 심볼 시퀀스의 길이이고, U 는 SLM의 branch 수이다.

위상 회전 시퀀스가 곱해진 신호는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} X_u &= X[v] \cdot B^u, \\ &= [X_u[1], X_u[2], \dots, X_u[M]]^T \end{aligned} \quad (7)$$

그리고 11, 26, 39, 54번 sub-carrier 위치에는 위상 시퀀스가 곱해지지 않은 파일럿 시퀀스 P^u 를 배치한다. 파일럿이 삽입된 위상이 서로 다른 U 개의 심볼 시퀀스 X_{P_u} 를 IFFT하면 아래와 같은 심볼 시퀀스가 생성된다.

$$X_{Pu} = [X_{Pu}[1], X_{Pu}[2], \dots, X_{Pu}[N]]^T \quad (8)$$

생성된 X_{Pu} 중에서 가장 작은 PAPR을 갖는 심볼 \bar{X} 을 선택하여 전송한다.

2-4 PAPR

이론적인 최대 PAPR은 부 반송파의 개수에 의해 결정된다. 그러나 심볼당 N 개 샘플링하는 Nyquist 샘플링률은 시 연속적인 OFDM의 최대값을 나타내지 못할 수 있으므로 PAPR을 정확히 측정할 수 없다. 따라서 IFFT를 하기 전에 오버 샘플링을 적용해야 하며, 4배 이상의 오버 샘플링을 적용하면 원래의 신호와 동일하게 된다^[11].

식 (8)의 값을 다시 쓰면 시간 영역에서 L 배의 오버 샘플링된 신호 샘플은 다음과 같다.

$$x_k = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} X_n \cdot e^{j2\pi n k / N}, k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (9)$$

신호의 PAPR은 다음과 같이 정의된다.

$$PAPR = \frac{\max_{0 \leq k < N-1} |x_k|^2}{E[|x_k|^2]} \quad (10)$$

$E[|x_k|^2]$ 는 기대값으로서 신호의 평균 전력을 나타낸다^[12].

III. 시뮬레이션 및 분석

본 논문에서 사용한 시뮬레이션을 위한 조건은 표 2와 같다.

그림 3은 Pseudo-random 위상 회전 시퀀스를 사용한 SLM 기법의 PAPR 특성을 나타낸 CCDF이다.

표 2. 시뮬레이션 조건

Table 2. Simulation condition.

Modulation method	QPSK
Number of subcarrier	$N=64$
Oversampling rate	4
Phase rotation sequence	Pseudo-random
Number of SLM branches	$U=4, 8$
Number of pilot	(6.25 %)

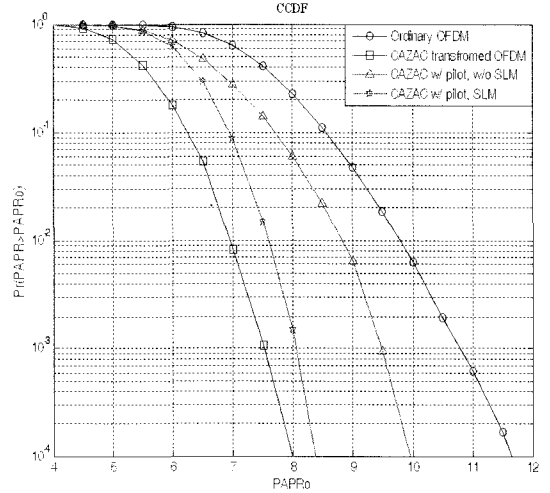


그림 3. PAPR 분포(4 branches)

Fig. 3. PAPR distribution(4 branches).

Copy branch는 총 4개이며, 이 중 첫 번째를 제외한 나머지 세 개의 copy branch만 위상 회전을 하였다. 그림을 보면 10^{-4} 에서 Pseudo-random SLM을 사용할 경우 파일럿이 삽입된 CAZAC 행렬 변환된 OFDM 시스템에 비해 약 1.6 dB 정도 개선되어 파일럿 삽입 후에도 파일럿 삽입 전과 비교하여 약 0.35 dB 정도의 차이만을 보임을 알 수 있다.

그림 4는 Pseudo-random 위상 회전 시퀀스를 사용한 SLM 기법의 PAPR 특성을 나타낸 CCDF이다. Copy branch는 총 8개를 사용하였고, 이 중 첫 번째를

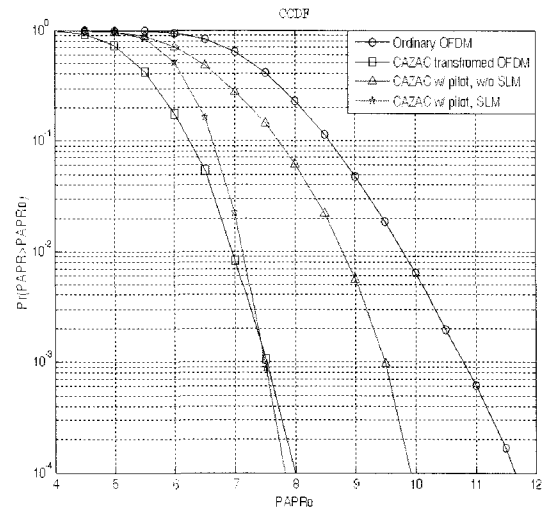


그림 4. PAPR 분포(8 branches)

Fig. 4. PAPR distribution(8 branches).

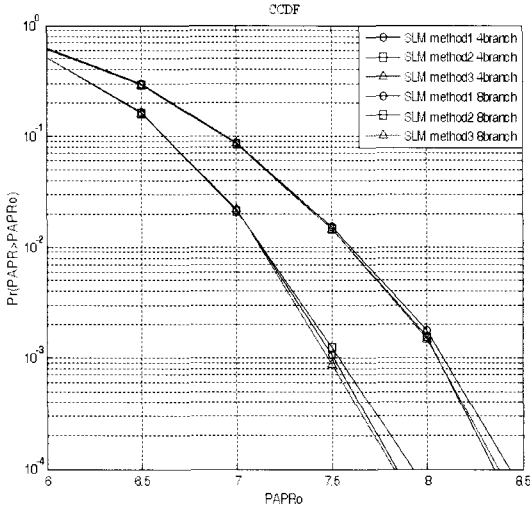


그림 5. SLM method 1, 2, 3의 PAPR 비교
Fig. 5. PAPR comparison of SLM method 1, 2, 3.

제외한 나머지 7개의 copy branch에 위상 회전을 하였다. 그림을 보면 Pseudo-random SLM을 사용한 경우 10^{-3} 에서 파일럿이 삽입된 CAZAC transformed OFDM 시스템에 비해 약 2 dB 정도 PAPR을 감소시켜 파일럿 삽입 전의 CAZAC 행렬 변환된 OFDM의 PAPR 성능과 거의 일치한다.

그림 5는 Pseudo-random 위상 회전 시퀀스를 사용한 SLM 기법의 각 방식에 따른 PAPR 특성을 비교한 CCDF이다. 세 가지 방식을 4개의 copy branch를 사용하였을 때와 8개의 copy branch를 사용하였을 때 Method 1, 2, 3 모두 비슷한 성능을 보임을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 고속의 데이터를 전송할 때 OFDM 시스템에서 발생하는 PAPR을 저감하기 위한 CAZAC 행렬 변환 기법을 적용하였다. Pseudo-random 시퀀스를 적용하여 4개의 SLM branch를 사용할 경우 파일럿을 배치하기 이전의 CAZAC 행렬 변환된 OFDM 시스템과 비교하여 약 0.35 dB, 8개의 SLM branch를 사용하였을 경우에는 거의 비슷한 PAPR 성능을 보였다. CAZAC 행렬 변환 기법과 SLM 기법 모두 PAPR을 저감하기 위한 기법으로 두 가지 기법을 모두 사용하였을 경우, 시스템의 복잡도가 증가한

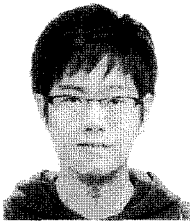
다는 단점이 있으나, 파일럿을 삽입하고도 일반적인 OFDM에 비해 3 dB 이상의 개선된 성능을 보인다. 또한 올바른 채널 추정을 위해서 파일럿의 위상이 회전하지 않도록 위상 회전 시퀀스를 재배치한 경우의 SLM(Method 2)을 사용하였을 경우, 그리고 Method 2에 부가 정보로 인한 대역폭의 손실을 막기 위해서 선택되는 위상 회전 시퀀스에 따라 서로 다른 파일럿을 삽입하여 부가 정보를 사용하지 않는 방식(Method 3)을 추가하였을 경우 모두 PAPR의 성능 저하에는 거의 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] J. A. C. Bingham, "Multi-carrier modulation for data transmission: an idea whose time has come", *IEEE Communications Magazine*, vol. 28, no. 5, pp. 5-14, May 1990.
- [2] P. Ramjee, *OFDM for Wireless Communications Systems*, Artech House, Incorporated, 2000.
- [3] S. Coleri, M. Ergen, A. Puri, and A. Bahai, "Channel estimation techniques based on pilot arrangement in OFDM systems", *IEEE Trans. Broadcasting*, pp. 223-229, Sep. 2002.
- [4] Ahmad R. S. Bahai, Burton R. Saltzberg, and Mustafa Ergen, *Multi-Carrier Digital Communications Theory and Applications of OFDM*, Springer Science +Business Media LLC, 2004.
- [5] Runhe Qiu, Zhongli Wu, and Shan Zhu, "A novel PAPR reduction method in OFDM systems by using CAZAC matrix transform", *Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, WiCOM '08. 4th International Conference*, pp. 1-4, Oct. 2008.
- [6] R. Bäuml, R. Fischer, and J. Huber, "Reducing the peak-to-average power ratio of multicarrier modulation by selected mapping", *Electron. Lett.*, vol. 32, no. 22, pp. 2056-2057, Oct. 1996.
- [7] Sang-Woo Kim, Jin-Kwan Kim, and Heung-Gyoon Ryu, "A computational complexity reduction scheme using Walsh Hadamard sequence in SLM method", *IEEE Communications, Circuits and Systems*

- Proceedings, 2006 International Conference on*, vol. 2, pp. 762-766, Jun. 2009.
- [8] H. Ochiai, H. Imai, "OFDM-CDMA with peak power reduction based on the spreading sequences", *IEEE ICC 98*, pp. 1299-1303, Atlanta, Jun. 1998.
- [9] S. Boyd, "Multitone signals with low crest factors", *IEEE Trans. Circuits Syst.*, vol. CAS-33, no. 10, Oct. 1986.
- [10] K. Okawa, F. Adachi, "Orthogonal forward link using orthogonal multi-spreading factor codes for coherent DS-CDMA mobile radio", *IEICE Trans. Commun.*, vol. E81-B, no. 4, Apr. 1998.
- [11] C. Tellambura, "Computation of the continuous-time PAR of an OFDM signal with BPSK subcarriers", *IEEE Commun. Lett.*, vol. 5, no. 5, May pp. 185-187, 2001.
- [12] Seung Hee Han, Jae Hong Lee, "An overview of peak-to-average power ratio reduction technique for multicarrier transmission", *IEEE Wireless Comm.*, vol. 12, pp. 56-65, Apr. 2005.

안 동 건



2009년 2월: 충북대학교 전기전자
컴퓨터공학부 (공학사)
2009년 3월~현재: 충북대학교 전자
공학과 석사과정
[주 관심분야] 무선 통신 시스템, 위
성통신, B3G/4G 이동통신 시스템

유 흥 균



1988년~현재: 충북대학교 전자공
학과 교수
2002년 3월~2004년 2월: 충북대학
교 컴퓨터정보통신연구소 소장
1996년~현재: IEEE, IET 논문 심사
위원
2002년: 한국전자과학회 학술상 수
상
2008년: ICWMC 2008 국제학술대회 "Best Paper Award" 수
상
[주 관심분야] 무선 통신 시스템, 위성 통신, B3G/4G 이동
통신 시스템, 통신 회로 설계 및 통신 신호 처리