

OFDM 신호의 PAPR 감소를 위한 적은 연산량을 가지는 새로운 Blind SLM 기법에 관한 연구

정회원 주 현 승*, 정회원 허 석 중*, 정회원 전 현 배*, 종신회원 노 종 선*, 종신회원 신 동 준*
*서울대학교, **한양대학교

joohs@ccl.snu.ac.kr, hsjbest@ccl.snu.ac.kr, lucidream@ccl.snu.ac.kr, jsno@snu.ac.kr,
djshin@hanyang.ac.kr

New Blind SLM with Low Complexity for PAPR Reduction of OFDM Signals

Hyun-Seung Joo* Member, Seok-Joong Heo* Member, Hyun-Bae Jeon* Member, Jong-Seon No* Life
Member, Dong-Joon Shin** Life Member
*Seoul National Univ., **Hanyang Univ.

요 약

선택사상기법 (SLM; selected mapping)은 직교 주파수 분할 다중 반송파 (OFDM; orthogonal frequency division multiplexing) 시스템의 최대 전력 대 평균 전력 비율 (PAPR; peak to average-power ratio)을 감소하기 위해서 잘 알려진 방법이다. 하지만 SLM 기법은 송신단에서 사용된 위상 시퀀스를 찾기 위해 수신단으로 부가 정보 (SI; side information)를 보내야 한다. 본 논문에서는 m-sequence 를 위상 시퀀스로 사용하면서 적은 연산량을 가지는 새로운 blind SLM 기법을 제안한다. 송신단에서 사용된 위상 시퀀스를 알기 위해 연산량이 적은 최대 우도 (ML; maximum likelihood) 탐색기를 사용한다. 이 탐색기를 이용하면 복호 복잡도가 크게 감소한다. 이 ML 탐색기는 Gaussian 백색 잡음 (AWGN; additive white Gaussian noise) 채널에서 성능이 좋다는 점을 모의실험 결과를 통하여 분석한다.

Key Words : Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM), selected mapping (SLM), peak to average power (PAPR), side information (SI), m-sequence

ABSTRACT

Selected mapping (SLM) is a well-known method for the peak to average power (PAPR) reduction in orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) systems. However, SLM scheme must send explicit side information to the receiver in order to search the phase sequence used in the transmitter. In this paper, we propose a new blind SLM scheme with low complexity using the m-sequence for OFDM. We use a modified maximum likelihood (ML) searcher with low complexity to know side information. This method reduces greatly the decoding complexity for searching side information of the phase sequence. This searcher has great performance of bit error rate (BER) over additive whit Gaussian noise (AWGN) channel.

I. 서론

직교 주파수 분할 다중 반송파 (OFDM: Orthogonal frequency division multiplexing)는 다중 경로 페이딩 (multipath fading) 채널에서 효과적인 전송 방법으로 알려져 있다. 또한 여러 개의 부반송파 (subcarrier)를 사용함으로써 데이터 전송률을 높일 수 있어 채널 용량이 극대화되는 장점을 가진다. 하지만 OFDM 시스템의 중요한 단점 중 하나는 송신단의 전송 신호의 최대 전력 대 평균 전력 비율 (PAPR: Peak to average power ratio)이 크다는 점이다.

이러한 PAPR의 범위는 부반송파의 수에 비례하여 증가한다. OFDM 신호는 이 PAPR 특성 때문에 고전력 증폭기 (HPA: High power amplifier)로 인한 비선형 특성을 가지게 되어서 대역내 왜곡 (in-band distortion)과 대역외 방사 (out of band radiation)가 발생한다 [1].

선택사상기법 (SLM: selected mapping)은 PAPR의 문제를 해결하기 위한 방법 중 하나로 잘 알려져 있다 [2]. SLM은 데이터 시퀀스로부터 U 개의 독립적인 심볼을 만들어서 그 중 가장 작은 PAPR을 갖는 심볼을 전송하는 방법이다. U 개의 심볼들은 동일한 데이터를 위상 시퀀스에 의해 위상 변화한 벡터이다.

SLM의 큰 단점 중 하나는 수신단에서 원래의 OFDM 심볼을 찾기 위해서는 송신단에서 사용된 위상

본 연구는 교육과학기술부, 지식경제부, 노동부의 출연금으로 수행한 최우수실험실 지원 사업과 BK21 사업에 의한 연구 결과입니다.

시퀀스의 부가 정보 (SI: side information)를 보내야 된다는 점이다. 이러한 부가 정보는 전송 효율을 약간 감소시키는 원인이 되며 또한 잘못된 부가 정보는 비트 오류율 (BER: bit error rate) 성능에 중대한 영향을 미친다. 따라서 부가 정보를 보내지 않아도 사용된 위상 시퀀스를 찾을 수 있는 몇 가지의 blind SLM 방법이 제안되었다 [3], [4]. 하지만 이러한 blind SLM 방법은 복잡도가 굉장히 커서 구현을 하기 어렵거나 큰 BER 성능 열화를 가져왔다.

본 논문에서는 적은 복잡도를 가지는 새로운 blind SLM 기법을 제안한다. 이 방법은 적은 복호 복잡도를 가지고 있고 약간의 BER 성능만을 열화시킨다. 새로운 blind SLM 에서는 기존의 random 위상 시퀀스와 사용하는 것과 달리 m-sequence 를 사용한다. m-sequence 는 이미 가장 최적화된 SLM 위상 시퀀스로 알려져 있다 [5]. 부가 정보를 OFDM 심볼에 실어 전송하기 위해 구간 분할과 위상 회전을 이용한다. 수신단에서 부가 정보를 찾기 위해서는 최대 우도 (ML: maximum likelihood) 탐색기 (searcher)를 이용한다. 이 blind SLM 방법은 BER 성능 열화가 거의 없고 기존의 SLM 과 동일한 PAPR 감소 성능을 가지고 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II 장에서는 기존의 blind SLM 기법을 소개하고 새로운 blind SLM 을 제안한다. III 장에서는 모의실험을 통해 제안된 방법의 성능을 분석하고, IV 장에서는 결론을 내린다.

II. 기존의 Blind SLM 기법

N 개의 부반송파를 사용하는 OFDM 시스템에서의 입력 심볼 시퀀스 $\mathbf{X}=[X_0 X_1 X_2 \dots X_{N-1}]$ 에 대하여 이산 OFDM 신호는 다음과 같이 표현된다.

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

여기서 X_n 은 n 번째 부반송파의 입력 데이터를 의미하고 N 은 부반송파의 수이다. 각 데이터는 정해진 성상도 Q 에 존재한다.

SLM 기법은 U 개의 위상 시퀀스를 사용하고 이는 다음과 같이 주어진다.

$$\mathbf{P}_u = \left[e^{j\phi_u^0} e^{j\phi_u^1} \dots e^{j\phi_u^{N-1}} \right]^T \quad (2)$$

여기서 $\phi_u^m \in (0, 2\pi]$ 이고 $u \in \{0, 1, \dots, U-1\}$ 이다. 임의의 두 벡터 \mathbf{a} 와 \mathbf{b} 의 곱벡터를 $\mathbf{a} \otimes \mathbf{b}$ 으로 두면 데이터 벡터 \mathbf{X} 에 대해서 가장 작은 PAPR 을 가지는 시퀀스를 $\mathbf{X} \otimes \mathbf{P}_{\tilde{u}}$, $\tilde{u} \in \{0, 1, \dots, U-1\}$ 으로 표현할 수 있다. 이때 \tilde{u} 는 OFDM 심볼이 가장 작은 PAPR 을 가지게 하는 위상 시퀀스를 나타낸다.

[3]에 제안된 기존의 blind SLM 은 부가 정보를 보내지 않기 위해 위상 시퀀스는 다음과 같은 성질을 가지고 있어야 한다. 1) 데이터 심볼 X_n 은 주어진 심볼 성상도 Q 로 제한된다. 2) 위상 시퀀스 \mathbf{P}_u 는 정해져 있고 송신단과 수신단에서 사전에 알고 있어야 한다. 3) $\mathbf{X} \otimes \mathbf{P}_u$ 와 $\mathbf{X} \otimes \mathbf{P}_v$ 는 $u \neq v$ 일 때 충분히 달라야 한다. 이 성질에 대한 필요한 조건은 모든 n 과 u 에 대해서 $X_n e^{j\phi_u^n} \notin Q$ 이어야 한다. 따라서 이러한 조건을 만족하는 \mathbf{P}_u 를 선택해야 한다.

기존의 blind SLM 기법은 M-PSK 또는 M-QAM 복호기를 사용하지 않고 어떤 위상 시퀀스의 사용

여부에 상관없는 새로운 차선 ML 복호기를 사용한다. 만약 \mathbf{P}_u 와 \mathbf{P}_v 사이에 Hamming distance 가 충분히 크다면 이 차선 ML 복호기는 매우 좋은 성능을 보인다. 주파수 영역의 수신된 심볼 R_n 은 다음과 같이 표현된다.

$$R_n = H_n X_n e^{j\phi_n^{\tilde{u}}} + N_n \quad (3)$$

여기서 H_n 은 n 번째 부반송파에 대한 페이딩 채널의 주파수 응답이고 N_n 은 n 번째 부반송파의 Gaussian 백색 잡음 (AWGN: Additive white Gaussian noise) 샘플이다. 송신단에서 PAPR 을 줄이기 위해 사용된 위상 시퀀스의 부가 정보 \tilde{u} 는 알려지지 않지만 차선 ML 복호기는 결정 매트릭 (decision metric)을 사용하여 데이터 시퀀스를 복호할 수 있다. 차선 ML 복호기의 매트릭은 다음과 같이 표현된다.

$$D_{so} = \min_{\mathbf{P}_{\tilde{u}}, \tilde{u} \in \{0, 1, \dots, U-1\}} \sum_{n=0}^{N-1} \min_{\hat{X}_n \in Q} \left| R_n e^{-j\phi_n^{\tilde{u}}} - H_n \hat{X}_n \right|^2 \quad (4)$$

Blind SLM 기법의 데이터 시퀀스 복호는 (4)에 의해 위상 시퀀스 탐색과 동시에 이루어진다. 복호 심볼은 R_n 을 $e^{-j\phi_n^{\tilde{u}}}$ 만큼 위상 회전한 후 이와 가장 가까운 성상도 Q 상의 점 \hat{X}_n 으로 결정된다. 이러한 hard decision 은 각 부반송파마다 하여 하나의 데이터 시퀀스를 결정한다. 또한 이것을 위상 시퀀스 $\mathbf{P}_{\tilde{u}}$, $u \in \{0, 1, \dots, U-1\}$ 에 대해서 U 번 반복한다. 따라서 (4)를 풀기 위해 복소 곱셈 연산을 총 UqN 해야 한다. 여기서 q 는 송신단의 변조 방식에 따라 결정된다. 이 차선 ML 복호기는 복잡도가 너무 크기 때문에 구현할 수 없다. 따라서 다음 장에서 이러한 문제를 해결할 수 있는 새로운 blind SLM 을 제안한다.

III. 새로운 Blind SLM 기법

기존의 랜덤 위상 시퀀스를 사용하지 않고 새로운 blind SLM 기법은 $\phi_u^m \in \{1, -1\}$ 과 $u \in \{0, 1, \dots, U-1\}$ 을 가지는 m-sequence, $\mathbf{P}_u = [e^{j\phi_u^0} e^{j\phi_u^1} \dots e^{j\phi_u^{N-1}}]^T$ 를 사용한다. m-sequence 가 SLM 에서 최적화된 위상 시퀀스 중 하나라는 것은 [5]에서 논의되었다. 새로운 blind SLM 기법은 가장 작은 PAPR 을 가지는 m-sequence 를 선택한 후 부가 정보를 OFDM 심볼 시퀀스에 포함시키기 위해 위상 회전과 구간 분할을 이용한다. 이 방법을 이용하면 사용되지 않은 다른 m-sequence 와 구별할 수 있다.

먼저 기존의 SLM 기법과 같이 m-sequence 에 의해 가장 작은 PAPR 을 가지는 대안의 OFDM 심볼 시퀀스의 구간을 $\log_2 U$ 개로 분할한다. 어떤 m-sequence 가 선택 되었느냐에 따라 대안의 OFDM 심볼 시퀀스의 구간을 $(e^{j\pi/4})^{b, u}$ 을 각 구간에 따라 곱하여 위상을 회전해준다. 여기서 $v \in \{1, 2, \dots, \log_2 U\}$ 는 각 구간의 번호를 의미하다. 그리고 $b \in \{0, 1\}$ 이고 $u = \{0, 1, \dots, U-1\}$ 이다. m-sequence 는 단지 0 과 π 만을 가질 수 있기 때문에 기존의 blind SLM 의 조건에 따라 수신단에서 어떤 m-sequence 를 사용하였는지 구분할 수가 없다. 그러므로 선택된 m-sequence 에 따라 구간별로 $\pi/4$ 의 위상 회전은 마치 두 개의 성상도를 사용한 효과를 갖게 되어 다른 m-sequence 를 사용한 심볼 시퀀스와의 Hamming distance 를 최대화시킨다. 그림 1 은 $U=4$ 와 $U=8$ 일 때의 구간 분할과 $\pi/4$ 의 위상 회전에 대한 예이다.

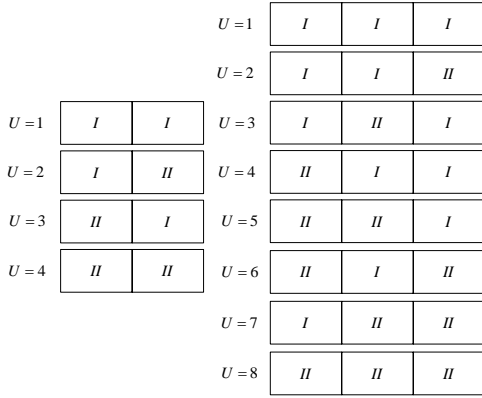


그림 1. $U=4, 8$ 일 때 위상 시퀀스의 구간 분할과 위상 회전에 관한 예.

여기서 I 는 위상 회전을 시키지 않은 구간을 의미하고 II 는 $\pi/4$ 의 위상 회전을 시키는 구간을 의미한다.

기존의 blind SLM 기법과 달리 이 방법에서는 기존의 ML 탐색기를 사용한다. 그림 2 는 ML 탐색기를 이용한 복호 과정을 보여준다. 수신단에서는 ML 탐색기를 이용하여 선택된 m-sequence 를 부가 정보 없이 찾을 수 있다. ML 탐색기의 각 구간 결정 메트릭은 다음과 같이 표현한다.

$$D_B = \min_{q \in \{0,1\}} \sum_{n=a_v}^{b_v} \min_{\hat{x} \in Q} \left| R_n e^{-j(\pi/4)^q} - H_n \hat{x}_n \right|^2 \quad (5)$$

여기서 $v \in \{1, 2, \dots, \log_2 U\}$ 이고 각 구간의 부반송파 범위는 $[a_v, b_v]$ 이다. (5)를 이용하여 구간의 위상이 $\pi/4$ 가 되었는지 여부를 결정할 수 있다. 각 구간의 위상 회전 여부를 보고 선택된 m-sequence 를 결정할 수 있다. m-sequence 를 결정한 후 $\pi/4$ 만큼 위상 회전된 구간을 원래 성상도를 가질 수 있게 복원시킨 후 사용된 m-sequence 를 이용해 전체 OFDM 심볼 시퀀스를 복원해준다.

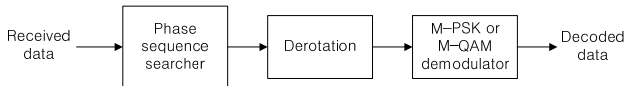


그림 2. 탐색기를 이용한 새로운 blind SLM 기법의 복호 과정.

이 탐색기는 AGWN 채널에서 선택된 m-sequence 의 탐색 실패가 거의 발생하지 않는다. 따라서 BER 열화도 발생하지 않는다. 그리고 기존의 blind SLM 의 복호기가 UqN 의 복잡도에 가지는 것에 비해서 ML 탐색기는 단지 $2qN$ 의 추가적인 연산만이 필요하다. 따라서 M-PSK 또는 M-QAM 의 복호기의 연산까지 고려하면 전체 복잡도는 $3qN$ 으로 감소된다.

새로운 방법의 계산 복잡도 감소 비율 (CCRR: Computational complexity reduction ratio)은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \text{CCRR} &= \left(\frac{UqN - 3qN}{UqN} \right) \times 100 \\ &= \left(\frac{U-3}{U} \right) \times 100 (\%) \end{aligned} \quad (6)$$

표 1 은 (6)을 이용해서 기존의 방법과 새로운 방법에 대한 복잡도를 비교하였다. U 가 커질수록 복잡도 감소 비율이 증가함을 확인할 수 있다.

	$U=4$	$U=8$	$U=16$
기존의 Blind SLM	$4qN$	$8qN$	$16qN$
새로운 Blind SLM	$3qN$	$3qN$	$3qN$
CCRR	25%	62.5%	81.25%

표 1. 기존의 Blind SLM 과 새로운 Blind SLM 의 복잡도 비교

IV. 모의실험 결과

모의실험은 QPSK 의 변조를 하고 부반송파의 수가 $N=64, 256$ 일 때인 OFDM 시스템에서 수행하였다. HPA 는 고려하지 않았고 AWGN 채널에 대해서 실험하였다. 과표본은 하지 않았고 10^8 개의 이진 데이터에 대해서 BER 을 살펴보았다. 새로운 blind SLM 은 본 논문에서 제안한 탐색 알고리즘으로는 (5)를 사용하였다. 탐색기를 이용한 blind SLM 기법의 BER 성능과 PAPR 성능을 기존의 blind SLM 기법과 비교하였다.

그림 3 은 부반송파의 수가 $N=64$ 이고 $U=4, 8, 16$ 인 경우에 따른 BER 성능을 비교하였다.

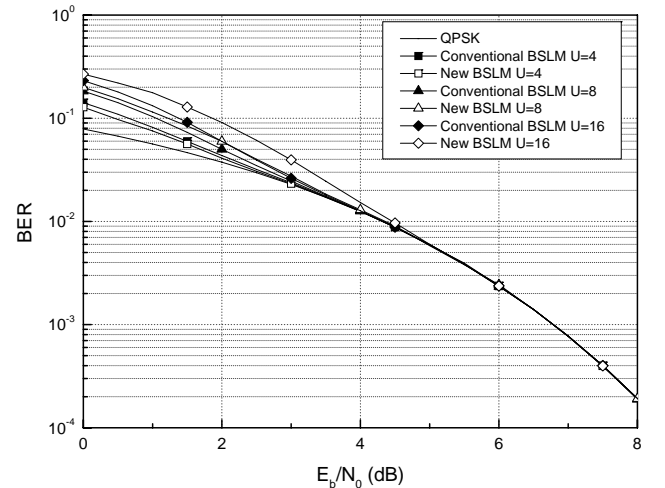


그림 3. $N=64$ 일 때 U 에 따른 기존의 blind SLM 과 새로운 blind SLM 의 BER 성능 비교.

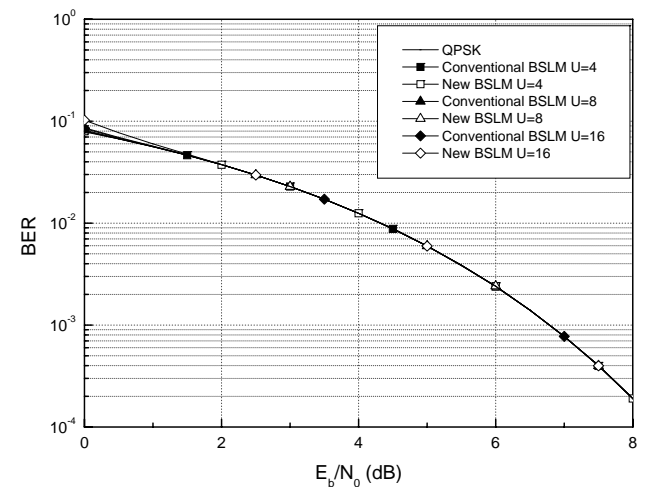


그림 4. $N=256$ 일 때 U 에 따른 기존의 blind SLM 과 새로운 blind SLM 의 BER 성능 비교.

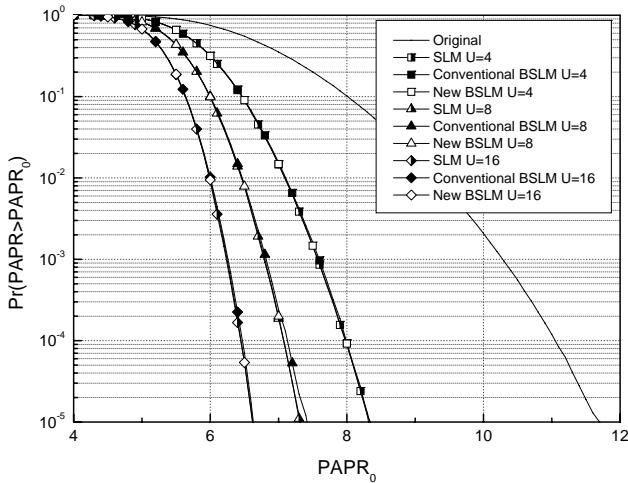


그림 5. $N=64$ 일 때 U 에 따른 기존의 blind SLM 과 새로운 blind SLM 의 PAPR CCDF.

기존의 blind SLM 에 비해서는 BER 성능이 약간 열화되지만 아주 낮은 신호 대비 잡음 (SNR: signal to noise ratio)에서만 열화가 나타나고 3 dB 이상의 SNR 부터는 QPSK 의 BER 과 차이나 나지 않는다. U 가 증가할수록 기존의 blind SLM 과 제안한 방법 모두 BER 성능이 떨어진다. 두 기법 모두 U 가 증가하면 결정 매트릭 중 선택해야 되는 값이 많아지므로 선택된 위상 시퀀스의 탐색 성공 확률이 떨어진다. 하지만 U 가 증가하더라도 3 dB 이상의 SNR 에서는 BER 성능의 열화 나타나지 않는다. 그림 4 는 $N=256$ 일 때의 U 값에 따른 BER 성능을 비교하였다. 그림 4 를 통해 N 이 커지면 낮은 SNR 영역에서도 BER 성능 열화가 거의 나타나지 않는다는 것을 알 수 있다. N 이 커지면 살펴볼 수 있는 데이터 심볼이 증가해서 결정 매트릭의 값에 차이가 커지기 때문에 탐색 실패가 나타나지 않는다.

그림 5 는 기존의 blind SLM 기법과 새로운 blind SLM 의 기법에 대한 PAPR 의 상보 누적 함수를 나타낸다. 또한 비교를 위해 일반적인 최적화된 위상 시퀀스를 이용한 SLM 과 비교하였다. 그림 5 를 통해 알 수 있듯이 기존의 SLM 과 차이가 나지 않는 것을 확인할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 OFDM 신호의 PAPR 감소를 위해 적은 연산량을 가지는 새로운 blind SLM 기법을 제안하였다. 이 기법은 SLM 에서 PAPR 을 줄이기 위해 사용하는 U 의 개수에 따라 구간 분할을 하고 각 위상 시퀀스를 구별하기 위해 위상 회전을 통해 부가 정보를 담아 전송할 수 있었다. 위상 시퀀스로는 랜덤 위상 시퀀스가 아닌 m-sequence 를 사용하였고 탐색을 위한 위상 회전을 통해 두 개의 성상도를 사용하는 효과를 가질 수 있었다. 기존의 blind SLM 방법과 비교하여 낮은 SNR 영역에서 약간의 성능 열화는 있지만 복잡도를 크게 낮출 수 있었다. U 가 커질 때에는 BER 성능 열화가 발생하지만 부반송파의 수 N 이 증가하면 BER 성능 열화가 거의 발생하지 않았다. 그리고 PAPR 의 성능은 SLM 의 방법과 동일함을 모의실험 결과를 통해 확인하였다.

참고 문헌

- [1] H. Ochiai and H. Imai, " Performance of the deliberate clipping with adaptive symbol selection for strictly band-limited OFDM systems," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 18, no. 11, pp. 2270-2277, Nov. 2000.
- [2] S. H. Müller, R.W. Bäuml, R. F. H. Fischer, and J. B. Huber, " OFDM with reduced peak-to-average power ratio by multiple signal representation," *Annals of Telecommun.*, vol. 52, no. 1- 2, pp. 58- 67, Feb. 1997.
- [3] A. D. S. Jayalath and C. Tellambura, " SLM and PTS peak-power reduction of OFDM signals without side information," *IEEE Trans. Wireless Communication*, vol. 4, no. 5, pp. 2006-2012, Sep. 2005.
- [4] Robert J. Baxley and G. Tong Zhou, " MAP Metric for Blind Phase Sequence Detection in Selected Mapping," *IEEE Transactions on Broadcasting*. vol. 51, no. 4, pp. 565-570, Dec. 2005.
- [5] Dae-Woon Lim, Seok-Joong Heo, Jong-Seon No, and Habong Chung, "On the phase sequence set of SLM OFDM scheme for a crest factor reduction," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 54, no. 5, pp. 1931-1935, May 2006.