

OFDM 시스템에서 PAR 감소를 위한 SLM 기법의 성능 분석

Performance Analysis of SLM Method for PAR Reduction Based on OFDM System

이상근*, 이윤현**, 진성우***

Sang-Geun Lee*, Yoon-Hyun Lee** and Seong-Woo Jin***

요 약

현재 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)은 다중경로 채널 환경에서 고속 통신에 적합한 방식으로 각광을 받고 있으나, 몇 가지 단점을 지니고 있다. 단일 반송파 방식에 비해 PAR(Peak-to-Average power Ratio)이 높다는 점은 그러한 단점 가운데 하나이다. 신호의 PAR이 높을 경우 고출력 증폭기를 통과하면서 비선형 왜곡이 발생할 수 있고, 이를 방지하기 위해서는 고출력 증폭기의 선형 구간을 비효율적으로 증가시켜야 하는 문제가 발생한다. 본 논문에서는 OFDM의 PAR 감소 기법중 하나의 OFDM 심벌을 나타내는 다수의 신호를 발생(Mapping)시킨 후, 그 중 가장 낮은 PAR을 갖는 신호를 선택해서 전송하는 SLM(Selected Mapping) 기법에 대한 성능을 분석한다.

Abstract

In these days, OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) is adopted to support high-speed data communication based on multi-path RF channel, but it has some weak point. One of those is that it has a higher PAR(peak-to-average power ratio) compared with single-carrier method. If some PAR of the transmitted signal is high, nonlinear amplitude distortion has occurred when it pass through the HPA(high power amplifier). There is a solution to prevent nonlinear distortion using higher peak power HPA, but it makes inefficiency and a cost problem. In this paper, we choose the SLM(Selected Mapping) scheme, which transmit the lowest PAR signal after OFDM symbol mapping, in various schemes reducing PAR for OFDM system. And we derived the performances of SLM method in fading channel through computer simulations.

key words : OFDM, PAR, PAPR, SLM

I. 서 론

CDMA 위주의 이동통신 시스템의 기술적 제약점을 극복하기 위하여 OFDM 방식의 이동통신 기술이 상용화 단계에 이르고 있다. 이러한 OFDM 방식은 고

속의 데이터를 저속의 심볼로 병렬 전송하기에 다중 반사파에 의한 ISI(Inter Symbol Interference)로부터 상대적으로 자유로울 수 있는 장점을 갖고 있지만 다수개의 부반송파의 겹침에 의한 피크 전력이 증가하게 된다. 이러한 피크 전력의 선형성을 보장하기 위

* 청강문화산업대학 이동통신공학과 (Chungkang College of Cultural Industries)

** 한국항공대학교 정보통신공학과 (Hankuk Aviation University)

*** (주)엠티아이 (MTI)

· 제1저자 (First Author) : 이상근

· 접수일자 : 2006년 1월 20일

한 파워앰프의 투자비 증가 또는 효율성 감소가 문제점으로 나타나게 된다. 따라서 이러한 최대전력을 감소시키기 위한 여러 가지 기법들이 제안되고 있다. 제안되고 있는 기법들은 Clipping, 윈도우 기법, PRC (Peak Reduction Carriers) 기법, SLM (Selected Mapping) 기법, PTS (Partial Transmit Sequences) 기법, 블록 코딩을 기반으로 한 기법 등이 있다.

본 논문에서는 OFDM 시스템에서 SLM 기법을 적용하여 최대전력 제어의 성능을 분석하도록 한다.

본 논문의 구성은 II장에서 OFDM 피크파워의 정의에 대하여, III장에서는 SLM 기법에 대하여 설명하며 IV장에서는 시뮬레이션을 통하여 SLM 기법의 성능을 분석하고 V장에서 결론을 맺는다.

II. OFDM 시스템에서의 PAR

먼저, M 전송 안테나와 N 수신 안테나를 사용하는 K 부반송파의 OFDM 시스템을 고려한다. 만약 i 번째 전송 안테나의 데이터 형태로써 주파수축 계수 $X_i(k)$ 를 나타낸다면, $x(n)$ 은 i 번째 전송 안테나 데이터 형태의 IFFT 결과이다. 그 관계는 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$x_i(n) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j2\pi nk/N} \quad (1)$$

여기서, 주파수 표본 순서 k 와 시간 표본 순서 n 의 범위는 $0 \leq k < N$, $0 \leq n < N$ 이며, X_k 는 k 번째 부반송파에 입력되는 변조 표준이다.

또한, OFDM 심벌의 시간축 계수 n 은 $(0, 1, \dots, K-1)$ 와 같이 나타낼 수 있는데, 이때 i 번째 전송 안테나의 데이터 벡터 \mathbb{X}_i 는 다음과 같이 나타낸다.

$$\mathbb{X}_i = [x_i(0), x_i(1), \dots, x_i(n), \dots, x_i(K-1)]^T \quad (2)$$

OFDM 신호는 각 부반송파에서 독립적으로 변조되기 때문에, 결합된 OFDM 신호는 어떤 경우에 대해서는 큰 최대전력을 가질 것이다. 그 최대전력은 부반

송파의 수가 증가함에 따라서 증가된다. 최대전력은 일반적으로 PAR 관점에서 구해진다[1].

$$PAR \equiv \frac{\max |x_i(n)|^2}{E[|x_i(n)|^2]} \quad (3)$$

여기서 $\max |x_i(n)|^2$ 는 최대 포락선 전력을 나타내고, $E[|x_i(n)|^2]$ 은 평균전력을 나타낸다. 부반송파의 수가 K 일 때 최대 PAR는 K 이다.

부반송파의 개수 K 가 충분히 크다면 변조된 신호는 중심극한정리(central limit theorem)에 의하여 출력신호의 실수부와 허수부의 크기가 모두 가우스 분포를 가지며 OFDM 신호의 크기는 Rayleigh 분포를 가진다. 전력분포는 자유도가 2이고 평균이 0인 중심 chi-square 분포가 되어, 전력의 확률밀도 함수는 다음 식처럼 나타낼 수 있다[1],[2].

$$F(z) = 1 - e^{-PAR_0} \quad (4)$$

여기서 PAR_0 은 특정 임계값이 된다.

OFDM 샘플들이 서로 상관성이 없는 (uncorrelated) 확률변수라 한다면, 어떠한 특정한 임계값 PAR_0 를 초과하는 PAR에 대한 확률 값은 다음과 같이 정의된다.

$$Pr [PAR > PAR_0] \equiv 1 - (1 - e^{-PAR_0})^K \quad (5)$$

III. PAR 감소를 위한 SLM 기법

OFDM의 PAR 감소를 위해 지금까지 여러 기법들이 연구되었는데, 그 중 한 가지 방법이 SLM(Selected Mapping)이다. 기본적으로 SLM은 Multiple Signal Representation에 기반한 다이버시티 기법이다. 하나의 OFDM 심벌을 나타내는 다수의 신호를 발생(Mapping)시킨 후, 그 중 가장 낮은 PAR을 갖는 신호를 선택해서 전송하는 방식이다 [3]-[5].

SLM 방식에서는 V 개의 통계적으로 독립적인

OFDM 심벌들은 동일한 정보를 나타낸다고 가정한다. SLM의 핵심은 동일한 정보를 나타내는 V 개의 신호들 중에서 원하는 성질에 부합하는 하나의 특정한 신호를 선택하기 위한 것이다. 부반송파로 정보의 매핑 후에, 각 OFDM 심벌은 V 개의 벡터들 $P^{(v)} = [P^{(v)}(0), \dots, P^{(v)}(K-1)]^T$ 와 곱해진다. 그 결과로 생성되어진 $M \cdot V$ 개의 다른 OFDM 심벌들의 집합 $X_{i^{(v)}}$ 은 다음과 같이 생성된다.

$$X_{i^{(v)}} = X_i \cdot P^{(v)}, 1 \leq v \leq V \quad (6)$$

이렇게 생성된 모든 새로운 OFDM 심벌들은 IFFT로 시간축으로 변환되고 심벌들 중 가장 낮은 PAR를 가진 심벌 \tilde{x}_i 가 선택된다.

SLM을 효율적으로 이행하기 위해 $P^{(v)}(k)$ 의 구성요소는 $\pm 1, \pm j$ 로 이루어져있다. 이 구성 요소들의 승법은 서로 교환되고, 더해지고, 빼지는 과정을 통해서 단순하게 이행되어진다. i 번째 전송 안테나에 대한 V 개의 독립적인 OFDM 심벌들 $x_{i^{(v)}}$ 는 같은 정보를 나타낸다. 그리고 가장 낮은 PAR를 가진 심벌 x_i 가 선택된다. 전송할 때에 가장 낮은 PAR를 가지는 심벌을 선택하여 전송하기 때문에 특정한 임계값 PAR_0 를 초과하는 PAR_{low} 에 대한 확률 값은 다음과 같다[5].

$$Pr[PAR_{low} > PAR_0] = [1 - (1 - e^{-PAR_0})^K]^V \quad (7)$$

SLM의 핵심은 동일한 정보를 나타내는 V 개의 신호들 중에서 원하는 성질에 부합하는 하나의 특정한 신호를 선택하기 위한 것이다. i 번째 전송 안테나에 대한 V 개의 독립적인 OFDM 심벌들 $x_{i^{(v)}}$ 중에서 가장 낮은 PAR를 가진 심벌 \tilde{x}_i 가 다음 조건을 만족하면서 선택된다.

$$\tilde{v}_i = \underset{1 \leq v \leq V}{\operatorname{argmin}} \left(\max_{1 \leq n \leq K} x_{i^{(v)}(n)} \right) \quad (8)$$

여기서 \tilde{v}_i 는 i 번째 전송 안테나에 대한 V 개의 독립적인 OFDM 심벌들 $x_{i^{(v)}}$ 중 가장 낮은 PAR를 가진 심벌의 인덱스이다. 전송 심벌 \tilde{x}_i 는 $x_{i^{(\tilde{v}_i)}}$ 와 같다. 전송할 때에 가장 낮은 PAR를 가지는 심벌을 선택하여 전송하기 때문에 그 심벌의 인덱스도 같이 전송해 주어야 한다.

수신된 데이터를 복원하기 위해서 수신기는 M 전송 안테나들의 $P^{(\tilde{v}_i)}$ 에 대한 정보를 알고 있어야 한다. 따라서 전송기는 각 안테나의 사이드 정보 \tilde{v}_i 를 전송해야만 한다. 각 안테나마다의 사이드 정보 \tilde{v}_i 를 전송하기 위해 요구되는 비트 수는 $\log_2 V$ 이다.

IV. 시뮬레이션

앞서 살펴본 SLM 기법의 성능을 측정하기 위하여 AWGN 환경의 OFDM 시스템을 가정하였다. 변조기법은 16QAM을 사용하고, 부반송파의 개수는 256개를 가정하였다. 이때 SLM 기법의 branch 개수를 각각 4, 8, 16, 32, 64개로 변화시킴에 따라 OFDM 시스템의 PAR 성능을 측정한다. 표 1은 시뮬레이션 파라미터를 나타낸 것이다.

표 1. 시뮬레이션 파라미터

Table 1. Parameter of simulation.

parameters	value
Modulation	16QAM
Sub-carrier	256
Fading	AWGN
Tx ant. × Rx ant.	1×1
Number of Symbol	10 ⁴
SLM branch	4, 8, 16, 32, 64

먼저, 성능 비교를 위해 SLM 기법을 적용하지 않은 16QAM을 사용하고 256개의 부반송파를 사용하는 OFDM 시스템의 성능을 그림 1에 나타내었다. 그림 2부터 그림 4까지는 branch 개수(동일한 입력 신호로부터 발생하는 OFDM 신호의 개수)를 각각 4, 16, 64개로 변화시켜 가며 시뮬레이션을 수행하여

SLM 기법이 OFDM 신호의 PAR의 변화를 나타낸 것이다.

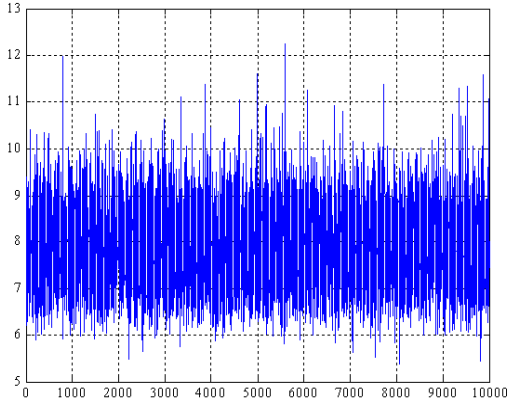


그림 1. 256개의 부반송파를 사용하는 OFDM 시스템의 PAR (SLM을 적용하지 않은 경우)
 Fig. 1. The PAR of OFDM system using 256 subcarriers (SLM is not used).

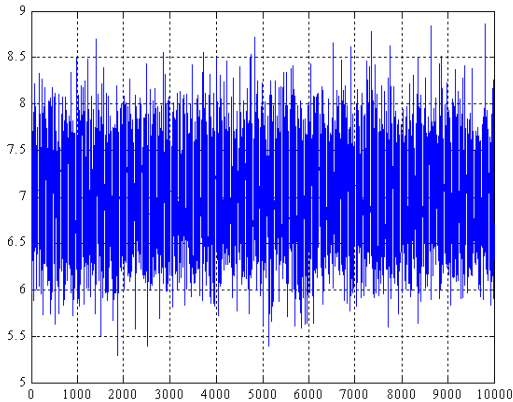


그림 2. 256개의 부반송파를 사용하는 OFDM 시스템의 PAR (SLM branch : 4인 경우)
 Fig. 2. The PAR of OFDM system using 256 subcarriers (SLM branch : 4).

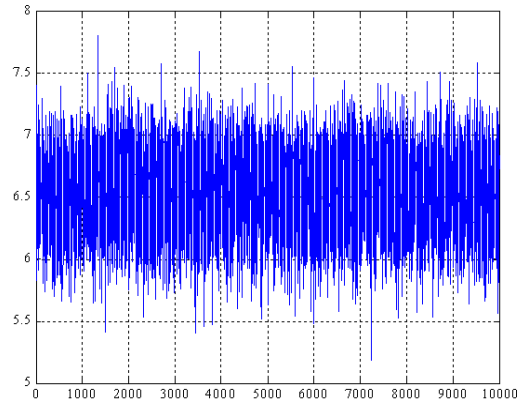


그림 3. 256개의 부반송파를 사용하는 OFDM 시스템의 PAR (SLM branch : 16인 경우)
 Fig. 3. The PAR of OFDM system using 256 subcarriers (SLM branch : 16).

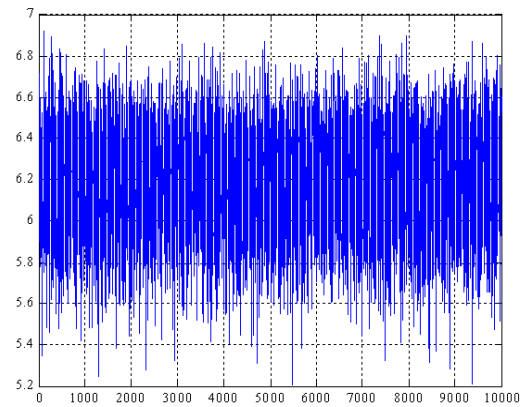


그림 4. 256개의 부반송파를 사용하는 OFDM 시스템의 PAR (SLM branch : 64인 경우)
 Fig. 4. The PAR of OFDM system using 256 subcarriers (SLM branch : 64).

시뮬레이션 결과, branch 개수가 증가함에 따라 PAR이 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 이때 각 결과의 PAR 평균치를 표에 나타내었다.

표 2. SLM branch에 따른 평균 PAR
Table 2. Average PAR for SLM branch.

SLM branch	평균 PAR(dB)
0	7.8842
4	7.0336
8	6.7751
16	6.552
32	6.3694
64	6.2147

그림 5은 표 2에 나타낸 PAR의 평균값을 계산해서 SLM branch 개수에 따라 나타낸 그림이다. 기존 OFDM에서 7.88 dB이던 PAR 값이 4개의 branch를 사용하는 SLM을 적용함으로써 7.03dB로 약 0.85 dB가 감소함을 알 수 있다. 그러나 4개 이상의 branch를 사용하는 경우, branch 개수를 64개까지 증가시켜도 얻을 수 있는 이득은 1.7dB 정도로 PAR의 감소 이득이 줄어들음을 알 수 있다. 구현상의 Complexity를 고려할 때 SLM branch를 4개 사용하는 것이 적절하다고 판단된다.

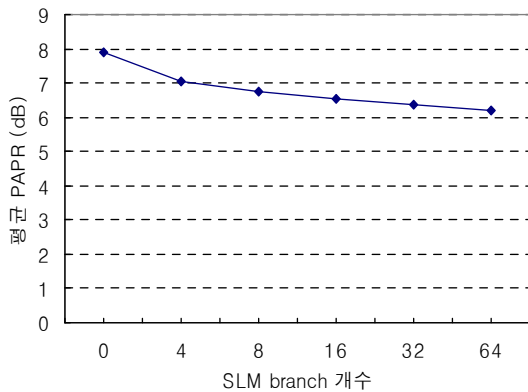


그림 5. SLM branch 수에 따른 평균 PAR (256-Carrier OFDM with SLM)
Fig. 5. The average PAR based on number of SLM branches (256-Carrier OFDM with SLM).

그림 5에서 논의한 내용은 PAR의 평균값을 대상으로 하였다. 그러나 실제 문제가 되는 것은 큰 값의 PAR이고, SLM의 효과는 작은 값의 PAR보다는 큰

값의 PAR에서 두드러지게 나타난다는 사실을 고려하면, SLM을 통해 실제 얻을 수 이득이 훨씬 크다고 할 수 있다. 아래 두 그림의 비교를 통해 이와 같은 사실을 확인할 수 있다.

그림 6은 SLM을 적용하지 않은 OFDM의 PAR 분포도와 4-branch SLM을 적용한 OFDM의 PAR 분포를 함께 나타낸 것이다. 그림에서 가로축은 PAR(dB), 세로축은 빈도수를 나타낸다. SLM을 적용함으로써 PAR이 작은 부분은 큰 변화가 없는 반면 큰 값의 PAR은 대부분 사라졌음을 알 수 있다.

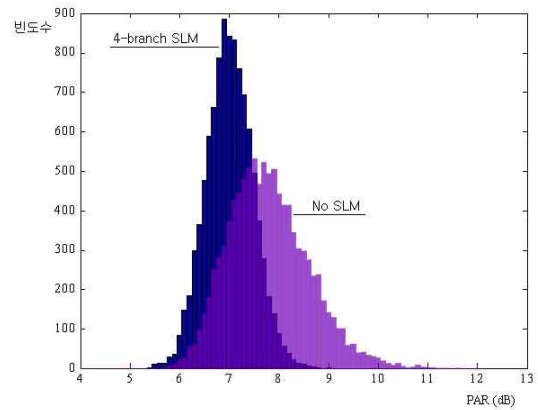


그림 6. SLM 기법에 따른 PAR의 분포 변화
Fig. 6. PAR variation for SLM scheme.

V. 결 론

본 논문에서는 OFDM의 PAR을 감소시키기 위한 방법 중 SLM 기법에 대해 고찰하였다. 이 기법은 Multiple Signal Representation에 기반한 다이버시티 기법으로, 하나의 OFDM 심벌을 나타내는 다수의 신호를 발생(Mapping)시킨 후, 그 중 가장 낮은 PAR을 갖는 신호를 선택해서 전송하는 방식이다. 성능 분석을 위해 256-carrier를 사용하는 16QAM OFDM 시스템을 가정하여 SLM branch 수를 변화시켜가며 OFDM 시스템의 PAR 성능의 변화를 측정하였다. 실험결과, 4-branch SLM을 적용함으로써 기본 시스템보다 평균 PAR이 0.83 dB 감소함을 확인하였다. 그러나, SLM 기법이 작은 값의 PAR보다는 큰 값의 PAR을 주로 감소시키는 특성을 가진다는 점을 감안할 때, SLM 적용에 의한 OFDM의 PAR 감소 효과는 더 클 것으로 예상된다.

참 고 문 헌

- [1] R. Prasad and R. V. Nee, *OFDM for Wireless Multimedia Communications*, Artech House, Boston, 2000.
- [2] C. Van Den Bos, M. H. L. Kouwenhoven and W. A. Serdijn, "The influence of non-linear distortion on OFDM bit error rate," *Proc. of ICC 2000*, vol. 2, pp. 1125-1129, 2000.
- [3] J. Telledo and J. M. Cioffi, "Efficient algorithms for reducing PAR in multicarrier systems," *Proc. of IEEE International Symposium on Information Theory*, pp. 191, Cambridge, MA, 1998.
- [4] G. Santella and F. Mazzenga, "A Hybrid analytical-simulation procedure for performance evaluation in M-QAM-OFDM schemes in presence of nonlinear distortions," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 47, no. 1, pp. 142-151, Feb. 1998.
- [5] 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.

이 상 근 (李商根)



1984년 2월 : 한국항공대학교
항공전자공학과 (공학사)
1986년 12월 : 한국항공대학교
항공전자공학과 (공학석사)
1985년~1989년 : 동양정밀
중앙연구소 군통신개발
1989년~1996년 : 삼성전자 통신연구소
1996년 10월~2002년 2월 : KTF 무선망기술팀장
2002년 3월~현재 : 청강문화산업대학 이동통신과 교수
관심분야 : 이동통신 무선접속기술, 이동통신 RF 시스템

이 윤 현



1965년 2월 : 한국항공대학교
전자공학과 (공학사)
1985년 2월 : 경희대학교 대학원
전자공학과 (공학박사)
1980년~현재 : 한국항공대학교 전
자정보통신컴퓨터공학부교수
관심분야 : 초고주파 회로 설계, 마
이크로파 및 광통신, 안테나 및 전파 전파, EMI/EMC

진 성 우



1999년 2월 : 한국항공대학교 항공통
신정보공학과 (공학사)
2002년 2월 : 한국항공대학교 정보통
신공학과 (공학석사)
2005년 3월~현재 : (주)엠티아이 연
구소 연구원
관심분야 : 이동통신 무선접속 기술