

OFDM 시스템에서 PAR을 줄이는 SMOPT 기법

학생회원 유 승 수*, 정회원 윤 석 호**, 종신회원 김 선 용*, 송 익 호***

Selective Mapping of Partial Tones (SMOPT) Scheme for PAR Reduction in OFDM Systems

Seung soo Yoo*, Seok ho Yoon**, Sun yong Kim*, Ick ho Song*** *Regular Members*

요 약

직교 주파수 분할 다중 접속(orthogonal frequency division multiplexing: OFDM) 시스템은 여러 부 반송파를 사용해 정보를 전송하기 때문에 각 부 반송파가 동위상으로 겹치면 최고 대 평균 전력 비율이 (peak-to-average power ratio: PAR) 커진다. 이 논문에서는 최고 줄임 톤을 (peak reduction tone: PRT) 사용한 PAR 감소 기법 가운데 하나로 부분 톤 선택 사상 (selective mapping of partial tones: SMOPT) 기법을 제안한다. 제안한 SMOPT 기법은 반복 수렴 알고리즘을 사용한 기존의 톤 예약 (tone reservation: TR) 기법보다 적은 복잡도로 구현이 가능하고, 최고 감소 부 반송파 위치에 덜 민감하다. 또한 병렬 구성이 가능하여 알고리즘 수행 시간을 단축할 수 있다. 이 논문에서는 이를 검증하기 위해 두 가지 사례에 대한 모의실험 환경을 구성하고, 이에 따른 복잡도와 침투 감소 부 반송파 위치, 그리고 송신 전력에 따른 PAR 감소 성능과 비트 오류율 (bit error rate: BER) 성능을 비교 분석한다.

Key Words : OFDM, PAR, PRT, TR, SMOPT

ABSTRACT

An orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) system consists of a number of independently modulated subcarriers and, thus, a high peak-to-average power ratio (PAR) can occur when the subcarriers are added coherently. The high PAR brings such disadvantages as an increased complexity of the analog-to-digital (ADC) and digital-to-analog (DAC) converters and a reduced efficiency of the radio frequency (RF) power amplifier. In this paper, we propose a novel PAR reduction scheme called selective mapping of partial tones (SMOPT). The SMOPT scheme has a reduced complexity, lower sensitivity to peak reduction tones (PRT) positions, and a shorter processing time as compared with the conventional tone reservation (TR) scheme.

The performance of the SMOPT scheme is analyzed based on the IEEE 802.11a wireless local area network (WLAN) physical layer model. Numerical results show that the SMOPT scheme outperforms the TR scheme under various scenarios.

I. 머리말

직교 주파수 분할 다중 접속(orthogonal frequen-

cy division multiplexing: OFDM) 시스템은 직교하는 여러 반송파를 사용해 정보를 전송하는 기법으로 다중 경로 페이딩에 강인하며, 데이터의 고속 전

* 건국대학교 전자공학부 (kimsy@konkuk.ac.kr), ** 성균관대학교 정보통신공학부, *** 한국과학기술원 전자전산학과

논문번호: KICS2005-01-046, 접수일자: 2005년 1월 8일.

**이 논문은 2004년도 건국대학교 학술진흥연구비 지원에 의한 논문임.

송이 가능한 장점을 갖는다. 그러나, 여러 반송파가 동위상으로 겹치면 최대 부 반송파 수만큼 최고 대 평균 전력 비율이(peak-to-average power ratio: PAR) 높아지며, 이로 말미암아 라디오 주파수 증폭기, 아날로그-디지털, 디지털-아날로그 변환기의 효율이 떨어진다. 따라서 OFDM 시스템 구현을 위해서는 효과적으로 PAR을 떨어뜨릴 수 있는 기법이 필요하다^[1].

지금까지 연구된 PAR 감소 기법은 PAR을 떨어뜨리고자 전체 부 반송파를 사용하는 기법과 특정한 부 반송파만인 최고 줄임 톤을(peak reduction tone: PRT) 사용하는 기법이 있다. PAR을 떨어뜨리고자 전체 부 반송파를 사용하는 기법은 클리핑(clipping), 첨두 윈도우링(peak windowing), 첨두 제거(peak cancelation) 기법 등의 신호 왜곡 기법과 부호화 기법, 그리고 선택 사상(selective mapping: SLM) 기법, 부분 전송 수열(partial transmit sequence: PTS) 기법 등의 스크램블링(scrambling) 기법이 있다. 그리고 PRT를 사용하는 기법은 반복 수렴 알고리즘에 의한 톤 예약(tone reservation: TR) 기법 등의 신호 왜곡 기법이 있다^{[2]-[4]}.

두 부류의 기법 가운데 PRT를 사용하는 기법은 부가 정보 전송이 필요 없으며, 수신부에서 특별한 처리 없이 송신 정보를 되찾을 수 있다는 장점이 있다. 그러나, 특정한 부 반송파를 최고값을 줄이고자 쓰므로 전체 부 반송파를 사용하는 기법보다 데이터 전송 효율이 떨어진다. 반복 수렴 알고리즘을 바탕으로 하는 TR 기법은 특정 위치의 PRT가 보장되면 구현 복잡도에 견주어 PAR 감소 성능이 뛰어나며, 구현이 쉽다는 장점을 갖고 있다. 그러나, 일정한 PAR 감소 성능을 얻으려면 특정 위치의 PRT가 보장되어야 하는 제약이 있으며, 여러 번의 반복 수행이 필요해 이로 말미암아 수행시간이 길다^{[2][3]}.

이 논문에서는 PRT를 사용하면서 TR 기법의 단점을 보완할 수 있는 기법으로 부분 톤 선택 사상(selective mapping of partial tones: SMOPT) 기법을 제안한다. 제안한 기법은 첨두 감소 부 반송파 위치에 민감하지 않으며, 병렬 구성이 가능하여 수행 시간을 줄일 수 있다. 또한 송신 전력 제어를 통해 일정 PAR에 따른 BER의 한계 성능을 높일 수 있다는 장점을 갖고 있다. 다만, 첨두 감소 심벌을 저장하는 저장 공간이 더 필요하다. 이를 검증하고자 IEEE802.11a WLAN 물리 계층 사양을 바탕으로 모의실험 환경을 구성하고, 이에 따른 복잡도와

첨두 감소 부 반송파의 위치, 그리고 송신 전력에 따른 PAR 감소 성능과 BER 성능을 비교 분석한다.

이 논문은 모두 5장으로 구성하였으며, 1장은 이제까지 연구된 PAR 감소 기법의 분류와 PRT를 쓰는 기법 가운데 하나인 TR 기법, 그리고 제안한 SMOPT 기법의 장점과 단점을 간략히 다루었으며, 2장은 PAR 문제 정의와 반복 수렴 알고리즘을 이용한 TR 기법을 설명하고, 3장은 새로운 PRT를 사용하는 기법으로 TR 기법의 단점을 개선한 SMOPT 기법을 제안한다. 4장은 IEEE802.11a WLAN 물리 계층 사양에 바탕을 둔 모의실험 및 분석을 수행하고, 5장은 SMOPT 기법의 장점과 단점을 정리하고, 앞으로의 연구에 대해 논의하는 것으로 맺는다.

II. PAR 감소 기법

2.1 문제 정의

OFDM 시스템은 특정한 여러 부 반송파를 사용해 정보를 전송하는 기법으로서 부 반송파 수 N 개 길이의 표본을 연결하여 OFDM 심벌 형태로 전송한다. 이 논문에서는 주요 기호를 표 1과 같이 정의한다^[1].

표 1. 주요 기호 정의

	심벌		표본	
	전역 푸리에 변환	후역 푸리에 변환	전역 푸리에 변환	후역 푸리에 변환
전송 신호	X	x	X_k	x_n
정보 신호	D	d	D_k	d_n
첨두 감소 신호	C, Q	c, q	C_k, Q_k	c_n, q_n

여기서, 전송 신호는 실제 송신부에서 전송되는 신호를 뜻하며, 정보 신호는 전송하고자 하는 정보 신호를, 그리고 첨두 감소 신호 C 와 Q 는 각각 TR 기법과 SMOPT 기법에서 정보 신호의 첨두를 떨어뜨리고자 만든 신호를 뜻한다. 이 때 C 의 성분 C_k 는 $-\infty < C_k < \infty$ 의 값을 가지며, Q 의 성분 Q_k 는 몇 개의 정해진 값을 갖는다. 그리고 심벌은 주파수 축과 시간 축에서 부 반송파의 수만큼 긴 신호를 뜻하며, 표본은 주파수 축과 시간 축에서 시스템의 동작 주파수 또는 표본화 주파수에 따라 얻은 값 하나를 뜻한다. 곧, 부 반송파 수와 같은 수만큼의 표본이 심벌 하나이다.

부 반송파가 N 개인 OFDM 시스템의 복소 바탕 대역에서 n -번째 OFDM 표본은 식 (1)과 같다.

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

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 째 부 반송파에 입력되는 변조 표본이다.

식 (1)을 실수부와 허수부로 간단히 정리하면 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$x_n = Re\{x_n\} + jIm\{x_n\}, j = \sqrt{-1}. \quad (2)$$

여기서, $Re\{x_n\}$ 과 $Im\{x_n\}$ 은 각각 n 째 시간의 OFDM 표본의 실수부와 허수부를 뜻한다. 이때, 변조 방식으로 $X_k \in \{\pm 1, \pm j\}$ 인 직각 위상 편이 키잉을 (quadrature phase shift keying: QPSK) 쓰고, N 이 꽤 크다고 두면, 중심극한정리를 (central limit theorem) 따라 $Re\{x_n\}$ 과 $Im\{x_n\}$ 의 분포는 평균이 0이고, 분산이 $1/2$ 인 정규 분포이다.

이제, n 째 시간에서의 OFDM 표본의 크기와 전력은 각각 식 (3)과 (4)와 같다.

$$|x_n| = \sqrt{|Re\{x_n\}|^2 + |Im\{x_n\}|^2}, \quad (3)$$

$$|x_n|^2 = |Re\{x_n\}|^2 + |Im\{x_n\}|^2. \quad (4)$$

여기서, 식 (3)에 있는 $|x_n|$ 은 레일레이 (Rayleigh) 확률변수이고, $|x_n|^2$ 는 평균 0, 자유도 2인 중심 카이 제곱 확률변수이며^{[1][7]}, 그 누적분포함수는 식 (5)와 같다.

$$F(|x_n|^2) = 1 - e^{-|x_n|^2} \quad (5)$$

식 (5)에서 OFDM 심벌의 PAR의 보 누적분포함수를 (complementary CDF: CCDF) 유도하기에 앞서 OFDM 심벌의 PAR을 식 (6)과 같이 정의한다.

$$PAR(\mathbf{x}) = \frac{\max_n(|x_n|^2)}{E[|\mathbf{x}|^2]}, \quad (6)$$

여기서, $\max_n(|x_n|^2)$ 은 표본 N 개 가운데 전력이 가장 큰 표본을, $E[|\mathbf{x}|^2]$ 은 OFDM 심벌 \mathbf{x} 의 평균 전력을 뜻한다.

식 (5)와 (6)을 바탕으로 OFDM 표본 N 개

$\{x_n\}$ 이 상관성이 없는 (uncorrelated) 확률변수라면, $PAR(\mathbf{x})$ 가 문턱 값 PAR_0 보다 작을 확률은 식 (7)과 같다^[1].

$$F_{PAR}(PAR_0) = P\{PAR(\mathbf{x}) \leq PAR_0\} = (1 - e^{-PAR_0})^N. \quad (7)$$

이를 문턱 값 PAR_0 를 넘을 확률로 바꾸고자 보 누적분포함수를 얻으면 식 (8)과 같다.

$$Pr\{PAR(\mathbf{x}) > PAR_0\} = 1 - (1 - e^{-PAR_0})^N. \quad (8)$$

2.2 반복 수렴 알고리즘을 이용한 TR 기법

[2]에서 제안한 반복 수렴 알고리즘을 이용한 TR 기법은 그림 1과 같다.

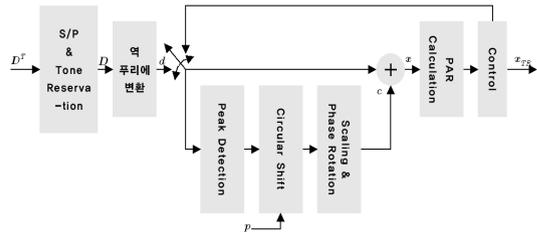


그림 1. 반복 수렴 알고리즘을 이용한 TR 기법

반복 수렴 알고리즘을 이용한 TR 기법은 미리 정해진 위치의 침두 감소 부 반송파를 예약하는 부분과 OFDM 변조를 위한 역 푸리에 변환 부분, 그리고 반복 수렴 알고리즘을 수행하는 부분으로 이루어진다.

첫째 직병렬 변환 및 부 반송파 예약 블록에서는 전송 정보 $(N-L)$ 개가 사상된 심벌을 입력받고, 침두를 떨어뜨리고자 예약한 부 반송파 L 개의 위치에 0을 채워 넣은 뒤 아직은 전송 정보만으로 구성된 $N \times 1$ 크기의 전송 심벌을 출력한다.

둘째 역 푸리에 변환 블록은 $N \times 1$ 크기의 전송 심벌을 입력받아 일반적인 역 푸리에 변환을 수행하고, 크기가 $N \times 1$ 인 OFDM 심벌을 출력한다.

셋째 반복 수렴 알고리즘 수행 부분은 다시 침두 검출, 순환 이동, 크기 및 위상 조정, 침두 감소 심벌 합산, PAR 연산, 제어 블록으로 이루어진다. 침두 검출 블록은 입력된 OFDM 심벌의 전력 최대 값과 길이 N 가운데에서의 위치, 그리고 침두와 동 위상 및 직교위상의 진폭과의 위상 정보를 출력하고, 순환 이동 블록은 미리 만든 침두 줄임 커널과 (peak reduction kernel: PRK) 침두 검출 블록의 출

력인 침두 위치를 입력받고, 커널을 침두 감소 위치만큼 자리를 옮겨 출력한다. 여기서 쓰는 PRK는 식 (9)를 역 푸리에 변환 연산을 수행해서 얻은 침두 감소 심벌로서 푸리에 변환의 속성에 따라 첫째 표본의 전력이 가장 크게 된다.

$$P = \begin{cases} P_k = 0, & k \notin \{i_1, \dots, i_L\} \\ P_k = 1, & k \in \{i_1, \dots, i_L\} \end{cases}, 0 \leq k < N-1, \quad (9)$$

여기서, i_l 은 PRT로 사용하는 l 째 부 반송파의 위치를 뜻한다. PRK의 특징은 뒤에 다시 다룬다. 크기 및 위상 조정 블록은 검출된 침두 위치와 일치시킨 PRK의 크기를 침두와 일치하도록 조정하고, 침두를 동위상 및 직교위상의 진폭과 일치하도록 위상면에서 위상을 회전시켜 출력한다. 침두 감소 심벌 합산 블록은 OFDM 심벌과 가공한 PRK를 더해 출력하며, PAR 연산 블록과 제어 블록은 입력된 OFDM 심벌의 PAR를 계산하여 사양에서 정의한 PAR를 만족시키지 않으면 반복 수렴 알고리즘을 순환 수행하며, 만족되면 PAR가 개선된 OFDM 심벌을 송신한다.

이상과 같이 반복 수렴 알고리즘을 이용한 TR 기법은 PRT를 사용하는 PAR 감소 기법의 장점을 그대로 지니고 있으며, 반복 수렴 알고리즘은 간단한 디지털 신호 처리를 통해 구현이 가능하다는 장점을 갖는다. 그러나, [2]-[4]에서 말한 바와 같이 일정한 PAR 감소 성능을 얻으려면 특정한 위치의 PRT이 보장되어야하며, 사양에서 정의한 PAR가 만족되지 않으면 반복 수행이 필요해 수행 시간이 길어진다.

이러한 단점을 일으키는 가장 큰 까닭은 앞에서 말한 PRK의 특징에 따른 것으로 전체 부 반송파 N 개 가운데 일부인 L 개만을 써서 PRK를 만들므로 충격 신호와의 상관성이 크게 떨어지게 된다. 반복 수렴 알고리즘에서는 침두 제거에 초점을 맞추어 알고리즘을 수행하므로 PRK의 침두가 아닌 값은 알고리즘의 성능을 떨어뜨리는 잡음 요소로 작용하게 된다. 따라서, 전체 부 반송파 N 개 가운데 L 개만을 써서 PRT를 만들어야 하며 [2]에서는 L/N 이 5-20%가 되도록 예약하고, 일정 수준의 높은 PAR 감소 성능을 얻을 수 있도록 특정 위치의 PRT를 보장해야하며, 30~40번쯤의 반복 수행을 제안하였다. 곧, 반복 수렴 알고리즘을 이용한 TR 기법은 실시간 또는 고속 처리가 필요한 OFDM 시스템의 PAR 감소 알고리즘으로 활용하기에는 알맞지 않다.

템의 PAR 감소 알고리즘으로 활용하기에는 알맞지 않다.

III. SMOPT 기법

이 논문에서 PAR 감소 기법으로 제안하는 SMOPT 기법은 그림 2와 같이 이루어진다.

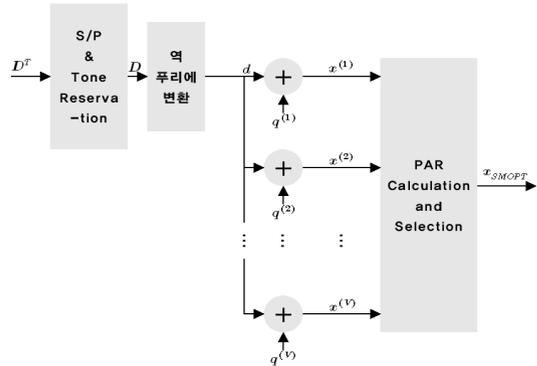


그림 2. SMOPT 기법

제안한 기법은 OFDM 시스템에서 PRT를 이용한 PAR 감소 기법과 마찬가지로 직렬별 변환 및 부 반송파 예약 부분과 OFDM 변조를 위한 역 푸리에 변환 부분, 그리고 이 논문에서 제안하는 핵심인 SMOPT 부분으로 이루어져 있다. 이 가운데에서 앞 두 부분은 반복 수렴 알고리즘을 이용한 TR 기법에서 말한 바와 같다.

SMOPT는 크기가 $N \times V$ 인 PAR 감소수열을 저장하고 있는 테이블과 크기가 $N \times 1$ 인 복소 덧셈을 수행하는 덧셈기, 그리고 크기가 $N \times 1$ 인 OFDM 심벌 V 개 가운데 가장 낮은 PAR를 갖는 심벌을 고르는 선택기로 이루어져 있다. 이를 식으로 (10)과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{SMOPT} &= \arg [\min_{\mathbf{x}^{(v)}} \{PAR(\mathbf{x}^{(v)})\}] \\ &= \arg [\min_{\mathbf{q}^{(v)}} \{PAR(\mathbf{d} + \mathbf{q}^{(v)})\}] \end{aligned}, \quad (10)$$

여기서, $\mathbf{q}^{(v)}$ 는 아래 식 (11)~(14)와 같이 정의된 v 째 PAR 감소 사상 수열이고, $\min_v(\cdot)$ 는 $0 \leq v < V$ 가운데 가장 작은 값을 출력하는 함수이며, $\arg(\cdot)$ 는 그런 결과를 도출한 인자를 출력하는 함수이다.

$$\mathbf{q}^{(v)} = \text{IFFT}\{\mathbf{Q}^{(v)}\}, \quad (11)$$

$$Q^{(v)} = \begin{cases} 0, & k \notin \{i_1, \dots, i_L\} \\ A_k, & k \in \{i_1, \dots, i_L\} \end{cases}, \quad (12)$$

$$A_k = \alpha e^{j\theta_k}, 0 < \alpha, \quad (13)$$

$$Pr[\theta_k] = \frac{1}{M}, \theta_k = \frac{2\pi m}{M}, m = 0, 1, \dots, M-1, \quad (14)$$

한편, α 는 침투 감소 표본의 진폭인데 설계할 때 필요한 PAR와 BER 성능 한계에 따라 결정할 수 있고, θ_k 는 (14)에 소 보인 바와 같이 고른 이산 확률변수이다.

제한한 SMOPT 기법은 PRT를 사용하는 기법의 장점을 그대로 살려서 부가 정보를 보낼 필요가 없으며, 수신부에서 특별한 처리 없이 송신 정보가 되살릴 수 있다는 장점을 갖는다. 물론 반복 수렴 알고리즘을 이용한 TR 기법과 마찬가지로 PAR을 떨어뜨릴 수 있도록 특정 PRT를 사용해야하므로 데이터 전송 효율이 떨어진다. 그러나, SMOPT 기법은 TR 기법과 달리 PRT의 위치가 바뀌어도 성능이 크게 떨어지지 않는다는 장점이 있다. 이는 SMOPT 기법은 언제나 각각 다른 PAR 특성을 갖는 OFDM 심벌 V 개 가운데 가장 작은 PAR를 고르기 때문이다. 또한 설계 사양에 따라 PRT 위치와 사상수 V 가 결정되면 미리 크기가 $N \times V$ 인 PAR 감소수열을 저장하고 있는 테이블을 만들어 둘 수 있다. 이는 저장 공간의 확장으로 이라는 단점이지만 한편으로는 연산 복잡도를 크게 줄이는 장점이기도 하다. 또한 필요에 따라 크기가 $N \times 1$ 인 복소 덧셈을 수행하는 덧셈기를 직렬 또는 병렬로 배치하여 구현할 수 있는 유연성이 있으므로 설계 사양에서 정해진 소요시간에 따라 해당 부분을 선택하여 꾸밀 수 있다는 장점을 갖는다.

표 2. 모의 실험에서의 주요 매개 변수

모의실험 이름	시스템	주요 매개 변수				비 고
		N	L	V	I	
유사 곱셈 복잡도에 따른 PAR 특성	IEEE802.11a WLAN	64	11	64	1	- 소수점 올림.
	ETS 300 401 DAB	64	11	128	1	- 소수점 올림
침투 감소 부 반송파 위치에 따른 PAR 특성	IEEE802.11a WLAN	64	11	64	40	- 연속 집합 : 사양에서의 가상 부 반송파 위치를 사용 - 퍼진 집합 : 참고문헌 [3]의 무작위 최적 부 반송파 위치를 사용
송신 전력에 따른 PAR 및 BER 특성	IEEE802.11a WLAN	64	11	64	-	- BER의 결과에서 잡음은 전송정보의 전력을 기준해 생성함.

IV. 성능 분석

4.1 모의실험 환경

성능 분석을 위한 모의실험 환경은 현재 OFDM 시스템 가운데 IEEE802.11a 무선 근거리망 (wireless local area network: WLAN) 물리 계층 사양을 바탕으로 하였으며, 유사 곱셈 복잡도에 따른 PAR 감소 성능을 보이기 위해 많은 부 반송파를 사용하는 ETS 300 401 디지털 음성방송(digital audio broadcasting: DAB) 물리 계층 사양에 대한 모의실험도 함께 수행하였다. 각 모의실험에서의 주요 매개 변수는 표 2에 보인 것처럼 두었다.

주요 매개 변수는 부 반송파의 수 N , PRT 수 L , SMOPT 기법의 사상 수 V , TR 기법의 수렴 알고리즘 반복 수 I 이고, 모든 모의실험에서 변조 방식은 QPSK 변조 방식을 생각하였으며, 직류 부 반송파는 가상 부 반송파로 설정하였다. 모의실험마다 특별한 설정은 각 모의실험에서 다시 말한다.

4.2 복잡도에 따른 성능 분석

이 절에서는 현재까지 제안된 PRT를 사용한 PAR 감소 기법 가운데 대표적인 반복 수렴 알고리즘을 이용한 TR 기법과 제안한 SMOPT 기법의 곱셈 복잡도, 덧셈 복잡도를 유도하였다^{[5][6]}. 이를 검증하고자 반복 수렴 알고리즘을 이용한 TR 기법과 SMOPT 기법이 유사 곱셈 복잡도를 보일 때 PAR 감소 성능을 모의실험으로 살펴보았다.

먼저, 두 알고리즘의 복잡도는 그림 1과 그림 2에 보인 열개를 바탕으로 유도하였는데 곱셈 복잡도는 식 (15), 식 (16)과 같다.

$$\mu_{SMOPT} = \frac{N}{2} \log_2 N + N + V, \quad (15)$$

$$\mu_{TR} = I(7N+1) + \frac{N}{2} \log_2 N, \quad (16)$$

이에 대한 모의실험 결과는 그림 3과 같다.

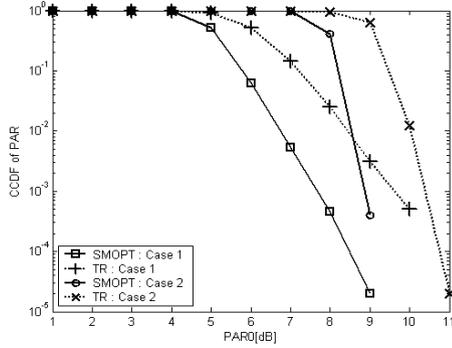


그림 3. 유사 곱셈 복잡도에 따른 PAR 감소 특성

그림 3에서 사례 1은 (Case 1) IEEE802.11a WLAN 물리 계층 사양을, 사례 2는 (Case 2) ETS 300 401 DAB 물리 계층 사양을 기반으로 모의실험을 수행한 결과이며, 부 반송파 위치는 SMOPT 기법은 연속 부 반송파 위치, TR 기법은 퍼짐 부 반송파 위치를 사용하였다. PAR 감소 특성을 보이기 위해 OFDM 심벌은 10^4 개의 심벌을 전송하였다. 사례 1과 사례 2에서 공통적으로 SMOPT 기법이 TR 기법에 견주어 PAR 감소 성능이 뛰어난 것을 확인할 수 있으며, 이를 통해 SMOPT 기법은 복잡도가 낮으면서도 PAR 감소 성능이 좋음을 알 수 있다.

두 알고리즘의 덧셈 복잡도는 식 (17)와 식 (18)과 같다.

$$\alpha_{SMOPT} = VN + \frac{N}{2} \log_2 N + V, \quad (17)$$

$$\alpha_{TR} = \frac{N}{2} \log_2 N + 3N - 1. \quad (18)$$

식 (17)과 식 (18)로부터 덧셈 복잡도는 SMOPT 기법이 TR 기법에 보다 조금 높음을 알 수 있다. 그러나, 이는 SMOPT 기법을 병렬로 썼을 때이며, 직렬로 쓰면 곱셈 복잡도와 마찬가지로 덧셈 복잡도도 SMOPT 기법이 TR 기법보다 복잡도가 낮다.

4.3 첨두 감소 부 반송파 위치에 따른 성능 분석
이 절에서는 사례 1에서 SMOPT 기법과 TR 기법의 PRT의 위치에 따른 PAR 감소 특성에 대한

모의실험을 수행하였다. 이를 위해 TR 기법에서 최적 무작위 첨두 감소 부 반송파 위치를 [2] 쓴 때와 연속 첨두 감소 부 반송파 위치를 쓴 때를 생각하였다. 먼저, TR 기법의 PAR 감소 성능을 가장 좋게 해 주는 부 반송파 위치를 반복 수렴 알고리즘을 써서 [3]의 방법과 비슷하게 10^5 개쯤의 PRT 위치 가운데에서 찾았다. 연속 부 반송파 위치는 사례 1에서 정의한 가상 부 반송파 가운데 DC 부 반송파를 제외한 나머지 가상 부 반송파 위치로 두었다. 이에 대한 모의실험 결과는 그림 4와 같다.

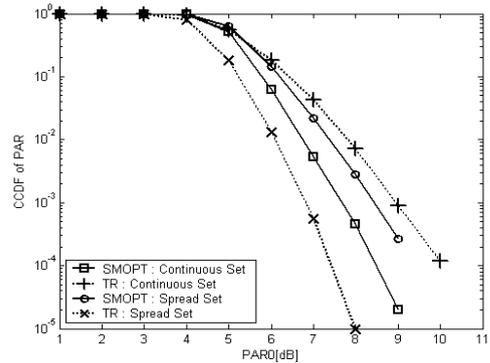


그림 4. 첨두 감소 부 반송파 위치에 따른 PAR 감소 특성

그림 4에서 SMOPT 기법에서는 연속 첨두 감소 부 반송파 위치를 사용하면 무작위 최적 첨두 감소 부 반송파 위치를 사용한 때 보다 PAR 감소 성능이 조금 더 좋음을 볼 수 있다. 반복 수렴 알고리즘을 이용한 TR 기법에서는 무작위 최적 첨두 감소 부 반송파 위치를 쓰면 연속 첨두 감소 부 반송파 위치를 쓸 때보다 PAR 감소 성능이 꽤 좋아짐을 확인할 수 있다. 이를 통해 반복 수렴 알고리즘을 이용한 TR 기법이 SMOPT 기법에 견주어 PRT의 위치에 따라 PAR 감소 성능이 민감하게 차이가 나타남을 확인할 수 있다. 이러한 PRT 위치에 따른 PAR 감소 성능의 민감도는 OFDM 시스템의 PAR 감소 기법을 설정하는데 중요한 요소 가운데 하나이다. 또한 이러한 특성은 시스템을 설계할 때 SMOPT 기법이 TR 기법보다 설계 자유도가 높음을 보여주며, SMOPT 기법은 여유 있게 구성한 가상 부 반송파 가운데 일부를 PRT로 할당해도 일정 수준의 PAR 감소 성능을 보일 수 있음을 뜻한다.

4.4 송신 전력에 따른 성능 분석

이 절에서는 사례 1의 환경에 SMOPT 기법의 첨

두 감소 수열을 만들고자 식 (13)의 α 와 θ_k 를 식 (19)와 식 (20)과 같이 두었다.

$$\alpha \in \{0.5, 1, 1.5\}, \quad (19)$$

$$\theta_k \in \{0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}\}. \quad (20)$$

그림 5와 6은 각각 송신 전력에 따른 PAR와 BER 특성이다.

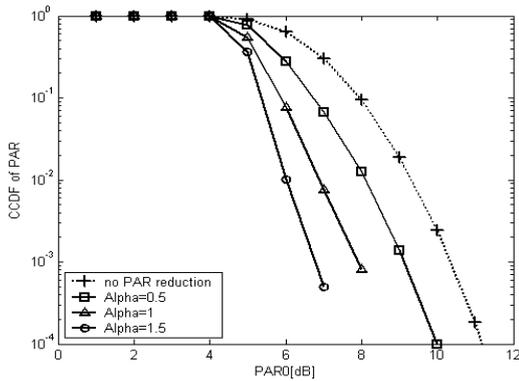


그림 5. 송신 전력에 따른 PAR 특성

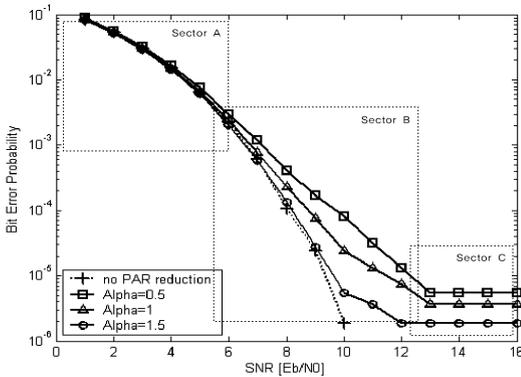


그림 6. 송신 전력에 따른 BER 특성

그림 5에서 ‘no PAR reduction’은 PAR 감소 기법을 사용하지 않은 때 PAR의 보 누적분포함수를 뜻하는 것으로서 식 (8)의 이론값과 같다. 그림 5에서 전력이 높아지면 PAR 감소 특성이 좋아 진다는 것을 알 수 있다. 이는 송신 전력이 큰 SMOPT 수열을 쓰면, 부 반송파 위치를 연속 위치로 사용하였으므로, 역 푸리에 변환 연산을 거친 뒤 시간 축에서의 신호가 첨두가 많은 형태보다는 퍼짐이 큰 형태로 나타나기 때문이다. 이러한 경향은 송신 전력을 높이면 PAR 감소 특성이 좋아지는 것으로 나타난다.

이러한 PAR 특성을 바탕으로 그림 6에서 송신 전력에 따른 BER 특성을 살펴본다. BER 성능을 보려면 잡음 성분을 고려해야 한다. 이 모의실험에서는 라디오 주파수증폭기의 최대 선형 한계 성능을 [3]에서와 같이 6.5dB로 설정한 자름 잡음과 (clipping noise) 잘린 전송 정보 전력을 기준으로 한 덧셈꼴 흰빛 정규 잡음만을 (additive white gaussian noise: AWGN) 생각하였다. 영역 A에서는 자름 잡음보다 덧셈꼴 흰빛 정규 잡음의 영향이 더 큰 비중을 차지하기 때문에 ‘no PAR reduction’이라고 표시한 QPSK 변조 OFDM 심벌의 BER의 이론값과 비슷한 결과가 나타난다. 영역 B는 자름 잡음과 덧셈꼴 흰빛 정규 잡음의 영향이 잡음 요소에서 비슷한 비중을 갖는 영역이며, 영역 C는 자름 잡음이 덧셈꼴 흰빛 정규 잡음 영향을 무시할 수 있을 정도로 큰 비중을 갖는 영역이다. 전체적으로 자름으로 말미암아 BER에서 성능 한계가 나타남을 확인할 수 있으며, 이는 송신 전력을 높이면 전력 효율은 떨어지지만 PAR와 BER 성능은 높일 수 있고, 자름 잡음이 줄어들어 BER 성능 한계도 낮출 수 있음을 뜻한다.

V. 맺음말

이 논문에서는 PRT를 쓰는 기법의 하나인 반복 수렴 알고리즘을 이용한 TR 기법의 단점을 보완할 수 있는 PAR 감소 기법으로 SMOPT 기법을 제안하였다. 반복 수렴 알고리즘을 사용한 TR 기법에서 일정한 PAR 감소 성능을 얻으려면 특정한 위치의 PRT가 보장되어야 하며, 여러 번 반복으로 말미암아 필요해 수행 시간이 길어진다. 이와 같은 단점을 보완할 수 있는 기법으로 SMOPT 기법을 제안하였으며, 성능 분석을 통해 SMOPT 기법의 성능과 특징을 검증하였다.

SMOPT 기법은 반복 수렴 알고리즘을 사용한 TR 기법에 비해 복잡도가 낮고 PAR 감소 성능이 첨두 감소 부 반송파 위치에 민감하지 않으며, 설계 사양에서 정해진 수행 시간에 따라 알고리즘을 직렬 또는 병렬로 꾸밀 수 있는 유연성을 지니고 있다. 그뿐만 아니라, PRT에 입력되는 전력을 조절하여 PAR 감소 성능과 BER 성능에서 이득을 얻을 수 있다. 다만, 첨두 감소 심벌을 저장하는 저장 공간이 더 필요하다. 이 저장 공간을 줄이려면 PAR 감소 특성이 크게 다른 첨두 감소 수열을 판정해야 한다.

송 익 호 (Iick ho Song)

중신회원



1982년 2월 서울대학교 전자
공학과 공학사(준최우등)

1984년 2월 서울대학교 전자
공학과 공학석사

1985년 8월 펜실베니아대학교
전기공학과 공학석사

1987년 3월~1998년 2월 벨 통

신연구소 연구원

1988년 3월~현재 한국과학기술원 전자전산학과 조
교수, 부교수, 교수

1995년 1월~현재 한국통신학회 논문지 편집위원

1991년, 1996년 한국통신학회 학술상 받음.

1993년 한국음향학회 우수연구상 받음.

1998년 한국통신학회 LG 학술상 받음.

1999년 대한전자공학회 해동논문상 받음.

2000년 한국과학기술한림원 젊은 과학자상 받음.

2000년 한국통신학회 모토롤라학술상 받음.

대한전자공학회, 한국음향학회, 한국통신학회 평생회
원, IEE 석학회원, IEEE 준석학회원

<관심분야> 통계학적 신호처리와 통신이론, 신호검
파와 추정, 이동통신