

OFDM 시스템의 PAPR 감소를 위한 적응적 TR 기법

정회원 임대운*, 노형석**, 종신회원 노종선**, 신동준****

Adaptive TR Scheme for PAPR Reduction in OFDM Systems

Dae-Woon Lim*, Hyung-Suk Noh** *Regular Members*,
Jong-Seon No**, Dong-Joon Shin****^o *Lifelong Members*

요약

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 위한 톤 예약 기법 (TR; tone reservation)에서 PRT (peak reduction tone) 집합의 크기가 커질수록 PAPR 감소 성능은 향상되지만 데이터 전송 효율은 감소하는 상반 관계가 존재한다. 기존의 TR 기법에서는 고정된 PRT 집합을 사용하는 반면 본 논문에서 제안된 TR 기법은 입력 심볼의 PAPR 크기에 따라 적응적으로 PRT 집합을 선택하여 사용한다. 제안된 방법은 기존의 방법과 유사한 데이터 전송 효율을 가지면서도 향상된 PAPR 감소 성능을 나타낸다.

Key Words : Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM), Peak to Average Power Ratio (PAPR), Peak Reduction Tone (PRT), Tone Reservation (TR)

ABSTRACT

For the tone reservation (TR) scheme in orthogonal frequency division multiplexing (OFDM), there exists a trade-off between peak to average power ratio (PAPR) reduction performance and data transmission rate. While PRT set is fixed in the conventional TR scheme, the proposed scheme adaptively select the PRT set according to the PAPR of the input OFDM symbol. It is shown that the PAPR reduction performance of the proposed scheme is better than that of the conventional scheme when the data transmission rate is the same.

I. 서론

직교 주파수 분할 다중 반송파 (OFDM; orthogonal frequency division multiplexing) 시스템은 다중 경로 페이딩 환경에서 효율적인 고속 데이터 전송이 가능하기 때문에 차세대 무선 통신 시스템의 표준으로 각광받고 있다. 다중 반송파 시스템은 주파수 선택적 채널에서 단일 반송파 시스템보다 좋은 성능을 보인다고 알려져 있으며, 일반적인 주파수 분

할 다중화 방법은 주파수 효율이 저하되는 반면 OFDM을 이용하면 주파수 효율을 높일 수 있다.

OFDM 시스템은 시간 영역 신호의 최대 전력 대 평균 전력 비율 (PAPR; peak to average power ratio)이 크다는 단점이 있다. 즉, PAPR이 큰 신호가 비선형 고전력 증폭기를 통과하고 나면 신호가 변형되고 이로 인해 대역내 왜곡 (in-band distortion) 과 대역외 방사 (out-of-band radiation)가 발생한다.

이러한 문제점을 줄이기 위해서 고전력 증폭기가

* 본 연구는 교육인적자원부, 산업자원부, 노동부의 출연금으로 수행한 최우수실험실지원사업과 BK21의 연구 결과입니다.

* 동국대학교 IT학부 정보통신공학전공(daewoonlim@gmail.com)

** 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 및 뉴미디어통신 연구소(imeanu@ccl.snu.ac.kr, jsno@snu.ac.kr)

*** 한양대학교 전자통신컴퓨터공학부(djshin@hanyang.ac.kr)^o: 교신저자

논문번호: KICS2007-08-344, 접수일자: 2007년 8월 1일, 최종논문접수일자: 2008년 6월 19일

선형 구간에서 동작하도록 제한하는데 이로 인하여 고전력 증폭기의 효율이 매우 감소된다. 최근에 OFDM 신호의 PAPR을 줄이기 위한 많은 연구들이 진행되었다. 상용화된 시스템에서 가장 널리 사용되는 클리핑 기법은 OFDM 신호의 PAPR을 정해진 임계값 이하로 줄이기 위해 신호의 크기를 제한한다. 하지만 클리핑은 대역내 왜곡과 대역외 방사를 발생시킨다^[1]. 선택 사상 기법은 입력 데이터 심볼에 여러 가지 순열을 곱해서 서로 다른 입력 데이터 심볼을 생성하고 이 중 가장 낮은 PAPR을 갖는 심볼을 선택하여 전송한다^[2]. 선택 사상 기법은 신호를 왜곡시키지 않는다는 장점은 있지만 계산 복잡도가 크고 PAPR의 감소가 일정 수준 이상이 되면 포화된다는 단점이 있다. 더미 시퀀스 삽입(dummy sequence insertion) 기법은 미리 정해진 더미 시퀀스들 중에서 하나를 선택한 후 이를 삽입하여 PAPR을 감소시키며 더미 시퀀스의 길이만큼 데이터 전송률이 감소되는 단점이 있다^[3].

Tellado에 의해서 제안된 톤 예약 (TR; tone reservation) 기법^{[4][5]}은 일부의 톤을 데이터 전송에 사용하지 않고 PAPR을 감소하기 위한 신호를 생성하기 위해서 사용한다. TR 기법에서 PAPR을 감소하기 위해 사용되는 톤을 PRT(peak reduction tone)라고 부르며, 톤은 부반송파와 같은 의미로 사용된다. TR 기법을 DSL (digital subscriber line)에서 사용하는 경우 채널 상태가 나빠서 데이터 전송에 사용할 수 없는 톤을 PRT(peak reduction tone)로 활용하면 데이터의 전송 효율을 낮추지 않는다는 장점이 있다. 하지만 TR 기법에서 PAPR을 원하는 수준 이하로 낮추기 위해서는 PRT의 비율이 일정 값 이상이 되어야 하는데 일반적으로는 채널 상태가 나쁜 톤의 수가 필요한 PRT보다 항상 많다고 할 수 없다. 또한 채널 상태에 따라서 PRT의 위치가 변하는 경우 이와 관련된 정보를 송신해야 한다는 문제도 있다. 이러한 점들을 고려하여 본 논문에서는 PRT로 사용될 수 있는 톤의 위치가 미리 정해지는 경우를 가정한다. TR 기법에서는 예약된 톤의 수가 증가할수록 PAPR 감소 성능도 증가하지만 데이터 전송을 위한 톤의 수가 줄어들어 데이터 전송 효율이 떨어진다는 단점이 있다. OFDM 신호의 특징을 살펴보면 큰 PAPR을 갖는 신호는 매우 낮은 확률로 생성됨을 알 수 있다. 전체 입력 심볼 시퀀스 중에 상당 부분은 PAPR이 작기 때문에 이 경우에는 PAPR을 감소할 필요가 없거나 또는 적은 크기의 PRT 집합만을 사용하여도 PAPR을 줄일 수

있다. 기존의 TR 기법은 OFDM 신호의 PAPR 값에 상관없이 고정된 크기의 PRT 집합을 사용한다. 하지만 PAPR이 큰 OFDM 신호가 상대적으로 적게 발생한다는 점을 감안하면 기존의 방법은 PRT 집합을 비효율적으로 사용하고 있다고 할 수 있다. 본 논문은 OFDM 신호의 PAPR 값에 따라서 크기가 다른 PRT 집합을 적응적으로 선택하여 사용함으로써 PAPR 감소 성능을 향상 시키거나 전송 효율을 증가 시키는 새로운 적응적 TR 기법(adaptive TR)을 소개한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 기존의 TR 기법을 살펴보고 III장에서는 크기가 다른 PRT 집합을 선택적으로 사용하는 적응적 TR 기법을 제안한다. IV장에서는 모의 실험을 통해 제안된 방법의 성능을 분석하고, V장에서 본 논문의 결론을 내린다.

II. Tone Reservation 기법

N 개의 톤 또는 부반송파를 사용하는 OFDM 시스템에서 입력 심볼 시퀀스 $\mathbf{A}=[A_0A_1 \dots A_{N-1}]^T$ 에 대하여 이산 시간 t 에서 OFDM 송신 신호 시퀀스 $\mathbf{a}=[a_0a_1 \dots a_{N-1}]^T$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$a_t = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} A_n e^{j2\pi \frac{n}{N}t}, 0 \leq t \leq N-1 \quad (1)$$

OFDM 신호의 PAPR은 다음과 같이 최대 전력과 평균 전력의 비율로 정의된다^[2].

$$\text{PAPR}_a = \frac{\max_{0 \leq t \leq N-1} |a_t|^2}{E[|a_t|^2]} \quad (2)$$

여기서 $E[x]$ 는 x 의 기대값을 의미한다.

TR 기법은 전체 톤을 데이터 전송을 위한 톤과 PAPR 감소를 위한 (PRT, peak reduction tone)로 구분하여 사용한다^[3]. 즉 PRT는 데이터 전송에 사용되지 않으므로 데이터 전송 효율을 감소시킨다. TR 기법에서는 데이터 신호의 PAPR을 감소시키기 위해서 PRT에 적절한 값을 할당하여 PAPR 감소 신호를 생성하고 이를 데이터 신호와 합하여 전송한다. 데이터 전송을 위한 톤에는 일정한 성좌(constellation)를 이용해서 심볼을 할당하지만 PRT에는 성좌와는 무관하게 임의의 값을 할당한다. N

개의 톤을 사용하는 경우 전체 심볼들의 위치는 집합 $\mathbf{N} = \{0, 1, \dots, N-1\}$ 으로 나타내고 M 개의 PRT의 위치를 집합 $\mathbf{R} = \{i_0, i_1, \dots, i_{M-1}\}$ 로 나타낸다. \mathbf{R}^C 가 \mathbf{R} 의 여집합을 의미할 때 입력 심볼 A_n 은 다음과 같이 표현된다.

$$A_n = X_n + C_n = \begin{cases} C_n, & n \in \mathbf{R} \\ X_n, & n \in \mathbf{R}^C \end{cases} \quad (3)$$

X_n 은 데이터 심볼을 나타내고 C_n 은 PRT에 할당되는 심볼을 나타내며, 이들을 각각 역푸리에 변환을 해서 x_t 와 c_t 를 얻는다. 이들의 벡터 표현은 $\mathbf{x} = [x_0, x_1, \dots, x_{N-1}]$, $\mathbf{c} = [c_0, c_1, \dots, c_{N-1}]$ 로 한다. 푸리에 변환은 선형 변환이기 때문에 OFDM 신호 a_t 는 데이터 신호 x_t 와 PAPR을 감소하기 위한 신호 c_t 의 합으로 이루어진다.

주파수 영역 커널 $\mathbf{P} = [P_0, P_1, \dots, P_{N-1}]^T$ 는 $n \in \mathbf{R}^C$ 에 대해서 $P_n = 0$ 이고 $n \in \mathbf{R}$ 인 경우에는 $P_n = 1$ 인 특징을 갖는 벡터로 정의한다. \mathbf{P} 를 역푸리에 변환 한 후 정규화해서 시간 영역 커널 $\mathbf{p} = [p_0, p_1, \dots, p_{N-1}]^T$ 를 생성한다. TR 기법에서 첨두치 감소 신호(peak canceling signal)를 생성하는 방법으로는 POCS(projection onto convex set)^[4], active-set approach^[5] 등이 있으며 본 논문에서는 반복적으로 최대 첨두치를 감소시키는 방법을 사용한다^[3]. 그림 1은 시간 영역 커널 \mathbf{p} 를 이용해 OFDM 신호의 PAPR을 반복적으로 감소시키는 TR 기법을 보여준다. \mathbf{x}^l 는 l 번째 반복 후의 OFDM 신호이고, l 번째 반복에서 더해지는 PAPR 감소 신호 \mathbf{c}^l 와 전송 신호 \mathbf{x}^l 는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \mathbf{c}^l &= \alpha_l \mathbf{P}_{(n_l)} \\ \mathbf{x}^l &= \mathbf{x}^{l-1} + \mathbf{c}^l \end{aligned} \quad (4)$$

$\mathbf{P}_{(n_l)}$ 는 \mathbf{p} 를 n_l 만큼 원순환 한 신호이고, α_l 는 l

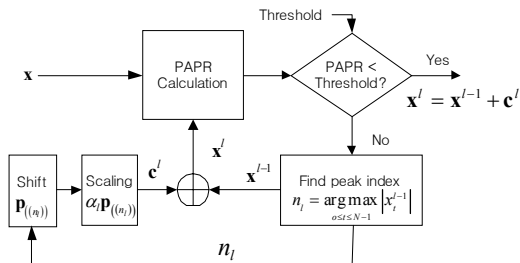


그림 1. Tone Reservation 기법.

번째 반복에서 첨두치를 줄이도록 결정된 계수 값이며 미리 설정한 임계치와 현재의 첨두치 값으로부터 결정된다. 푸리에 변환의 기본 성질에 의하면 시간 영역 신호의 원순환은 주파수 영역에서의 선형 위상 회전과 같다. 즉 주파수 영역에서 크기가 0인 심볼은 시간 영역에서의 원순환 이후에도 계속 0으로 남는다는 것을 의미한다. 원순환 거리 n_l 은 다음과 같이 결정된다.

$$n_l = \arg \max_{0 \leq t \leq N-1} |x_t^{l-1}| \quad (5)$$

α_l 의 값은 다음과 같이 결정한다.

$$\begin{aligned} \alpha_l &= -(A_{n_l} - \gamma) e^{j\theta_{n_l}} \\ \theta_{n_l} &= \arg(x_{n_l}), A_{n_l} = |x_{n_l}| \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 γ 는 임계치를 의미한다. 각 반복 시에는 최대 첨두치를 최소화하는 것만을 고려하기 때문에 1회 반복을 하고나면 다른 표본의 크기가 이전의 첨두치보다 커질수도 있어 매 반복시마다 이전의 최소 첨두치 값과 비교하여 가장 작은 첨두치를 갖는 OFDM 신호를 저장한다. l 번째 반복 후에 PAPR이 임계치 이하이면 반복을 멈춘 후 신호를 전송하고 그렇지 않으면 반복을 계속 진행하며 최대 반복까지 PAPR을 임계치 이하로 줄이지 못하는 경우에는 저장된 최소의 PAPR을 갖는 OFDM 신호를 전송한다.

PAPR 감소 성능은 시간 영역 커널 \mathbf{p} 의 형태에 의해 결정된다. \mathbf{p} 가 하나의 첨두치만을 갖는 단위 충격 함수(unit impulse function)일 때 PAPR 감소 성능이 가장 좋다고 할 수 있다. 왜냐하면 단위 충격 함수는 한 위치에서 하나의 값만 변경시키고 다른 위치의 값들에 영향을 주지 않기 때문이다. 하지만 \mathbf{p} 를 단위 충격 함수의 형태로 만들기 위해서는 \mathbf{P} 의 모든 위치에 같은 값을 할당해야 하며 이 경우에는 데이터 전송할 수 있는 톤이 하나도 남지 않게 된다는 모순이 발생한다. 일반적으로 PRT의 비율은 전체 톤의 15% 이하를 사용하고 PRT 집합을 선택할 때 \mathbf{p} 의 이차 첨두치가 가능한 작도록 해야 PAPR 감소 성능이 우수하다고 알려져 있다^[6].

그림 2는 기존의 TR 기법에서 PRT 비율을 5%, 8%, 30%로 사용할 때 PAPR의 성능을 나타내는 상보 누적 함수 (CCDF; complementary cumulative distribution function) 이다. 여기서 사용된 톤은

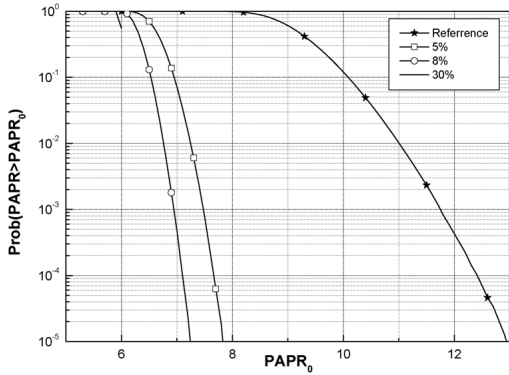


그림 2. TR 기법에서 PRT 비율에 따른 PAPR 감소 성능의 비교

1024개이고 16-QAM으로 변조하였으며 이진로그 신호를 표현하기 위해서 IFFT 신호를 4배 과표본 하였다⁷⁾. 또한 최대 반복 횟수는 40회이고 목표 임계치는 6.0dB로 설정하였다. 그림 2에서 PRT의 비율이 증가할 수록 PAPR 감소 성능이 향상되며 PRT를 30% 사용한 경우에는 PAPR이 6.0dB 이하임을 볼 수 있다.

따라서 기존의 TR 기법에서는 효율적인 PAPR 성능을 만족시키기 위해서는 매우 큰 PRT 집합이 요구되고 이는 OFDM 시스템의 전송효율을 현저히 저하시키는 요인이 된다. 이러한 기존의 TR 기법의 단점을 극복하기 위해서 다음과 같은 적응적 TR 기법을 제안한다.

III. 적응적 TR 기법

3.1 적응적 TR 기법의 구조

OFDM 신호의 PAPR 분포의 특징을 살펴보면 PAPR이 큰 신호는 비교적 낮은 확률로 존재한다는 것을 알 수 있다. 낮은 확률로 존재하는 큰 PAPR을 감소시키기 위해 항상 높은 비율의 톤을 사용하는 것은 전체 데이터 전송률을 낮춘다는 면에서 비효율적이다. 그림 3은 적응적 TR 기법의 구조를 보

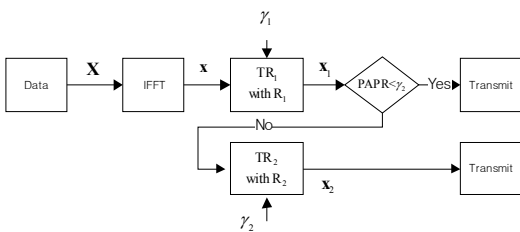


그림 3. 적응적 TR 구조

여준다. 적응적 TR 기법은 PAPR 감소를 두 단계로 나누어서 시행한다. 먼저 첫 번째 단계인 TR₁에서 낮은 비율의 PRT 집합 R₁을 사용하여 PAPR을 감소한다. 이 때 TR₁의 출력 신호의 PAPR이 임계값 γ_1 이하이면 이 신호를 전송하고 그렇지 아니면 두 번째 단계인 TR₂를 진행한다. TR₂에서는 높은 비율의 PRT 집합 R₂와 임계값 γ_2 를 사용하여 PAPR을 감소시킨 후 신호를 전송한다. 일반적으로 적응적 TR 기법에서는 입력 신호에 따라 첫 번째 단계에서 PAPR 감소가 끝나거나 이 후 단계로 진행했는지에 관한 부가 정보를 부호화하여 송수신해야 하며 이 때 사용되는 부가 정보는 매우 적은 양이다.

3.2 PRT 집합

적응적 TR 방법은 두 개의 PRT 집합 R₁과 R₂를 정의한 후 입력 신호의 PAPR 크기에 따라서 PRT 집합을 선택적으로 사용한다. 이 때 R₁ \subset R₂을 만족하도록 PRT 집합을 생성하고 R₁과 R₂의 크기를 각각 W₁과 W₂로 나타낸다.

PRT 집합의 특성 순열 (characteristic sequence)로 정의되는 주파수 커널 P_m = [P_{m,0} P_{m,1} ... P_{m,N-1}]^T, m = 0,1은 다음과 같이 표현된다.

$$P_{m,n} = \begin{cases} 1, & n \in R_m \\ 0, & n \in R_m^c \end{cases}, \quad 0 \leq n \leq N-1 \quad (7)$$

그림 4는 W₁ = 51이고 W₂ = 301의 경우에 임의로

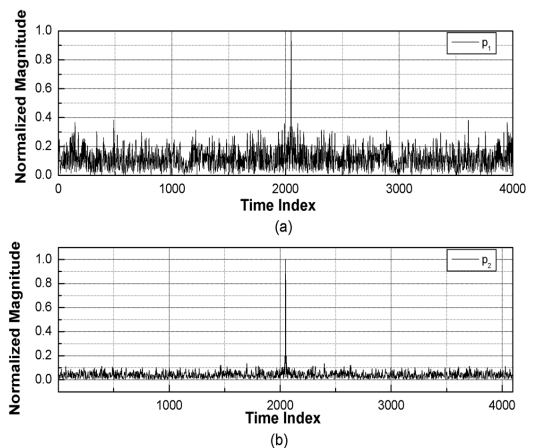


그림 4. 시간 영역 커널 (a) 정규화한 |p₁|, W₁ = 51 (b) 정규화한 |p₂|, W₂ = 301.

선택한 R_1 과 R_2 를 1024 IFFT 한 후 4배 과표분하여 정규화한 시간 영역 커널 p_1 과 p_2 의 크기를 보여준다.

3.3 임계치의 선택

최종 목표 임계치를 γ_2 로 설정하고 첫 번째 단계에서 TR 기법을 적용할 때 사용하는 임계치 γ_1 은 γ_2 보다 낮게 설정한다(이는 실험적으로 결정할 수 있으며 본 논문에서는 약 1.0 dB 가량 낮게 설정하였다). 이와 같이 임계치를 설정하는 이유는 다음과 같다. TR 기법은 침투치를 갖는 표본을 임계치 수준까지 줄이기 때문에 임계치 미만으로 PAPR 이 줄어들지 않는다. 또한 사용된 시간 영역 커널의 모양에 따라 임계치로 줄이는 과정에서 다른 표본의 크기를 증가 시키는 경우가 발생한다. 그림 5는 5%의 비율을 같은 PRT를 사용한 TR 기법에서 임계치를 6.0dB와 7.0dB로 설정한 경우 PAPR 감소 성능의 차이를 보여준다. 임계치를 6.0dB로 설정한 경우에는 PAPR이 7.0dB를 넘을 확률이 7% 반면, 임계치를 7.0dB로 설정한 경우에는 35%로 증가함을 볼 수 있다. 따라서 제안된 방식처럼 2 단계의 TR 기법을 사용하는 경우에는 첫 번째 단계의 임계치를 목표치보다 낮게 설정하는 것이 보다 효과적이다.

그림 5에서 두 TR 기법의 CCDF가 교차함을 알 수 있다. 이는 주어진 PRT 집합의 크기에서는 임계치의 선택에 따라 PAPR 감소 성능이 다르다는 것을 의미한다. 그림 6은 목표 임계치를 변화시킬 때 CCDF 그래프의 출력 PAPR을 10^{-2} 확률에서 조사한 결과이다. $N=1024$ 일 때 PRT는 5%를 임의로 선택하였다. 이 경우 출력의 PAPR을 가장 낮추는 목표 임계치는 약 6.5 dB 임을 알 수 있다.

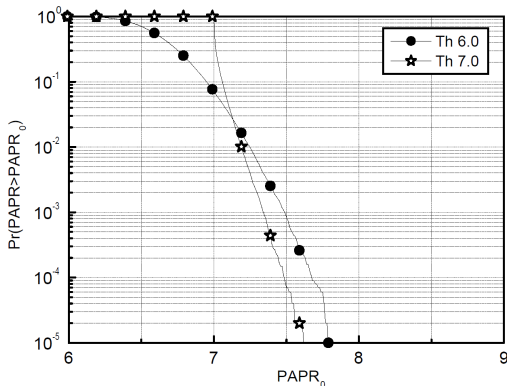


그림 5. 임계치에 따른 TR 기법의 성능 변화.

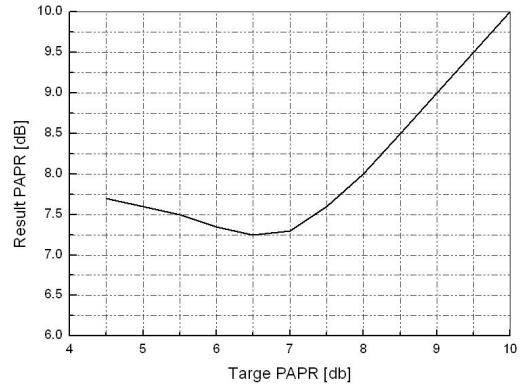


그림 6. 임계치의 설정에 따른 출력.

3.4 적응적 TR 기법의 데이터 전송 효율

M 개의 PRT를 사용하는 경우 기존의 TR 기법에서 데이터 전송 효율을 다음과 같이 정의한다.

$$\rho = \frac{N - (G + W)}{N} \quad (8)$$

여기서 G 는 보호대역(guard band)을 위한 톤의 수이다. 적응적 TR 기법의 평균 전송 효율 ρ_{avg} 는 다음과 같이 정의한다.

$$\rho_{avg} = \Pr(\text{PAPR}_{x_1} < \gamma_2) \times \rho_1 + \{1 - \Pr(\text{PAPR}_{x_1} < \gamma_2)\} \times \rho_2 \quad (9)$$

여기서 ρ_1 와 ρ_2 는 각각 첫 번째와 두 번째 단계에서의 전송 효율을 나타내고 PAPR_{x_1} 는 TR_1 을 거치고 난 신호 x_1 의 PAPR을 의미한다.

TR_2 의 전송 효율 ρ_2 이 높지 않으므로 TR_2 블록이 사용되는 확률을 낮추어야 평균 전송 효율이 높아진다. 이를 위해 TR_1 에서 사용하는 임계치 γ_1 을 PAPR_{x_1} 이 γ_2 를 초과하는 확률이 충분히 낮도록(대략 10% 이하) 설정한다. 이러한 과정을 통하여 전송 효율의 감소를 최소화하면서 PAPR을 목표로 하는 값 이하로 감소시킬 수 있다.

3.5 데이터 할당 방법

TR_2 블록을 진행하기 전에 R_2 와 R_1 의 차집합 $E = R_2 - R_1$ 에 해당하는 위치에 할당된 데이터 심볼은 저장해 두었다가 다음 패킷에 전송한다. 만약 데이터 심볼을 톤에 순차적으로 할당한 경우 TR_2 를 진행하기 위해서 E 의 위치에 할당된 데이터 심볼을

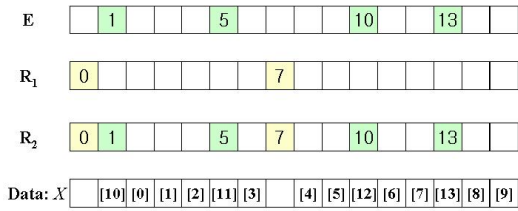


그림 7. 데이터 할당 순서.

전송에서 제외된다면 수신단에서는 다음 시간까지 데이터가 전송되기를 기다려야 한다는 문제가 발생된다. 이와 같은 지연 문제를 방지하기 위해서 데이터 심볼을 톤에 할당할 때 순차적으로 할당하지 않고 PRT의 위치가 아닌 곳에 먼저 데이터를 할당한 후 E의 위치에 데이터를 할당하는 방법을 사용한다.

그림 7은 $N=16$, $R_1 = \{0, 7\}$ 이고 $R_2 = \{0, 1, 5, 7, 10, 13\}$ 일 때 데이터 심볼을 할당하는 예를 보여준다. 이때 $E = \{1, 5, 10, 13\}$ 이다. 먼저 R_2 가 아닌 위치에 순서대로 $X[0]$ 부터 $X[9]$ 까지 10개의 데이터 심볼을 할당하고, 다음으로 E의 위치에 $X[10]$ 부터 $X[13]$ 까지 4개의 데이터 심볼을 추가로 할당한다. 이와 같이 할당하면 TR_2 단계로 진행하여도 수신된 데이터 심볼들은 모두 앞뒤의 데이터들과 연속적으로 이어진다.

3.6 두 번째 TR 블록에서의 신호 선택

TR_1 단계에서는 E의 위치에 있는 심볼은 데이터로 사용되거나 TR_2 단계에서는 PRT로 사용되며 이 심볼들을 다음 두 가지 방법으로 처리할 수 있다. 첫 번째는 E의 위치에 해당하는 데이터 심볼들을 완전히 제거한 후 다시 IFFT 해서 TR_2 단계에 적용하는 방법이다. 두 번째는 TR_2 의 출력 신호를 그대로 TR_2 단계의 입력으로 사용하는 방법이다. 왜냐하면 TR_2 단계에서는 E 위치의 값들은 더 이상 데이터 심볼로 간주되지 않기 때문에 이전 심볼의 값이 남아 있다 하더라도 다음 번 반복에서 현재 값을 기준으로 PAPR을 감소하기 위한 새로운 값으로 갱신될 것이기 때문이다. 모의 실험의 결과에 의하면 TR_1 단계의 출력을 그대로 이용하는 것이 같은 반복 횟수에서 PAPR 감소 성능이 우수하였다. 이러한 결과는 TR_1 단계에서 다수의 침투치들이 어느 정도 작게 줄어들었고, 목표 임계치를 넘는 표본들은 많지 않기 때문으로 해석할 수 있다.

적응적 TR 기법에서 PRT 집합의 크기와 임계치는 모의 실험적으로 결정된다. R_1 의 크기는 허용

가능한 데이터 전송률을 고려해서 결정하며 R_1 의 크기에 따라서 γ_1 이 달라진다. 목표 임계치에 따른 PAPR의 분포를 그림 6과 같이 조사한 후 PAPR을 최소로 하는 목표 임계치를 γ_1 으로 결정한다. 이어서 사용되는 R_2 의 크기는 R_1 보다 상대적으로 크게 설정하며 R_1 을 포함하도록 한다. 위의 설명에서 필요한 설정 값들은 미리 결정되면 변하지 않는 값으로 송신단과 수신단에 저장한 후 사용된다.

IV. 모의 실험 결과

모의 실험은 1024개의 톤을 이용하는 OFDM 시스템을 가정하여 수행하였다. 이 때 보호 대역은 사용하지 않았고 입력 데이터는 16-QAM으로 변조하였으며 신호는 4배로 과표본 하였다.

그림 8의 (a)는 $|R_1|=51$ 이고 $|R_2|=301$ 인 적응적 TR 기법과 $|R|=51$ 인 기존의 TR 기법의 PAPR 성능의 차이를 보여준다. 적응적 TR 기법에서 $\gamma_1=6.0$ dB, $\gamma_2=7.0$ dB로, 기존의 TR 기법에서 $\gamma=6.0$ dB로 설정하였으며 각 단계에서 최대 반복 횟수는 40번으로 제한하였다. 적응적 TR 기법을 적용한 경우 신호의 PAPR은 10^{-6} 확률에서 7.0 dB를 넘지 않는다. 이에 비해 기존의 TR 기법을 적용한 경우에는 약 7.8 dB의 PAPR을 갖는다. 두 기법의 데이터 전송 효율은 각각 0.9317과 0.9502이며 적응적 TR 기법을 적용한 경우 전송률이 약 1.95% 낮아지며, 6.8%의 PRT를 사용한 경우와 평균전송효율이 같다. 그러나 PAPR 감소 성능 향상에 비하여 전송 효율 손실은 매우 낮다고 볼 수 있다.

그림 8의 (b)는 $|R_1|=81$ 이고 $|R_2|=301$ 인 적응적 TR 기법과 $|R|=81$ 인 기존의 TR 기법의 PAPR 성능을 보여준다. 이 때 임계치와 최대 반복 횟수는 (a)의 조건과 같다. 적응적 TR 기법을 적용한 경우 신호의 PAPR은 10^{-6} 확률에서 7.0 dB를 넘지 않고, 기존의 TR 기법을 적용한 경우에는 약 7.4 dB의 PAPR을 갖는다. 두 기법의 데이터 전송 효율은 각각 0.9208과 0.9209로 거의 동일하다.

그림 8의 모의 실험 결과로 기존의 TR 기법은 PRT를 8%를 사용하는 경우에 10^{-6} 확률로 PAPR이 7.4 dB 보다 크지만, 적응적 TR에서는 PRT를 평균적으로 6.8% 사용하면서 PAPR은 7.0 dB를 넘지 않음을 알 수 있다.

모의 실험 결과로부터 적응적 TR 기법이 기존의 TR 기법과 유사한 전송 효율을 보이면서 PAPR 성능을 크게 향상시킴을 확인할 수 있었다.

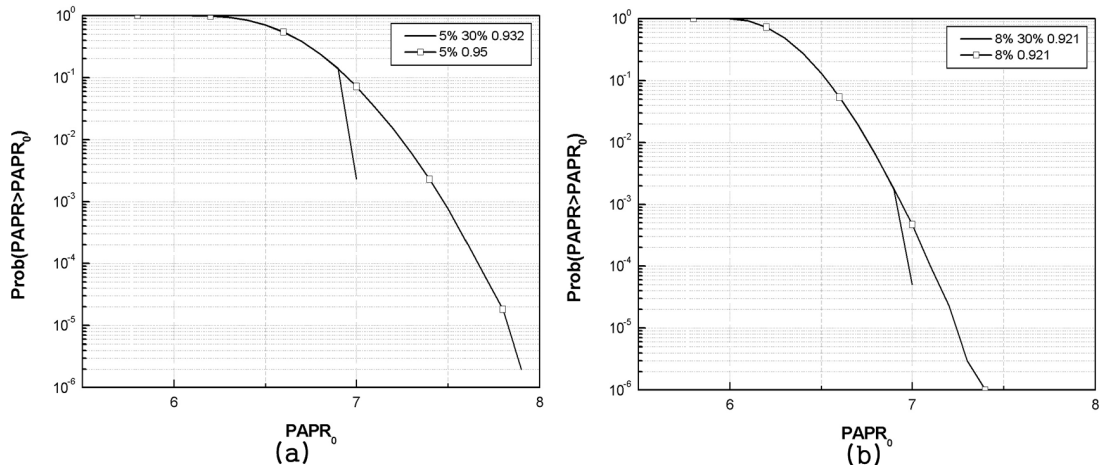


그림 8. 적응적 TR 기법과 기존 TR 기법의 PAPR 감소 성능 비교 (a) 5% (b) 8%.

V. 결 론

본 논문에서는 입력 심볼 시퀀스의 PAPR에 따라 크기가 다른 PRT 집합을 적응적으로 사용하는 것을 특징으로 하는 적응적인 TR 기법을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 두 개의 PRT 집합을 R_1 과 R_2 정의하고, R_2 가 R_1 을 포함한다는 특징을 갖는다. 먼저 크기가 작은 R_1 을 이용해서 TR 기법을 적용한 신호의 PAPR이 원하는 크기보다 작으면 신호를 전송하고 그렇지 않다면 크기가 큰 R_2 를 이용해서 다시 TR 기법을 적용한다. 따라서 본 논문에서 제안된 적응적 TR 기법은 두 개의 임계치, 두 개의 PRT 집합을 적절히 선택함으로써 다양한 범위의 PAPR을 만족시킬 수 있는 매우 효율적이고 매우 큰 유연성을 갖는 PAPR 감소 기법이라 할 수 있다. 따라서 제안된 방법은 고정된 크기의 PRT 집합을 사용하는 기존의 TR 방법에 비해 유사한 데이터 전송 효율을 보이면서 PAPR 감소 성능을 매우 향상 시킨다.

본 논문에서 제안한 알고리즘은 두 개의 TR 블록을 이용하지만 응용하고자 하는 시스템의 상황에 따라 세 개 이상의 TR 블록을 사용한 알고리즘으로 확장할 수 있다.

참 고 문 헌

[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] H.G. Ryu, J.E. Lee, and J.S. Park, "Dummy sequence insertion (DSI) for PAPR reduction in the OFDM communication system," *IEEE Trans. Consum. Electron.*, Vol.50, No.1, pp.89-94, Feb. 2004.

[4] B. S. Krongold and D. L. Jones, "An Active-Set Approach for OFDM PAR Reduction Via Tone Reservation," *IEEE Trans. Signal Process*, Vol. 52, pp.495-509., Feb. 2004.

[5] D.-W. Lim, H.-S. Noh, J.-S. No, and D.-J. Shin, "New selection method of near optimal PRT set in TR scheme for PAPR reduction of OFDM," in *Proc. ISITA*, Oct. 29 - Nov. 1, 2006, pp. 697-701.

[6] M. Sharif, M. Gharavi-Alkhansari, and B. H. Khalaj, "On the peak-to-average power of OFDM signals based on oversampling," *IEEE Trans. Commun.*, Vol.51, No.1, pp.72-78, Jan. 2003.

[7] J. Tellado, *Multicarrier Modulation with Low PAPR*, Massachusetts: Kluwer, 2000.

임 대 운 (Dae-Woon Lim)

정회원



1994년 2월 한국과학기술원 전기 및전자공학과 학사
1997년 2월 한국과학기술원 전기 및전자공학과 석사
2006년 8월 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 박사
1995년 9월~2002년 8월 LS산전

(주) 중앙 연구소 선임 연구원

2006년 9월~현재 동국대학교 IT학부 조교수

<관심분야> OFDM, 부호 이론, 시공간 부호

노 종 선 (Jong-Seon No)

종신회원



1981년 2월 서울대학교 전자공학과 공학사
1984년 2월 서울대학교 전자공학과 공학 석사
1988년 USC, 전기공학과 공학 박사
1990년 9월~1999년 7월 건국대학교 전자공학과 부교수

1999년 8월~현재 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 교수

<관심분야> 시퀀스, 시공간 부호, LDPC, 암호학

노 형 석 (Hyung-Suk Noh)

정회원



2005년 2월 고려대학교 전기전자전파공학부 학사
2008년 2월 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 석사
2008년 2월~현재 SK 텔레콤 연구원
<관심분야> OFDM, WLAN, 시공간 부호, MIMO

신 동 준 (Dong-Joon Shin)

종신회원



1990년 2월 서울대학교 전자공학과 공학사
1991년 12월 Northwestern University, 전기공학과 공학 석사
1998년 12월 전기공학과 공학 박사
1999년 4월~2000년 8월 Hughes Network Systems, MTS

2000년 9월~현재 한양대학교 전자통신컴퓨터공학부 부교수

<관심분야> 디지털 통신, 이산 수학, 시퀀스, 오류정정 부호, 암호학