

OFDM 신호의 PAPR 감소를 위한 적응적 톤 예약 기법

양모찬*

An Adaptive Tone Reservation Scheme for PAPR Reduction of OFDM Signals

Mo-Chan Yang*

요 약

OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 전송 신호의 PAPR (Peak-to-Average Power Ratio) 을 효과적으로 감소시키기 위하여 클리핑 잡음 (Clipping Noise)을 이용한 적응적 톤 삽입 (Adaptive Tone Reservation; ATR) 기법을 제안한다. 제안된 ATR 기법은 기존 TR 방법에서의 복잡도 문제를 개선하기 위해, IFFT (Inverse Fast Fourier Transform) 출력 가운데 임계 진폭값 보다 큰 신호들을 클리핑 하는 과정, 클리핑된 신호에 대해 클리핑 잡음을 계산 후 주파수 영역 클리핑 잡음의 심별 중에서 가장 큰 전력이 할당된 톤을 추출하는 과정, 추출된 톤을 예약하여 PAPR을 감소하는 과정의 총 3단계로 구성된다. 모의실험 결과, 제안된 ATR 기법은 톤 예약이 가능한 최적의 톤을 클리핑 잡음을 이용하여 추출함으로써 기존 TR 방법의 계산량을 획기적으로 줄이면서도 성능이 최적의 TR 방법에 근접한 것을 보여준다.

ABSTRACT

We propose an ATR (Adaptive Tone Reservation) scheme based on clipping noise for PAPR (Peak-to-Average Power Ratio) reduction of OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) signals. The proposed scheme is composed of three steps: clipping, tone selection, and TR procedures. In the first step, the peak samples in the IFFT (Inverse Fast Fourier Transform) outputs are scaled down by clipping. In the second step, the sub-carrier position where the power of the clipping noise is the maximum, is selected. Finally, the generic TR procedure is performed. Simulation results show that the proposed scheme does not require all the possible combinations for the original TR procedures, while maintaining the PAPR reduction performance.

키워드

OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing), PAPR(Peak-to-Average Power Ratio), Clipping, TR(Tone Reservation)

직교 주파수 분할 다중화, 첨두대 평균치 전력 비율, 클리핑, 톤 예약

1. 서 론

OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 시스템은 무선랜, 휴대인터넷, 차세대

이동통신 등의 고속 멀티미디어 무선 네트워크와 더불어 디지털 라디오, TV 방송에 이르기까지 폭넓은 분야에서 독보적인 무선 전송 방식으로 각광받고 있다. OFDM 시스템은 변조 신호들을 다수의 직교 부

* 교신저자 : 한화시스템 지상시스템팀
• 접수일 : 2019. 08. 01
• 수정완료일 : 2019. 09. 07
• 게재확정일 : 2019. 10. 15

• Received : Aug. 01, 2019, Revised : Sep. 07, 2019, Accepted : Oct. 15, 2019
• Corresponding Author : Mo-Chan Yang
Dept. Land System, Hanwha Systems,
Email : ymc0124@naver.com

반송파를 이용하여 전송하는 방식으로서, 전체 전송 대역을 다수의 협대역 직교 부채널로 분할하여 데이터를 전송하게 된다. 이 때 인접 부반송파 간에 직교성을 유지함으로써 부채널들을 중첩하여 배치할 수 있으므로, 높은 대역폭 효율을 가지며 단일 반송파를 사용하는 시스템에 비해 주파수 선택적 페이딩에 강한 특성을 갖는다[1-5].

OFDM을 포함한 대부분의 무선통신 시스템은 송신단에서 충분한 송신 전력을 얻기 위하여 고풍력 증폭기 (High Power Amplifier; HPA)를 사용하게 되는데, 이러한 HPA로부터 최대 출력 전력을 얻기 위하여 일반적으로 포화 영역 근처에 동작점을 설정하여야 하며 이로 인해 발생하는 비선형 왜곡은 시스템 성능을 크게 저하시키는 요인이 된다. 이러한 HPA의 비선형 특성은 전송 신호의 진폭 변화에 매우 민감하기 때문에, 다수의 부반송파로 변조된 신호를 결합하여 전송하는 OFDM 시스템의 경우 전송 신호 진폭이 매우 크게 변하게 되어 결국 전송 신호에 대한 최대 전력대평균전력비, 즉 PAPR (Peak-to-Average Power Ratio)이 단일 반송파 시스템에 비해 매우 큰 단점을 갖게 된다[1-5].

OFDM 신호의 PAPR을 감소시키기 위해 가장 간단한 클리핑(Clippling) 기법을 비롯하여 Companding 기법, SLM(SeLective Mapping), PTS(Partial Transmit Sequence), TR(Tone Reservation), ACE(Active Constellation Extension), 톤 삽입(Tone Injection; TI) 등의 다양한 PAPR 감소 기법이 제시되었다[6-11]. 특히 이 가운데 TR 기법[10]은 몇 개의 톤을 예약하여 시간영역에서 PAPR을 감소시키는 방법으로, 부반송파 (즉, 톤) 수가 많아질수록 톤 예약이 가능한 조합의 수가 기하급수적으로 증가하게 되는 문제를 가지고 있다.

본 논문에서는 이러한 기존 TR 방법의 단점을 보완하기 위해 클리핑 잡음을 이용하는 저복잡도의 적응적 톤 예약 (Adaptive TR; ATR) 기법을 제안한다. 제안된 ATR 기법은 주파수 영역 OFDM 심벌들에 대한 IFFT(Inverse Fast Fourier Transform) 출력 가운데 임계 진폭값 보다 큰 신호들을 클리핑하는 과정, 클리핑된 신호에 대해서 클리핑 잡음을 계산 후 주파수 영역 클리핑 잡음의 심벌 중에서 가장 큰 전력이 할당된 톤을 추출하는 과정, 추출된 톤을 이용하

여 PAPR을 감소하는 과정의 총 3단계로 구성되며, 이는 매 OFDM 심벌에 대해 적용된다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 OFDM 전송 신호 및 PAPR에 대해 정의하고, 3장에서는 OFDM 신호의 PAPR 감소를 위한 기존의 TR 방법 및 제안된 클리핑 잡음 기반의 ATR 기법에 대해 설명한다. 4장에는 다양한 파라미터에 따른 모의실험을 통해 제안된 ATR 기법과 기존 TR 방법의 OFDM PAPR 감소 성능 및 복잡도를 비교하며, 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

II. OFDM 전송 신호 및 PAPR

OFDM 시스템에서는 전체 전송 대역을 다수의 협대역 직교 부채널로 분할하여 데이터 변조된 심벌들을 다수의 직교 부반송파를 이용하여 전송한다. 이러한 OFDM 시스템의 송신단에서는 먼저 입력 데이터 비트들이 PSK(Phase Shift Keying) 또는 QAM(Quadrature Amplitude Modulation) 부호기에 의해 L 비트 단위로 묶여 심벌 간격이 T_s (sec)인 N 개 변조 심벌 X_k ($k = 0, \dots, N-1$) 로 변환된다. 여기서 M 진 변조 방식을 고려할 경우 $L \equiv N \log_2 M$ 이다. 이러한 N 개 심벌들은 주파수 간격이 $\Delta f \equiv 1/N T_s$ (Hz)인 N 개 직교 부반송파에 의해 변조된 후, 직렬 변환기를 통해 직렬 신호로 변환되어 HPA의 입력이 된다. 따라서, N 개 심벌 길이인 $N T_s$ (sec)동안 OFDM 변조된 기저대역 신호 $x(t)$ 는 적절한 크기 변환을 거쳐 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$x(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j \frac{2\pi f_k t}{N T_s}} \quad (0 \leq t < N T_s) \quad (1)$$

위 식에서 f_k 는 X_k 를 전송하기 위한 k 번째 부반송파 주파수 성분으로서 $f_k \equiv k \Delta f = k / N T_s$ (Hz)이다. 한편, $x(t)$ 를 심벌 간격인 T_s 단위로 $t = n T_s$ ($n = 0, \dots, N-1$) 마다 표본화한 이산 시간 시스템에서 기저대역 전송 신호는 식(2)와 같이 표현될 수 있다.

$$x_n \equiv x(nT_s) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j2\pi kn/N} \quad (2)$$

여기서 식 (2)는 N 개 심벌 X_k 에 대한 IDFT (Inverse Discrete Fourier Transform) 과정과 동일함을 알 수 있고, 따라서 이는 N -point IFFT를 이용하여 디지털 방식을 통해 효과적으로 구현될 수 있다. 또한 OFDM 시스템의 수신단에서는 송신단의 이러한 과정에 대한 역과정을 수행하게 되며, 특히 부반송파 복조는 N -point FFT로 수행된다.

한편, 심벌 X_k 가 통계적으로 서로 독립일 경우 전송 신호 $x(t)$ 의 진폭은 N 이 커질수록 (복소) 가우시안 분포를 만족하게 되어 매우 큰 값을 가질 수 있는 가능성이 존재하게 된다. 일반적으로 이러한 연속 시간 OFDM 전송 신호에 대해 PAPR은 한 OFDM 심벌에서 전송 신호의 최대 순시 전력과 평균 전력의 비율로서 식(3)과 같이 정의된다[12-13].

$$\text{PAPR} \equiv \frac{\max_{0 \leq t < NT_s} |x(t)|^2}{\frac{1}{NT_s} \int_0^{NT_s} |x(t)|^2 dt} \quad (3)$$

대부분의 PAPR 감소 기법들은 일반적으로 위의 정의식에서 분자에 해당하는 값, 즉 최대순시전력을 감소시키는 방식으로 적용된다. 한편 식 (2)와 같은 이산 시간 신호를 이용하여 PAPR을 계산하는 경우, 전송 신호 $x(t)$ 를 충분히 빠르게 표본화하지 않으면 원래의 연속 시간 신호에서 실제 최대 순시 전력을 나타내는 부분, 즉 피크값들이 표본화된 신호 샘플에 포함되지 않게 되는 경우가 발생한다. 실제로 식 (2)에서는 이산 시간 신호 x_n 을 생성하기 위해 변조 심벌 간격인 T_s (sec) 단위로 표본화를 수행하게 되므로 이러한 문제가 발생할 가능성이 크다. 따라서 가급적 정확한 피크값을 표본화하기 위해 연속 시간 신호 $x(t)$ 를 T_s (sec)가 아닌 T_s/Q (sec) 단위로 Q 배 과표본화 (Oversampling)하게 되는데, 이렇게 과표본화된 시간 영역 신호 샘플들은 길이 N 의 원래 데이터 심벌 블록에 $(Q-1)N$ 개 0을 삽입 (Zero-Padding)한 후 QN -point IDFT 연산을 적용

하여 등가적으로 구할 수 있다[12,14]. 대부분의 경우 $Q=4$ 정도면 충분히 원래 연속 시간 신호에서의 실제 피크값들을 표본화할 수 있다고 알려져 있으며 [14], 본 논문에서도 이러한 4배의 과표본화 과정을 적용하였다.

III. 제안된 ATR 기법

제안된 ATR 기법은 주파수 영역에서 OFDM 심벌의 IFFT 출력 신호에 대하여 임계 진폭값보다 큰 신호들을 임계 진폭 값으로 할당하는 클리핑 과정, 클리핑된 신호에 대해서 클리핑 잡음을 계산한 후 클리핑 잡음의 주파수 영역 심벌 중에서 가장 큰 전력이 할당된 톤을 추출하는 과정, 추출된 톤을 이용하여 PAPR을 시간영역에서 감소하는 과정의 총 3단계로 구성되며, 이는 매 OFDM 심벌에 대해 적용된다. 아래에는 이러한 제안 기법의 절차에 대해 구체적으로 설명한다.

3.1 1단계 : 클리핑 과정

제안된 ATR을 위해 본 단계에서는 그림 1에서와 같이 주파수 영역 OFDM 심벌 $\mathbf{X}=[X_0, \dots, X_{N-1}]$ 의 IFFT 출력 신호 $\mathbf{x}=[x_0, \dots, x_{N-1}]$ 에 대해 식 (4)와 같이 클리핑을 수행하게 된다.

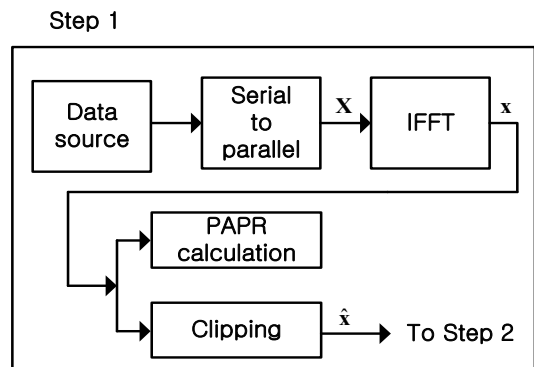


그림 1. 제안된 ATR 기법의 첫번째 단계
Fig. 1 Block diagram of the first step for the proposed ATR

$$\hat{x}_n = \begin{cases} x_n & |x_n| \leq A_{\max} \\ A_{\max} e^{j\psi_n} & |x_n| > A_{\max} \end{cases} \quad (4)$$

여기서 $\psi_n = \arg[x_n]$ 이다. 따라서, 클리핑된 신호 \hat{x}_n 의 크기는 최대 진폭 A_{\max} 를 넘지 않으며 위상 성분은 보존된다. A_{\max} 는 식 (5)에서와 같이 시스템에서 요구하는 CR (Clipping Ratio) γ 에 의해 결정된다.

$$\gamma = \frac{A_{\max}}{\sqrt{\rho_s}} \quad (5)$$

여기서, ρ_s 는 입력 신호 x_n 의 평균 전력을 의미한다.

3.2 2단계: 클리핑 잡음을 이용한 최적의 톤 추출 과정

본 단계에서는 1단계에서 얻어진 클리핑 신호를 이용하여 PAPR을 감소시킬 톤을 추출하게 되는데 그 절차는 아래와 같다 (그림 2 참조).

① 본래 신호 x_n 과 피크 조정된 시간 영역 신호 \hat{x}_n 의 차이인 클리핑 잡음 $x_{dip,n} = x_n - \hat{x}_n$ ($n = 0, \dots, N-1$)을 구한다.

② $x_{dip,n}$ 의 샘플 수만큼 선택적으로 FFT를 취하여 $X_{dip,k}$ ($k = 0, \dots, N-1$)을 구한다

③ $X_{dip,k}$ 의 전력 크기가 가장 크게 발생하는 톤을 추출하고, 클리핑 잡음 신호를 이용하여 톤이 맵핑될 방향을 결정한다.

클리핑 잡음 신호 $x_{dip,n}$ 은 몇 개의 샘플만 의미 있는 크기를 가지게 되므로 식(6)과 같이 선택적 FFT를 이용할 수 있다.

$$X_{dip,k} = \sum_{s=0}^{N_0-1} x_{dip,n_s} e^{-j2\pi n_s k / NQ} \quad (k = 0, \dots, N-1) \quad (6)$$

여기서 N_0 는 클리핑 잡음 총 샘플 수를 나타내며, $n_s \in \{n_0, \dots, n_{N_0-1}\}$ 는 샘플이 발생한 위치를 나타낸다. 이제 클리핑에 의한 전력 변동이 가장 큰 톤의 위

치는 식(7)과 같이 구해진다.

Step 2

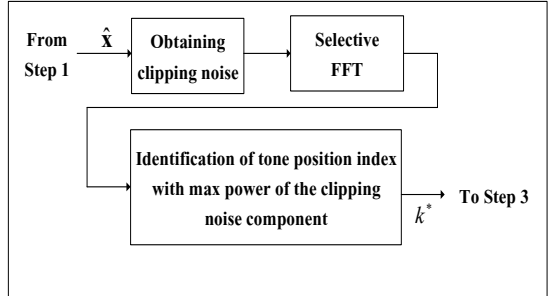


그림 2. 제안된 ATR 기법의 두번째 단계
Fig. 2 Block diagram of the second stage for the proposed ATR

$$k^* = \underset{k \in \{0, \dots, N-1\}}{\operatorname{argmax}} |(X_k - X_{dip,k})|^2 \quad (7)$$

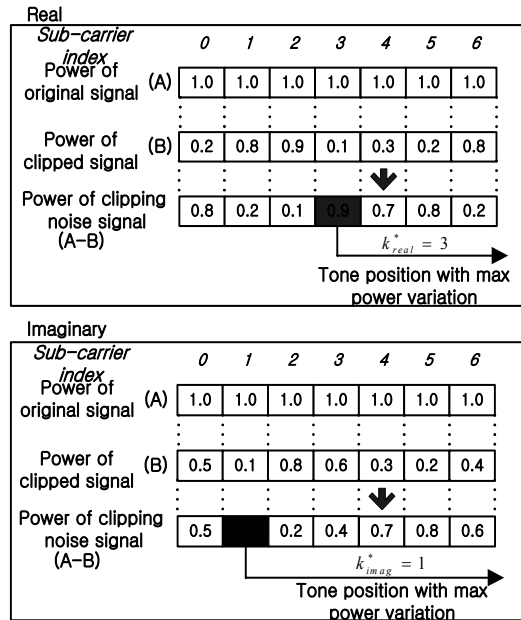


그림 3. 클리핑 잡음을 이용한 최적의 톤 선택의 예
Fig. 3 An example of the optimal tone selection procedure by using clipping noise

그림 3은 X_{dip} 의 전력값을 부반송파 (즉, 톤)별로 비교하여, 그 값이 가장 큰 톤의 위치 k^* 를 추출하는

과정의 예를 보여주고 있다. 그림 3에서와 같이 추출된 톤 위치 k^* 는 1 단계의 클리핑 이후 급격한 전력 변동이 발생한 위치이므로, 이는 시간 영역에서 피크 신호를 구성하는 기여도가 가장 큰 톤 위치를 의미한다고 볼 수 있다. 따라서 피크 신호의 전력을 낮추기 위해서는 이 위치를 통해 전송되는 변조 심벌에 TR을 통하여 확장된 정상도 상으로 맵핑하는 과정이 필요하다.

3.3 3단계 : TR 과정

마지막으로, 본 단계에서는 그림 4에서와 같이 앞서 선택된 톤의 위치 k^* 을 이용하여 TR 기법을 적용한다. TR 기법은 식 (8), (9), (10)과 같다.

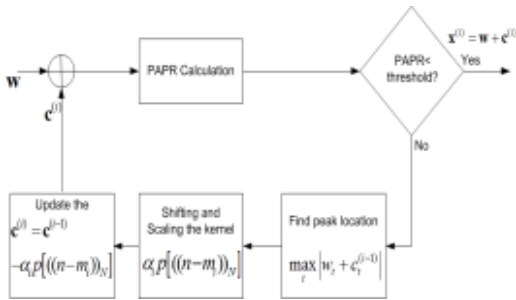


그림 4. 제안된 ATR 기법의 세 번째 단계
Fig. 4 Block diagram of the third step for the proposed ATR

$$c^{(i)} = c^{(i-1)} - \alpha_i p_t^*[(n-m_i)]_N \quad (8)$$

$$\alpha_i = \beta \times \max_t |w_t + c_t^{(i-1)}|, \quad \beta = \text{constant} \quad (9)$$

$$m_i = \arg \max_t |w_t + c_t^{(i-1)}| \quad (10)$$

식 (8)에서 $p_t^*[(n-m_i)]_N$ 는 커널함수 \mathbf{p} 가 시간축으로 m_i 만큼 순환이동된 결과를 의미한다. α_i 는 커널함수에 적용될 scale factor로 식(11)에 의해 결정된다.

제안된 ATR은 커널함수 \mathbf{p} 를 구성할 때 3.2단계에서 얻어진 결과 k^* 을 고려하여 만든다.

$$P_l = \begin{cases} 1, & l \in R \\ 0, & l \notin R \end{cases} \quad (11)$$

여기서 예약된 톤 세트 R 은 $R = \bigcup_k k^*$ 로 k^* 원소의 합집합으로 구성된다. \mathbf{p} 는 $\text{IFFT}(\mathbf{P})$ 로 결정된다. 제안된 ATR에서 적용된 TR 기법은 다음과 같다.

(1) Initial condition: set $\bar{\mathbf{x}}^{(0)} = \mathbf{x}$, $\mathbf{c}^{(0)} = [0 \dots 0]^T = \mathbf{0}_N$, and $\mathbf{p} = \text{IFFT}(\mathbf{P})$

(2) Find the OFDM symbol samples m_i for which $m_i = \arg \max_t |w_t + c_t^{(i-1)}|$, i.e., the location of the max peak. If all samples are below the target threshold, go to step 5.

(3) Update $\bar{\mathbf{x}}^{(i)}$ according to $\bar{\mathbf{x}}^{(i)} = \mathbf{x} + \mathbf{c}^{(i-1)} - \alpha_i p_t^*[(n-m_i)]_N$

(4) Increment the iteration counter $i = i + 1$. If $i < \text{Max iterations}$, go to step 2.

(5) Transmit $\bar{\mathbf{x}}^{(i)}$

IV. 모의실험 결과 및 분석

제안된 ATR 기법과 최적 TR 방법의 OFDM 신호에 대한 PAPR 감소 성능 및 복잡도 비교를 위해 모의실험을 수행하였다. 본 논문에서는 OFDM 시스템의 부반송파수 N 은 32, 64, 128, 예약된 톤의 개수 L 은 1을 고려하였고, 변조 방식으로는 QPSK를 고려하였으며, $Q=4$ 의 과표분화 과정을 적용하였다.

그림 5에서는 각각 ($N=32$, QPSK, Iteration=10) 및 을 적용하였을 때 제안된 ATR 기법 (“Proposed”)과 조합 가능한 모든 예약 톤을 통해 최적의 성능을 얻은 기존 TR 기법 (“Optimal”)과의 CCDF (Complementary Cumulative Distribution Function), 즉 $\text{Prob}(\text{PAPR} > \text{PAPR}_{\text{th}})$ 성능을 비교하여 나타내고 있다. Random의 결과는 무작위로 다수의 톤중 한 개의 톤을 예약한 결과를 나타낸 것이다. 제안된 ATR 기법과 기존의 최적 TR 기법이 $\text{CCDF}10^{-3}$ 에서 약 0.3 dB의 근소한 성능 차이를 보여주는 것을 확인 할 수 있다.

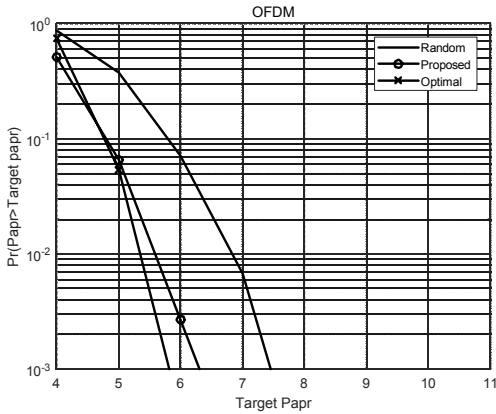


그림 5. 제안된 ATR 기법과 기존의 최적 TR 기법과의 성능 비교 (N=32, QPSK, Iteration=10)

Fig. 5 Comparison of the PAPR reduction performance between the proposed ATR and the optimal TR (N=32, QPSK, Iteration=10)

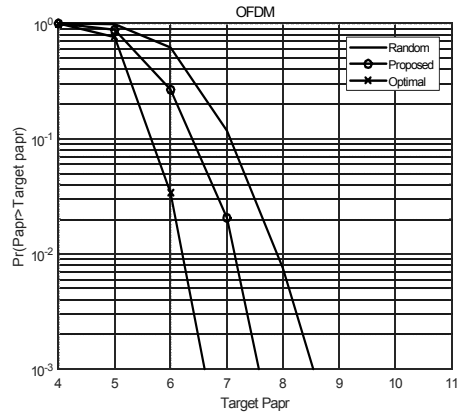


그림 7. 제안된 ATR 기법과 기존의 최적 TR 기법과의 성능 비교 (N=128, QPSK, Iteration=10)

Fig. 7 Comparison of the PAPR reduction performance between the proposed ATR and the optimal TR (N=128, QPSK, Iteration=10)

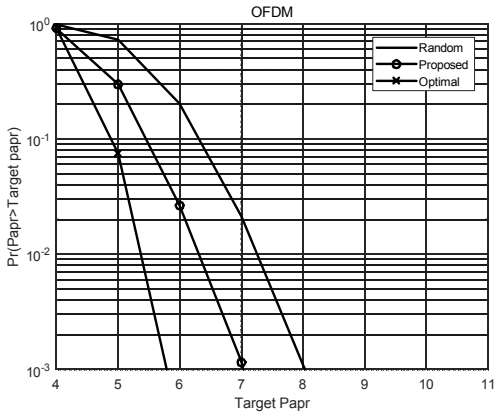


그림 6. 제안된 ATR 기법과 기존의 최적 TR 기법과의 성능 비교 (N=64, QPSK, Iteration=10)

Fig. 6 Comparison of the PAPR reduction performance between the proposed ATR and the optimal TR (N=64, QPSK, Iteration=10)

그림 6, 7에서는 각각 (N=64, QPSK), (N=128, QPSK)을 적용하였을 때 서브캐리어 변화에 따른 제안된 기법의 성능을 나타내고 있다. 서브캐리어 개수가 많아지고, 톤의 예약 개수가 유지되면 상대적으로 PAPR을 감소하기 위한 신호를 정확하게 얻어내기 힘들게 되는데 그러한 영향이 나타나고 있다.

그림 5에서 전체 톤의 개수 32개에 대한 예약된 톤의 개수 1개인 1/32의 경우 보다 1/64, 1/128로 고려하게 되면 시간축에서 가장 이상적인 파형인 임펄스 파형으로부터 멀어지게 되어 최적 성능과 차이가 더욱 커지는 것을 확인하였다. 따라서 서브캐리어수가 증가하면 톤의 예약개수도 적절히 조절하게 되는 경우 제안된 ATR 기법으로 최적의 성능을 보장하면서도 계산량을 획기적으로 줄일 수 있음을 확인하였다.

계속해서, TR 기법의 분석 결과 예약된 톤의 개수가 많아질수록 커널함수 p 가 임펄스 함수에 가까워지기 때문에 수식 (8),(9)를 수행할 때 재피크가 발생하는 경우가 확연히 줄어들게 된다. 예약된 톤의 개수가 적으면 적을수록 커널함수 p 의 주요 피크 성분과 주변의 side lobe 성분이 크기가 점점 더 비슷해져서 커널함수와 PAPR이 큰 본래 신호와 서로 차이를 구할 때 재피크 발생이 매우 높아지는 것을 확인하였다. 재피크 발생이 PAPRth까지 반복수행을 해야하는 것을 고려하면 data rate를 고려하여 적절하게 톤의 개수를 예약하고 iteration을 줄이는 것이 중요하다고 보여진다.

마지막으로 본 논문에서는 기존 TR 방법의 $O(LN^2)$ 의 계산량을 1회의 FFT 연산량으로 줄이면서도 성능이 최적의 TR 방법에 근접한 것을 보여준다.

References

- [1] L. Hanzo, M. Munster, B. J. Choi, and T. Keller, *OFDM and MC-CDMA for Broadband Multi-user Communications, WLANs and Broadcasting*. 발행도시: John Wiley & Sons, 2003.
- [2] P. van Nee and R. Prasad, *OFDM for Wireless Multimedia Communications*. 발행도시: Artech House Publishers, 2000.
- [3] S. Li, H. Kwon, and S. Kang, "An Approximated Model of the Coefficients for Interchannel Interference of OFDM System with Frequency Offset," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 13, no. 5, 2018, pp. 917-922.
- [4] S. Hwang, "Channel Estimation Based on LMS Algorithm for MIMO-OFDM System," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 7, no. 6, 2012, pp. 1455-1461.
- [5] H. Chen and S. Kang, "An Interchannel Interference Self-Cancellation Scheme for the Orthogonal Frequency Division Multiplexing System," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 13, no 4, 2018, pp. 729-736.
- [6] X. Li and L. J. Cimini, "Effects of clipping and filtering on the performance of OFDM," *Proc. VTC '97*, Phoenix, USA, May 1997, pp. 1634-1638.
- [7] X. Wang, T. T. Yhung, and C. S. Ng, "Reduction of peak-to-average power ratio of OFDM system using a companding technique," *IEEE Trans. Broadcast.*, vol. 45, no. 9, Sept. 1999, pp. 303-307.
- [8] R. W. Bauml, R. F. H. Fischer, and J. B. Huber, "Reducing the peak-to-average power ratio of multicarrier modulation by selective mapping," *IEE Electr. Lett.*, vol. 32, Oct. 1996, pp. 2056-2057.
- [9] L. Cimini, Jr. and N. Sollenberger, "Peak-to-average power ratio reduction of OFDM signal using partial transmit sequences," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 4, no. 3, Mar. 2000, pp. 86-88.
- [10] J. Tellado, "Peak to average power reduction for multicarrier modulation," Ph. D. dissertation, *Stanford University*, 2000.
- [11] B. S. Krongold and D. L. Jones, "An active-set approach for OFDM PAR reduction via tone reservation," *IEEE Trans. Signal Proc.*, vol. 52, no. 2, Feb. 2004, pp. 495-509.
- [12] S. Han and J. Lee, "Peak-to-average power ratio reduction of an OFDM signal by PAPR reduction sub-carriers," *Proc. APWCS 2004*, Seoul, Korea, Jan. 2004, pp. 3-6.
- [13] E. Lawley and C. J. Kikkert, "Peak-to-average power ratio reduction of OFDM signals using peak reduction carriers," *Proc. ISSPA '99*, Brisbane, Australia, Aug. 1999, pp. 737-740.
- [14] C. Tellambura, "Computation of the continuous-time PAR of an OFDM signal with BPSK subcarriers," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 5, no. 5, May 2001, pp. 185-187.

저자 소개

양모찬(Mo-Chan Yang)



2005년 숭실대학교 정보통신전자공학부 졸업(공학사)

2009년 숭실대학교 정보통신공학과 졸업(공학석사)

2014년 숭실대학교 정보통신공학과 졸업(공학박사)

2015년~2016년 GCT 리써치 선임연구원

2016년~현재 한화시스템 지상시스템팀 전문연구원

※ 관심분야 : LTE, 5G, OFDM 시스템, CR 네트워크

