

# DFT 확산 OFDM 시스템에서 효율적인 주파수 국소화를 위한 Ripple 윈도우의 특성과 성능 평가

안창영\*, 유흥균<sup>o</sup>

## Performance and Characteristic Evaluation of Ripple Windowing for Efficient Frequency Localization in DFT Spread OFDM System

Changyoung An\*, Heung-Gyoon Ryu<sup>o</sup>

요약

OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)은 높은 PAPR(Peak-to-Average Power Ratio)과 높은 OOB(Out-Of-Band) 전력을 갖는다. 본 논문에서는 이러한 OFDM의 약점을 개선시킬 수 있는 새로운 Ripple 윈도우를 사용하는 DFT(Discrete Fourier Transform) 확산 OFDM 시스템을 제안하고 성능을 평가한다. 높은 PAPR 특성은 DFT 확산 방법을 이용하여 효과적으로 감소시킬 수 있으며, 높은 OOB 전력은 새롭게 설계된 Ripple 윈도우를 사용하여 효과적으로 저감시킬 수 있다. Ripple 윈도우는 Overshoot 및 Ripple 특성이 추가된 윈도우이다. 이 윈도우는 주어진 윈도우 길이 내에서 더욱 높은 OOB 전력을 저감시키거나, 목표 OOB 전력을 달성하는데 요구되는 윈도우 길이를 줄일 수 있다. 시뮬레이션 결과를 통해 제안하는 RW-DFTs-OFDM (DFT spread OFDM using Ripple Window) 시스템은 기존 DFTs-OFDM 시스템과 비교하여 윈도우 길이가 128일 때, BER(Bit Error Rate) 성능과 PAPR 특성에서 일부 열화가 발생하지만 약 150dB의 OOB 전력을 저감시킬 수 있음을 확인하였다.

**Key Words** : RW-DFTs-OFDM, Ripple window, OFDM, OOB power, PAPR

### ABSTRACT

Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) has high peak-to-average power ratio (PAPR) and high out-of-band (OOB) power characteristics. In this paper, we propose a DFT (Discrete Fourier Transform) spread OFDM system using a new Ripple window. The proposed system that can improve the weakness of OFDM and evaluate its performance. High PAPR characteristic can be effectively reduced using the DFT spread method, and high OOB power can be effectively reduced by using the newly designed ripple window. The Ripple window has overshoot and ripple properties. This window can reduce the higher OOB power within a given window length or reduce the window length required to achieve the target OOB power. Simulation results show that the proposed DFT spread OFDM using Ripple window (RW-DFTs-OFDM) system has some deterioration in BER (bit error rate) performance and PAPR characteristic when the window length is 128 But OOB power of about 150dB can be reduced.

\* 이 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2016R1D1A1B01008046).

• First Author : Chungbuk National University, Department of Electronic Engineering, acy890217@naver.com, 학생회원

o Corresponding Author : Chungbuk National University, Department of Electronic Engineering, ecomm@cbu.ac.kr, 정회원  
논문번호 : 201901-413-A-RN, Received January 14, 2019; Revised February 22, 2019 Accepted March 3, 2019

## I. 서 론

OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)은 다중 반송파를 사용하여 데이터 심볼을 송수신 하는 기술이다<sup>[1]</sup>. 이 기술은 단일 반송파 시스템과 비교하여 다중경로 채널에서 매우 효율적이다. 다중경로 채널에서 단일 반송파 시스템의 송신 신호는 주파수 선택적 페이딩을 거치게 되므로 신호의 왜곡이 매우 심각하게 일어나게 되며 이로 인해 수신기에서는 매우 복잡하고 많은 연산량을 요구하는 등화기를 사용해야 한다. 그러나 OFDM 시스템의 경우 대역이 부반송파의 개수만큼 나뉘게 되어 각 부반송파는 주파수 비선택적 페이딩을 겪게 되며, 송신기에서 추가한 CP(Cyclic Prefix)에 의해 인접 심볼 간에 발생하는 ISI(Inter-Symbol Interference) 영향에서 자유롭게 되어 수신기에서 하나의 탭을 갖는 저 복잡도의 등화기를 사용할 수 있다<sup>[2]</sup>. 이는 수신기를 간소화 하고 고속 처리를 가능하게 한다.

최근 5G(5th generation) 이동통신을 위한 다양한 연구가 활발히 이루어지고 있으며<sup>[2-6]</sup>, 3GPP(3rd Generation Partnership)에서는 5G 이동통신을 위한 첫 번째 표준인 Release-15를 발표하였다<sup>[7]</sup>. 이 표준에서는 물리계층의 표준 변조 기술로 OFDM을 채택하였다. OFDM은 앞에서 소개한 장점으로 인하여 이미 4G(4th Generation) 이동통신, WLAN(Wireless Local Area Network) 등에 핵심 기술로 사용되고 있으며, 다가오는 5G 및 B5G 이동통신을 위한 핵심적인 기술로써 주목받고 있다. 그러나 OFDM은 다중 반송파의 신호들이 합쳐지기 때문에 높은 PAPR(Peak-to-Average Power Ratio) 특성을 갖으며, 하나의 심볼과 인접 심볼들 간에 신호의 불연속성으로 인해서 높은 OOB(Out-Of-Band) 전력 특성을 보인다<sup>[8][9]</sup>. PAPR이 높을 경우 HPA(High Power Amplifier)의 비선형 왜곡이 발생할 가능성이 높으며 이로 인하여 OOB 전력이 더욱 증가되는 문제가 발생한다. OOB 전력이 높을 경우 스펙트럼 마스크 조건을 만족시키기 위하여 할당 된 대역폭 내에서 부반송파를 최대한으로 활용하기 어려우며 더욱 넓은 보호대역을 사용해야 한다. 이러한 점은 OFDM의 효율을 감소시키게 된다. OFDM의 높은 PAPR 문제는 DFT(Discrete Fourier Transform) 확산 방법을 통하여 효과적으로 극복할 수 있으며, 이러한 기술은 4G 이동통신의 상향링크에도 이미 적용되어 있는 효과적인 PAPR 저감 기술이다<sup>[10]</sup>. 본 논문에서는 이 기술을 사용한 OFDM을 DFTs-OFDM(DFT spread OFDM)

이라고 표기한다. 다음으로 OFDM에서 하나의 심볼과 인접 심볼들 간의 불연속성에 의해 발생하는 높은 OOB 전력 문제는 윈도우(Window)나 필터(Filter)를 사용하여 저감시킬 수 있다. 이러한 기술들로 UPMC(Universal Filtered Multi-Carrier), FBMC(Filter Bank Multi-Carrier), W-OFDM(Windowed OFDM) 등이 있다. 이 시스템들은 OOB 전력을 감소시켜 주파수 자원을 효율적으로 사용할 수 있도록 한다. FBMC는 가장 우수한 OOB 전력 저감 성능을 보이지만, OQPSK(Offset Quadrature Phase Shift Keying) 변조를 사용해야 함으로 기존 시스템들과의 하위 호환성(Backward Compatibility)이 좋지 않으며 MIMO(Multiple Input Multiple Output) 기술을 결합하는데도 어려움이 있다<sup>[9]</sup>. UPMC 시스템은 OOB 전력을 효과적으로 저감시키지만, 수신기에서 기존 OFDM 대비 2배의 크기를 갖는 DFT 연산을 요구하며, CP를 사용하지 않음으로 인하여 다중경로 채널에서 성능열화가 발생할 수 있다<sup>[9]</sup>. W-OFDM은 기존 윈도우 함수들을 사용하여 OOB 전력을 저감시키는 방법으로 복잡도가 낮은 특성이 있다<sup>[9]</sup>. 일반적으로 윈도우 방법은 윈도우를 심볼에 간단히 곱해주기 때문에 복잡도가 매우 낮은 장점이 있다. 이러한 특성을 고려하여 본 논문에서는 윈도우를 사용하는 방법에 초점을 맞춘다. 일반적으로 송신 신호에 윈도우(Windowing)을 하는 방법이 필터링(Filtering)을 하는 방법보다 직관적으로 간단하게 처리 가능하다. 윈도우를 사용하는 OFDM 신호의 OOB 전력은 윈도우 함수의 특성에 영향을 받게 된다. 이때 윈도우 길이를 최소화 하면서 더욱 많은 OOB 전력을 저감시켜야 시간 자원의 추가적인 소모를 최소화 할 수 있다.

본 논문에서는 OFDM이 갖는 이러한 두 가지의 약점을 개선시킬 수 있는 새로운 윈도우를 사용하는 DFTs-OFDM(DFT spread OFDM) 시스템을 제안한다. 제안하는 시스템은 RW-DFTs-OFDM(DFT spread OFDM using Ripple Window) 시스템으로 새롭게 설계된 Ripple 윈도우를 사용한다. 이 시스템은 DFT 확산 방법을 통하여 PAPR을 효과적으로 저감시키며, 새로운 윈도우를 적용하여 기존 일반적인 윈도우를 사용하는 시스템에 비하여 OOB 전력을 더욱 효과적으로 저감시킨다. 본 논문에서는 우선 기본적인 DFTs-OFDM 시스템에 대하여 소개한다. 그 다음 새롭게 설계된 Ripple 윈도우와 이를 적용한 RW-DFTs-OFDM 시스템을 제안한다. 그 다음 기존 OFDM 및 DFTs-OFDM 시스템과 제안하는

RW-DFTs-OFDM 시스템의 주요 특성과 성능을 평가하고 비교 분석한다. 이러한 비교 분석을 위하여 스펙트럼 및 PAPR 특성과 BER 성능 평가한다.

## II. DFTs-OFDM

DFTs-OFDM은 OFDM의 높은 PAPR을 효율적으로 제거하기 위하여 DFT 확산 기술을 사용한다. 그림 1은 DFTs-OFDM 시스템의 블록도를 나타낸다. 이 시스템은 OFDM 시스템에서 송신기 측에 DFT 연산이, 수신기 측에 iDFT 연산이 추가된 구조를 가지고 있다. 송신기에서는 심볼을 다중반송파에 맵핑하기 위한 iDFT 연산 전에  $M$ 개의 심볼에 대하여 DFT 연산을 수행한다. 이 연산 후에 심볼의 양 끝에 0이 추가된 후  $N$ 개의 iDFT 연산이 수행된다. 수신기는 송신기의 반대 순서로  $N$ 개의 DFT 연산을 한 후에  $M$ 개의 iDFT 연산을 수행한다. 추가적으로 다중경로 채널에 의한 ISI 영향을 극복하고, 각 부반송파의 직교성을 유지시키기 위해 송신기에서는 CP(Cyclic Prefix)를 추가하며, 수신기에서는 CP를 제거하고, 주파수 영역에서 각 부반송파에 대하여 간단한 등화를 수행한다. 일반적으로 잘 알려진 간단한 등화기로는 ZF(Zero Forcing) 등화기가 있다. DFT 확산 방법은 송수신기에서 간단하고 직관적인 처리를 통해 OFDM의 PAPR을 효과적으로 저감시킨다.

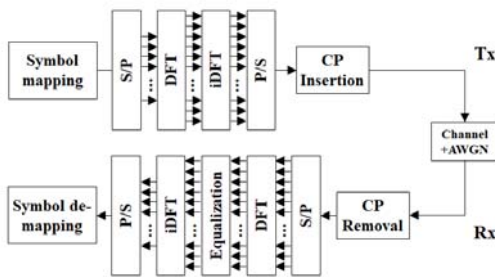


그림 1. DFTs-OFDM 시스템의 블록도  
Fig. 1. Block diagram of DFTs-OFDM system.

## III. 제안하는 RW-DFTs-OFDM

OFDM은 높은 PAPR과 OOB 전력을 갖는다. 높은 PAPR 특성은 송신기에서 가격이 높은 선형 HPA의 사용과 전력효율을 감소시키는 IBO(Input Back-Off)를 요구하며, 이러한 조건이 만족되지 않을 경우 신호 왜곡이 발생할 수 있으며, 결정적으로 시스템의 성능

을 열화시키게 된다. 높은 OOB 전력은 인접 대역에 간섭을 일으킬 수 있는 요인으로, 일반적으로 OOB 전력이 높을수록 더 넓은 보호대역을 사용해야 하며, 이는 결국 스펙트럼 자원의 낭비를 야기하여 효율을 감소시키게 된다. 본 논문에서는 이와 같은 OFDM의 문제점을 극복하고자 RW-DFTs-OFDM 시스템을 제안한다. 제안하는 시스템은 PAPR의 제거 방법으로 잘 알려진 DFT 확산 방법과 OOB 전력을 획기적으로 감소시키는 새로운 윈도우를 사용한다.

### 3.1 The Proposed System

본 논문에서는 RW-DFTs-OFDM 시스템을 제안한다. 그림 2는 제안하는 시스템의 블록도를 나타낸다. 제안하는 시스템은 송신기에서 DFTs-OFDM 변조 후에 CP를 추가한 후, 추가적으로 심볼을 확장하고 새롭게 설계된 Ripple 윈도우를 사용하여 윈도우를 수행한다. 수신기에서는 확장된 부분을 제거하고, 윈도우 특성에 대한 보상을 수행한 후에 CP를 제거한 뒤 DFTs-OFDM 복조를 수행한다. 수신기에서 Ripple 윈도우에 대한 CP 및 데이터 부분의 신호 왜곡을 보상하기 위하여 간단하게 송신기에서 사용한 Ripple 윈도우를 이용하여 신호에서 이 윈도우를 나누어 줌으로써 구현이 가능하다. 여기에서 양측에 윈도우 되는 부분은 제외하고 정상 부분만을 선택하여 나누어 준다. 이러한 방법으로 AWGN 채널에서 간단하게 Ripple 윈도우에 대한 영향을 보상할 수 있다. 그러나 다중경로 채널에서는 여러 신호가 중첩되기 때문에 이러한 방법을 사용하기 어렵다.

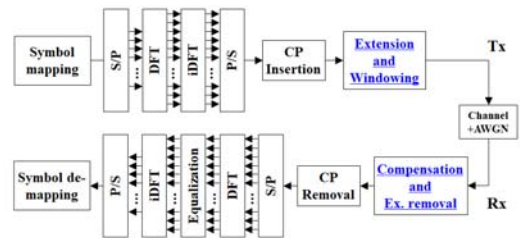


그림 2. 제안하는 RW-DFTs-OFDM 시스템의 블록도  
Fig. 2. Block diagram of the proposed RW-DFTs-OFDM system.

### 3.2 Ripple Window

일반적으로 OOB 전력을 저감하기 위하여 윈도우 기술을 사용한다. 잘 알려진 윈도우로는 Chebyshev, Hamming, Hann, Kaiser, Nuttall, Parzen 윈도우 등이 있다. 이러한 윈도우들의 시간영역의 특성은 매우

부드럽게 상승한 뒤 하강한다. 그러나 일반적인 OFDM 시스템에 윈도우를 적용할 때에는 CP가 추가된 변조 신호의 왜곡을 최소화하기 위하여, CP-OFDM 심볼 부분은 윈도우가 되지 않도록 한다. 즉, 일반적인 윈도우를 생성하여 반으로 나눈 뒤 그 사이에 심볼 길이만큼 1을 추가한다. 이러한 방법으로 윈도우가 강제로 확장될 경우 그림 3과 그림 4와 같이 이 윈도우의 주파수 응답 특성이 변경될 수 있다. 강제로 1을 추가하는 부분으로 인하여 윈도우 함수의 부드러운 변화에 영향을 주어 윈도우 자체의 OOB 전력이 상승하는 문제가 발생한다.

Ripple 윈도우는 OFDM 시스템을 위해 사용되는 기존 강제로 확장된 윈도우의 특성을 개선하는 윈도우이다. Ripple 윈도우는 시간영역에서 함수의 시작부터 끝까지 완만한 변화를 유지한다. 이러한 특성으로 OOB 전력을 획기적으로 저감시킬 수 있다. 그림 5는 본 논문에서 사용하는 Ripple 윈도우의 시간영역 특성을 나타낸다. 이 윈도우는 CP-OFDM 심볼의 확장

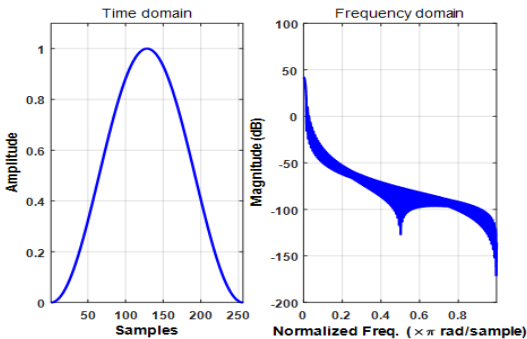


그림 3. 일반적인 윈도우의 시간영역 및 주파수 응답 특성. Fig. 3. Time-domain and frequency-domain Characteristics of typical window function (Hann).

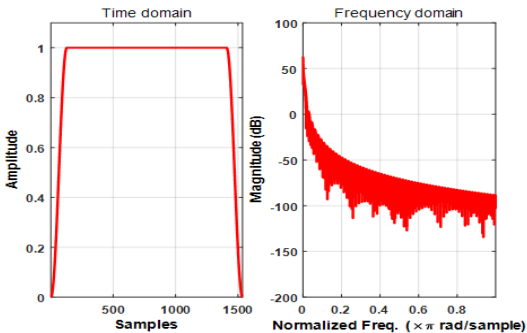


그림 4. OFDM 시스템에 적용하기 위해 강제로 확장된 윈도우의 시간영역 및 주파수 응답 특성 (Hann). Fig. 4. Time-domain and frequency-domain Characteristics of extended window function for OFDM systems (Hann).

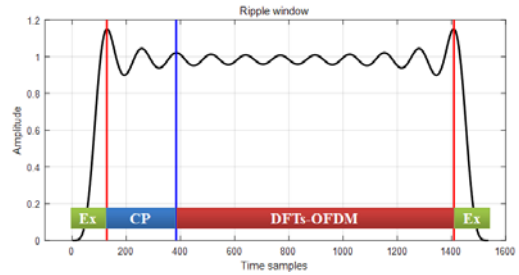


그림 5. 새롭게 제안하는 Ripple 윈도우의 시간영역 특성. Fig. 5. Time-domain characteristic of the proposed ripple window.

영역에서 상승과 하강을 하며, 심볼 구간동안 Ripple 특성을 갖는다. 이러한 윈도우 구조는 상승 후 강제로 1로 변화되는 기존 윈도우 방법에 비하여 보다 부드러운 변화 특성을 갖으며, 이로 인하여 보다 낮은 OOB 전력 특성을 기대할 수 있다. 이와 같은 Ripple 윈도우는 Sinc 함수와 Rectangular 윈도우의 Convolution 연산을 통해 생성될 수 있다. 여기에서 Sinc 함수는 사인함수와 그 변수의 비로 나타내어진다. 여기에서 Sinc 함수의 시간 영역 변수를  $t$ 라 할 때, 이 변수의 구간과 샘플링 간격을 가변하여 다양한 모양의 Ripple 윈도우를 생성할 수 있으며, 설계하기 위한 시스템에 Ripple 윈도우를 적용하기 위해서는 스펙트럼 및 PAPR 특성을 최적화한 Sinc 함수의 범위와 샘플링 간격 파라미터를 효과적으로 선택하여 Ripple 윈도우를 생성하고 이를 사용해야 한다.

#### IV. 시뮬레이션 결과 및 분석

본 논문에서는 제안하는 RW-DFTs-OFDM 시스템의 BER 성능과 스펙트럼 및 PAPR 특성을 기존 시스템과 비교 평가한다. 표 1은 이를 위한 시뮬레이션 파라미터를 나타낸다. QPSK, 16-QAM, 64-QAM 심볼을 사용하는 OFDM과 DFTs-OFDM 시스템과 함께 RW-OFDM 및 RW-DFTs-OFDM 시스템의 성능을 평가하였다.

윈도우는 제안하는 Ripple 윈도우와 Rectangular 윈도우, Hann 윈도우를 고려하였다. 전체 부반송파는 1024개, 사용하는 부반송파는 중앙에 512개의 부반송파를 사용하였다. CP길이는 전체 심볼 길이의 1/4로 설정하였으며, 다중경로 채널 역시 최대 CP길이와 같은 만큼의 지연을 고려하였다. 그리고 확장 및 윈도우 되는 길이는 왼쪽 128, 오른쪽 128로 설정하였다. 그리고 심볼과 심볼 간에 확장 및 윈도우 되는 구간 128

표 1. 시뮬레이션 파라미터  
Table 1. Simulation parameters

Parameter	Value
Symbol type	QPSK, 16-QAM, 64-QAM
Modulation	OFDM, DFTs-OFDM
Window function	- Ripple window - Rectangular window - Hann window
# of total subcarriers	1024
# of active subcarriers	512
CP length	256
Channel	- AWGN - Rayleigh fading channel with 256-taps
Window length	left: 128, right: 128

샘플을 중첩을 시켰다. 따라서 인접 심볼간의 간격은 128이 된다. Ripple 윈도우를 이용한 윈도우 방법은 Hann 윈도우와 같은 기존 윈도우를 사용한 윈도우 방법과 같이 윈도우를 미리 생성하고 간단히 이 윈도우를 생성된 심볼에 곱하는 방법이기 때문에 윈도우 방법에 대한 복잡도는 다르지 않다.

그림 6은 RW-DFTs-OFDM과 기존 시스템의 스펙트럼 트럼을 비교한 것이다. Rectangular 윈도우를 사용하는 DFTs-OFDM 시스템의 경우 OOB 전력이 약 -40dB까지 감소될 수 있으며, 일반적인 Hann 윈도우를 사용할 경우 약 -120dB까지 OOB 전력이 감소된다. 그러나 제안하는 RW-DFTs-OFDM의 경우 약 -190dB까지 OOB 전력이 저감되어 우수한 주파수 국소화(Frequency Localization) 특성을 갖는 것을 확인

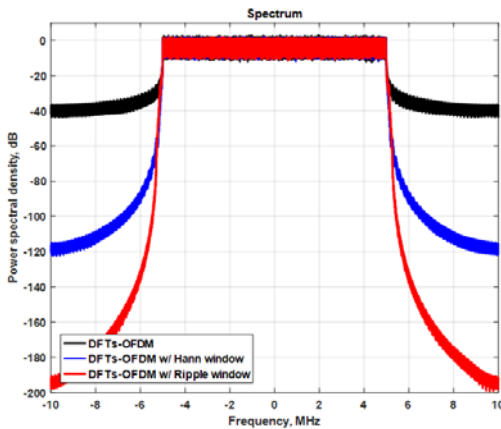


그림 6. RW-DFTs-OFDM과 기존 시스템의 스펙트럼 비교  
Fig. 6. Spectrum comparison of the proposed RW-DFTs-OFDM and the conventional systems.

할 수 있다.

그림 7은 RW-DFTs-OFDM과 기존 시스템의 PAPR을 비교한 것이다. RW-DFTs-OFDM의 경우 기존 윈도우를 사용하는 시스템에 비하여 약 0.8dB의 PAPR 특성이 열화되는 것을 확인할 수 있다. 이는 Ripple 윈도우의 모양에 의해 발생하는 열화 특성으로 윈도우의 상단이 물결모양으로 되어 있으며, 윈도우의 상승이 끝나는 부분과 하강이 시작되는 부분의 물결 특성이 매우 높기 때문에 발생하게 된다. 이는 물결 특성을 보다 낮게 줄여줄 경우 PAPR의 저감 효과를 볼 수 있을 것으로 판단된다.

그림 8은 AWGN 채널에서 RW-DFTs-OFDM과 기존 시스템의 BER 성능을 평가하고 비교한 것이다. RW-DFTs-OFDM은 사용하는 윈도우의 모양이 물결 특성을 가지므로 이를 보상하지 않을 경우 일부 성능 열화를 초래할 수 있다. QPSK에서는 윈도우의 특성에 의해 열화되는 수치가 크지 않으나 16-QAM이나 64-QAM과 같이 높은 차수의 심볼을 사용할 경우 심볼간의 유클리디안 거리가 짧기 때문에 윈도우 특성에 의한 영향이 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그러나 AWGN 채널에서는 윈도우의 역 특성을 이용하여 쉽게 보상이 가능하여, 윈도우를 사용하지 않는 기존 시스템과 같은 BER 성능을 확보할 수 있다.

그림 9는 다중경로 채널에서 RW-DFTs-OFDM과 기존 시스템의 BER 성능을 평가하고 비교한 것이다. AWGN 채널과 같이 심볼의 차수가 높아질수록 윈도우 특성에 의한 성능 열화가 크게 일어나는 것을 확인할 수 있다. RW-DFTs-OFDM의 BER이 기존 CP-OFDM의 BER과 근접하게 되는 SNR은 QPSK

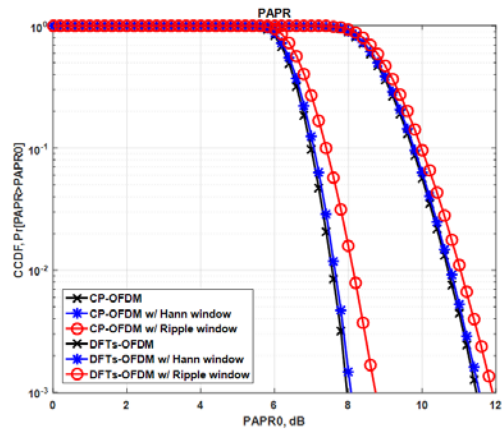


그림 7. RW-DFTs-OFDM과 기존 시스템의 PAPR 비교  
Fig. 7. PAPR comparison of the proposed RW-DFTs-OFDM and the conventional systems.

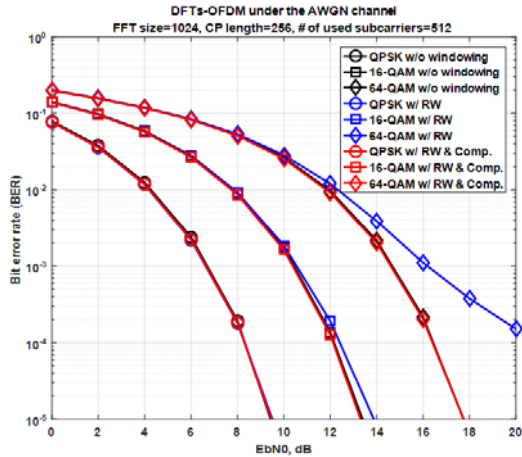


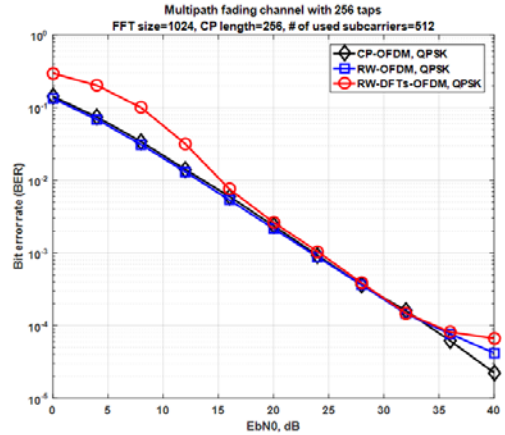
그림 8. AWGN 채널에서 RW-DFTs-OFDM과 기존 시스템의 BER 비교  
Fig. 8. BER comparison of the proposed RW-DFTs-OFDM and the conventional systems in AWGN channel.

심볼을 사용할 경우 32dB, 16-QAM 심볼을 사용할 경우에는 30dB, 64-QAM 심볼을 사용할 경우에는 28dB인 것을 확인할 수 있다. 이 SNR 조건 이후에는 기존 시스템의 BER과 성능 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있다.

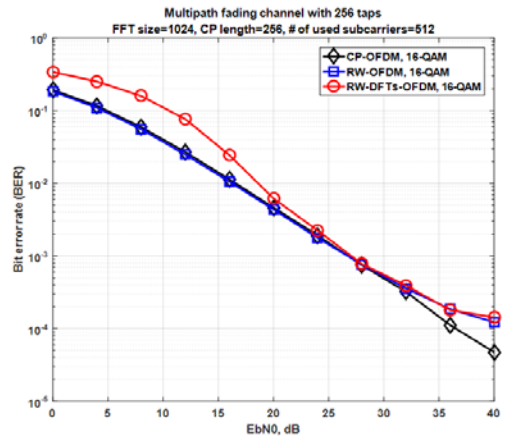
스펙트럼과 PAPR 특성, BER 성능을 전체적으로 고려해 보면, RW-DFTs-OFDM 시스템은 매우 높은 수준의 OOB 전력을 저감할 수 있으나, PAPR과 다중 경로 채널에서의 BER 성능에서 일부 열화가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 특성 하에서 제안하는 시스템은 SNR이 40dB인 조건에서 QPSK 심볼을 사용할 경우  $8 \times 10^{-5}$ , 16-QAM 심볼을 사용할 경우  $1.5 \times 10^{-4}$ , 64-QAM 심볼을 사용할 경우  $5 \times 10^{-4}$ 의 BER 성능을 달성할 수 있음을 확인할 수 있다.

### V. 결론

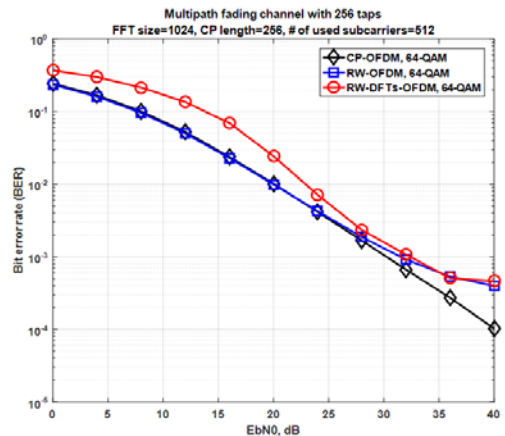
본 논문에서는 새로운 Ripple 윈도우를 사용하는 RW-DFTs-OFDM 시스템을 설계하고 스펙트럼 및 PAPR 특성과 BER 성능을 평가하였다. 제안하는 시스템은 윈도우의 길이가 왼쪽과 오른쪽에 각각 128일 때, 약 -190dB의 OOB 전력을 저감시킬 수 있어 매우 효율적인 주파수 국소화를 달성할 수 있음을 확인할 수 있다. 그러나 윈도우 자체의 물결 특성으로 인하여 약 0.8dB의 PAPR 특성이 열화된다. 그러나 이 수치



(a) QPSK



(b) 16-QAM



(c) 64-QAM

그림 9. 다중경로 채널에서 RW-DFTs-OFDM과 기존 시스템의 BER 비교  
Fig. 9. BER comparison of the proposed RW-DFTs-OFDM and the conventional systems in Rayleigh fading channel.

는 제안하는 시스템이 갖는 장점과 비교하여 수용할 만한 수준으로 평가된다. 추가적으로 AWGN 채널에서는 기존 시스템과 동일한 BER 성능을 낼 수 있으나 다중경로 환경에서 BER 성능의 열화가 일부 발생하게 된다. 이러한 다중경로 채널에서의 성능 열화 특성이 향후 연구를 통해 수신기에서 추가적인 신호처리로 극복된다면, 제안하는 시스템의 우수성이 더욱 강조될 것으로 판단된다.

### References

[1] L. Cimini, "Analysis and simulation of a digital mobile channel using orthogonal frequency division multiplexing," in *IEEE Trans. Commun.*, vol. 33, no. 7, pp. 665-675, Jul. 1985.

[2] P. H. Moose, "A technique for orthogonal frequency division multiplexing frequency offset correction," in *IEEE Trans. Commun.*, vol. 42, no. 10, pp. 2908-2914, Oct. 1994.

[3] J. G. Andrews, et al., "What will 5G be?," in *IEEE J. Sel. Areas in Commun.*, vol. 32, no. 6, pp. 1065-1082, Jun. 2014.

[4] T. S. Rappaport, et al., "Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work!," in *IEEE Access*, vol. 1, pp. 335-349, 2013.

[5] A. Osseiran, et al., "Scenarios for 5G mobile and wireless communications: the vision of the METIS project," in *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 5, pp. 26-35, May 2014.

[6] H. Ji, S. Park, J. Yeo, Y. Kim, J. Lee, and B. Shim, "Ultra-reliable and low-latency communications in 5G downlink: Physical layer aspects," in *IEEE Wireless Commun.*, vol. 25, no. 3, pp. 124-130, Jun. 2018.

[7] A. Hoglund, D. P. Van, T. Tirronen, O. Liberg, Y. Sui, and E. A. Yavuz, "3GPP release 15 early data transmission," in *IEEE Commun. Standards Mag.*, vol. 2, no. 2, pp. 90-96, Jun. 2018.

[8] S. H. Han and J. H. Lee, "An overview of peak-to-average power ratio reduction techniques for multicarrier transmission," in *IEEE Wireless Commun.*, vol. 12, no. 2, pp.

56-65, Apr. 2005.

[9] C. An and H.-G. Ryu, "BER performance comparison and evaluation of 5G candidate waveforms based on DFT spreading under the nonlinear HPA," *J. KICS*, vol. 41, no. 4, pp. 415-423, Apr. 2016.

[10] N. Prasad, S. Wang, and X. Wang, "Efficient receiver algorithms for DFT-spread OFDM systems," in *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 8, no. 6, pp. 3216-3225, Jun. 2009.

### 안 창 영 (Changyoung An)



2013년 2월 : 충북대학교 전자공학과(공학사)  
 2015년 2월 : 충북대학교 전자공학과(공학석사)  
 2015년 3월~현재 : 충북대학교 전자공학과 박사과정  
 <관심분야> 차세대 이동통신시스템, 무선통신시스템, 디지털신호처리

### 유 흥 균 (Heung-Gyoon Ryu)



1988년~현재 : 충북대학교 전자공학과 교수  
 2002년 3월~2004년 2월 : 충북대학교 컴퓨터정보통신연구소 소장  
 <관심분야> 무선통신시스템, 위성통신, B5G/6G 이동통신시스템, 통신회로 설계 및 통신 신호 처리