

효과적인 OOB 전력 저감을 위한 Ripple 윈도우를 사용하는 OFDM 시스템 설계와 성능 평가

안창영*, 유흥균°

Design and Performance Evaluation of OFDM System Using Ripple Window for Effective OOB Power Reduction

Changyoung An*, Heung-Gyoon Ryu°

요약

본 논문에서는 시간 자원의 손실을 최소화 하면서 OOB(Out-Of-Band) 전력을 효과적으로 저감시킬 수 있는 RW-OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing using Ripple Window) 시스템을 제안한다. 제안하는 시스템은 Ripple 윈도우를 사용하며, 심볼의 중첩 전송을 통해 시간-주파수 국소화(Localization) 특성을 향상시킨다. 시뮬레이션 결과를 통해 RW-OFDM 시스템은 기존 윈도우를 사용하는 CP-OFDM 시스템과 비교하여 PAPR(Peak-to-Average Power Ratio) 특성은 유사하고, OOB 전력은 약 100dB 더 낮은 것을 확인할 수 있다. AWGN(Additive White Gaussian Noise) 환경에서는 RW-OFDM과 기존 CP-OFDM 시스템과 성능이 유사하며, Rayleigh 페이딩 채널에서는 저차 변조를 사용하는 RW-OFDM 시스템이 10^{-4} 의 BER(Bit Error Rate) 조건에서 기존 시스템과 약 1dB 이내의 성능 차이를 갖는 것을 확인할 수 있다. 더욱이 심볼을 중첩시켜 보낼 때, 기존 시스템과 비교하여 제안하는 시스템은 시간 자원 손실을 약 40% 개선할 수 있음을 확인하였다.

Key Words : OFDM, RW-OFDM, ripple window, OOB power, spectral efficiency

ABSTRACT

In this paper, we propose a novel orthogonal frequency division multiplexing system using a ripple window (RW-OFDM) that minimizes the loss of time resources while effectively reducing out-of-band (OOB) power. The proposed system uses a ripple window and improves the time-frequency localization characteristics through overlap transmission of symbols. Simulation results show that the RW-OFDM system has a similar peak-to-average power ratio characteristic to conventional CP-OFDM using general windows and the OOB power is about 100 dB lower than the conventional system. In the additive white Gaussian noise environment, bit error rate (BER) performance of the RW-OFDM system is similar to that of the CP-OFDM system using existing windows. In the Rayleigh fading channel, the RW-OFDM system using a low level modulation has a performance difference of less than 1dB from the existing system under the BER condition of 10^{-4} . Furthermore, when the symbols are overlapped, the proposed system can improve the time resource loss by about 40% compared with the conventional system.

* 이 논문은 2018년도 한국항공우주연구원의 지원을 받아 수행된 연구임. 그리고 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

° Corresponding Author : Chungbuk National University, Department of Electronic Engineering, ecomm@cnu.ac.kr, 정회원

논문번호 : 201812-392-A-RN, Received December 19, 2018; Revised February 14, 2019 Accepted February 15, 2019

I. 서 론

최근 5G(5th Generation) 및 B5G(Beyond 5G)와 같은 이동통신과 관련 연구가 가속화 되고 있다^[1]. 3GPP(3rd Generation Partnership Project)에서는 NSA(Non-Standalone) 5G 이동통신을 위한 첫 번째 표준인 Release-15를 발표하였다. 이 표준에서는 물리 계층의 표준 변조 기술로 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)을 채택하였다. OFDM은 다양한 장점으로 인하여 이미 4G(4th Generation) 이동통신, WLAN(Wireless Local Area Network) 등에 핵심 기술로 사용되고 있으며, 5G 및 B5G(Beyond 5G) 이동통신에서도 핵심적인 기술로 주목받고 있다^[2-4]. OFDM은 직교하는 다중반송파에 심볼을 맵핑하여 전송하는 기술이다^[4]. OFDM은 CP(Cyclic Prefix)를 사용하여 다중경로 페이딩에 의한 ISI(Inter-Symbol Interference)를 제거함으로써 수신기의 등화 복잡도를 줄이고 고속 송수신을 가능하게 한다. 그러나 OFDM은 OOB(Out-of-Band) 전력이 높은 문제가 있다. 이러한 문제로, 할당된 대역폭에서 양 끝 부분에 사용하지 못하는 부분이 많아 이 대역폭을 완전하게 사용하기 힘들고 넓은 보호대역을 사용해야 한다. 이러한 점은 스펙트럼 효율을 감소시키는 주요 원인이다. 이를 해결하기 위하여 WOLA(Weighted Overlap Add), FBMC(Filter Bank Multi-carrier), UFMC(Universal Filtered Multi-carrier), W(Windowed)-OFDM과 같이 OFDM에 윈도우(Windowing) 또는 필터링(Filtering) 기법을 사용하여 OOB 전력을 저감시키는 연구가 활발히 이루어지고 있다^[3-6]. 이러한 시스템들에서는 윈도우 함수의 종류가 스펙트럼의 모양에 큰 영향을 미치게 된다. 일반적으로 CP-OFDM 심볼에 윈도우를 할 때, 이 심볼의 양 끝을 확장하고 확장된 부분을 윈도우 한다. 여기에서 확장된 부분을 위한 윈도우는 일반적인 윈도우 함수를 통해 생성된 윈도우를 반으로 나누어 만들게 된다. 일반적인 윈도우 함수로는 Hann, Chebyshev 윈도우 등이 있다. 이러한 방법은 OFDM이 갖는 높은 OOB 전력을 감소시킬 수 있다. 특히 윈도우 길이를 길게 할 경우 OOB 전력을 더욱 크게 감소시킬 수 있다. 그러나 윈도우 길이가 늘어나게 되면 시간 자원의 손실을 초래할 수 있다. 따라서 윈도우 길이를 최소화 하면서 OOB 전력을 저감시키는 것이 중요하다.

본 논문에서는 최근 제안된 시간자원의 손실을 최소화 하면서 우수한 OOB 전력 저감 성능을 낼 수

있는 새로운 윈도우를 사용하여 RW-OFDM 시스템을 설계하고 성능과 특성을 평가한다. 제안하는 시스템에 사용하는 윈도우는 Ripple 윈도우이다. Ripple 윈도우는 신호의 크기가 0에서 정상상태에 빠르게 도달할 경우 발생하는 Overshoot 및 Ripple 특성을 활용하여 설계된다^[7]. Ripple 윈도우는 동일한 윈도우 길이를 사용하는 조건에서 기존 윈도우 함수들에 비해 더욱 우수한 OOB 전력을 저감시킬 수 있도록 설계되었다^[7]. 현재 Ripple 윈도우를 사용하는 OFDM에 대한 연구는 기초적으로 Ripple 윈도우를 CP-OFDM 심볼에 적용하여 특성을 파악한 수준이다. 기존의 연구에서는 Ripple 윈도우를 적용하기 위하여 심볼을 양쪽으로 확장한다. 이러한 확장 영역은 시간 자원을 낭비하게 된다. 본 논문에서는 이러한 시간 자원 낭비를 최소화 하는 RW-OFDM 시스템을 제안한다. 그리고 시뮬레이션을 통하여 Ripple 윈도우를 CP-OFDM 시스템에 적용하였을 때, OOB 전력 저감 특성, PAPR(Peak-to-Average Power Ratio) 특성, BER(Bit Error Rate) 성능을 평가하고 분석한다. 더욱이 제안하는 시스템에서 성능의 열화가 크게 증가하지 않는 조건에서, 확장 영역에 의한 시간 자원 낭비를 최소화 하기 위한 중첩 비율을 정량적으로 파악하고 분석한다.

II. OFDM 시스템에서 OOB 저감 방법

2.1 시스템 모델

OFDM은 여러개의 부분반송파를 이용하여 심볼을 전송한다^[5]. 여기에서 각 부분반송파는 서로 직교하여 서로 간에 간섭이 발생하지 않는다. OFDM 시스템은 송신기에서 CP를 추가하여 다중경로 채널에 의한 ISI에 매우 강인하다^[5]. 따라서 CP-OFDM은 다중경로 페이딩 채널에서도 채널 등화가 매우 간단하게 완료할 수 있다. 이는 수신 신호의 처리 시간을 효과적으로 단축시켜 고속 송수신을 가능하게 한다. 그러나 CP-OFDM은 Rectangular 윈도우를 사용하기 때문에 인접 심볼간 불연속적인 구간이 발생하여 OOB 전력이 매우 높은 문제점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방법 중 하나로 윈도우 기술이 있다. 윈도우 기술을 사용하면 인접 심볼간 신호의 연결이 연속적으로 부드럽게 이루어지기 때문에 원치 않는 주파수 성분의 발생이 억압되며, 결과적으로 OOB 전력이 낮아진다. 그러나 CP-OFDM 심볼 자체에 윈도우를 수행하면 CP의 직교성이 손상되며, 데이터 부분의 신호도 손상되어 전체적인 시스템의 성능을 열화시킬 수 있다. 따라서 CP-OFDM 심볼의 시작과 끝에 일정 길

이만큼 확장을 한 후 윈도잉을 수행한다. 확장된 부분만 윈도잉이 수행되기 때문에 심볼의 데이터 손상은 발생하지 않으면서 OOB 전력이 저감된다. 그러나 확장 길이만큼 시간 자원이 손실되므로, 최대한 짧은 길이만을 확장하여 윈도잉을 수행해야 한다. 더욱이 윈도잉 함수의 특성에 따라 OOB 전력의 저감 특성이 달라지기 때문에 효과적인 윈도잉을 선택하는 것도 매우 중요하다.

그림 1은 윈도잉 기술을 사용하는 CP-OFDM 시스템의 블록도를 나타낸다. 송신기에서는 iDFT(inverse Discrete Fourier Transform) 연산을 통해 데이터 심볼들을 다중반송파에 매핑한다. 그 다음 CP를 추가하고, CP-OFDM 심볼의 양 끝을 확장한다. 심볼을 확장할 때에도 CP를 붙이는 것과 같이 직교성이 유지되도록 확장한다. 그 다음 윈도잉을 수행하고 송신한다. 수신기에서는 우선 확장된 부분과 CP를 제거한다. 그 다음 DFT 연산을 통해 다중반송파에서 데이터 심볼들을 디맵핑하고, 채널 등화를 수행한다. 만약 CP-OFDM 시스템에 특별한 윈도잉을 사용했을 경우에는 CP를 제거하기 전에 먼저 윈도잉에 대한 영향을 보상하고 수신 처리를 수행한다. 그러나 일반적인 윈도잉의 경우 CP 및 Data 부분에 영향을 주지 않기 때문에 특별한 보상 처리가 요구되지 않는다.

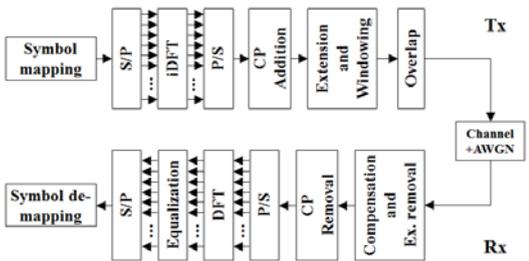


그림 1. 윈도잉을 사용하는 CP-OFDM 시스템의 블록도.
Fig. 1. Block diagram of CP-OFDM system using windowing.

2.2 심볼 구성

그림 2는 윈도잉 기술이 사용되지 않은 CP-OFDM 심볼을 나타낸다. CP의 길이는 다중경로 채널에서 가장 긴 경로의 지연시간을 기반으로 하여 결정된다. CP는 Data의 오른쪽 끝 부분이 복사되어 생성된다. 따라서 CP와 Data는 직교성을 유지한다. 그러나 CP-OFDM 심볼의 시작과 끝이 0으로 바로 수렴하기 때문에 신호의 부드러운 연속성이 깨지게 되고, 신호의 급격한 변화가 발생하여 OOB 전력이 증가하게 된다.

그림 3은 일반적인 윈도잉 기술을 사용하는

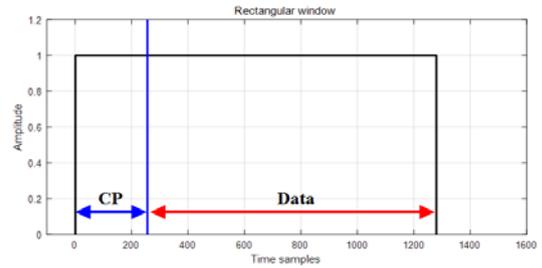


그림 2. 윈도잉 기술이 사용되지 않은 CP-OFDM 심볼.
Fig. 2. CP-OFDM symbol without windowing technique.

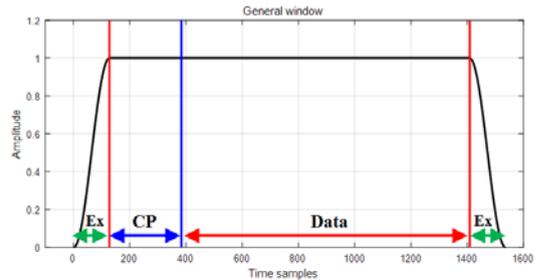


그림 3. 일반적인 윈도잉 기술을 사용하는 CP-OFDM 심볼.
Fig. 3. CP-OFDM symbol with general windowing technique.

CP-OFDM 심볼을 나타낸다. 기존 윈도잉 기술은 CP와 Data 부분에 변형을 가하지 않으며, 확장된 부분만 윈도잉한다. 일부의 경우 OOB 전력 저감을 조금 더 증가시키기 위하여 확장된 부분과 이어지는 CP와 Data 부분을 일부 침범하여 윈도잉을 길게 하는 경우도 있다.

두 가지 방법의 윈도잉 방법에 사용되는 윈도잉에서 왼쪽부분은 크기가 0에서 1로 부드럽게 증가하고, 오른쪽 부분은 1에서 시작해서 0으로 감소한다. 여기에서 1은 정상 상태(Steady state)를 의미한다. 이러한 방법은 CP-OFDM 심볼의 급격한 변화를 완화해주어 OOB 전력이 저감된다. 그러나 이러한 윈도잉에서 왼쪽부분은 크기가 0에서 1에 도달한 후 바로 변화가 없는 정상 상태가 되고, 오른쪽 부분은 크기가 정상 상태에서 곧바로 0으로 감소한다. 확장 구간, 윈도잉 되는 구간이 짧아지더라도 이와 같은 특성이 유지된다. 이러한 방법은 자연스럽게 못하다. 현실에서는 이러한 신호의 변화가 발생할 경우, 정상 상태에 도달하기 전에 Overshoot가 발생하게 되고, Ripple이 존재하게 된다. 이를 다시 정리하면, 기존 윈도잉 방법은 특정 OOB 전력 저감 효과를 얻기 위해 더욱 긴 윈도잉 구간, 확장 구간을 요구하게 된다. 윈도잉 길이를 감소시키기 위해서는 변화를 보다 자연

스럽게 만들어야 한다.

2.3 Ripple 윈도우

그림 4는 본 논문에서 사용하는 Ripple 윈도우 기법이 적용된 CP-OFDM 심볼을 보여준다. 윈도우에서 크기의 변화를 보다 자연스럽게 하기 위해서는 현실에서 발생할 수 있는 Overshoot와 Ripple 현상을 윈도우에 적용해야 한다. 이 윈도우의 확장 부분을 보면 크기가 0에서 정상 상태에 도달할 때, Overshoot와 Ripple이 존재하는 것을 확인할 수 있다. Ripple 윈도우의 특성에 의해 CP와 Data 구간에서 지속적으로 Ripple이 유지된다. 이와 같은 방법으로 윈도우를 설계할 경우 기존 윈도우와 비교하여 특정 OOB 전력 저감 효과를 얻기 위한 확장 길이를 감소시킬 수 있다^[7]. 반대로 윈도우 길이가 한정되어 있을 경우 제안하는 Ripple 윈도우는 일반적인 윈도우에 비하여 더욱 높은 수준의 OOB 전력 저감 효과를 달성할 수 있다. 여기에서 Ripple 윈도우 형태는 Rectangular 윈도우에 Sinc 함수를 Convolution 연산하여 얻을 수 있으며, 설계하는 시스템의 심볼 길이와 확장되는 길이 등을 고려하여 Sinc 함수 및 Rectangular 윈도우의 파라미터를 조절하여 원하는 Ripple 윈도우를 설계할 수 있다.

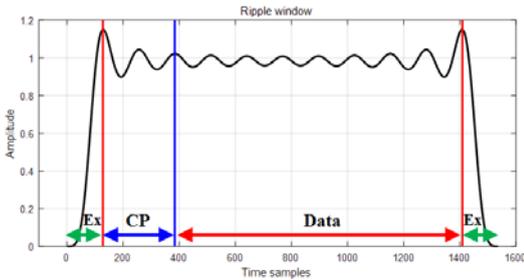


그림 4. 새로운 Ripple 윈도우 기법이 적용된 CP-OFDM 심볼.
Fig. 4. CP-OFDM symbol with the proposed ripple windowing technique.

2.4 심볼 전송 방법

CP-OFDM 심볼을 확장하고 윈도우를 할 경우 시간 자원을 추가적으로 소모하기 때문에 스펙트럼 효율을 감소시키게 된다. 이러한 문제를 완화시키기 위하여, 일반적으로 확장을 한 후 윈도우를 할 경우 Data 또는 CP 구간의 침범 없이 확장한 구간을 중첩시켜 심볼을 전송한다. 그림 5는 인접 심볼간의 중첩 비율에 따른 심볼 구성 결과를 나타낸다. 중첩 비율 α 는 확장 길이 L_E 와 중첩 길이 L_O 의 비율로 나타낸다.

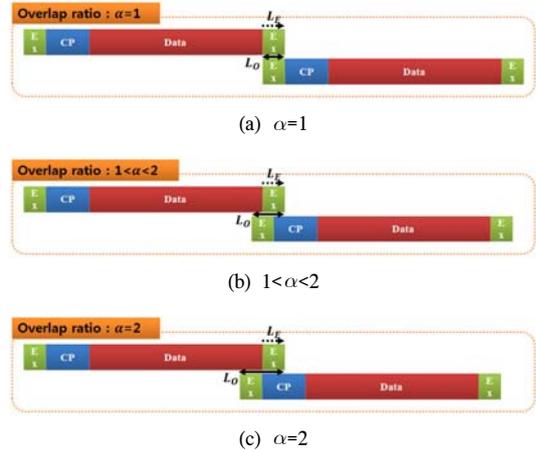


그림 5. 인접 심볼간의 중첩 비율.
Fig. 5. Overlap ratio between one and adjacent symbol.

즉, $\alpha = L_O/L_E$ 이다. 확장 길이와 중첩 길이가 같을 경우 α 는 1이며, 이때에는 그림 5. (a)와 같이 확장 부분만 서로 중첩되어 Data나 CP 부분에 간섭이 발생하지 않는다. 중첩 길이가 더 증가하여 α 가 1보다 크고 2보다 작을 경우 확장 부분은 인접 심볼의 Data와 CP 부분을 일부 침범하여 간섭이 발생할 수 있으며, 그림 5. (b)는 이러한 심볼 전송 방법을 나타낸다. 중첩 길이가 확장 길이의 2배가 될 경우 기존 CP-OFDM과 같이 앞의 심볼의 Data 부분 다음에 바로 다음 심볼의 CP가 붙어서 전송되며 확장되는 구간은 서로에게 간섭을 주게 되며, 그림 5. (c)는 이와 같은 심볼 전송 방법을 나타낸다. 즉, α 가 증가할 경우 확장 및 윈도우에 의한 시간 자원 손실을 저감시킬 수 있으나 인접 심볼간 간섭 영향을 증가시키게 된다. 따라서 성능 열화를 최소화 하면서 α 가 높은 조건을 찾는 것이 중요하다. 따라서 본 논문에서 제안하는 RW-OFDM 시스템은 확장 영역에 의한 시간 자원 낭비를 최소화 하기 위하여 심볼을 중첩시켜 전송하는 방법을 사용한다.

III. 시뮬레이션 결과 및 분석

본 논문에서는 RW-OFDM 시스템을 설계하고, 이 시스템의 스펙트럼 특성, PAPR 특성, BER 성능을 평가하고 분석하였다. 표 1은 시뮬레이션 파라미터를 나타낸다. 제안하는 Ripple 윈도우를 사용하는 RW-OFDM과 기존 윈도우를 사용하는 CP-OFDM을 동일한 조건으로 설계하고 특성과 성능을 평가하였다. BER 성능 평가를 위한 채널은 AWGN(Additive

표 1. 시뮬레이션 환경
Table 1. Simulation parameters

Parameter	Value
Symbol type	4QAM, 16QAM, 64QAM
Modulation	CP-OFDM
Window function	- Ripple, Rectangular, Chebyshev, Flat Top, Gaussian, Hann, Kaiser windows
# of total subcarriers	1024
# of active subcarriers	512
CP length	256
Channel	- AWGN, Rayleigh fading channel with 256-taps
Window length (Extension length)	- left side : 128 - right side : 128

White Gaussian Noise)과 256탭의 Rayleigh 페이딩 채널을 고려하였다. 윈도우가 되는 확장 길이는 왼쪽, 오른쪽 각각 128을 고려하였다.

그림 6은 RW-OFDM과 기존 윈도우 기술을 사용한 CP-OFDM의 스펙트럼 비교를 보여준다. 윈도우를 하지 않는 CP-OFDM은 OOB 전력이 약 -38dB이며, Chebyshev, Flat Top, Gaussian, Hann, Kaiser 윈도우를 사용했을 때는 각각 -100dB, -61dB, -82dB, -113dB, -109dB의 OOB 전력을 갖으며, 제안하는 Ripple 윈도우를 사용한 RW-OFDM의 경우 -215dB의 OOB 전력을 보인다. 일반적인 윈도우를 사용할 경우 평균적으로 -110dB의 OOB 전력 저감 효과를 얻을 수 있으며, 제안하는 윈도우는 약 100dB의 OOB

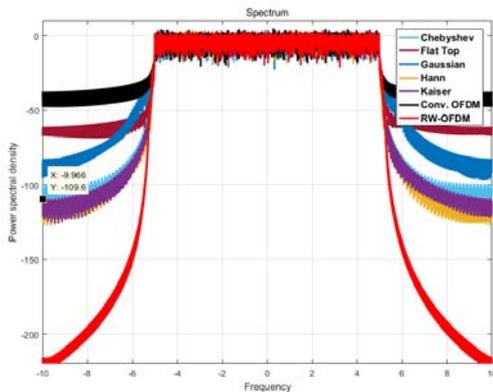


그림 6. RW-OFDM과 기존 윈도우 기술을 사용한 CP-OFDM의 스펙트럼 비교
Fig. 6. Spectrum comparison according to windowing technique.

전력을 추가적으로 억압할 수 있다. 이 결과로 제안하는 Ripple 윈도우는 OOB 전력 저감 성능이 매우 우수함을 확인할 수 있다.

그림 7은 RW-OFDM과 기존 윈도우 기술을 사용한 CP-OFDM의 PAPR 특성 비교를 보여준다. 이 PAPR 특성 결과는 심볼간 중첩이 없는 환경에서 평가되었다. 10^{-3} 의 CCDF(Complementary Cumulative Distribution Function)값을 만족하기 위해, 윈도우를 하지 않는 CP-OFDM은 11.3dB의 PAPR0값을 요구하며, Chebyshev, Flat Top, Gaussian, Hann, Kaiser 윈도우를 사용했을 때는 각각 11.9dB, 12.03dB, 12.06dB, 11.84dB, 12dB의 PAPR0값을 요구하는 것을 확인할 수 있다. RW-OFDM의 경우 같은 조건을 위해 12dB의 PAPR0값을 요구하는 것을 확인할 수 있다. 제안하는 Ripple 윈도우는 Overshoot 및 Ripple 특성을 가지고 있기 때문에 PAPR 특성의 열화가 클 것으로 보이나, 평가 결과 기존 윈도우들과 유사한 PAPR 특성을 갖는 것을 확인할 수 있다. 송신 신호에서 PAPR 특성을 결정하는 최대 전력을 갖는 부분은 무작위 입력 심볼에 따라 불규칙적으로 전체 구간에서 유사한 확률로 발생하게 된다. 이러한 환경에서 Ripple 윈도우가 적용되었을 때, Ripple 윈도우의 상단부에서 크기가 높은 부분과 낮은 부분의 면적이 서로 유사하여 최대 전력 부분이 증폭될 확률과 감소될 확률이 유사하므로 전체적인 PAPR 특성은 기존 윈도우를 사용하는 OFDM 시스템과 유사하게 된다.

그림 8은 AWGN 환경에서 RW-OFDM 시스템의 BER 성능을 보여준다. 4QAM 변조를 사용하였을 경우에는 RW-OFDM 시스템과 기존 CP-OFDM 시스템과 성능이 유사하다. 그러나 변조 레벨이 증가할수록 RW-OFDM 시스템의 성능이 열화되는 것을 확인

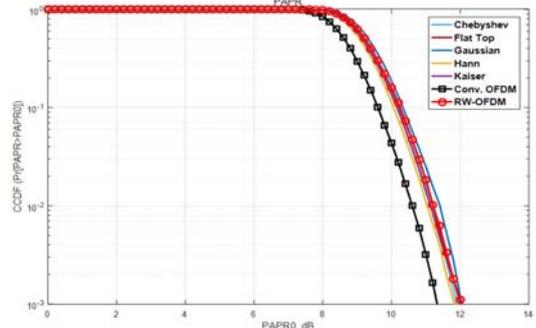


그림 7. RW-OFDM과 기존 윈도우 기술을 사용한 CP-OFDM의 PAPR 특성 비교
Fig. 7. PAPR comparison according to windowing technique.

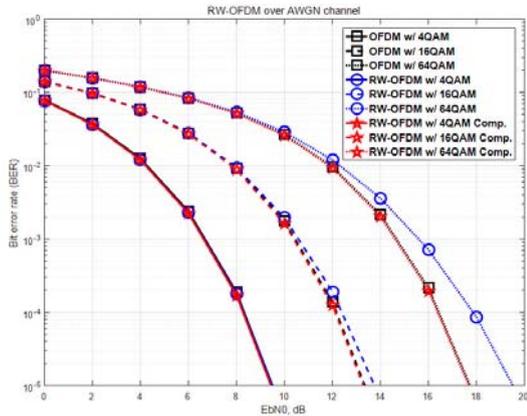


그림 8. AWGN 환경에서 RW-OFDM 시스템의 BER 성능.
Fig. 8. BER performance of RW-OFDM system over AWGN channel.

할 수 있다. 그 이유는 Ripple 윈도우의 Overshoot와 Ripple 성분이 송신 심볼을 왜곡시키기 때문이다. 이 문제는 ripple 윈도우의 역에 해당하는 윈도우를 이용하여 수신기에서 보상을 해줌으로써 해결할 수 있다. 이 방법으로 보상을 하게 되면 RW-OFDM 시스템의 성능이 기존 CP-OFDM 시스템의 성능과 유사해짐을 확인할 수 있다.

그림 9는 Rayleigh fading channel 환경에서 RW-OFDM 시스템의 BER 성능을 보여준다. RW-OFDM 시스템은 10^{-3} 의 BER 성능을 만족하기 위해서 4QAM 변조를 사용할 경우 24dB의 SNR이 요구되고, 16QAM 변조를 사용할 경우 27.2dB의 SNR이 요구되며, 64QAM 변조를 사용할 경우 32dB

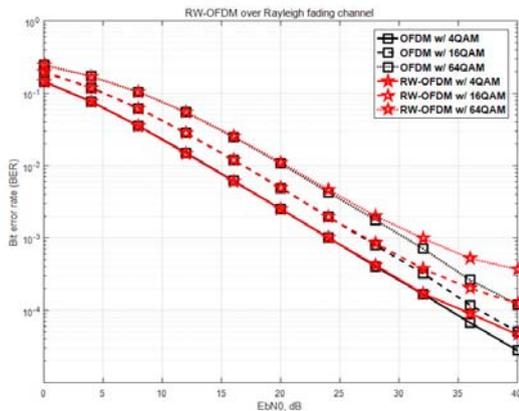


그림 9. Rayleigh fading channel 환경에서 RW-OFDM 시스템의 BER 성능.
Fig. 9. BER performance of RW-OFDM system over the Rayleigh fading channel.

의 SNR이 요구됨을 확인할 수 있다. 같은 조건에서 기존 CP-OFDM 시스템의 성능과 비교할 경우 변조 레벨이 높아질수록 성능 열화가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이 성능 열화는 다중경로 채널에서 RW-OFDM 시스템의 보상 방법이 적용되지 않았기 때문에 발생하게 된다. 향후 수신기에서 추가적인 신호처리를 통해 이를 보상한다면 성능을 개선시킬 수 있을 것이다. 따라서 현재의 상황으로는 다중경로 채널에 의한 영향이 적은 정지궤도 위성 등의 시스템에 적용하여 주파수 집적화(Frequency-localization) 특성을 향상시킬 수 있다.

그림 10은 중첩 비율에 따른 Hann 윈도우를 사용하는 CP-OFDM 시스템의 BER 성능을 나타낸다. Hann 윈도우는 일반적으로 많이 사용되는 윈도우 중의 하나로 우수한 OOB 전력 저감 특성을 갖는다. 그림 10에서는 확장 영역에 의한 시간 자원의 손실을 더욱 저감시키기 위하여 α 를 1에서 2로 증가시켰을 때 시스템의 성능을 평가하였다. Hann 윈도우를 사용할 경우 중첩 비율이 1.5일 때부터 성능 열화가 크게 발생하기 시작하며 중첩 비율이 더 증가할수록 인접 심볼간 간섭 영향이 커짐에 따라서 성능 열화가 크게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 10^{-5} 의 BER 성능을 만족시키기 위해서 α 가 1, 1.5, 1.6, 1.7, 1.8, 1.9, 2일 때에 각각 9.55dB, 9.8dB, 10.15dB, 10.75dB, 11.75dB, 13.41dB, 16.1dB의 SNR이 요구된다.

그림 11은 중첩 비율에 따른 Ripple 윈도우를 사용하는 제안하는 시스템의 BER 성능을 나타낸다. Ripple 윈도우는 왼쪽과 오른쪽에 윈도우 길이가 각

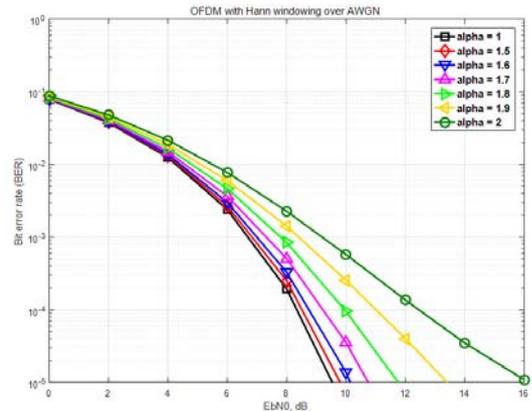


그림 10. 중첩 비율에 따른 Hann 윈도우를 사용하는 CP-OFDM 시스템의 BER 성능.
Fig. 10. BER performance of CP-OFDM system using Hann window according to overlap ratio.

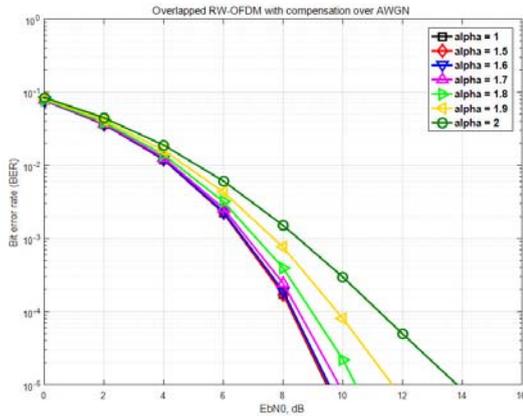


그림 11. 중첩 비율에 따른 제안하는 RW-OFDM 시스템의 BER 성능.
Fig. 11. BER performance of the proposed RW-OFDM system according to overlap ratio.

각 128일 때 기존 윈도우들 보다 100dB 더 우수한 OOB 전력 저감 특성을 갖는다. 그림 11에서는 확장 영역에 의한 시간 자원의 손실을 더욱 저감시키기 위하여 α 를 1에서 2로 증가시켰을 때 시스템의 성능을 평가하였다. Ripple 윈도우를 사용할 경우 중첩 비율이 1.7일 때부터 성능 열화가 크게 발생하기 시작하며 중첩 비율이 더 증가할수록 인접 심볼간 간섭 영향이 커짐에 따라서 성능 열화가 크게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 10^{-5} 의 BER 성능을 만족시키기 위해서 α 가 1, 1.5, 1.6, 1.7, 1.8, 1.9, 2일 때에 각각 9.46dB, 9.48dB, 9.54dB, 9.86dB, 11.42dB, 11.66dB, 13.82dB의 SNR이 요구된다.

표 2는 RW-OFDM과 Hann 윈도우를 사용하는 CP-OFDM의 BER 성능을 비교한 것이다. 중첩 비율 α 는 1에서 2까지 고려하였으며, 10^{-5} 의 BER 성능을

표 2. RW-OFDM과 Hann 윈도우를 사용하는 CP-OFDM의 BER 성능 비교
Table 2. BER performance comparison of RW-OFDM and CP-OFDM using Hann window

Required SNR (dB) for BER of 10^{-5} [dB]	Overlap ratio, α						
	1	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2
CP-OFDM using Hann window	9.55	9.8	10.15	10.75	11.75	13.41	16.1
RW-OFDM	9.46	9.48	9.54	9.86	11.42	11.66	13.82
SNR degradation between $\alpha=1$ and $\alpha>1$ in CP-OFDM using Hann window	0	0.25	0.6	1.2	2.2	3.86	6.55
SNR degradation of less than 0.5dB	<u>0</u>	<u>0</u>	-	-	-	-	-
SNR degradation between $\alpha=1$ and $\alpha>1$ in RW-OFDM	0	0.02	0.08	0.4	1.96	2.2	4.36
SNR degradation of less than 0.5dB	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	-	-	-

만족시키기 위해 요구되는 SNR을 평가하였다. 제안하는 시스템과 기존 시스템은 중첩 비율이 증가함에 따라 성능 열화가 심화되나, 제안하는 시스템의 경우 성능 열화 정도가 상대적으로 약한 것을 확인할 수 있다. 더욱이 0.5dB 이내의 성능 열화가 발생하는 조건에서 시간 자원을 최대한 절약하기 위해 중첩 비율을 증가시킬 때, 기존 Hann 윈도우 기반 CP-OFDM은 중첩 비율을 1.5까지 증가시킬 수 있으며, 제안하는 시스템의 경우 중첩 비율을 1.7까지 증가시킬 수 있다. 결과적으로 이러한 조건 하에서 기존 시스템은 인접 심볼 간에 존재하는 시간 자원을 손실시키는 구간이 64 샘플이며, 제안하는 시스템은 38 샘플이다. 즉, 제안하는 RW-OFDM 시스템은 기존 시스템에 비하여 약 40%의 시간 자원 손실을 줄일 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 OFDM의 OOB 전력을 보다 효과적으로 저감시킬 수 있는 Ripple 윈도우를 사용하여 RW-OFDM 시스템을 설계하고 성능을 평가하였다. Ripple 윈도우는 기존 윈도우 특성에 Overshoot 및 Ripple 특성을 추가하여 설계하였다. 기존 시스템과 비교하여 RW-OFDM 시스템의 특성을 평가하기 위해 Spectrum과 PAPR 특성, BER 성능을 평가하였다. 시뮬레이션 결과로 제안하는 윈도우는 왼쪽, 오른쪽의 윈도우길이가 각각 128일 때, -215dB의 OOB 전력을 보이며, PAPR 특성은 기존 윈도우들과 유사한 것을 확인하였다. BER 성능 평가 결과를 살펴보면 AWGN 환경에서는 수신기에서 보상을 통해 기존 CP-OFDM 시스템과 유사한 성능을 보이는 것을 확인하였으며, Rayleigh 페이딩 채널 환경에서는 고차 변조를 사용

함에 따라 성능 열화가 일부 발생하나, 4QAM 변조를 사용할 경우 10^{-4} 의 BER 조건에서, 기존 CP-OFDM 시스템과 약 1dB 이내의 성능 차이를 보이는 것을 확인하였다. 더욱이 확장 구간에 의한 시간 자원의 손실을 최소화 하기 위하여 심볼을 중첩시켜 전송할 때, 제안하는 시스템은 0.5dB 이하의 성능 열화가 발생하는 조건 하에서, 기존 Hann 윈도우를 사용하는 CP-OFDM과 비교하여, 중첩 비율을 더욱 높일 수 있으며, 결과적으로 시간 자원 손실을 약 40% 줄일 수 있음을 확인하였다. 추후 연구를 통해 다중경로 페이딩 환경에서 ripple 윈도우에 대한 영향을 보강할 수 있다면, 이 성능 열화는 해결 될 수 있을 것으로 판단 된다.

References

- [1] S. Y. Lien, S. L. Shieh, Y. Huang, B. Su, Y. L. Hsu, and H. Y. Wei, "5G new radio: Waveform, frame structure, multiple access, and initial access," in *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, no. 6, pp. 64-71, 2017.
- [2] S. Venkatesan and R. A. Valenzuela, "OFDM for 5G: Cyclic prefix versus zero postfix, and filtering versus windowing," *2016 IEEE Int. Conf. Commun. (ICC)*, pp. 1-5, Kuala Lumpur, 2016.
- [3] P. Guan, et al., "5G field trials: OFDM-Based waveforms and mixed numerologies," in *IEEE J. Sel. Areas in Commun.*, vol. 35, no. 6, pp. 1234-1243, Jun. 2017.
- [4] X. Zhang, L. Chen, J. Qiu, and J. Abdoli, "On the waveform for 5G," in *IEEE Commun. Mag.*, vol. 54, no. 11, pp. 74-80, Nov. 2016.
- [5] G. Berardinelli, K. Pajukoski, E. Lahetkangas, R. Wichman, O. Tirkkonen, and P. Mogensen, "On the potential of OFDM enhancements as 5G waveforms," *2014 IEEE 79th VTC Spring*, pp. 1-5, Seoul, 2014.
- [6] 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.
- [7] C. An, D. Kim, and H. Ryu, "Ripple window OFDM (RW-OFDM) system for improvement

of spectrum resource utilization," *2018 Int. Conf. Inf. and Commun. Technol. Convergence (ICTC)*, pp. 1214-1217, Jeju, 2018.

안 창 영 (Changyoung An)



2013년 2월 : 충북대학교 전자공학(공학사)
 2015년 2월 : 충북대학교 전자공학(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