

다중반송파 시스템의 OOB 전력 저감을 위한 새로운 코사인 함수 기반 윈도우 설계 및 성능 평가

박병학*, 안창영*, 유흥균^o

Design and Performance Evaluation of Windowing Based on New Cosine Function for OOB Power Reduction of Multi-Carrier System

Byoung-hak Park*, Changyoung An*, Heung-Gyoon Ryu^o

요 약

현재 이동통신에서는 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)을 사용하고 있다. OFDM은 OOB(Out Of Band)전력이 높은 특성을 가진다. 따라서 주파수 자원을 효율적으로 사용하는데 제약이 생긴다. 이를 해결하기 위한 많은 연구가 진행되고 있으며, 그 예로 FBMC, UFMC 등이 있다. 본 논문에서는 Windowing 방법을 사용한다. 그러나 OFDM 심볼에 Windowing을 적용하게 되면 정보가 손상된다. 따라서 심볼이 끝나는 부분을 Windowing 길이만큼 확장하여 정보의 손상을 방지한다. 또한 기존의 Window 함수보다 더 나은 성능을 나타내는 코사인 함수 기반의 Window를 소개하고 그 적용 방법에 대해 소개한다. 기존의 Window 함수 중 가장 성능이 좋은 Hann window와 성능을 비교하여 2dB의 성능향상을 확인하였고, 적용방법에 차이를 두어 4dB의 성능향상을 확인하였다.

Key Words : OFDM, Windowing, OOB, B5G, SW-OFDM

ABSTRACT

Currently, OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) is used in mobile communications. OFDM has high OOB (Out Of Band) power characteristics. Therefore, there is a restriction on the efficient use of frequency resources. Much research has been conducted to solve this problem, for example, FBMC and UFMC. In this paper, we use the windowing method. However, if windowing is applied to OFDM symbols, information is damaged. Therefore, the end of the symbol is extended by the windowing length to prevent the information from being damaged. It also introduces the window based on cosine function, which shows better performance than the existing window function, and introduces how to apply it. We compare the performance of proposed window function with Hann window having the best performance among the existing Window functions. We confirmed the performance improvement of 2dB and confirmed the improvement of 4dB by applying different method.

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

• First Author : Department of electronic engineering, Chungbuk National University, bh9877@naver.com, 학생회원

◦ Corresponding Author : Department of electronic engineering, Chungbuk National University, ecomm@cbu.ac.kr, 정회원

* Department of electronic engineering, Chungbuk National University, acy890217@naver.com, 학생회원

논문번호 : 201901-419-A-RN, Received January 22, 2019; Revised April 1, 2019; Accepted April 16, 2019

I. 서 론

요즘 시대는 5G(5th Generation)의 시대로 나아가고 있다. 최근에 5G의 첫 표준인 Release-15이 발표되었다. 5G는 이전 세대인 4G(4th Generation)에서 사용하던 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 변조 기술을 핵심으로 하고 있다. OFDM은 다중반송파를 사용하는 시스템으로 다중경로 채널에 강인하고 CP(Cyclic Prefix) 기술을 사용하여 ISI(Inter-Symbol Interference)를 처리한다. 이는 등화기를 간소화하고 고속 수신처리를 가능하게 한다^[1].

고속 수신 처리에 용이하고 다중 경로 채널에 유리한 OFDM에 큰 단점 중의 하나는 OOB(Out Of Band) Emission이 매우 크다는 점이다. 다중반송파를 사용하는 OFDM의 특성상 이러한 결과는 필연적이다. 이러한 OOB Emission 문제는 주파수 할당에 있어서 매우 비효율적인 배치를 야기한다^[2]. 대한민국 5G 주파수 대역 경매결과 총 낙찰가는 3조 6,183억원에 이른다. 주파수 자원은 매우 한정적이고, 가격 또한 만만치 않은 가격이다. 또한 Release-15에서 요구하는 표준사항 중 하나로 5G는 100MHz의 대역폭을 가져야하며 이는 이전의 4G의 20MHz의 5배에 해당하는 대역폭이다.

이와 같이 요구하는 주파수 대역은 넓어지고 있고, 동시에 가입자와 데이터 트래픽도 지속적으로 증가하고 있다. 이러한 조건을 만족시키려면 스펙트럼 효율을 올리는 것이 매우 중요하다^[3]. 위에서 언급한 OFDM의 OOB Emission 문제를 해결하기 위한 수많은 연구가 진행되었다. 예를 들어 FBMC, UFMC, WOLA-OFDM 등이 있다^[4]. 이와 같이 새로운 파형을 통해 OOB Emission을 줄이려는 연구가 전 세계적으로 진행되고 있다. 본 논문에서는 윈도우링 방법을 사용한다. 윈도우링이란 윈도우 함수를 통해서 파형성형을 하는 신호처리의 대표적인 방법 중 하나로 Spectral Leakage를 줄이는 데 매우 효과적이다^[5]. 기존 OFDM 심볼은 직사각형의 형태로 양 끝의 불연속성에 의해서 OOB Emission이 심각하게 일어난다. 윈도우링을 사용하면 OOB Emission을 효과적으로 줄일 수 있다. 또 다른 윈도우링의 장점으로 시스템 구성이 매우 간단하다는 것으로 위에서 언급한 FBMC나 UFMC와 같은 경우 새로운 송수신기를 설계하여야 하는 반면에 윈도우링 방법의 경우 파형성형 이외에는 다른 부분이 없기 때문에 기존의 시스템에서 손쉽게 구성이 가능하다. 하지만 양 끝단에 윈도우링을 하게 되면 CP가 붙지 않는 부분은 데이터에 손상이 가게 된다. 따라서

윈도우 길이만큼 심볼을 확장하여 데이터의 손상을 막는다^[6]. 본 논문의 목적은 단축 확장 윈도우링 방식을 사용한 SW(Single extension Windowing)-OFDM의 스펙트럼의 OOB Emission을 확인하고 기존의 OFDM 심볼에 비해 어느 정도의 성능향상이 있는지 확인한다. 또한 기존에 제안되어 있는 윈도우 함수 대신 새로운 윈도우 함수를 제안하고 그에 대한 성능을 평가하여 기존의 윈도우 함수와 어떠한 성능 차이가 있는지 확인한다.

II. 시스템 모델

2.1 OFDM 시스템

OFDM은 신호를 각각 직교하는 협대역 부반송파로 변조하여 송신하는 기술로 다중 반송파에 실어 전송하는 다중 반송파 시스템이다. 각 부반송파에는 하나의 심볼이 맵핑되며 iDFT로 간단하게 구현할 수 있다. iDFT연산 후의 심볼은 수식으로 나타내면 (1)과 같다^[7].

$$x[n] = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} s_k e^{i w_k n / N} \quad (1)$$

여기서 $s_k = \{s_0, s_1, s_2, \dots, s_{N-1}\}$ 는 맵핑할 심볼을 나타내고 N은 DFT의 크기이다. (1) 식과 같이 iDFT연산을 수행하면 각 심볼은 부반송파에 맵핑된다.

OFDM은 송신기에서 CP를 추가하여 다중경로 채널에 의해 발생하는 심볼 간 간섭을 효과적으로 처리한다. CP의 길이는 보통 전체 심볼 길이의 1/4정도를 사용하며 이 길이는 다중경로채널의 최대 지연 시간에 관계된다. 이후 수신기에서 CP를 제거하고 DFT연산을 통해 각 부반송파에 맵핑된 심볼을 복조한다. 그리고 demapper를 통해 data stream을 구한다.

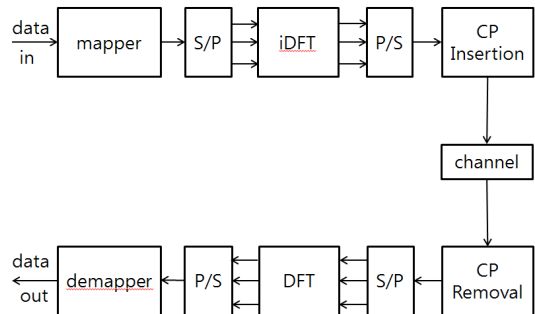


그림 1. 기존 OFDM 시스템의 블록 다이어그램
Fig. 1. Block diagram of conventional OFDM system

2.2 SW-OFDM 시스템

SW-OFDM은 기존의 OFDM에 윈도잉을 적용하기 위해 단축 확장하는 시스템이다. 기존의 OFDM에 윈도잉을 적용하게 되면 우측 데이터 부분이 손상되므로 윈도잉 길이만큼 단축 확장하여 윈도잉을 적용한다.

그림 2는 윈도잉을 한 심볼과 기존의 심볼을 비교한 것이다. 확장할 부분은 data의 앞쪽에서 가져온다^[8]. 그림 2는 기존의 OFDM 심볼과 SW-OFDM의 심볼 형태를 비교한 것이다. 윈도잉을 하면 기존 OFDM 심볼의 불연속성이 완화된다.

그림 3은 SW-OFDM에서 위쪽으로 완만하게 진폭을 증가시켜 양 끝단에서의 불연속성을 더욱 완화시킨 형태이다. 단, 이러한 형태의 경우 데이터 부분을 직접적으로 건드리기 때문에 BER(Bit Error Rate) 성능에 영향을 끼치게 된다. 따라서 BER 성능의 보장을 위해서 진폭의 확장은 어느 정도 제한된 값을 두고 해야 한다.

그림 4는 SW-OFDM의 블록 다이어그램이다. 기존 블록 다이어그램과 비교하여 송수신기에 각각 블록이 한 개 추가되었다. 송신기에서는 심볼을 확장하고 윈도잉 하는 블록이 추가되었다. 수신기에서는 확

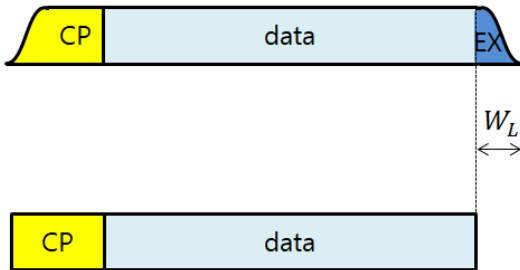


그림 2. SW-OFDM과 기존 OFDM의 심볼 형태 비교
Fig. 2. Comparison of symbol form of SW-OFDM and conventional OFDM

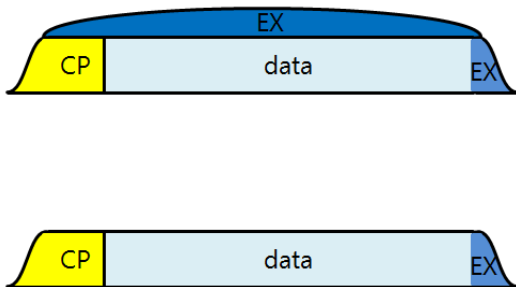


그림 3. SW-OFDM 심볼과 변형된 모양의 비교
Fig. 3. Comparison of symbol form of SW-OFDM and modified symbol form

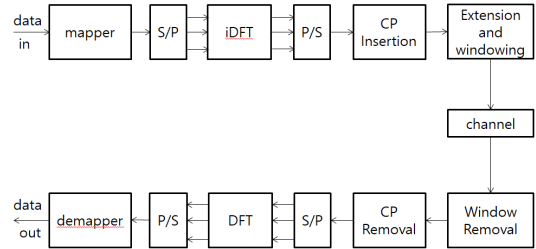


그림 4. SW-OFDM 시스템의 블록 다이어그램
Fig. 4. Block diagram of SW-OFDM system

장된 부분을 제거하고, 나머지는 기존의 OFDM과 동일한 처리를 진행하게 된다.

2.3 윈도잉 함수

윈도잉 함수는 Spectral leakage를 줄이기 위해 파형형에 쓰이는 함수로 신호처리의 일반적인 방법 중 하나이다. 윈도잉 함수는 양 끝이 0이고 중간 부분에서 최대값을 갖는 특징을 가지고 있다. 윈도잉 함수의 종류는 다양해서 목적에 맞게 사용할 수 있기 때문에 범용성이 좋다. 윈도잉 함수는 코사인, 사인, 싱크, 베셀 함수 등의 함수를 기반으로 만들어진다.

본 논문에서 쓰인 Hann 윈도잉의 경우 코사인 기반 함수로 식 (2)로 표현되고 파형은 그림 5로 나타난다^[9].

$$w[n] = \frac{1}{2} [1 - \cos(\frac{2\pi n}{N-1})], (0 \leq n \leq N-1) \quad (2)$$

Hann 윈도잉은 기존에 알려진 윈도잉 중 성능이 가장 뛰어난 것으로 알려져있다. Hann 윈도잉이 아닌 다른 윈도잉 중에서도 코사인 함수를 기반으로 한 윈도잉이 다수 존재하며, 그 성능이 우수하다.

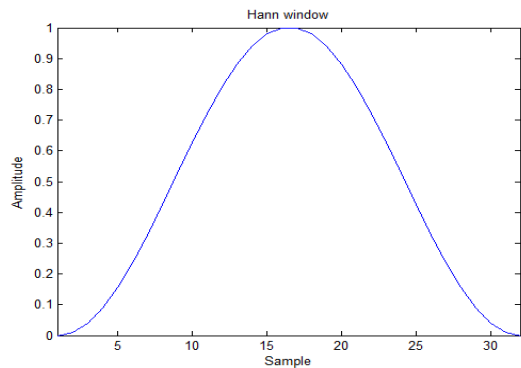


그림 5. Hann 윈도잉의 파형
Fig. 5. waveshape of Hann window

본 논문에서 제시할 새로운 윈도우는 식 (3)으로 표현된다.

$$w[n] = \cos^k\left(\frac{\pi n}{N-1}\right), \left(-\frac{N}{2} \leq n \leq \frac{N}{2}-1\right) \quad (3)$$

k 값의 변화에 따라 다양한 형태를 취할 수 있는 코사인 기반 윈도우 함수로 k 값이 커질수록 날카롭게 내려가는 특성을 가지고 있다. 파형은 그림 6으로 표현된다. 실제 심볼을 구성할 때에는 위의 윈도우 함수들의 절반을 사용해서 OFDM 심볼의 양 끝단을 파형 성형한다.

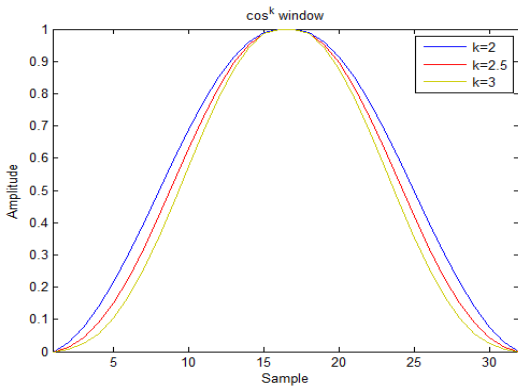


그림 6. $\cos^k(\pi x)$ 윈도우의 파형
Fig. 6. waveshape of $\cos^k(\pi x)$ window

III. 시뮬레이션 결과 및 분석

본 논문에서는 SW-OFDM 시스템을 설계하고 BER 성능 및 스펙트럼 특성을 평가한다. 기존의 OFDM과 성능을 비교하기 위해 표 1과 같이 시뮬레이션을 진행하였다. 우선 변조레벨은 가장 낮은 BPSK를 사용하였다. 전체 부반송파는 128개로 하였으며, 실제 사용된 부반송파는 80개로 하였다. CP의 길이는 128의 1/4인 32를 사용하였으며, AWGN 채널에서 시뮬레이션을 진행하였다. SW-OFDM에 사용될 윈도우 길이는 16으로 설정하였으며, 그에 따라 윈도우 길이인 16만큼 심볼을 확장하였다. 본 논문에서 제시한 코사인 기반의 윈도우 함수 성능을 평가하고, 비교를 위해 기존에 있던 윈도우 중 가장 성능이 좋다고 알려진 Hann 윈도우를 사용하여 비교한다. 또한 Hann 윈도우를 기반으로 하여 SW-OFDM의 심볼 형태를 다르게 구성하여 스펙트럼을 평가하였다. 심볼

표 1. 시뮬레이션 환경
Table 1. Simulation parameters

Parameters	Values	
	OFDM	SW-OFDM
System model	OFDM	SW-OFDM
Modulation	BPSK	
FFT size	128	
data carrier size	80	
CP length	32	
Channel	AWGN	
Window type	-	Hann $\cos^k \pi x$ gradual Hann
Window length	-	16
Extension length	-	16

형태는 평평한 형태와 완만한 곡선 형태를 가지는 심볼을 가지고 서로 비교, 평가하였다.

기존 OFDM은 그림 7과 같은 형태로 나타나며 주파수 영역에서 그림 8과 같은 특성을 나타내게 된다. 그림 8에서 -45dB까지 내려가는 것을 확인했다.

그림 9는 기존 OFDM에 Hann 윈도우로 파형 성형을 하고 난 뒤의 SW-OFDM의 심볼 형태를 나타낸 것이다.

그림 10은 그림 9의 주파수 영역을 나타낸 그림이다. -90dB까지 내려가는 것을 확인하였다.

그림 11은 그림 6의 $\cos^k(\pi x)$ 윈도우로 파형 성형된 SW-OFDM 심볼의 주파수 영역 특징이다.

그림 12는 그림 11의 포락선을 그린 것이다. 그림 12에서 $k=2.5$ 와 $k=3$ 의 차이점을 살펴보면 $k=3$ 의 경우 끝 부분의 크기가 더 작다는 것이고, $k=2.5$ 의 경우는 끝 부분의 크기는 $k=3$ 보다 크

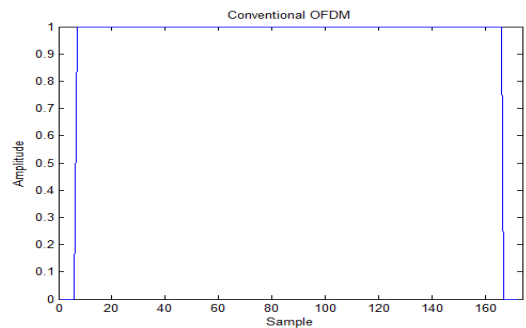


그림 7. 기존 OFDM의 심볼 형태
Fig. 7. Conventional OFDM symbol form

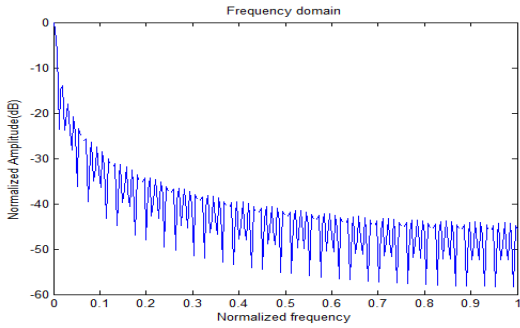


그림 8. 기존 OFDM 심볼 형태의 주파수 영역 특성
Fig. 8. frequency domain characteristic of conventional OFDM symbol form

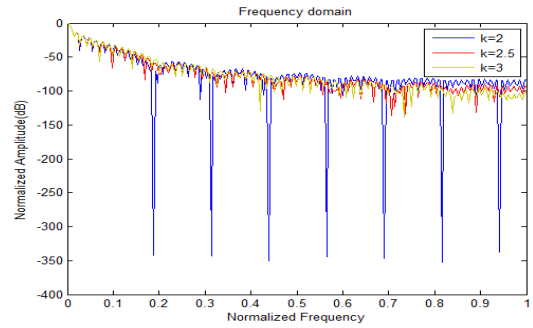


그림 11. $\cos^k(\pi x)$ 윈도우가 적용된 SW-OFDM 심볼 형태의 주파수 영역 특성
Fig. 11. frequency domain characteristic of SW-OFDM symbol form with $\cos^k(\pi x)$ window

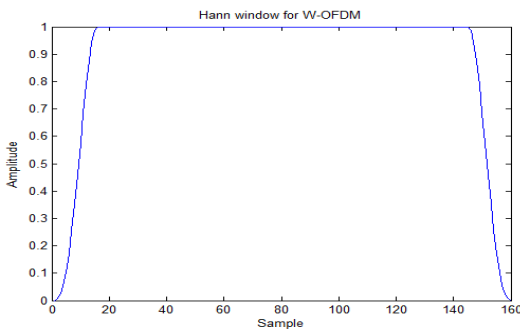


그림 9. Hann 윈도우가 적용된 SW-OFDM 심볼 형태
Fig. 9. SW-OFDM symbol form applied Hann window

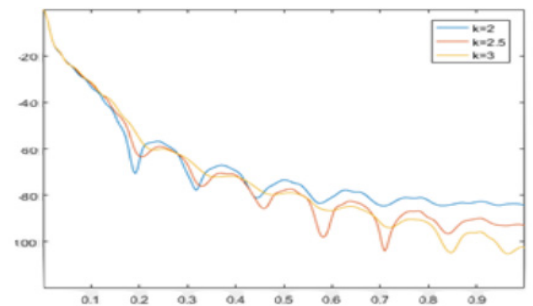


그림 12. $\cos^k(\pi x)$ 윈도우가 적용된 SW-OFDM 심볼 형태의 주파수 영역 포락선
Fig. 12. frequency domain envelope of SW-OFDM symbol form with $\cos^k(\pi x)$ window

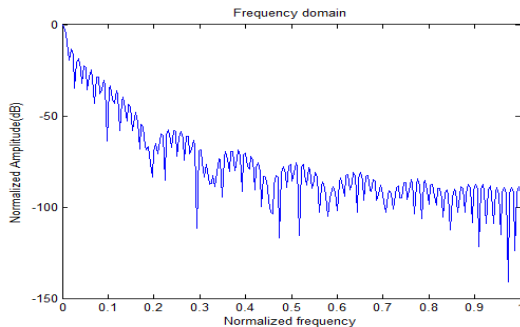


그림 10. Hann 윈도우가 적용된 SW-OFDM 심볼 형태의 주파수 영역 특성
Fig. 10. frequency domain characteristic of SW-OFDM symbol form with Hann window

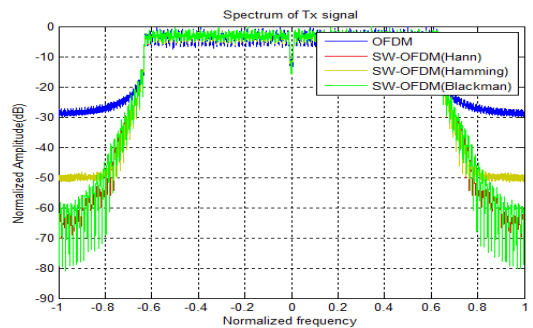


그림 13. 기존 OFDM과 다양한 윈도우가 적용된 SW-OFDM의 스펙트럼 비교
Fig. 13. Spectrum comparison of conventional OFDM and SW-OFDM applied different windows

지만 사이사이로 $k = 3$ 보다 깊게 파인다는 특징이 있다.

그림 13은 기존 OFDM과 다양한 윈도우가 적용된 SW-OFDM의 스펙트럼을 동시에 나타낸 것이다. 기존 OFDM이 -28dB 정도의 OOB Emission을 가지는 것을 확인할 수 있다. SW-OFDM에서의 OOB Emission은 Hann 윈도우가 적용된 경우 -62dB,

Hamming 윈도우는 -50dB, Blackman 윈도우가 적용된 경우 -58dB의 성능을 나타낸다.

그림 14에서는 k 값을 다르게 해가며 $\cos^k(\pi x)$ 윈도우를 SW-OFDM에 적용시켜 스펙트럼을 비교하였다. $k = 2$ 일 때 -61dB의 OOB Emission을 가졌

으며 $k = 2.5$ 일 때와 $k = 3$ 일 때는 -66dB 의 OOB Emission을 보였고 $k = 2.5$ 일 때 더 급격하게 크기가 줄어든다.

그림 15는 기존 OFDM과 SW-OFDM에서처럼 data부분을 1로 유지시킨 것이 아니라 위쪽으로 볼록하게 올린 모양이다. 볼록하게 올라온 부분은 식 (4)를 기반으로 하고 있다.

$$w(x) = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2}x\right)}{0.809}, (-0.4 \leq x \leq 0.4) \quad (4)$$

식 (4)를 전체 길이에서 윈도우 길이를 뺀 만큼 샘플링하여 얻는다. 즉 데이터 부분을 파형성형한다.

그림 16은 완만한 형태의 심볼과 평평한 형태의 심볼을 가지는 SW-OFDM의 주파수 영역 특성을 나타낸 것이다. 기존의 평평한 SW-OFDM은 -90dB 까지 내려가는 특성을 가진데 반해 완만한 형태의 SW-OFDM은 -100dB 까지 내려가는 특성을 보인다.

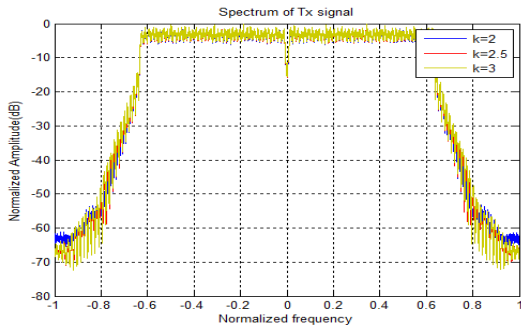


그림 14. 여러 k 값에 대한 $\cos^k(\pi x)$ 윈도우가 적용된 SW-OFDM의 스펙트럼 비교
Fig. 14. Spectrum Comparison of SW-OFDM applied $\cos^k(\pi x)$ window for different k value

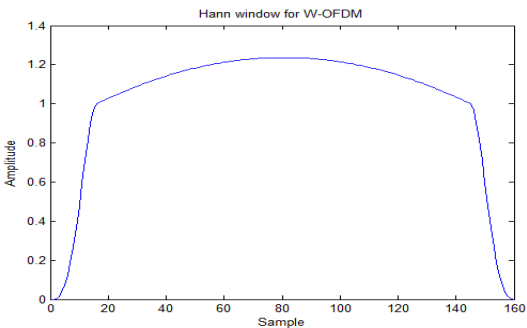


그림 15. SW-OFDM에서 완만한 형태의 심볼
Fig. 15. Gradual symbol form on SW-OFDM

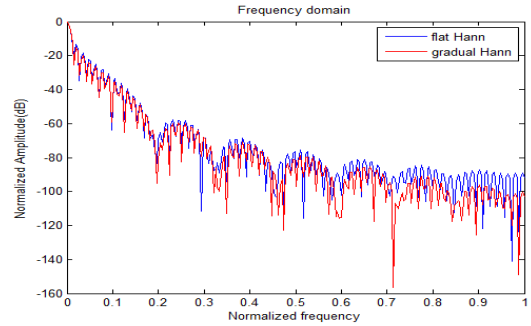


그림 16. 완만한 형태의 심볼을 갖는 SW-OFDM의 주파수 영역 특성
Fig. 16. frequency domain characteristic of Gradual symbol form on SW-OFDM

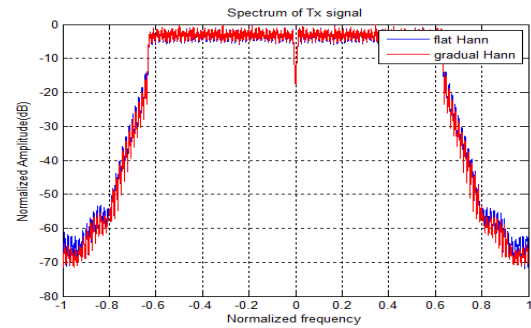


그림 17. 완만한 형태를 갖는 SW-OFDM의 스펙트럼 특성 비교
Fig. 17. Spectrum Comparison of flat form and gradual form on SW-OFDM

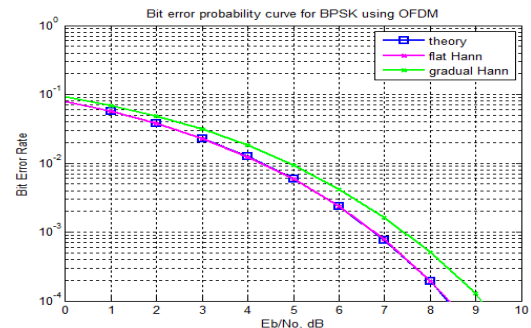


그림 18. 평평한 SW-OFDM과 완만한 SW-OFDM의 BER 성능
Fig. 18. BER performance of flat form and gradual form on SW-OFDM

그림 17은 SW-OFDM에서 심볼의 완만한 형태와 평평한 형태의 스펙트럼을 비교한 그림이다. 평평한 형태는 -62dB 의 OOB Emission을 나타냈고 완만한 형태는 -66dB 의 OOB Emission을 나타내었다. 대략 4dB 의 OOB Emission 성능 향상을 확인하였다.

그림 18은 기존의 SW-OFDM과 완전한 형태의 SW-OFDM의 BER 성능을 비교한 그림이다. 완전한 형태의 SW-OFDM은 OOB Emission 특성이 좋지만 데이터 부분을 건드리기 때문에 BER에서 성능이 나빠진다. 그림 18에서는 0.8dB의 성능저하가 나타난다.

IV. 결 론

본 논문에서는 기존 OFDM의 OOB Emission을 저감시키기 위해 SW-OFDM을 설계하였다. 여기서 사용하는 윈도우에 따라 특성이 달라지므로 기존에 알려진 윈도우 중 가장 좋은 성능을 나타내는 Hann 윈도우의 전체적인 성능을 평가하고 그와 비교하여 본 논문에서 제시한 윈도우들의 성능을 평가하였다. SW-OFDM은 설계할 때 데이터부분을 침범하지 않기 위해 우측 부분을 윈도우 길이만큼 확장해준다. 그를 통해 BER 성능의 저하를 방지한다. 본 논문에서 제시한 $\cos^k(\pi x)$ 의 특성으로 k 값이 커질수록 파형이 급격한 곡선을 그린다. 너무 급격하거나 너무 완만하면 성능의 저하가 생기므로 적절한 계수를 설정하는 것이 중요하다. 시뮬레이션 결과 $k = 2.5$ 일 때 가장 좋은 특성을 나타내었다. 완전한 형태를 가지는 SW-OFDM의 경우에는 완만하면 완만할수록 스펙트럼의 OOB Emission은 줄어든다. 본 논문의 시뮬레이션 조건에서 완전한 형태의 SW-OFDM은 기존의 SW-OFDM에 비해 4dB의 성능향상이 있음을 확인하였다. 그러나 완만하게 할수록 BER 성능의 저하가 동반됨을 확인하였다. 따라서 시스템 설계에서 목표 성능에 알맞게 조절하여 완전한 정도를 조절하는 것이 매우 중요하다.

References

[1] 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.

[2] S. Noreen and N. Z. Azeemi, "A technique for Out-of-Band radiation reduction in OFDM-based cognitive radio," *2010 17th Int. Conf. Telecommun.*, pp. 853-856, Doha, Qatar, Apr. 2010.

[3] Y. Gizlenmistir, "Massive MIMO in LTE

systems: Energy and spectral efficiency," *2018 26th Signal Process. and Commun. Appl. Conf. (SIU)*, pp. 1-4, Izmir, Turkey, May 2018.

- [4] H. S. Kang, Y. B. Song, D. Kwon, D. K. Kim, "Key techniques and performance comparison of 5G new waveform technologies," *J. KICS*, vol. 41, no. 1, pp. 142-155, Jan. 2018.
- [5] T. H. Yoon and E. K. Joo, "A flexible window function for spectral analysis [DSP Tips & Tricks]," in *IEEE Sign. Process. Mag.*, vol. 27, no. 2, pp. 139-142, Mar. 2010.
- [6] C. An, J. Lee, and H. Ryu, "An spectrum efficient WO-OFDM using windowing and overlapping on the cyclic prefix and postfix," *2018 2nd Int. Conf. Recent Advances in Sign. Process.*, Telecommunications & Computing (SigTelCom), pp. 198-202, Ho Chi Minh City, Vietnam, Jan. 2018.
- [7] Y. Medjahdi, R. Zayani, H. Shaïek, and D. Roviras, "WOLA processing: A useful tool for windowed waveforms in 5G with relaxed synchronicity," *2017 IEEE ICC Workshops*, pp. 393-398, Paris, France, May 2017.
- [8] Q. Bodinier, F. Bader, and J. Palicot, "Modeling interference between OFDM/OQAM and CP-OFDM: Limitations of the PSD-based model," *2016 23rd ICT*, pp. 1-7, Thessaloniki, Greek, May 2016.
- [9] S. Singh, R. Pandey, and P. Yadav, "Effect of windowing functions on clipping and filtering based PAPR reduction techniques in OFDM Systems," *2015 ICSC*, pp. 171-176, Noida, Okhla, Mar. 2015.

박 병 학 (Byoung-hak Park)



2019년 2월 : 충북대학교 전자
공학과(공학사)
2019년 3월~현재 : 충북대학교
전자공학과 석사과정
<관심분야> 무선통신시스템,
차세대 통신시스템

[ORCID:0000-0002-4052-7398]

유 흥 균 (Heung-Gyoon Ryu)



1988년~현재 : 충북대학교 전자
공학과 교수
2002년 3월~2004년 2월 : 충북
대학교 컴퓨터정보통신연구
소 소장
<관심분야> 무선통신, B5G/6G
이동통신, 위성통신, 통신회
로 설계 및 통신 신호처리

[ORCID:0000-0002-7368-9860]

안 창 영 (Changyoung An)



2013년 2월 : 충북대학교 전자
공학과(공학사)
2015년 2월 : 충북대학교 전자
공학과(공학석사)
2015년 3월~현재 : 충북대학교
전자공학과 박사과정
<관심분야> 차세대 이동통신시
스템, 디지털신호처리

[ORCID:0000-0002-7829-7866]