

Wavelet-OFDM 시스템 설계와 특성평가

이준구*, 유흥균^o

Design and Characteristics Evaluation of Wavelet-OFDM

Jungu Lee*, Heung-Gyoon Ryu^o

요약

본 논문에서는 웨이블릿 변환을 기반으로 하는 Wavelet-OFDM(orthogonal frequency division multiplexing) 시스템을 설계하고 특성을 평가한다. 웨이블릿 변환이란 사인, 코사인 함수 뿐 아니라 웨이블릿 모함수를 사용함으로써 푸리에 변환과 다른 특징을 갖는다. 또한, 웨이블릿 변환에는 여러 가지의 웨이블릿이 사용되며 이에 따른 신호의 변화를 확인할 수 있다. 기존의 CP-OFDM(cyclic prefix orthogonal frequency division multiplexing)에는 IFFT(inverse fast Fourier transform) 연산을 기반으로 행해지는데 Wavelet-OFDM 시스템에서는 IDWT(inverse discrete wavelet transform) 연산을 사용한다. 따라서 본 연구는 시뮬레이션 결과를 통해 두 시스템의 BER(bit error rate), PAPR(peak to average power ratio)을 확인하고 OOB(out of band) 특성을 확인한다. 기존의 OFDM과 Wavelet-OFDM의 특성을 비교하면, 동일한 BER 성능을 나타내었다. 하지만, Wavelet-OFDM이 기존의 OFDM보다 낮은 PAPR 성능을 내며, OOB 또한 기존의 OFDM보다 낮은 것을 확인할 수 있다.

Key Words : Wavelet-OFDM, CP-OFDM, IDWT, PAPR, OOB

ABSTRACT

In this paper, we design and evaluate the wavelet-OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) system based on wavelet transform. Wavelet transform has functions other than the Fourier transform using sine and cosine functions as well as the number of wavelets. In addition, various wavelets are used for wavelet transformation, and the change of signals according to the wavelets can be confirmed. In the conventional CP-OFDM (cyclic prefix orthogonal frequency division multiplexing), inverse fast Fourier transform (IFFT) is used. In the wavelet-OFDM system, inverse discrete wavelet transform (IDWT) is used. Therefore, this study confirms bit error rate (BER), peak to average power ratio (PAPR) and out of band (OOB) characteristics of the two systems through simulation results. Comparing the characteristics of the conventional OFDM and the wavelet-OFDM, the same BER performance is shown. However, it can be confirmed that the wavelet-OFDM has lower PAPR performance than that of the conventional OFDM, and OOB is also lower than that of the conventional OFDM.

1. 서론

현재 4세대 이동통신의 방식으로 사용되는 OFDM

시스템은 여러 개의 반송파를 사용하여 고속 전송을 가능하게 한다. 이때, 각 반송파에 정보를 실어 보내게 되며, 이 반송파들은 주파수축에서는 서로 직

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

• First Author : Department of Electronic Engineering, Chungbuk National University, lee.jg1992@gmail.com, 학생회원

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

논문번호 : KICS2017-07-192, Received July 4, 2017; Revised September 13, 2017; Accepted September 18, 2017

교하고, 시간축에서는 서로 중첩이 되는 특성을 가지고 있다¹¹. OFDM 시스템은 신호를 맵핑하기 위해 송신기에서는 IFFT 연산을 수행하게 된다. 또한, OFDM 시스템의 특징 중 하나인 CP가 추가되는데, CP는 Multipath 채널에서 심볼간 간섭을 최소화하기 위해 추가되고, 이로써 송신신호가 생성이 된다. 이 CP는 스펙트럼 효율성을 떨어뜨리며, 전력이 손실되는 문제점이 있다. 또한, OFDM은 높은 PAPR의 단점으로 특정 레벨 이상의 출력에서 증폭기가 포화되어 비선형 왜곡이 나타나는 문제점이 발생한다²¹. 따라서 5세대 이후 고속전송에 사용될 새로운 멀티캐리어 방식의 시스템 설계가 요구되며, 이 시스템은 기존의 OFDM과 비교하여 전력손실을 줄여주고, 낮은 PAPR 성능을 내야하며 스펙트럼 효율성을 증가시킬 수 있는 시스템이 되어야 한다. 따라서 본 논문에서는, 기존의 OFDM과 비교하여 푸리에 변환을 사용하지 않고, 웨이블릿 변환을 사용하여 새로운 멀티캐리어 방식의 시스템을 설계하였다. Wavelet-OFDM은 송신기에서 신호를 맵핑하는데 IDWT 연산이 사용되며, 이를 통해 얻는 장점에 대하여 연구한다. Wavelet-OFDM 시스템의 평가는 기존의 OFDM 방식과 BER, PAPR, OOB 성능을 비교하여 이루어진다.

II. Wavelet-OFDM 시스템

웨이블릿 변환이란, 신호를 여러 개의 해상도로 분해하며, 입력 신호가 서로 다른 해상도로 표현하기 위한 부신호들과 나머지를 표현하는 세부 신호들로 나누어지는 것을 의미한다³¹. 웨이블릿 변환은 주로 동영상이나 사진의 데이터 압축 또는 소스와 채널코딩 등에 사용된다. 기존의 OFDM에서 푸리에계수를 사용하여 부반송파에 신호가 맵핑되었다면, 웨이블릿 변환에서는 웨이블릿 함수와 스케일 함수에 의해 신호가 표현된다. 푸리에 변환은 분석하려는 데이터의 전 시간 영역 동안에 존재하는 성분을 추출하게 됨으로 결과로써 얻은 주파수 성분이 어느 시점에서 발생한 요소인지 파악하는데 어려움이 있다. 반면에 웨이블릿 변환은 다양한 크기의 시간-주파수 해상도로 분리가 가능하다⁴¹. 따라서 Wavelet-OFDM 송신기에서 연산되는 IDWT는 다음과 같은 식을 통해 신호가 표현된다.

$$x(t) = \sum_n \sum_{j=J_0}^{2^j-1} \sum_{k=0}^{2^j-1} w_{j,k} \psi_{j,k}(t-nT_0) + \sum_n \sum_{k=0}^{2^{j_0}-1} a_{j_0,k} \phi_{j_0,k}(t-nT_0) \quad (1)$$

여기서 w 와 a 는 스케일 값에 해당하는 상수이며, 심볼이 맵핑된다. ψ 와 ϕ 는 웨이블릿과 스케일 함수로 사용하는 다양한 웨이블릿에 따라 함수가 사용이 된다. 여기서 스케일이란, 주파수와 연관이 있다. 낮은 스케일 값은 압축된 웨이블릿을 나타내며 빠르게 진동하는 특성을 가지고 있고, 이는 높은 주파수와 연관이 있을 수 있다. 반대로 높은 스케일 값은 늘어난 웨이블릿을 나타내며 천천히 진동하고, 이는 낮은 주파수와 연관이 있을 수 있다. 이때, OFDM시스템의 부반송파 수를 M 이라고 한다면 Wavelet-OFDM에서는 2^j 와 동일하다. J_0, j, k 는 각각 Wavelet transform을 시행하는 스케일 값으로써, 이 값에 따라서 신호의 분해능이 달라진다^{3,51}.

그림 1에서는 IDWT 연산 과정을 그림으로 나타낸 것이다. 송신기에서 신호가 IDWT 연산을 수행하게 되면, 한쪽에 보내고자 하는 신호가 입력된다. 신호가 입력되지 않은 다른 한쪽에서는 zero padding과 함께 IDWT 연산이 진행되고 송신 신호가 만들어 진다.

다음은 웨이블릿 변환에 사용된 두 가지의 웨이블릿에 대한 소개이다. 첫 번째로, 그림 2는 Haar 웨이

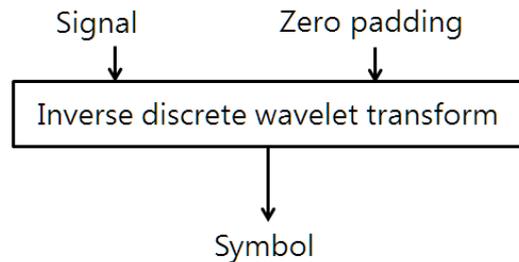


그림 1. IDWT 연산 과정
Fig. 1. Operation process of IDWT

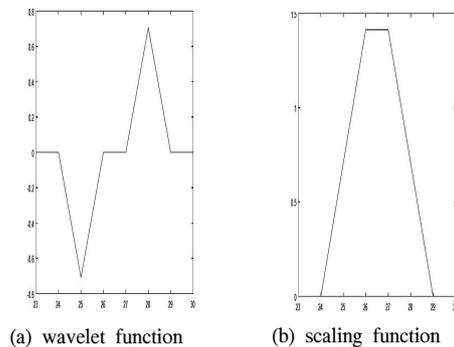


그림 2. Haar 웨이블릿의 웨이블릿 함수와 스케일링 함수
Fig. 2. Wavelet function and scaling function of Haar wavelet

블릿의 웨이블릿 함수와 스케일링 함수이다. Haar 웨이블릿은 가장 일반적이고 간결한 형태로서 계산속도가 빠르고 쉽게 구현이 가능하다는 특징이 있다. 두 번째로, 그림 3은 이산 Meyer 웨이블릿의 웨이블릿 함수와 스케일링 함수이다. 이산 Meyer 웨이블릿은 좌우 대칭적이고 직교해석이 가능하다는 특징이 있다.

본 논문에서 제안하는 Wavelet-OFDM 시스템 모델은 그림 4와 같다. Wavelet-OFDM 시스템은 기존의 OFDM 시스템과 거의 유사한 형태를 보인다. Wavelet-OFDM 시스템의 특징은 기존의 OFDM 시스템과는 달리 CP를 사용하지 않는다. 웨이블릿의 좋은 직교특성으로 인하여 심볼간 간섭과 반송파간 간섭을 줄여주며, 이를 통해 CP를 사용하지 않아도 되므로 그로인한 스펙트럼 효율 향상에 도움을 준다⁶⁻⁹. 기존의 OFDM의 송수신기 부분에서 IFFT, FFT연산이 수행되었다면, Wavelet-OFDM의 송수신기에서는 각각 IDWT와 DWT 연산을 수행하게 된다.

다음은 시스템에 사용된 변조방식에 대한 성좌도이다. 그림 5는 64 QAM 하나의 심볼 당 64개의 다른 값을 식별하며, 각 심볼에 6개의 비트가 대응된다. 이 변조방식은 진폭변조와 위상변조를 동시에 수행하며 주로 고속의 디지털 변조에 많이 사용된다.

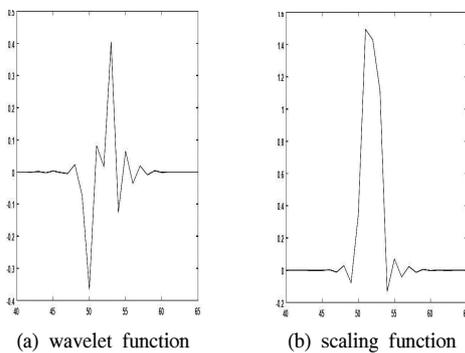


그림 3. 이산 Meyer 웨이블릿의 웨이블릿 함수와 스케일링 함수
Fig. 3. Wavelet function and scaling function of discrete Meyer wavelet

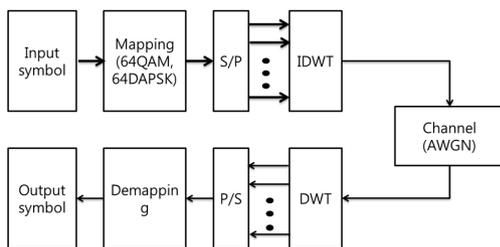


그림 4. Wavelet-OFDM 시스템 블록도
Fig. 4. Wavelet-OFDM system block diagram

그림 6은 64 DAPSK 변조방식으로 4개의 동심원에 각각 16개의 다른 값을 식별하며 한 심볼당 6개의 비트가 대응된다. 64 QAM과의 차이점은 Differential 코딩을 사용함으로써 수신단에서 신호의 동기화를 맞추는데 이점이 있으며, 이는 수신기의 복잡도를 줄일 수 있다¹⁰. 이 각각의 심볼은 할당된 부반송파의 개수에 따라 심볼이 맵핑된다. 따라서 본 시스템에서는 52개의 부반송파를 사용하였으므로 52개의 심볼이 맵핑되어 전송된다. 또한, IDWT 연산에서는 입력되는 심볼의 개수만큼 같은 크기의 zero padding이 이루어져 송신신호가 완성된다.

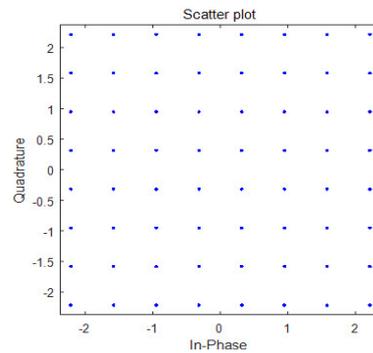


그림 5. 64-QAM 성좌도
Fig. 5. Constellation of 64-QAM

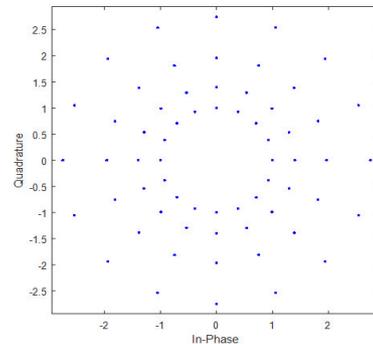


그림 6. 64-DAPSK 성좌도
Fig. 6. Constellation of 64-DAPSK

III. 시뮬레이션 결과 및 분석

본 논문에서는 제안하고 있는 Wavelet-OFDM 시스템을 MATLAB 프로그램을 사용하여 시스템 모델의 각각 성능을 분석하고 확인하기 위한 시뮬레이션을 진행하였다.

표 1과 같은 환경으로 시뮬레이션을 진행하였다. 기존의 OFDM과 Wavelet-OFDM 각 시스템의 BER

표 1. 시뮬레이션 환경
Table 1. Simulation parameters

Modulation	64-QAM
FFT size	64
Number of subcarriers	52
CP length	16
Channel	AWGN
Type of Wavelet	Haar Discrete Meyer

과 PAPR과 OOB 특성과 Wavelet-OFDM의 웨이블릿 함수를 다르게 사용하였을 때의 BER과 PAPR 특성을 확인하였다.

그림 7, 8은 기존의 OFDM 시스템과 Wavelet-OFDM 시스템의 BER 성능을 비교 분석한 것이다. AWGN 채널에서 두 시스템의 BER 성능은 동일한

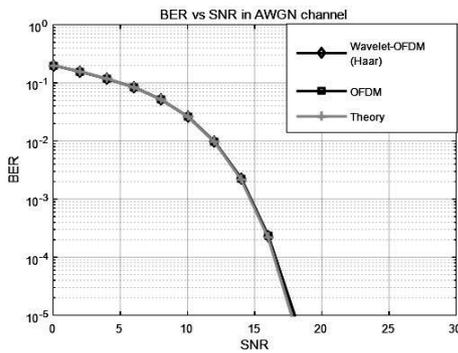


그림 7. Haar 웨이블릿을 사용한 Wavelet-OFDM과 기존 OFDM의 BER 성능 비교
Fig. 7. Comparison of BER performance between Wavelet-OFDM using Haar wavelet and conventional OFDM

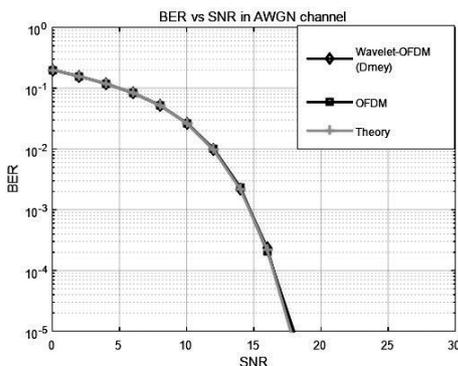


그림 8. 이산 Meyer 웨이블릿을 사용한 Wavelet-OFDM과 기존 OFDM의 BER 성능 비교
Fig. 8. Comparison of BER performance between Wavelet-OFDM using discrete Meyer wavelet and conventional OFDM

것으로 확인하였다. 또한, Wavelet-OFDM의 경우 Haar 웨이블릿과 이산 Meyer 웨이블릿 둘 다 같은 BER 성능을 확인하였다. 그림 9는 OFDM 시스템과 Wavelet-OFDM 시스템의 PAPR 성능을 비교하였다. 특히 Wavelet-OFDM의 경우 Haar 웨이블릿과 이산 Meyer 웨이블릿 두 가지로 나누어 성능을 평가하였다. 기존의 OFDM의 PAPR은 약 9.8dB로 높은 반면에, Wavelet-OFDM에서는 이산 Meyer 웨이블릿을 사용한 경우 약 8.5dB, Haar 웨이블릿을 사용한 경우 약 5.9dB로 기존의 OFDM보다 각각 1.3dB와 3.9dB의 저감효과를 확인하였다.

그림 10은 64 QAM 변조방식과 64 DAPSK 변조방식을 각각 사용하였을 때, 두 시스템의 BER 성능을 비교한 것이다. 두 변조방식 모두 같은 입력 심볼 값을 가지며 평균 송신전력 또한 동일한 조건으로 시뮬레이션을 진행하였다. 같은 변조방식을 사용하였을 경우, 기존의 OFDM과 Wavelet-OFDM의 BER 성능은 같은 것으로 확인되었다. 변조방식을 달리하였을 경우에는 64 QAM 변조방식을 사용한 시스템이 64 DAPSK 변조방식을 사용한 시스템보다 약 5dB 정도

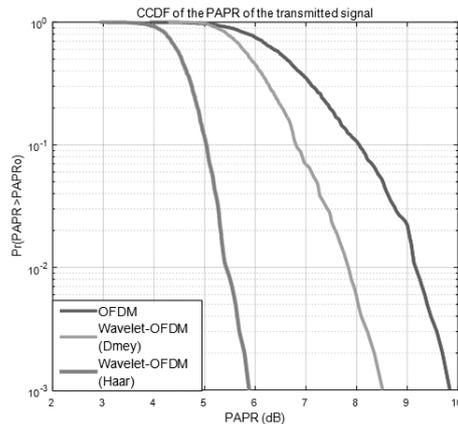


그림 9. 기존의 OFDM과 Wavelet-OFDM의 PAPR 비교
Fig. 9. Comparison of PAPR between OFDM and Wavelet-OFDM

표 2. 시뮬레이션 환경
Table 2. Simulation parameters

Modulation	64-QAM 64-DAPSK
FFT size	64
Number of subcarriers	52
CP length	16
Channel	AWGN
Type of Wavelet	Discrete Meyer

차이가 있었다. 이는 64 DAPSK의 성좌도를 살펴보면 원점으로부터 네 개의 동심원에서 가장 안쪽에 위치한 심볼간에는 간격이 좁고, 가장 바깥쪽에 위치한 동심원상에 있는 심볼간에는 비교적 간격이 멀리 떨어져 있는 것을 확인할 수 있다. 이에 따라 서로간의 간격이 좁은 동심원상에 있는 심볼간의 에러발생율이 모든 심볼이 동일한 간격을 형성하고 있는 64 QAM 보다 높기 때문으로 확인되었다.

그림 11은 64-QAM 변조방식과 64-DAPSK 변조방식을 각각 사용하였을 때, 두 시스템의 PAPR 성능을 비교한 것이다. 변조방식을 달리하였을 때, BER 성능과는 다르게 기존의 OFDM 시스템과 Wavelet-OFDM 시스템의 PAPR 성능은 동일한 것으로 확인하였다. 따라서 PAPR 성능은 변조방식에는 영향을 받지 않고, Wavelet-OFDM과 OFDM 시스템에 영향을 받는 것을 알 수 있다.

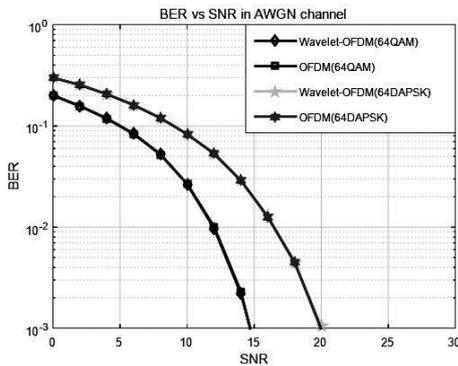


그림 10. 변조방식에 따른 OFDM과 Wavelet-OFDM의 BER 성능 비교
Fig. 10. Comparison of BER performance between OFDM and Wavelet-OFDM according to modulation scheme

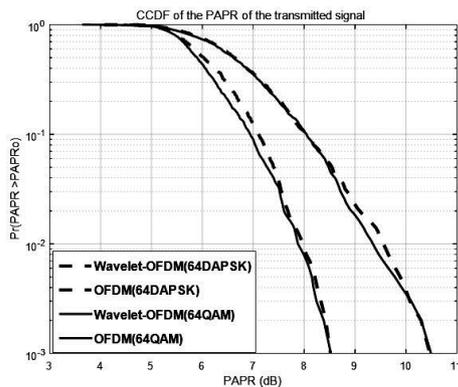


그림 11. 변조방식에 따른 OFDM과 Wavelet-OFDM의 PAPR 성능 비교
Fig. 11. Comparison of PAPR performance between OFDM and Wavelet-OFDM with modulation scheme

다음은 OFDM과 Wavelet-OFDM의 사용하는 입력 데이터 개수에 따른 OOB 특성을 비교한 것이다. OFDM의 경우 FFT 사이즈를 64로 동일하게 한 후, 할당하는 입력 데이터의 개수를 달리하며 나머지는 null carrier를 채워 넣어 비교하였다. 마찬가지로, Wavelet-OFDM의 경우에도 $J=6$ 을 고정으로 하여 $M=2^J=64$ 와 같이 기존 OFDM과 사이즈를 동일하게 한 후, 할당하는 입력 데이터의 개수를 달리하며 나머지는 null carrier를 채워 넣어 시뮬레이션을 진행하였다.

그림 12, 13, 14.에서 볼 수 있듯이 입력 데이터의 수를 변화시켰을 때, 기존의 OFDM 경우에는 OOB의 큰 변화가 나타나지 않는 것으로 확인되었다. 반면에, Wavelet-OFDM의 경우 할당되는 입력 데이터의 수가 줄어들어서 전력이 감소하는 것을 확인하였다. 또한, 같은 수의 입력 데이터를 할당하였을 때, 기존의 OFDM보다 Wavelet-OFDM이 낮은 Side lobe 특성을 가지고 있다. 이는 웨이블릿 변환을 사용함으로써

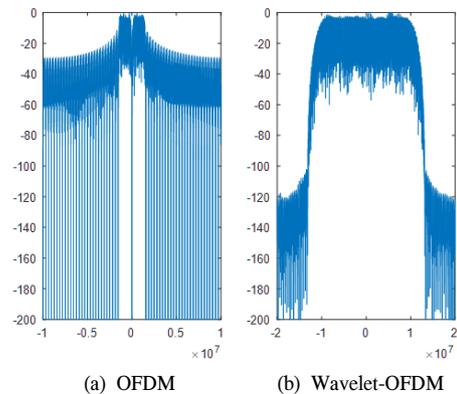


그림 12. 8개의 입력 데이터를 할당한 경우의 스펙트럼
Fig. 12. Spectrum when 8 input data are allocated

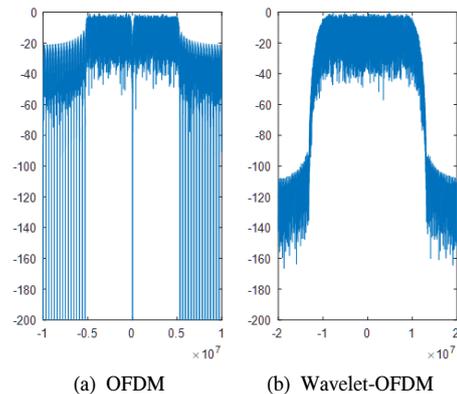


그림 13. 32개의 입력 데이터를 할당한 경우의 스펙트럼
Fig. 13. Spectrum when 32 input data are allocated

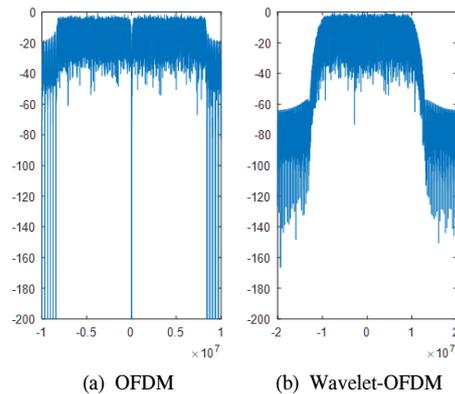


그림 14. 52개의 입력 데이터를 할당한 경우의 스펙트럼
Fig. 14. Spectrum when 52 input data are allocated

표 3. 입력 데이터 수에 따른 OOB 측정
Table 3. OOB measurement based on the number of input data

Number of input data	OFDM	Wavelet-OFDM
8	-29dB	-120dB
32	-22dB	-109dB
52	-20dB	-60dB

OOB 전력 절감을 실현할 수 있는 것으로 보인다.

IV. 결 론

본 논문에서는 OFDM 시스템과 Wavelet-OFDM 시스템의 BER, PAPR, OOB 성능을 비교해보았다. 현재, 기존의 OFDM 시스템의 높은 PAPR 문제 큰 OOB 문제 등의 문제점을 파악하고, 5세대 이후 고려될 고효율의 통신시스템을 위해 새로운 방식의 다중반송파시스템의 설계가 요구되었다. 따라서 이번 연구에서는 기존의 OFDM의 문제점을 개선할 수 있는 다중반송파시스템의 설계로써 웨이블릿 변환을 사용한 Wavelet-OFDM 시스템을 설계하였다. 웨이블릿 변환은 심볼간 간섭을 줄일 수 있고, 낮은 PAPR 성능의 장점이 있기 때문에 푸리에변환을 기반으로 하는 OFDM의 문제점을 해결할 수 있다. 또한, 기존의 OFDM보다 낮은 OOB 특성을 갖는 Wavelet-OFDM은 주파수 효율 향상을 위한 장점이라고 생각된다. 두 시스템은 동일한 BER 성능을 기준으로 하였을 때, Haar 웨이블릿과 이산 Meyer 웨이블릿은 각각의 장점이 다르다. Haar 웨이블릿의 경우 가장 낮은 PAPR 성능의 장점을 보였고, 이산 Meyer 웨이블릿은 기존의 OFDM보다 낮고 Haar 웨이블릿을 사용한 Wavelet-OFDM보다 높은 PAPR 성능을 가졌지만 스

펙트럼 효율측면에서는 기존의 OFDM과 유사한 스펙트럼 형태를 보였다. 따라서, 기존의 OFDM 시스템의 PAPR, OOB 문제점을 Wavelet-OFDM을 사용함으로써 PAPR, OOB 저감효과를 확인할 수 있으므로 새로운 다중반송파시스템으로 적합함을 알 수 있다.

References

- [1] T. Hwang, et al., "OFDM and its wireless applications: a survey," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 58, no. 4, pp. 1673-1694, May 2009.
- [2] D. Wulich, "Definition of efficient PAPR in OFDM," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 9, no. 9, pp. 832-834, 2005.
- [3] M. Chafii, J. Palicot, R. Gribonval, and A. G. Burr, "Power spectral density limitations of the wavelet-OFDM system," in *EUSIPCO*, pp. 1428-1432, Budapest, Hungary, Aug. 2016.
- [4] S.-M. Shin, Y.-J. Kim, and H.-C. Lee, "Validation method of simulation model using wavelet transform," *J. Korea Soc. Simulation*, vol. 19, no. 2, pp. 127-135, 2010.
- [5] M. Chafii, J. Palicot, and R. Gribonval, "Wavelet modulation: An alternative modulation with low energy consumption," *Comptes Rendus Physique*, vol. 18, no. 2, pp. 156-167, Feb. 2017.
- [6] A. Roy and A. S. Poonia, "Implementation of IDWT OFDM system in LabVIEW," *IJMTER*, vol. 2, no. 6, pp. 620-624, Jun. 2015.
- [7] G. Sailakshmi and K. Sudha, "BER analysis of wavelet based OFDM using different modulation techniques," *Int. J. Sci. and Res.*, vol. 4, no. 5, Mar. 2014.
- [8] A. H. Kattoush, W. A. Mahmoud, and S. Nihad, "The performance of multiwavelets based on OFDM system under different channel conditions," *Digital Sign. Process., Elsevier*, vol. 20, no. 2, pp. 472-482, Mar. 2010.
- [9] M. Oltean and M. Nafornitã, "Wavelet OFDM performance in frequency selective fading channels," *2010 8th Int. Conf. Commun.*, pp. 343-346, Bucharest, Romania, Jun. 2010.

- [10] E.-A. Mohamed, "Performance evaluation of DWT based OFDM system with DAPSK modulation," Liverpool John Moores Univ., 2012.

이 준 구 (Jungu Lee)



2017년 2월 : 충북대학교 전자공학과(공학사)
2017년 3월~현재 : 충북대학교 전자공학과 석사과정
<관심분야> 무선통신시스템, 차세대 통신시스템

유 흥 균 (Heung-Gyoon Ryu)



1988년 2월~현재 : 충북대학교 전자공학과 교수
2002년 3월~2004년 : 2월 충북대학교 컴퓨터정보통신연구소 소장
<관심분야> 무선통신, 5G/B5G 이동통신, 위성통신, 통신회로 설계 및 통신 신호처리