

웨이블릿 변환 기반의 Wavelet-OFDM 시스템과 푸리에 변환 기반의 OFDM 시스템의 성능 비교

Performance Comparison of OFDM Based on Fourier Transform and Wavelet OFDM Based on Wavelet Transform

이 준 구 · 유 흥 균

Jungu Lee · Heung-Gyoon Ryu

요 약

OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)은 다중캐리어를 사용해 고속통신을 가능하게 하는 MCM(Multi-Carrier Modulation)시스템이며, 전력과 스펙트럼 효율의 단점을 갖는다. 따라서 본 논문에서는 기존의 단점을 보완하고, 효율적인 MCM시스템 설계를 목표로 한다. 제안하는 시스템은 IFFT(Inverse Fast Fourier Transform) 연산 대신에 IDWT(Inverse Discrete Wavelet Transform) 연산을 사용하게 된다. 웨이블릿 변환 기반의 OFDM 시스템 설계를 통해 기존의 OFDM 시스템과 BER(Bit Error Rate), 스펙트럼 효율, PAPR(Peak to Average Power Ratio) 성능 비교를 진행하였다. 그 결과, 기존의 OFDM과 Wavelet-OFDM은 동일한 BER 성능을 나타내었고, Discrete Meyer 웨이블릿을 사용한 Wavelet-OFDM에서는 기존의 OFDM과 동일한 스펙트럼 효율을 갖는다. 또한, 여러 가지 웨이블릿을 기반으로 구성한 Wavelet-OFDM의 모든 시스템은 기존의 OFDM보다 낮은 PAPR 성능을 갖는다.

Abstract

Orthogonal frequency division multiplexing(OFDM) is a multicarrier modulation(MCM) system that enables high-speed communications using multiple carriers and has advantages of power and spectral efficiency. Therefore, this study aims to complement the existing shortcomings and to design an efficient MCM system. The proposed system uses the inverse discrete wavelet transform(IDWT) operation instead of the inverse fast Fourier transform(FFT) operation. The bit error rate(BER), spectral efficiency, and peak-to-average power ratio(PAPR) performance were compared with the conventional OFDM system through the OFDM system design based on wavelet transform. Our results showed that the conventional OFDM and Wavelet-OFDM exhibited the same BER performance, and that the Wavelet-OFDM using the discrete Meyer wavelet had the same spectral efficiency as the conventional OFDM. In addition, all systems of Wavelet-OFDM based on various wavelets confirm a PAPR performance lower than that of conventional OFDM.

Key words: Wavelet-OFDM, OFDM, IDWT, IFFT, Discrete Meyer

I. 서 론

현재 4세대 이동통신방식의 일종으로 사용되고 있는

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

충북대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Chungbuk National University)

· Manuscript received August 7, 2017 ; Revised December 28, 2017 ; Accepted December 28, 2017. (ID No. 20170807-077)

· Corresponding Author: Heung-Gyoon Ryu (e-mail: ecomm@cbu.ac.kr)

OFDM은 다수의 반송파를 사용하여 고속전송을 가능하게 해주는 MCM 시스템이다. 하나의 반송파를 사용하는 싱글캐리어방식에서 다중캐리어방식을 사용하게 됨으로써 다수의 반송파에 심볼을 맵핑하는데에 고속푸리에 변환연산이 사용된다. 이로써 다수의 반송파에 심볼이 맵핑되는데, 이때 각 반송파들은 시간축에서 서로 직교하며, 주파수축에서는 중첩되는 특징을 가지고 있다^[1]. 따라서 반송파에 맵핑된 신호가 다중 경로화 채널에서 부호간 간섭이 발생되지 않도록 CP를 사용하여 문제를 최소화시켜준다^[2]. 하지만 OFDM에서 사용되는 CP는 기존의 신호보다 전력 측면에서의 낭비와 스펙트럼 효율이 떨어지는 문제점을 가지고 있다. 하지만 Wavelet-OFDM의 경우, IDWT 연산의 ISI와 ICI에 강한 장점을 가지고 있어 CP를 사용하지 않고도 주파수 선택적 페이딩 채널에 대해 강력한 모습을 보인다^{[3]~[6]}. 또한, 기존의 OFDM 시스템에서는 PAPR이 높다는 단점을 가지고 있다. 이는 신호가 증폭기를 거치며 특정 레벨 이상에서 비선형 왜곡이 발생하는 문제점을 지니고 있다^[7]. 따라서 현 문제점을 보완하는 다음 세대의 고속통신 방식의 설계가 요구되는데 본 논문에서는 기존의 OFDM 단점을 보완하기 위한 새로운 MCM 시스템방식을 제안한다. 제안하는 시스템방식은 기존의 IFFT 연산을 사용하는 OFDM에서 IFFT 연산 대신에 IDWT를 사용하여 심볼을 맵핑한다. 따라서 IDWT를 사용한 OFDM 시스템에서 얻을 수 있는 성능에 대하여 연구한다.

II. 웨이블릿 변환

웨이블릿 변환이란, 서로 다른 웨이블릿에 따른 기저함수를 사용해 신호를 확장, 분해하여 분석하는 것을 의미한다^[8]. 이 신호해석방법은 과도 신호 분석, 이미지 분석, 통신 시스템 신호를 분석하는데 사용되어진다. 푸리에 변환과 다른 점은 삼각 함수의 관점이 아닌 각각의 웨이블릿 고정 함수의 변환 및 확장 형태로 신호가 생성된다. 따라서 본 연구에서는 여러 형태의 웨이블릿 기저함수를 달리 사용하여 IDWT 연산을 실행하고, 이에 따른 성능의 변화를 살펴보고 기존의 OFDM 방식의 성능을 비교 분석하게 된다. 다음은 시스템 연산에 사용되는 IDWT 수식이

다^{[9],[10]}. 식 (1)에서 ω, γ 는 각 스케일 값에 해당하는 상수이고, ψ, ϕ 는 다양한 웨이블릿마다의 특정되어 있는 고정함수이다. ϕ 는 스케일함수로서 이 값에 따라 다양한 분해능을 가진다. ψ 는 웨이블릿함수로서 신호의 필터링에 사용된다^[11]. IDWT 연산 시, 스케일함수는 저역통과필터역할을 하며, 웨이블릿함수는 고역통과필터역할을 하게 된다^[12]. 본 시스템에서는 64QAM 방식으로 변조된 신호가 병렬로 나뉘어 저역통과필터를 통과하게 되고, 같은 벡터 길이의 zero padding이 고역통과필터를 통과하여 합쳐진 신호가 하나의 심볼을 구성하게 된다^{[13],[14]}.

$$x(t) = \sum_n \sum_{\alpha=A_0\Delta=0}^{A-1} \sum_{\Delta=0}^{2^{A_0}-1} \omega_{\alpha,\Delta} \psi_{\alpha,\Delta}(t-nT_0) + \sum_n \sum_{\Delta=0}^{2^{A_0}-1} \gamma_{A_0,\Delta} \phi_{A_0,\Delta}(t-nT_0) \quad (1)$$

다음은 wavelet transform에 사용된 각 웨이블릿함수와 스케일함수이다.

첫 번째로, 식 (2)와 (3)은 Discrete Meyer 웨이블릿을 나타내는 스케일함수와 웨이블릿함수이다^[15].

$$\phi(w) = \begin{cases} 1 & \text{if } |w| \leq \frac{2\pi}{3} \\ \cos\left[\frac{\pi}{2}\nu\left(\frac{3}{4\pi}|w|-1\right)\right] & \text{if } \frac{2\pi}{3} \leq |w| \leq \frac{4\pi}{3} \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (2)$$

$$\psi(w) = e^{iw/2} [\phi(w+2\pi) + \omega(w-2\pi)] \phi(w/2) \quad (3)$$

다음은 Daubechies 웨이블릿의 스케일함수와 웨이블릿함수이다.

$$\phi(t) = \sum_{\Delta=-\infty}^{\infty} \alpha_{\Delta} \sqrt{2} \phi(2t-\Delta) \quad (4)$$

$$\psi(t) = \sum_{\Delta=-\infty}^{\infty} \beta_{\Delta} \sqrt{2} \phi(2t-\Delta) \quad (5)$$

다음은 Haar 웨이블릿의 스케일함수와 웨이블릿함수이다.

$$\phi(t) = \begin{cases} 1 & \text{if } 0 \leq t \leq 1 \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (6)$$

$$\psi(t) = \begin{cases} 1 & \text{if } 0 < t \leq 1/2 \\ -1 & \text{if } 1/2 < t \leq 1 \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (7)$$

그림 1~그림 4는 각 웨이블릿의 웨이블릿함수와 스케일함수의 모습이다.

III. 시뮬레이션 결과 및 분석

본 논문에서는 MATLAB 프로그램을 사용하여 OFDM과

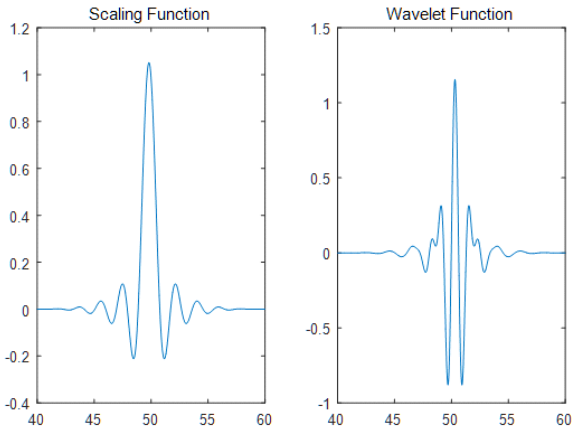


그림 1. Discrete Meyer 웨이블릿의 스케일함수와 웨이블릿함수
Fig. 1. Scaling and wavelet function of Discrete Meyer wavelet.

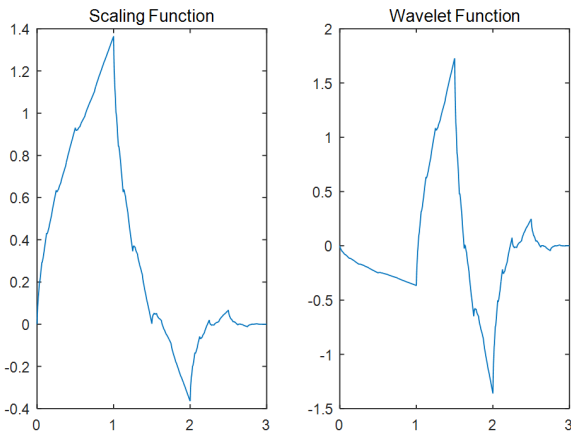


그림 2. Daubechies2 웨이블릿의 스케일함수와 웨이블릿함수
Fig. 2. Scaling and wavelet function of Daubechies2 wavelet.

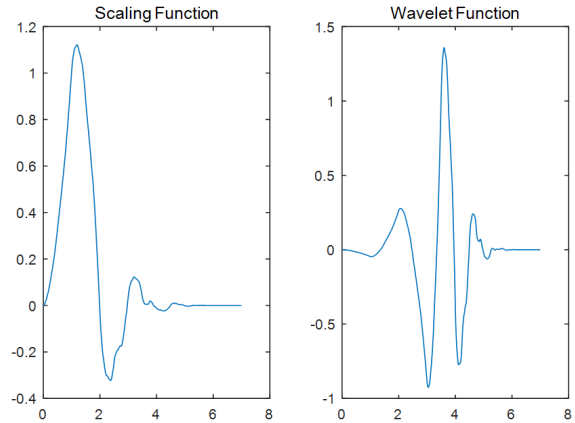


그림 3. Daubechies4 웨이블릿의 스케일함수와 웨이블릿함수
Fig. 3. Scaling and wavelet function of Daubechies4 wavelet.

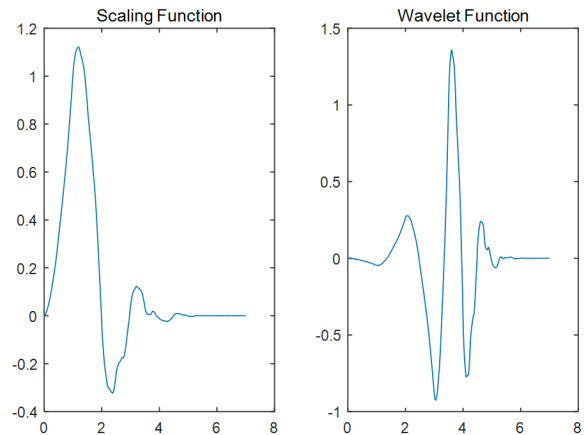


그림 4. Daubechies8 웨이블릿의 스케일함수와 웨이블릿함수
Fig. 4. Scaling and wavelet function of Daubechies8 wavelet.

Wavelet-OFDM 시스템을 설계하고 성능을 분석하였다.

시뮬레이션은 IEEE 802.11a 표준의 OFDM 심볼 주기를 적용하여 진행하였다. 기존의 OFDM에서의 IFFT 연산 후의 심볼과 Wavelet-OFDM에서의 IDWT 연산 후의 심볼의 주기를 3.2 μ s로 표준과 동일하게 적용을 하였고, 이에 따른 대역폭과 부반송파간의 간격을 측정하였다. 그 후, 각각의 시스템에서 시뮬레이션 결과에 따라 스펙트럼 효율을 계산하였다.

그림 5는 AWGN 채널환경에서 기존의 OFDM 시스템

표 1. 시뮬레이션 조건

Table 1. Conditions of simulation.

Parameters	Value
Modulation	64-QAM
FFT size	64
Number of subcarriers	52
CP length	46
Channel	AWGN
Type of wavelet	Discrete Meyer Daubechies2 Daubechies4 Daubechies8 Haar

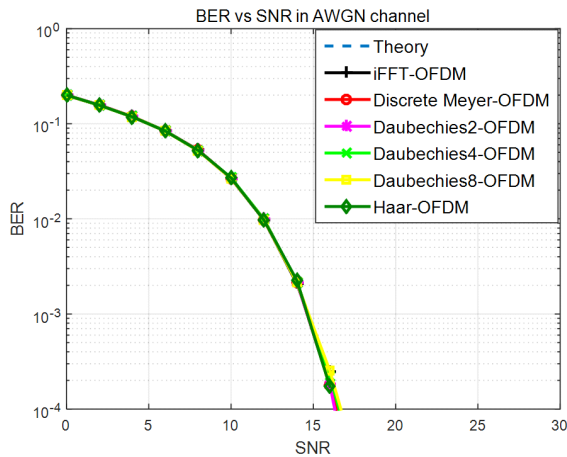


그림 5. 기존의 OFDM 시스템과 Wavelet-OFDM 시스템의 BER 성능 비교

Fig. 5. Comparison of BER performance between Wavelet-OFDM and conventional OFDM.

과 Wavelet-OFDM 시스템의 BER 성능을 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이, 기존의 OFDM과 여러 웨이블릿을 사용하여 설계한 OFDM 시스템의 BER 성능은 거의 동일한 것을 확인하였다. 그림 6은 기존의 OFDM 시스템과 Wavelet-OFDM 시스템의 한 심볼당 길이를 샘플의 개수로 나타낸 것이다. 여기서 한 심볼당 길이는 $3.2 \mu s$ 로 모든 시스템이 동일하지만, 한 심볼을 이루는 샘플의 개수는 각 시스템별로 차이가 있기 때문에 한 샘플의 주기는 시스템마다 차이가 있다. 예를 들어, Discrete Meyer 웨이블릿을 사

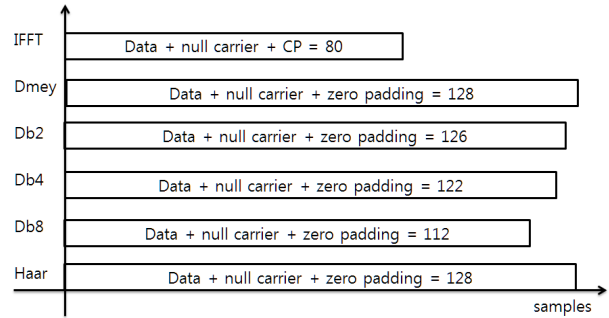


그림 6. 각 시스템의 한 심볼을 이루는 샘플의 개수

Fig. 6. The number of samples that make up one symbol in each system.

용한 Wavelet-OFDM 시스템은 한 심볼이 128개의 샘플로 이루어져 있고, 한 심볼당 주기는 $3.2 \mu s$ 이다. 따라서 한 샘플당 주기는 $3.2 \mu s$ 를 128개의 샘플로 나눈 $0.25 ns$ 이다. 또한, 기존의 OFDM 시스템의 경우 한 심볼주기의 1/4만큼의 주기가 CP로 사용되어 더해지기 때문에 송신되는 한 심볼의 주기는 $3.2 \mu s$ 와 $0.8 \mu s$ 가 더해진 $4.0 \mu s$ 이다. 그러므로 기존 OFDM 시스템의 한 심볼은 80개의 샘플로 이루어져 있고, 한 샘플당 주기는 $0.5 ns$ 로 확인하였다.

그림 7은 기존 OFDM 시스템의 송신 신호 스펙트럼을 시뮬레이션 환경에 따라 측정하였다. 그림 7에서 볼 수 있듯이, OFDM 신호의 대역폭은 IEEE 802.11a 표준과 같

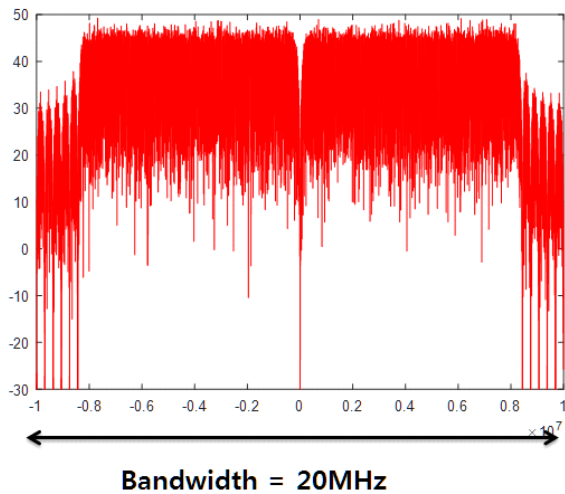


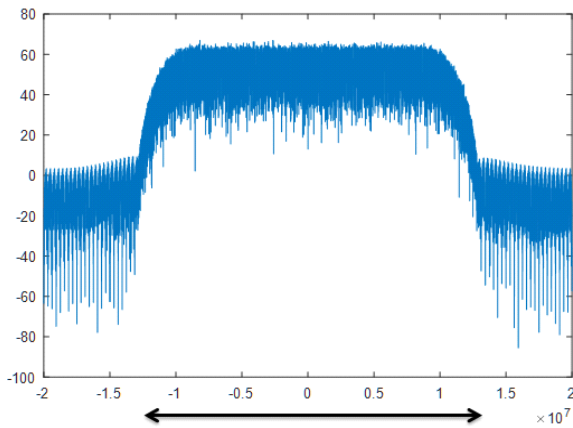
그림 7. OFDM 시스템의 스펙트럼

Fig. 7. Spectrum of conventional OFDM.

이 20 MHz로 확인되었다. 그 후, 부반송파의 개수로 대역폭을 나누어 부반송파간의 간격을 측정하였다. 그림 8부터 그림 12까지는 여러 가지 웨이블릿을 사용하여 구성된 Wavelet-OFDM 시스템의 스펙트럼을 나타낸다. 하나의 심볼을 구성하는 샘플 수의 차이 및 웨이블릿 함수의 형태의 차이로 인해 각 시스템마다 대역폭이 서로 다른 것을 확인할 수 있다. 그중에서도 Discrete Meyer 웨이블릿

를 사용하는 Wavelet-OFDM 시스템의 대역폭이 가장 좁으며 OOB(Out Of Band) 또한 다른 웨이블릿 시스템보다 낮다. 이 특징은 주파수 효율을 향상시킬 수 있는 이점으로 여겨진다.

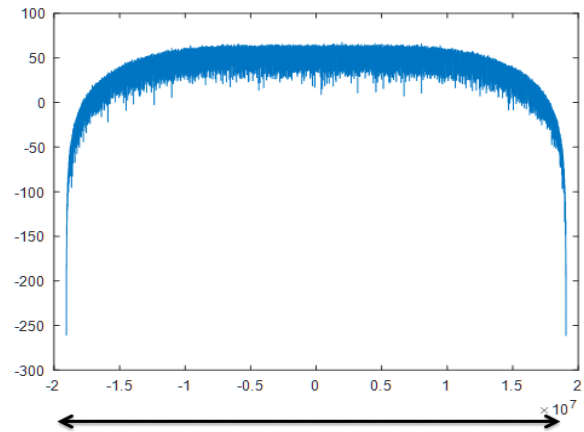
표 2는 각 시스템의 스펙트럼 효율과 대역폭 그리고 부반송파간의 간격을 표로 정리한 것이다. 본 논문에서는 각 시스템의 시간을 동일하게 적용하였고, 그에 따라 동



Bandwidth = 25MHz

그림 8. Discrete Meyer 웨이블릿을 사용하는 Wavelet-OFDM 시스템의 스펙트럼

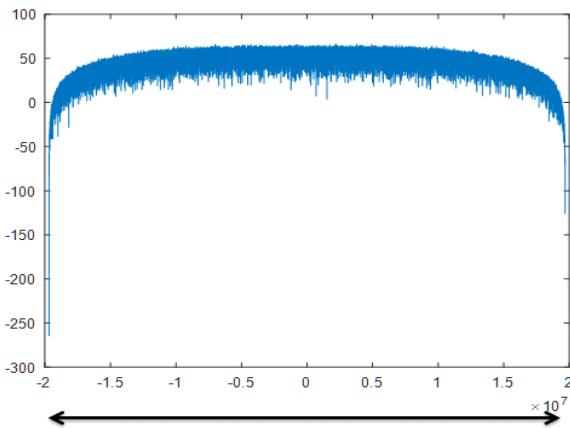
Fig. 8. Spectrum of Wavelet-OFDM using Discrete Meyer.



Bandwidth = 38MHz

그림 10. Daubechies4 웨이블릿을 사용하는 Wavelet-OFDM 시스템의 스펙트럼

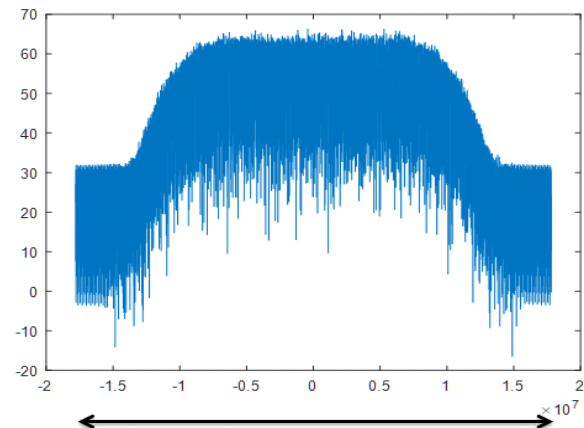
Fig. 10. Spectrum of Wavelet-OFDM using Daubechies4.



Bandwidth = 39.4MHz

그림 9. Daubechies2 웨이블릿을 사용하는 Wavelet-OFDM 시스템의 스펙트럼

Fig. 9. Spectrum of Wavelet-OFDM using Daubechies2.



Bandwidth = 35.6MHz

그림 11. Daubechies8 웨이블릿을 사용하는 Wavelet-OFDM 시스템의 스펙트럼

Fig. 11. Spectrum of Wavelet-OFDM using Daubechies8.

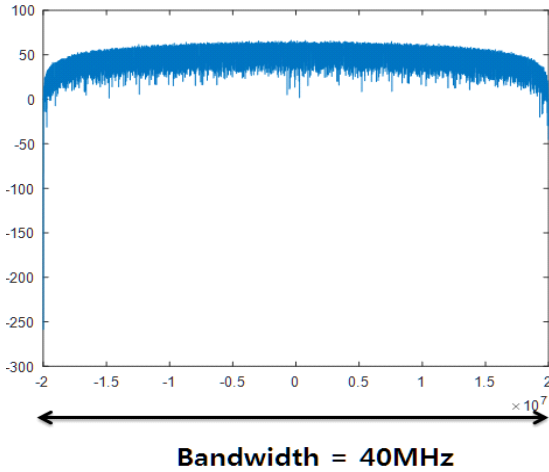


그림 12. Haar 웨이블릿을 사용하는 Wavelet-OFDM 시스템의 스펙트럼

Fig. 12. Spectrum of Wavelet-OFDM using Haar.

표 2. 각 시스템의 스펙트럼 효율
Table 2. Spectral efficiency for each system.

	Spectral efficiency (bps/Hz)	Bandwidth (MHz)	Subcarrier spacing (kHz)
IFFT	2.7	20	312.5
Discrete Meyer	2.7	25	390.625
Daubechies2	1.7132	39.4	615.625
Daubechies4	1.7763	38	593.750
Daubechies8	1.8961	35.6	556.250
Haar	1.6875	40	625

일한 정보량을 전송하는데 필요한 대역폭을 계산함으로써 스펙트럼 효율을 구했다. 따라서 스펙트럼 효율의 단위는 bits/s/Hz가 된다. IFFT 연산 기반의 기존 OFDM 시스템의 경우, 스펙트럼 효율이 2.7 bps/Hz로 계산되었다. Discrete Meyer 웨이블릿을 사용한 Wavelet-OFDM의 경우 역시 기존의 OFDM 스펙트럼 효율과 같은 값인 2.7 bps/Hz로 측정되었다. 이외에 다른 웨이블릿을 사용한 Wavelet-OFDM 시스템의 경우 기존의 OFDM 시스템보다 낮은 스펙트럼 효율을 보였는데, 이는 IFFT와 IDWT 연산의 차이점 및 심볼의 길이에서 오는 차이가 서로 다른 대역폭을 갖게 하였고, 이로 인해 낮은 스펙트럼 효율을 나타낸다

는 것을 알 수 있다.

표 3은 IEEE 802.11a 표준에 나와있는 스펙트럼 마스크를 각 시스템에 적용하였을 때의 유효한 대역폭을 계산하여 스펙트럼 효율을 구한 것이다.

그림 13은 기존 OFDM 시스템과 여러 웨이블릿을 사용한 Wavelet-OFDM 시스템의 PAPR 성능비교이다. 그림에서 볼 수 있듯이, IFFT 연산기반의 OFDM 시스템이 가장 높은 PAPR 성능을 보였고, IDWT 연산기반의 OFDM 시스템은 적어도 기존의 OFDM 시스템보다 1 dB 이상의 차이를 보이며 낮은 PAPR 성능을 나타냈다. 그 중, Haar 웨

표 3. IEEE 802.11a 스펙트럼 마스크 표준을 만족할 때, 각 시스템의 스펙트럼 효율

Table 3. When the IEEE 802.11a spectral mask standard is satisfied, the spectral efficiency of systems.

	Spectral efficiency (bps/Hz)
IFFT	2.7
Discrete Meyer	2.43
Daubechies2	0.7709
Daubechies4	0.8348
Daubechies8	0.9480
Haar	0.7593

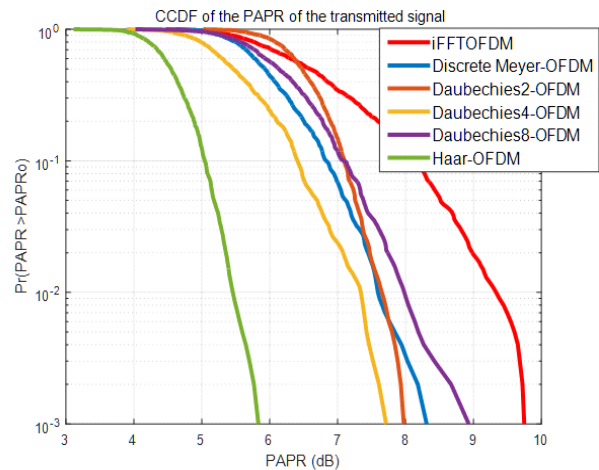


그림 13. 기존의 OFDM 시스템과 Wavelet-OFDM 시스템의 PAPR 성능 비교.

Fig. 13. PAPR performance comparison of conventional OFDM and Wavelet-OFDM.

이블릿을 사용한 Wavelet-OFDM 시스템의 PAPR 성능이 가장 낮게 측정이 되었는데, 이는 IDWT 연산 중에서도 가장 간결한 웨이블릿 함수와 스케일 함수를 사용하기 때문임을 알 수 있다.

표 4는 각 시스템의 스펙트럼 효율, BER, PAPR 성능을 정리한 것이다. BER 성능은 10^{-4} 기준의 SNR을 기준으로 측정하였다. 표에서 볼 수 있듯이, 기존의 OFDM과 Wavelet-OFDM은 거의 유사한 BER 성능을 나타내었다. 스펙트럼 효율 측면에서는 기존의 OFDM과 Discrete Meyer 웨이블릿을 사용한 Wavelet-OFDM 시스템이 가장 좋은 효율을 나타냈다. Discrete Meyer 웨이블릿을 제외하고 가장 좋은 스펙트럼 효율을 가진 웨이블릿은 Daubechies8 웨이블릿을 사용한 Wavelet-OFDM 시스템인데, 다른 Wavelet-OFDM 시스템에 비해 PAPR이 높은 편으로 나타났기 때문에 효율적인 시스템이라고 판단하기는 어렵다. IEEE 802.11a 표준에 나와있는 스펙트럼 마스크를 적용시켰을 때는 표 3과 같은 스펙트럼 효율을 얻을 수 있다. 또한, PAPR 측면에서 각 시스템을 평가하면 Haar 웨이블릿을 사용한 Wavelet-OFDM 시스템이 다른 시스템보다 많게는 4dB가량 차이를 보이며 가장 낮은 PAPR 성능을 보였다. 하지만, 스펙트럼 효율을 고려한다면 가장 낮은 효율을 나타냈으므로 이 시스템 또한 효율적인 시스템으로 고려하기는 힘들다. 따라서 위의 3가지 종합적인 성능을 모두 고려하였을 때, 가장 효율적인 시스템은 Discrete Meyer 웨이블릿을 사용한 Wavelet-OFDM 시스템이며 기존의 OFDM 시스템의 단점을 보완할 수 있는 새로운 MCM 시스템 방식으로 고려할 수 있다.

표 4. 각 시스템의 성능 비교

Table 4. Performance comparison for each systems.

	Spectral efficiency (bps/Hz)	BER (dB)	PAPR (dB)
IFFT	2.7	18.3	9.8
Discrete Meyer	2.7	18.5	8.3
Daubechies2	1.7132	18.3	7.9
Daubechies4	1.7763	18.5	7.7
Daubechies8	1.8961	18.5	8.9
Haar	1.6875	18.3	5.8

IV. 결 론

본 연구에서는 현 4세대 이동통신방식의 일종으로 사용되어지고 있는 OFDM 시스템의 단점을 극복하여 대체될 수 있는 차세대 고속통신 MCM 방식 시스템의 고안을 목표로 하였다. 따라서 IDWT 연산 기반의 Wavelet-OFDM 시스템을 새로운 MCM 방식으로 제안하며, 기존의 IFFT 연산 기반의 OFDM 시스템과 성능을 비교하였다. 또한, 현 OFDM 시스템과 정확한 비교를 위해 IEEE 802.11a 표준에 맞게 기존의 OFDM 시스템을 설계하고, 표준에 나와있는 하나의 심볼당 주기를 각 시스템에 동일하게 적용하여 시뮬레이션을 진행하였다. 결과적으로 각 시스템의 BER 성능은 거의 유사한 BER 성능을 나타내었다. 또한, 각 시스템의 한 심볼당 주기를 $3.2 \mu s$ 로 동일시하여 시뮬레이션을 진행하였다. 한 심볼당 주기는 동일하지만 하나의 심볼을 이루는 샘플의 개수는 각기 다르고 그에 따라서 한 샘플의 주기 차이와 각 시스템의 연산에 사용되는 기저함수의 차이로 인해 서로 다른 스펙트럼 효율을 나타내었다. 그 중, 기존의 IFFT 연산 기반의 OFDM 시스템과 Discrete Meyer 웨이블릿을 사용한 Wavelet-OFDM 시스템은 IEEE 802.11a 표준 스펙트럼 마스크를 고려하지 않은 경우에는 동일한 스펙트럼 효율을 나타내었으며, Wavelet-OFDM 시스템은 낮은 PAPR과 OOB 성능이 측정되었다. 이는 주파수 효율측면과 전력효율 측면에서 큰 이점으로 판단되며, 기존의 OFDM 시스템의 단점을 보완할 수 있는 특징이다. 따라서 본 연구의 목표인 기존 IFFT 연산 기반의 OFDM 시스템의 단점을 보완할 수 있는 새로운 다중캐리어 시스템으로서 Discrete Meyer 웨이블릿을 사용한 Wavelet-OFDM을 새로운 방식으로 고려할 수 있다.

References

- [1] T. Hwang, C. Yang, G. Wu, S. Li, and G. Y. Li, "OFDM and its wireless applications: A survey," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 58, no. 4, pp. 1673-1694, May 2009.
- [2] Y. J. Choi, H. R. Kim, N. Kim, Y. H. Ko, and J. H. Ahn, "Performance analysis of a OFDM system for

- wireless LAN in indoor wireless channel," *Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 12, no. 2, pp. 268-277, Feb. 2001.
- [3] A. Roy, A. S. Poonia, "Implementation of IDWT OFDM system in LabVIEW," *International Journal of Modern Trends in Engineering and Research*, vol. 2, no. 6, pp. 620-624, Jun. 2015.
- [4] G. Sailakshmi, K. Sudha, "BER analysis of wavelet based OFDM using different modulation techniques," *International Journal of Science and Research*, vol. 4, no. 5, pp. 2519-2523, Mar. 2014.
- [5] A. H. Kattoush, W. A. Mahmoud, and S. Nihad, "The performance of multiwavelets based on OFDM system under different channel conditions," *Digital Signal Processing*, vol. 20, no. 2, pp. 472-482, Mar. 2010.
- [6] M. Oltean, M. Nafoarniță, "Wavelet OFDM performance in frequency selective fading channels," in *2010 8th International Conference on Communications*, Bucharest, 2010, pp. 343-346.
- [7] D. Wulich, "Definition of efficient PAPR in OFDM," *IEEE Communications Letters*, vol. 9, no. 9, pp. 832-834, Sep. 2005.
- [8] D. TL Lee, A. Yamamoto, "Wavelet analysis: Theory and applications," *Hewlett Packard Journal*, vol. 45, pp. 44-52, 1994.
- [9] M. Chafii, J. Palicot, R. Gribonval, and A. G. Burr, "Power spectral density limitations of the wavelet-OFDM system," in *Signal Processing Conference(EUSIPCO), 2016 24th European*, 2016, pp. 1428-1432.
- [10] J. Lee, J. H. Kim, and W. Kim, "Comparison and performance analysis of wavelet OFDM system and FD-OFDM," *Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers*, vol. 50, no. 7, pp. 34-42, Jul. 2013.
- [11] K. T. Moon, J. S. Kim, D. W. Jang, and K. S. Kim, "A design of power line communication system using wavelet OFDM," *Journal of Korean Institute of Communications and Information Science*, vol. 35, no. 11, pp. 871-876, Nov. 2010.
- [12] 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, 2017.
- [13] K. Abdullah, Z. M. Hussain, "Simulation of models and BER performances of DWT-OFDM versus FFT-OFDM," in *Discrete Wavelet Transforms-Algorithms and Applications*, InTech, 2011.
- [14] K. Abdullah, Z. M. Hussain, "Studies on DWT-OFDM and FFT-OFDM systems," in *International Conference on Communication, Computer and Power(ICCCP'09)*, Muscat, 2009, pp. 15-18.
- [15] V. Vermehren, H. M. de Oliveira, "Close expressions for Meyer wavelet and scale function," preprint, arXiv:1502.00161, 2015.

이 준 구



2017년 2월: 충북대학교 전자공학과 (공학사)
 2017년 3월 ~ 현재: 충북대학교 전자공학과 석사과정
 [주 관심분야] 무선통신시스템, 차세대 통신시스템

유 흥 균



1988년 2월 ~ 현재: 충북대학교 전자공학과 교수
 2002년 3월 ~ 2004년 2월: 충북대학교 컴퓨터정보통신연구소 소장
 [주 관심분야] 무선통신, 5G/B5G 이동통신, 위성통신, 통신회로 설계 및 통신신호처리