

# 웨이블릿 변환을 사용하는 다중 모드 OFDM 시스템의 설계와 성능 평가

이 준 구\*, 안 창 영\*, 유 흥 균<sup>o</sup>

## Design and Performance Evaluation of Multi-Mode OFDM System Using Wavelet Transform

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

### 요 약

본 논문에서는 스펙트럼 효율을 향상시킬 수 있는 Multi-mode DWT-OFDM(Multi-mode Discrete Wavelet Transform Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 시스템을 설계하고 성능을 평가한다. DWT-OFDM(Discrete Wavelet Transform Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 시스템과 Multi-mode DFT-OFDM(Multi-mode Discrete Fourier Transform Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 시스템을 결합하여 스펙트럼 효율을 향상시킬 수 있는 Multi-mode DWT-OFDM 시스템을 설계하고 이를 기존의 푸리에 변환을 기반으로 하는 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 시스템과 성능을 비교한다. 여러 개의 웨이블릿 함수를 사용하고, 이를 지칭하는 인덱스 비트를 추가적으로 보내는 Multi-mode DWT-OFDM 시스템은 기존의 DFT-OFDM 시스템에 비해 더 많은 비트 전송량을 가지며, 두 시스템을 동일한 BER(Bit Error Rate) 성능을 기준으로 스펙트럼 효율을 비교한 결과 약 11%의 스펙트럼 효율 향상을 보인다.

**Key Words** : OFDM, DWT-OFDM, Multi-mode DWT-OFDM, Spectral efficiency, BER

### ABSTRACT

In this paper, Multi-mode DWT-OFDM (Multi-mode Discrete Wavelet Transform Orthogonal Frequency Division Multiplexing) system that can improve spectral efficiency is designed and its performance is evaluated. Multi-mode DWT-OFDM system that can improve spectral efficiency by combining DWT-OFDM (Discrete Wavelet Transform Orthogonal Frequency Division Multiplexing) system and multi-mode DFT-OFDM (Multi-mode Discrete Fourier Transform Orthogonal Frequency Division Multiplexing) And compare it with OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) system based on existing Fourier transform. Multi-mode DWT-OFDM system, which uses several wavelet functions and sends index bits to them, has more bit transmission capacity than the conventional DFT-OFDM system, and has the same BER (Bit Error Rate) performance The spectral efficiency is improved by about 11%.

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

• First Author : Chungbuk National University, Department of Electronic Engineering, leejg1992@gmail.com, 학생회원

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

\* Chungbuk National University, Department of Electronic Engineering, acy890217@naver.com, 학생회원

논문번호 : 201901-437-A-RN, Received January 29, 2019; Revised March 6, 2019; Accepted March 6, 2019

## I. 서 론

OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)은 4세대 셀룰러 통신 방식으로 채택된 변조 방식이다. 이 변조방식은 송수신기의 구현 복잡성이 상대적으로 낮다는 점을 강조하면 혁신적인 시스템이다<sup>[1]</sup>. 앞으로의 5G 셀룰러 통신은 현재 4세대 LTE 통신 시스템에 비해 최고 속도를 약 20배 증가시켜 모바일 사용자에게 기가비트 경험을 제공할 것을 약속하고 있다<sup>[2]</sup>.

현재 LTE 통신방식으로 사용되는 OFDM 시스템의 수신기는 간단한 등화기를 설계하여 신호를 등화하게 된다. 또한 협대역 간섭에서도 강한 특징을 보여 주는데, 이러한 간섭은 OFDM 시스템의 전체 부반송파 중 일부의 부반송파에만 영향을 주게 된다. 이는 다중경로에 의한 주파수 선택적 페이딩에 용이한 특징이 있다<sup>[3]</sup>. OFDM 시스템은 부채널들을 주파수상에서 중첩하여 겹치게 대역할당을 하므로 주파수 대역 효율이 기존의 시스템에 비해 좋다<sup>[4]</sup>. 반면에, OFDM 시스템의 단점으로는 큰 PAPR(Peak to Average Power Ratio)를 갖는 특성이 있다<sup>[5]</sup>. 이러한 단점을 개선하여 좀 더 효율적인 시스템이 될 수 있도록 많은 연구가 진행되고 있다<sup>[6]</sup>. 그 중, 웨이블릿 변환을 사용하여 다중반송파 시스템을 구현하는 연구가 선행되었다. 웨이블릿 변환을 사용한 DWT-OFDM (Discrete Wavelet Transform Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 시스템은 낮은 PAPR 특성을 갖는다.

SM(Spatial Modulation)방식은 MIMO(Multiple Input Multiple Output) 시스템에서 다수의 안테나를 사용하기 위한 방식이다. 일련의 비트정보를 활용하여, 시스템의 여러 안테나 중 사용하고자 하는 안테나를 지정하여 사용하게 된다<sup>[7]</sup>. 활성화시켜 사용하려는 안테나를 인덱싱하게 되는 정보 비트 외에 인덱스 비트는 스펙트럼 효율 향상의 효과를 얻을 수 있다. 이러한 SM방식을 OFDM 시스템에 적용한 OFDM-IM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing-Index Modulation)은 활성화시킨 안테나를 인덱싱하는 방법을 부반송파에 적용한다<sup>[8]</sup>. 조합의 방식을 사용하여 인덱스 비트로 부반송파를 인덱싱하게 되기 때문에, 정보 비트 외에 보내지는 인덱스 비트로 인한 스펙트럼 효율의 향상 효과도 얻을 수 있다.

Dual mode OFDM-IM(Dual Mode Orthogonal Frequency Division Multiplexing-Index Modulation) 시스템은 기존의 OFDM-IM 시스템을 확장시킨 시스템이다<sup>[9]</sup>. OFDM-IM 시스템이 일련의 인덱스 비트를 사용해 활성화시키는 부반송파를 인덱싱하게 된다면, Dual mode OFDM-IM 시스템에서는 서로 다른 두 가지 형태의 성좌도를 사용하여 인덱스 비트에 의해 심볼을 만들어내고 이를 부반송파에 맵핑하게 된다. 이러한 시스템 성좌도 모드를 네 가지로 확장시켜 시스템을 구성한 Multi-mode OFDM 시스템은 기존의 OFDM 시스템과 비교하여 BER 성능을 개선한 시스템이다.

본 논문에서는 여러 웨이블릿을 사용하는 DWT-OFDM 시스템을 설계하여 이러한 웨이블릿을 지칭하는 추가적인 인덱스 비트를 전송하는 시스템인 Multi-mode DWT-OFDM 시스템에 대하여 설계하고 이를 기존의 DFT-OFDM 시스템과 성능을 비교한다.

본 논문에서는 여러 웨이블릿을 사용하는 DWT-OFDM 시스템을 설계하여 이러한 웨이블릿을 지칭하는 추가적인 인덱스 비트를 전송하는 시스템인 Multi-mode DWT-OFDM 시스템에 대하여 설계하고 이를 기존의 DFT-OFDM 시스템과 성능을 비교한다.

## II. Multi-Mode DWT-OFDM

### 2.1 DWT-OFDM

그림 1은 웨이블릿 변환을 기반으로 하는 OFDM 시스템인 DWT-OFDM 시스템의 송수신기를 설명하는 그림이다. 그림 2는 웨이블릿 변환의 특성을 비교하는 그림이다.

신호를 해석할 때는 신호의 불연속성을 없애기 위

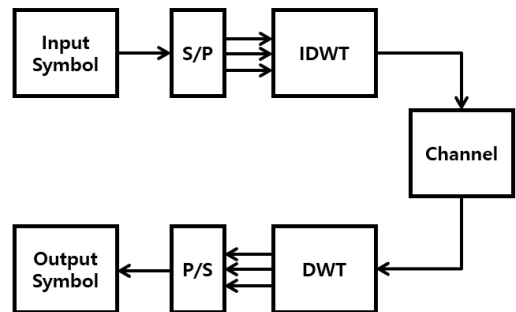


그림 1. DWT-OFDM 시스템 블록다이어그램  
Fig. 1. DWT-OFDM system block diagram.

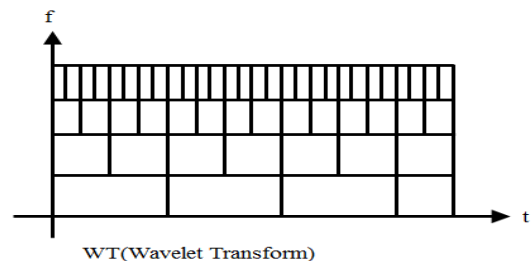


그림 2. 웨이블릿 변환 특성  
Fig. 2. Characteristic of wavelet transform.

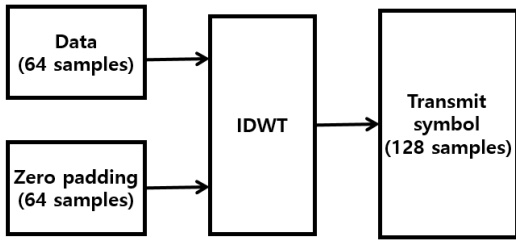


그림 3. IDWT 연산 후의 심볼 구성  
Fig. 3. Symbol configuration after IDWT operation.

해서는 매우 짧은 기저함수가 필요하다. 동시에, 자세한 주파수 분석을 위해 매우 긴 기저함수를 필요로 하게 된다. 따라서 웨이블릿 변환의 장점은 이러한 신호 해석을 위해 윈도우의 크기를 달리하며 신호를 해석할 수 있다는 특징이 있다.

그림 3은 송신기에서의 IDWT 연산을 설명하는 그림이다. 기존의 OFDM 시스템에서 64개의 부반송파를 사용하는 심볼의 형태가 구성된다고 예를 들면, 전송하려는 심볼은 IFFT 연산 후에 64개의 시간 샘플로 구성된 심볼이 형성된다. 그러나 DWT-OFDM 시스템에서는 IDWT 연산을 위해 전송하고자 하는 데이터의 시간 샘플 길이와 동일한 길이의 zero padding이 더해져 원래 보내려던 신호보다 두 배의 시간샘플을 갖게 되는 심볼이 만들어진다. 기존의 OFDM 시스템과 동일한 대역폭을 토대로 시스템을 평가하면, 두 시스템은 같은 스펙트럼 효율을 낼 수 있다.

### 2.2 Multi-mode DFT-OFDM

Multi-mode DFT-OFDM 시스템은 Dual-mode DFT-OFDM-IM 시스템의 방식을 확장하여 설계하는 시스템이다[10]. 두 가지 모드를 사용하여 심볼을 형성하는 Dual-mode DFT-OFDM-IM에서 여러 가지 모드를 사용하는 Multi-mode DFT-OFDM으로 시스템을 확장시켜 전송되는 정보량을 증가시킬 수 있다.

그림 4는 Multi-mode DFT-OFDM 시스템의 송신기 구조를 나타내는 그림이다. 보내고자하는 데이터는 인덱스 비트와 심볼을 형성하는 정보비트로 나뉜다. 그 후, 각각의 인덱스 비트에 따라 네 가지의 서로 겹치지 않는 성좌도 형태는 모드 A, B, C, D의 매핑을 사용해 심볼을 형성한다. 그 후, 인덱스 비트의 배치 정보에 따라 OFDM 서브블록을 구성하게 되고 IFFT 연산을 거쳐 CP가 더해져 송신신호가 만들어진다. 수신기에서는 부반송파에 매핑되어있는 심볼 정보가 어떤 매핑을 사용하여 형성된 심볼인지를 LLR(Log Likelihood Ratio) 알고리즘을 사용하여 판별하게 된

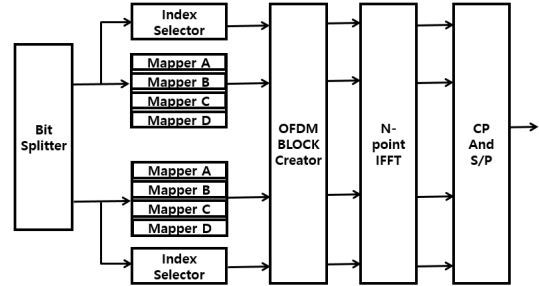


그림 4. Multi-mode DFT-OFDM 시스템의 송신기 블록 다이어그램  
Fig. 4. Transmitter block diagram of Multi-mode DFT-OFDM.

다. 이를 통해, 알맞은 디매핑을 사용해 심볼을 복조하고, 심볼들의 배치 정보를 알아내어 부반송파에 매핑되지 않은 인덱스 비트를 추가적으로 복조할 수 있게 된다. 따라서 이는 동일한 부반송파와 대역폭을 사용하는 OFDM 시스템과 비교하여 추가적인 정보 비트를 보낼 수 있는 특징이 있다.

그림 5는 Multi-mode DFT-OFDM 시스템에 사용되는 네 가지의 성좌도 모드를 나타낸다. 각 모드는 QPSK(Quadrature Phase Shift Keying) 형태이며, 전체적인 위상이 45도 틀어져 있는 형태와 전력레벨 크기를 키워 겹치지 않도록 하는 네 가지 형태를 이룬다. 이러한 Multi-mode DFT-OFDM 시스템은 기존의 OFDM 시스템과 성능을 비교해볼 때, 기존의 OFDM 시스템에서는 16APSK (Amplitude Phase Shift

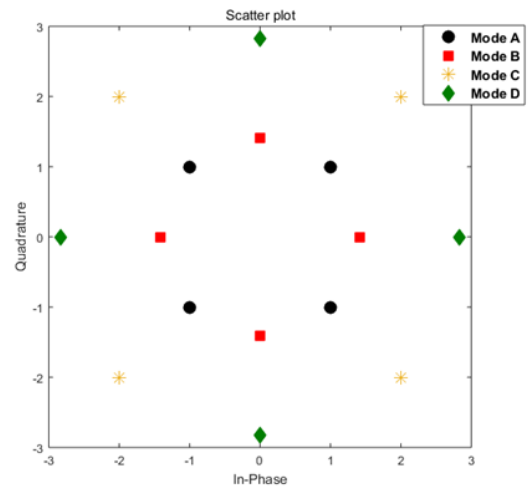


그림 5. Multi-mode DFT-OFDM 시스템에 사용되는 네 가지 모드의 성좌도 형태  
Fig 5. Four mode constellation type used in Multi-mode DFT-OFDM system.

Keying) 성좌도를 사용할 때와 비교를 하게 된다. 이는 수신 받은 성좌도의 형태가 QPSK 형태를 달리 사용하여 구성된 Multi-mode DFT-OFDM 시스템과 16APSK 성좌도를 사용한 OFDM 시스템과 동일하기 때문이다. 따라서 이를 통해 두 시스템의 스펙트럼 효율을 비교하면 기존의 OFDM 시스템에 비해 Multi-mode DFT-OFDM 시스템은 약간 떨어지는 반면에, BER 성능에서는 개선 효과가 나타난다.

### 2.3 제안하는 Multi-mode DWT-OFDM

그림 6은 본 논문에서 제안하고자 하는 Multi-mode DWT-OFDM 시스템의 송신기 구조이다. 기존의 Multi-mode DWT-OFDM 시스템과는 달리 성좌도는 기존의 시스템과 동일하게 사용하며, DWT-OFDM 시스템의 특징 중 하나인 웨이블릿 변환에 사용되는 웨이블릿 함수를 인덱싱하여 각각 IDWT 연산을 한 후에 송신 신호를 만들어 낸다. 그림 6에서 볼 수 있듯이 각각의 웨이블릿 함수를 사용하여 IDWT 연산을 거친 후, 심볼들은 인덱스 비트에 의해 송신 신호 프레임에 배치가 된다.

그림 7은 Multi-mode DWT-OFDM 시스템의 수신기 구조를 나타내는 그림이다. 송신기에서와 마찬가지로 수신한 신호의 CP를 제거하고, LLR 알고리즘을 사용해 웨이블릿 함수를 구분한다. 이를 통해, 기존의 Multi-mode DFT-OFDM 시스템에서와 같이 직접적으로 부반송파에 데이터가 실리지 않더라도, 수신기에서 사용된 웨이블릿의 배치를 파악해 인덱스 비트를 복조한다.

그림 8은 Multi-mode DWT-OFDM 시스템의 웨이블릿 인덱싱을 위해 서브블록을 나누는 과정을 나타내는 그림이다. QAM 등의 변조를 사용해 만들어진 심볼은 총 128개의 시간샘플로 이루어져 있다. 이를

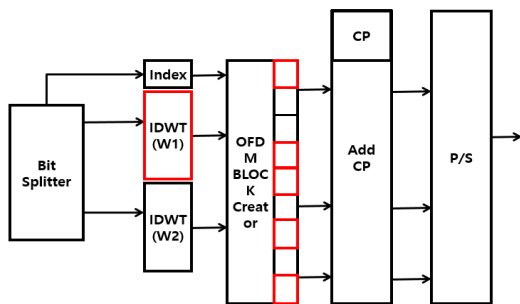


그림 6. Multi-mode DWT-OFDM 시스템의 송신기 블록 다이어그램  
Fig. 6. Transmitter block diagram of Multi-mode DWT-OFDM system.

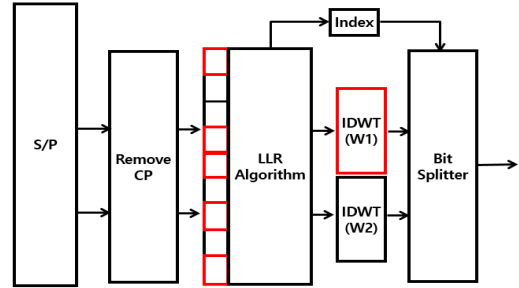


그림 7. Multi-mode DWT-OFDM 시스템의 수신기 블록 다이어그램  
Fig. 7. Receiver block diagram of Multi-mode DWT-OFDM systems.

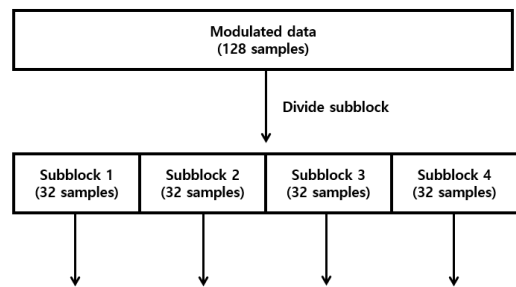


그림 8. Multi-mode DWT-OFDM 시스템의 웨이블릿 인덱싱을 위한 서브블록  
Fig. 8. Subblock for wavelet indexing in Multi-mode DWT-OFDM system.

32개의 샘플로 구성된 4개의 서브블록으로 나누어주고, 웨이블릿 인덱싱을 위해 가장 많은 경우의 수를 제공하는 절반의 샘플을 선택하는 방법을 적용한다. 이를 통해 기존의 정보 비트 외에 추가적인 인덱스 비트를 전송함으로써 비트 전송량을 증가시킬 수 있다. 이는 시스템의 효율에 직접적인 향상 요인으로 작용한다.

그림 9는 Multi-mode DWT-OFDM 시스템의 송신기에서 IDWT 연산을 수행하게 되는 과정을 설명하는 그림이다. 전송하려는 데이터의 시간 샘플은 네 개의 서브블록으로 나누어져 있고, 각 서브블록에서 하나의 샘플만을 선택하여 zero padding과 함께 IDWT의 입력 값으로 사용한다. 따라서 IDWT 연산의 입력 값으로 사용되는 데이터 샘플과 함께 zero padding이 더해져 송신 신호의 한 심볼을 이루는 시간 샘플의 개수는 IDWT 연산하기 전의 두 배가 되는 것을 확인할 수 있다. 여기서, IDWT 연산의 입력 값으로 사용되는 샘플의 길이는 최소 4 이상이 되어야 zero padding과 함께 한 웨이블릿 정보를 담을 수 있는 송신 신호 심볼이 된다.

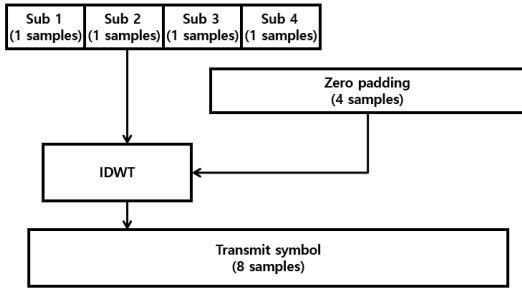


그림 9. 송신기에서 IDWT 연산 과정  
Fig. 9. IDWT operation process in transmitter.

그림 10은 나뉜 서브블록의 데이터 샘플을 사용해서 실질적으로 웨이블릿 변환을 한 후 송신 신호의 심볼을 구성하게 되는 과정을 나타내는 그림이다. 전송되는 송신 한 프레임은 웨이블릿을 사용해 IDWT 연산을 한 심볼과 웨이블릿을 사용해 IDWT 연산을 한 심볼이 조합되어 전송된다.

다음은 각각의 웨이블릿 함수를 사용하여 IDWT 연산을 한 후의 심볼의 성좌도 모습을 나타내는 그림이다. Haar 웨이블릿 함수를 사용하여 만든 심볼의 성좌도가 가장 간단한 형태를 띤다. 따라서 Multi-mode 웨이블릿을 구현하기 위해 Haar 웨이블릿 함수를 사용한 심볼과 다른 모양을 갖는 웨이블릿 함수를 사용한 심볼을 서로 겹치지 않도록 합쳐 송신 신호로 만든다.

그림 11, 12, 13은 각각의 웨이블릿 함수를 사용하여 IDWT 연산을 한 후의 심볼의 성좌도 모습을 나타내는 그림이다. Haar 웨이블릿 함수를 사용하여 만든 심볼의 성좌도가 가장 간단한 형태를 띤다. 따라서 Multi-mode 웨이블릿을 구현하기 위해 Haar 웨이블릿 함수를 사용한 심볼과 다른 모양을 갖는 웨이블릿 함수를 사용한 심볼을 서로 겹치지 않도록 합쳐 송신 신호로 만든다.

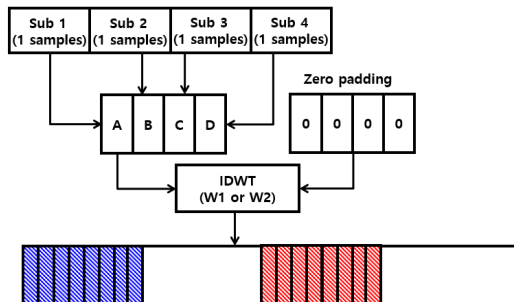


그림 10. 서브블록의 데이터로부터 웨이블릿 인덱싱 방법  
Fig. 10. Method of wavelet indexing from data of subblock.

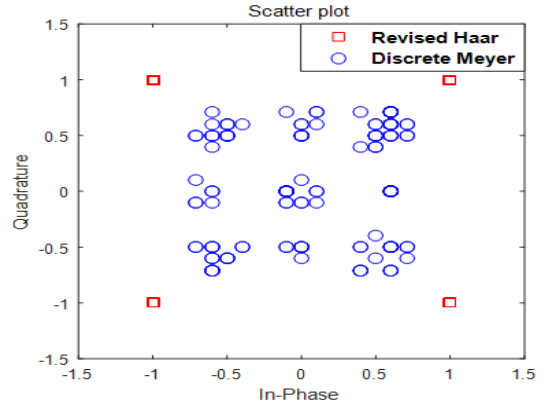


그림 11. Discrete Meyer와 Haar 웨이블릿을 사용한 경우의 심볼 성좌도  
Fig. 11. Constellation of symbol using Discrete Meyer and Haar wavelet.

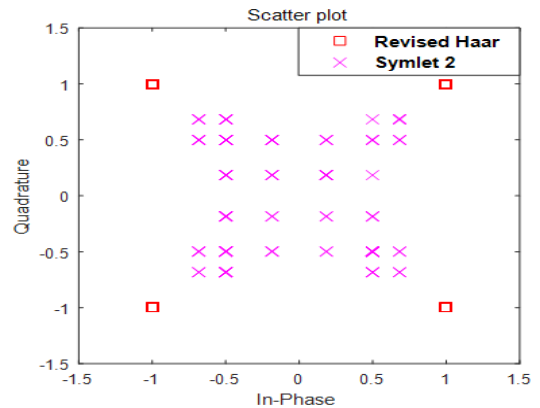


그림 12. Symlet 2와 Haar 웨이블릿을 사용한 경우의 심볼 성좌도  
Fig. 12. Constellation of symbol using Symlet 2 and Haar wavelet.

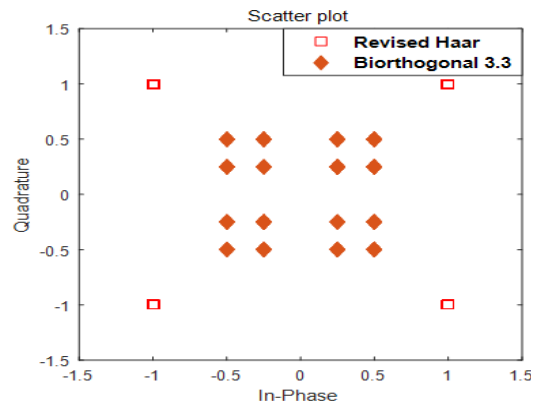


그림 13. Biorthogonal 3.3과 Haar 웨이블릿을 사용한 경우의 심볼 성좌도  
Fig. 13. Constellation of symbol using Biorthogonal 3.3 and Haar wavelet.



### III. 시뮬레이션 결과 및 분석

다음은 제안하고자 하는 Multi-mode DWT-OFDM 시스템의 각 웨이블릿 함수를 다르게 사용했을 때의 시스템의 성능을 비교하고, 기존의 DFT-OFDM 시스템과 성능을 비교하게 된다. 표 1의 시뮬레이션 조건을 사용하여 기존의 DFT-OFDM 시스템과 Multi-mode DWT-OFDM 시스템의 스펙트럼 특성과 PAPR 특성을 분석한다. 두 시스템의 조건을 동일시키기 위해 QPSK 변조를 사용하며, 사용하는 부반송파의 개수를 128개로 일치시킨다. 기존의 DFT-OFDM 시스템과 제안하고자 하는 Multi-mode DWT-OFDM 시스템을 구성하는 웨이블릿 함수들의 모임은 각각 Discrete Meyer 웨이블릿과 Haar 웨이블릿을 사용한 경우와 Symlet 2와 Haar 웨이블릿, 그리고 Biorthogonal 3.3과 Haar 웨이블릿 이렇게 세 가지의 형태로 나누어 시스템의 성능을 평가한다.

그림 14를 보면 기존의 DFT-OFDM 시스템보다 OOB 전력특성이 열화 되는 것을 확인할 수 있는데, 이러한 이유는 심볼의 구성을 할 때 신호의 불연속성이 나타나기 때문이다. 따라서 이러한 현상은 주파수 영역에서 스펙트럼 특성의 열화현상을 발생시킨다. Multi-mode DWT-OFDM 시스템에서 각 웨이블릿 함수를 사용했을 때의 스펙트럼을 비교해보면, Haar 웨이블릿과 Discrete Meyer를 사용한 시스템과 Biorthogonal 3.3을 사용한 시스템의 스펙트럼이 Symlet 2을 사용한 시스템보다 우수한 특성을 가지고 있는 것을 확인하였다.

표 2는 DFT-OFDM 시스템과 Multi-mode DWT-OFDM 시스템의 스펙트럼 효율을 비교한 표이다. 기존의 DFT-OFDM 시스템과 Multi-mode DWT-OFDM 시스템은 동일한 개수의 부반송파를 사용하지만 한 전송 심볼을 이루는 시간 샘플의 개수는 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. 그러나 두 시스템

표 1. 시뮬레이션 조건  
Table 1. Simulation conditions

	Value
Symbol type	QPSK
Modulation	DFT-OFDM Multi-mode DWT-OFDM
Number of subcarriers	128
Wavelet function	Discrete Meyer + Haar Symlet 2 + Haar Biorthogonal 3.3 + Haar

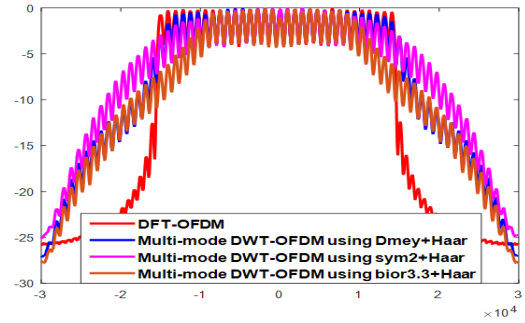


그림 14. 각 시스템의 스펙트럼 OOB 특성 비교  
Fig. 14. Comparison of OOB characteristics for each systems.

표 2. DFT-OFDM 시스템과 Multi-mode DWT-OFDM 시스템의 스펙트럼 효율 비교  
Table 2. Spectral efficiency of DFT-OFDM system and Multi-mode DWT-OFDM system.

	DFT-OFDM		Multi-mode DWT-OFDM
FFT size	128		-
DWT size	-		128
Used subcarrier	128	=	128
Number of samples	128	→	256 (with zero padding)
Symbol duration	$T_{sym}$	=	$T_{sym}$
Symbol type	QPSK	=	QPSK
Transmitted bits	256 bits (information)	→	256 bits + 29 bits (information) (index)
Spectral efficiency	$2 \text{ bits/s/Hz}$	→	$2.2266 \text{ bits/s/Hz}$

의 송신 심볼 주기를 동일하다는 가정으로 두 시스템의 스펙트럼 효율을 판단하게 되면, 전송하려는 비트의 수에 의해 스펙트럼 효율이 결정된다. 따라서 Multi-mode DWT-OFDM 시스템은 기존의 DFT-OFDM 시스템에서 128개의 부반송파를 사용할 때, 256 정보 비트 외에 29 비트의 인덱스 비트를 추가적으로 전송하게 되어 스펙트럼 효율은  $2.2266 \text{ bits/s/Hz}$ 가 된다.

그림 15는 기존의 DFT-OFDM 시스템과 각 웨이블릿을 사용한 Multi-mode DWT-OFDM 시스템의 PAPR 특성을 비교하는 그림이다. Multi-mode DWT-OFDM 시스템에서도 마찬가지로 웨이블릿 변환의 특성에 따라 기존의 DFT-OFDM 시스템보다 모두 낮은 PAPR 특성을 각 Multi-mode DWT-OFDM 시스템이 갖는 것을 확인한다. 또한, Multi-mode

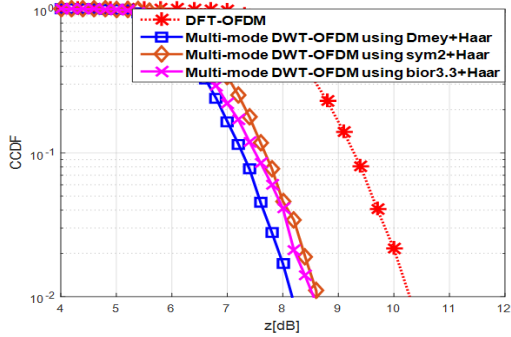


그림 15. 각 시스템의 PAPR 특성 비교  
Fig. 15. Comparison of PAPR characteristics each systems.

DWT-OFDM 시스템에서는 Discrete Meyer 웨이블릿과 Haar 웨이블릿을 사용한 시스템이 가장 낮은 PAPR 특성을 나타낸다. 이러한 PAPR 특성은 주파수

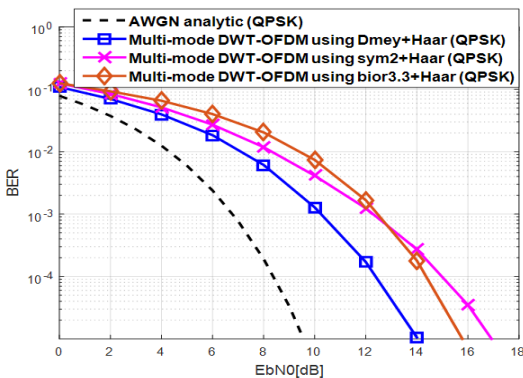


그림 16. Multi-mode DWT-OFDM 시스템의 BER 성능  
Fig. 16. BER performance of Multi-mode DWT-OFDM system.

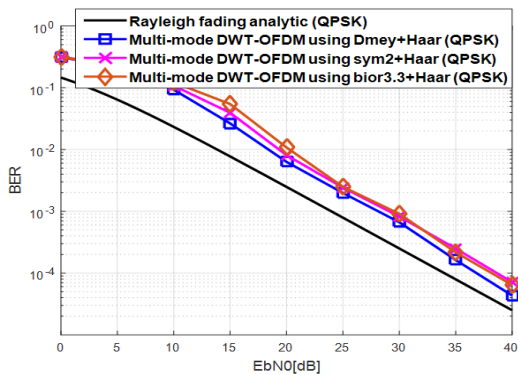


그림 17. Multi-mode DWT-OFDM 시스템의 레일리 페이딩 채널에서의 BER 성능  
Fig. 17. BER performance of Multi-mode DWT-OFDM system in Rayleigh fading channel.

표 3. 시뮬레이션 조건  
Table 3. Simulation conditions.

	Value
Symbol type	QPSK
Modulation	Multi-mode DWT-OFDM
Number of subcarriers	128
Symbol length	256
CP length	64
Wavelet function	Discrete Meyer + Haar Symlet 2 + Haar Biorthogonal 3.3 + Haar
Channel	AWGN channel 64-taps random Rayleigh fading channel
Equalization	Zero-forcing

도메인에서 시스템의 스펙트럼 열화현상을 막아줄 수 있으며 대역폭 효율성을 높여준다.

그림 16과 17은 Multi-mode DWT-OFDM 시스템의 BER 성능을 나타내는 그림이다. 여기에서 Analytic 성능은 OFDM 및 DFT-OFDM에 대한 성능을 나타낸다. Discrete Meyer 웨이블릿과 Haar 웨이블릿을 사용한 Multi-mode DWT-OFDM 시스템의 BER 성능이 가장 우수한 것을 확인할 수 있다. 또한, 다중경로 페이딩 채널에서도 Discrete Meyer 웨이블릿과 Haar 웨이블릿을 사용한 시스템의 BER 성능이 가장 우수한 것을 확인하였다.

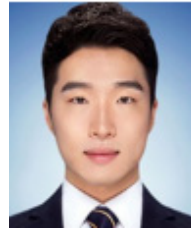
#### IV. 결론

본 논문에서는 한정된 주파수 자원 내에서 기존의 시스템 대비 스펙트럼 효율을 향상시키기 위해 기존의 DWT-OFDM 시스템과 Multi-mode DFT-OFDM 시스템을 사용하여 시스템을 설계하였다. 여러 웨이블릿을 사용하여 송신 신호를 만드는 Multi-mode DWT-OFDM 시스템은 심볼을 매핑하는데 사용되는 정보 비트 외에, 웨이블릿 변환에 사용되는 웨이블릿 함수를 인덱싱하는 인덱스 비트를 추가적으로 보낸다. 기존의 DFT-OFDM 시스템보다 많은 수의 비트를 보내며 이는 직접적으로 효율 향상의 효과를 준다. 따라서 이러한 성능을 비교 분석하기 위해 두 시스템의 요구 SNR 조건을 동일 시 했을 때, 동일한 BER 성능을 갖도록 하여 스펙트럼 효율을 비교하였다. 따라서 이러한 지표를 적용하여 두 시스템의 스펙트럼 효율을 비교한 결과, 기존 시스템 대비 약 11%의 스펙트럼 효율 향상 효과를 보았다.

References

- [1] P. N. Ba, et al., "Performance evaluation of LTE and 5G modeling over OFDM and GFDM physical layers," *2018 IEEE ICC*, pp. 1-6, May 2018.
- [2] P. Banelli, et al., "Modulation formats and waveforms for 5G networks: Who will be the heir of OFDM?: An overview of alternative modulation schemes for improved spectral efficiency," *IEEE Sign. Process. Mag.*, vol. 31, no. 6, pp. 80-93, 2014.
- [3] B. Farhang-Boroujeny and H. Moradi, "OFDM inspired waveforms for 5G," *IEEE Commun. Surv. & Tuts.*, vol. 18, no. 4, pp. 2474-2492, 2016.
- [4] D. Agarwal, et al., "PAPR reduction using precoding and companding techniques for OFDM systems," *IEEE ICACEA*, pp. 18-23, Ghaziabad, India, 2015.
- [5] W. Zhang, et al., "Frequency synchronization for uplink massive MIMO systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 17, no. 1, pp. 235-249, 2018.
- [6] R. Asif, et al., "Performance comparison between DWT-OFDM and FFT-OFDM using time domain zero forcing equalization," *IEEE TEMU*, pp. 175-179, Chania, Greece, Jul.-Aug. 2012.
- [7] A. Deshmukh and S. Bodhe, "Comparison of DCT and wavelet based OFDM system working in 60 GHZ band," *Int. J. Advancements in Technol.*, vol. 3, no. 2, pp. 74-83, 2012.
- [8] E. Başar, et al., "Orthogonal frequency division multiplexing with index modulation," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 61, no. 22, pp. 5546-5549, 2013.
- [9] T. Mao, et al., "Dual-mode index modulation aided OFDM," *IEEE Access* 5, pp. 50-60, 2017.
- [10] J. Lee and H.-G. Ryu, "Design and performance evaluation of multimode OFDM," *J. IEIE*, vol. 55, no. 8, pp. 3-8, Aug. 2018.

이 준 구 (Jungu Lee)



2017년 2월 : 충북대학교 전자공학과 (공학사)  
 2019년 2월 : 충북대학교 전자공학과 (공학석사)  
 <관심분야> 무선통신시스템, 차세대 통신시스템

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