

# HPA 비선형 환경에서 Multi-Mode DWT-OFDM 시스템 설계와 성능 평가

김 다 영\*, 이 준 구\*, 유 흥 균<sup>o</sup>

## Design and Performance Evaluation of Multi-Mode DWT-OFDM Under Nonlinear HPA

Dayoung Kim\*, Jungu Lee\*, Heung-Gyoon Ryu<sup>o</sup>

### 요 약

본 논문에서는 스펙트럼 효율을 개선하는 Multi-mode DWT (Discrete Wavelet Transform)-OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 시스템을 설계하고, HPA 비선형 환경에서 성능을 평가한다. Multi-mode DWT-OFDM은 Multi-mode OFDM 시스템을 FFT가 아닌 DWT를 기반으로 하는 DWT-OFDM을 결합한 시스템이다. 여러 개의 웨이블릿 함수를 사용하며 이를 지칭하는 인덱스 비트를 추가적으로 보내는 Multi-mode DWT-OFDM 시스템은 기존 OFDM 시스템보다 스펙트럼 효율이 약 11% 향상된다. 시뮬레이션은 Multi-mode DWT-OFDM 시스템과 1/2 부호율을 갖는 컨볼루션 코딩을 적용한 Multi-mode DWT-OFDM 시스템을 HPA(High Power Amplifier) 비선형 환경에서 평가하고 기존의 OFDM 시스템과 비교했다. 그 결과, 두 시스템 모두 기존 OFDM 시스템과 유사한 BER 성능을 가지며, 컨볼루션 코딩을 적용한 Multi-mode DWT-OFDM 시스템은 22%의 스펙트럼 효율 향상을 보이는 것을 확인했다.

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

### ABSTRACT

In this paper, we design and evaluate the performance of multi-mode DWT (Discrete Wavelet Transform)-OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) system that improves spectral efficiency under nonlinear HPA environment. Multi-mode DWT-OFDM is a system combining with DWT-OFDM based on DWT instead of FFT. The multi-mode DWT-OFDM system, which uses several wavelet functions and sends additional index bits to it, has a spectral efficiency of about 11% higher than the conventional OFDM system. Simulations were conducted to evaluate and compare multi-mode DWT-OFDM system and multi-mode DWT-OFDM system with convolutional coding with 1/2 code rate under HPA (High Power Amplifier) nonlinear environment. As a result, the multi-mode DWT-OFDM system with convolutional coding has a BER performance similar to that of the conventional OFDM system under HPA nonlinear environment and shows a spectral efficiency improvement of 22%.

※ 본 연구 결과물은 교육부와 한국연구재단의 재원으로 지원을 받아 수행된 사회맞춤형 산학협력 선도대학(LINC+) 육성사업의 연구 결과입니다. 그리고 이 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2016R1D1A1B01008046).

♦ First Author : Department of electronic engineering, Chungbuk National University, allzero0718@naver.com, 학생회원

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

\* Department of electronic engineering, Chungbuk National University

논문번호 : 201906-105-A-RN, Received June 11, 2019; Revised August 9, 2019; Accepted August 15, 2019

## I. 서 론

다양한 형태와 종류의 모바일 기기들이 무수히 출시되고 있다. 이러한 모바일 기기들은 대부분 무선통신 기술을 사용하므로 스펙트럼 자원이 포화 상태에 이른 요즘에는 스펙트럼 효율을 높이기 위한 기술들의 연구가 활발히 진행되고 있다. 최신 이동통신은 FFT(Fast Fourier Transform)를 사용하는 디지털 변조 방식인 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 시스템을 사용한다<sup>[1]</sup>. OFDM 시스템은 높은 PAPR(Peak-to-Average Power Ratio) 등의 여러 가지 단점이 있다. 이러한 단점을 개선하는 효율적인 시스템으로 웨이블릿 변환을 사용한 다중반송파 시스템에 대한 연구가 진행되고 있다<sup>[2,3]</sup>.

DWT(Discrete Wavelet Transform)-OFDM 시스템에 사용하는 웨이블릿 변환은 송신신호의 특성을 개선시킬 수 있는 중요한 요인이 된다. 이러한 신호표현을 통해 신호의 성좌도가 좀 더 자세히 표현될 수 있으므로 넓게 퍼지는 특성이 나타난다. 따라서 DWT-OFDM 시스템은 기존의 OFDM 시스템보다 낮은 PAPR 특성을 갖게 된다.

OFDM-IM(Index Modulation)은 활성화시키는 안테나를 인덱싱하는 방법을 부반송파에 적용한 방식이다<sup>[4]</sup>. 시스템의 여러 안테나 중 사용하고자 하는 안테나를 지정하기 때문에 인덱싱된 정보 비트 외의 인덱스 비트는 스펙트럼 효율 향상의 효과를 얻을 수 있다. 조합의 방식을 사용하여 인덱스 비트를 가지고 부반송파를 인덱싱하게 되기 때문에, 정보 비트 외에 보내지는 인덱스 비트로 인한 스펙트럼 효율의 향상 효과도 얻을 수 있다.

Dual-mode OFDM-IM 시스템은 기존의 OFDM-IM 시스템을 확장시킨 시스템이다<sup>[5]</sup>. OFDM-IM 시스템이 활성화시키는 부반송파를 인덱싱하게 되면, Dual-mode OFDM-IM 시스템에서는 서로 다른 두 가지 형태의 성좌도를 사용하여 부반송파에 매핑하게 되므로 스펙트럼 효율이 같은 기존의 OFDM 시스템과 OFDM-IM 시스템의 BER 성능을 비교하였을 때, Dual mode OFDM-IM 시스템이 성좌도 특성에 따라 우수한 성능을 갖게 되는 장점이 있다. 이러한 시스템을 성좌도의 모드를 네 가지로 확장시켜 시스템을 구성한 Multi-mode OFDM 시스템은 기존의 OFDM 시스템과 비교하여 BER 성능을 개선한 시스템이다<sup>[6]</sup>.

본 논문에서는 Multi-mode DWT-OFDM 시스템과 기존의 OFDM 시스템을 HPA(High Power

Amplifier) 비선형 환경에서 성능을 비교한다. 또한, 컨볼루션 코드를 적용한 Multi-mode DWT-OFDM 시스템을 HPA 비선형 환경에서 고려한 경우의 성능을 기존 OFDM과 비교하여 분석한다.

## II. 시스템 모델

### 2.1 OFDM

OFDM은 다수의 캐리어를 사용하는 Multiple carrier frequencies를 이용하여 변조하는 방식이다. 여러 개의 병렬 데이터 스트림이나 채널을 통해 데이터를 전송하기 위해 직교 부반송파와 신호를 사용하여 데이터를 전송한다. 그림 1은 OFDM 시스템의 구성도를 간략히 표현한 것이다.

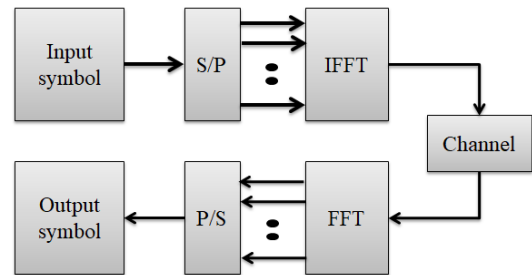


그림 1. OFDM 시스템 구성도  
Fig. 1. Block diagram of OFDM system.

### 2.2 DWT-OFDM

그림 2는 DWT-OFDM 시스템의 송수신기를 설명한다. 그림 3은 송신기에서의 IDWT 연산을 설명하는 그림이다. IDWT 연산을 하기 위해 전송하고자 하는 데이터의 시간 샘플 길이와 동일한 길이의 zero padding이 더해져 원래 보내려던 신호보다 두 배의 시간샘플을 갖게 되는 심볼이 만들어진다. 그러나 Discrete Meyer 웨이블릿을 사용한 DWT-OFDM 시스템의 경우 스펙트럼이 가장 좁으며 OOB(Out Of Band) 또한 다른 웨이블릿 시스템보다 낮다. 동일한 정보량을 전송하는데 필요한 대역폭을 계산함으로써 스펙트럼 효율을 구했을 때에, 기존의 OFDM 스펙트럼 효율과 같은 값인 2.7bps/Hz로 측정되었다<sup>[7]</sup>. 다음은 시스템 연산에 사용되는 IDWT 수식이다. 식 (1)에서  $\omega, \gamma$ 는 각 스케일 값에 해당하는 상수이고,  $\psi, \phi$ 는 다양한 웨이블릿마다의 특정되어 있는 고정함수이다.  $\phi$ 는 스케일함수로서 이 값에 따라 다양한 분해능을 가진다.  $\psi$ 는 웨이블릿 함수로서 신호의 필터링에 사용된다<sup>[7]</sup>.

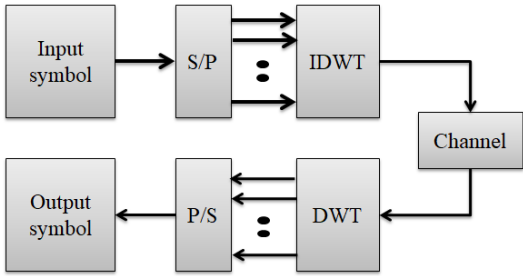


그림 2. DWT-OFDM 시스템 구성도  
Fig. 2. Block diagram of DWT-OFDM system.

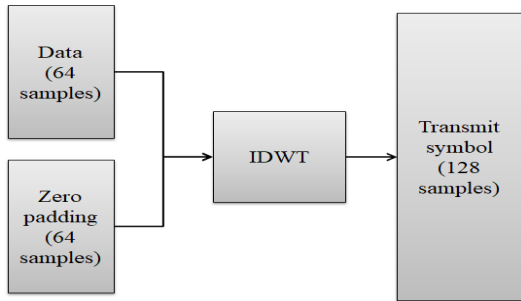


그림 3. IDWT 연산 후의 심볼 구성  
Fig. 3. Symbol configuration after IDWT operation.

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

2.3 Multi-mode DWT-OFDM

그림 4는 Multi-mode DWT-OFDM 시스템의 송신기 구조이다. 송신기에서 매핑된 심볼은 IDWT 연산을 수행하게 되는데, IDWT 연산에 사용되는 웨이블릿 함수를 본 논문에서는 두 가지의 웨이블릿 함수 방

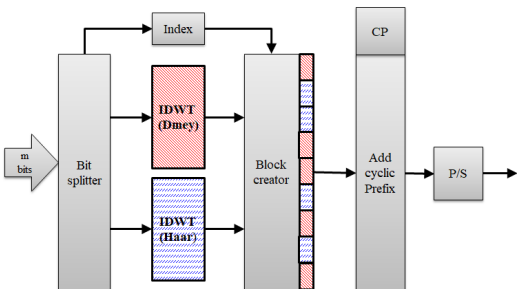


그림 4. Multi-mode DWT-OFDM 시스템의 송신기 블럭다이어그램  
Fig. 4. Transmitter block diagram of Multi-mode DWT-OFDM system.

식의 송신기를 설계하였다. 그림 5는 수신기를 나타내는 그림이다. Multi-mode DWT-OFDM 시스템은 웨이블릿 인덱싱을 위해 서브블록을 나누어야 한다. 인덱스 비트는 조합의 방식을 사용하여 만들어지며, Combinadics 방식은 n개의 데이터 개수 중에 k개의 데이터를 웨이블릿 인덱싱에 사용하여 일대일 매핑을 하는 방법이다. 이를 통해 추가적인 인덱스 비트를 전송함으로써 비트 전송량을 증가시킬 수 있다. 다음 그림 6과 7은 Multi-mode DWT-OFDM 시스템에 사용된 32개의 샘플 중 16개를 인덱싱하는 방법이다<sup>[6]</sup>. 다음은 웨이블릿 변환에 사용된 각 웨이블릿함수와 스케일함수이다. 식(2)와 (3)은 Haar 웨이블릿을 나타

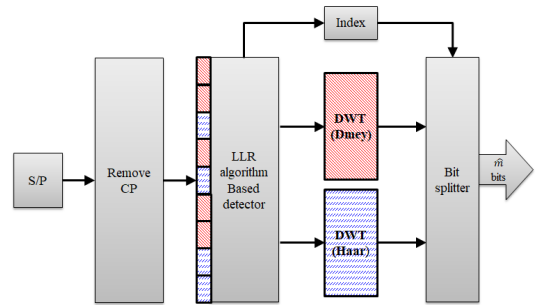


그림 5. Multi-mode DWT-OFDM 시스템의 수신기 블럭다이어그램  
Fig. 5. Receiver block diagram of Multi-mode DWT-OFDM system.

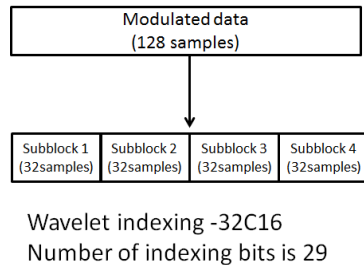


그림 6. 웨이블릿 인덱싱을 위한 서브블록  
Fig. 6. Subblock for wavelet indexing.

```

32C16 = 601,080,390
log2(601,080,390) = 29.16
29 bits used
0 1 0 0 0 1 1 0 1 0 0 0 1 1 0 0 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 1 0
Bin-2-Dec Conversion : 141,084,514
Combinadics (indices)
29, 28, 27, 26, 25, 19, 17, 16, 15, 14, 13, 12, 11, 8, 4, 2
    
```

그림 7. 각 서브블록의 32개 데이터 샘플 중 16개 선택하는 예시  
Fig. 7. Example of selecting 16 of 32 data samples in each subblock.

내는 스케일함수와 웨이블릿함수이다.

$$\phi(t) = \begin{cases} 1 & \text{if } 0 \leq t \leq 1 \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (2)$$

$$\psi(t) = \begin{cases} 1 & \text{if } 0 < t \leq 1/2 \\ -1 & \text{if } 1/2 < t \leq 1 \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (3)$$

다음은 Discrete Meyer 웨이블릿을 나타내는 스케일함수와 웨이블릿함수이다.

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

$$\psi(w) = e^{iw/2}[\phi(w+2\pi) + w(w-2\pi)]\phi(w/2) \quad (5)$$

다음은 Biorthogonal 3.3 웨이블릿을 나타내는 스케일함수와 웨이블릿함수이다.

$$\int_{-\infty}^{\infty} \phi_{j,k}(t) \tilde{\psi}_{J,K}(t) dt = 0 \quad (6)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \tilde{\phi}_{j,k}(t) \psi_{J,K}(t) dt = 0 \quad (7)$$

다음은 Daubechies 웨이블릿의 스케일함수와 웨이블릿함수이다.

$$\phi(t) = \sum_{\Delta=-\infty}^{\infty} \alpha_{\Delta} \sqrt{2} \phi(2t - \Delta) \quad (8)$$

$$\psi(t) = \sum_{\Delta=-\infty}^{\infty} \beta_{\Delta} \sqrt{2} \phi(2t - \Delta) \quad (9)$$

Symlets 웨이블릿은 Daubechies 웨이블릿을 대칭과 가깝게 필터 계수를 수정한 웨이블릿이다.

### III. 시뮬레이션 결과 및 분석

시뮬레이션은 표 1의 조건을 사용하였으며, 표 2는 OFDM 시스템과 Multi-mode DWT-OFDM 시스템의 스펙트럼 효율을 비교한 표이다. Multi-mode DWT-OFDM 시스템은 추가적인 29개의 인덱스 비트로 스펙트럼 효율은 2.2266 bits/s/Hz가 된다<sup>6)</sup>.

그림 8은 OFDM 시스템과 Multi-mode

표 1. 시뮬레이션 조건  
Table 1. Simulation conditions.

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

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

	OFDM	Multi-mode DWT-OFDM
FFT(or DWT) size	128	128
Number of samples	128	258 (with zero padding)
Symbol type	QPSK	QPSK
Transmitted bits	256 bits	256 bits + 29 bits
Spectral efficiency	2 bits/s/Hz	2.2266 bits/s/Hz

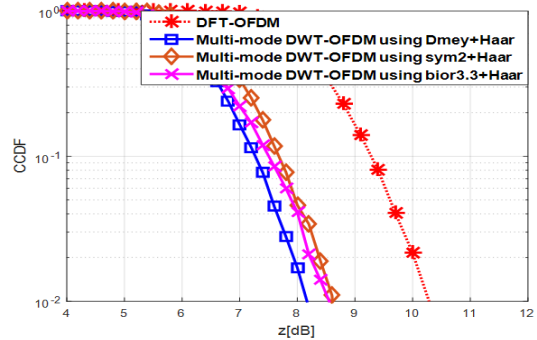


그림 8. 각 시스템의 PAPR 특성 비교  
Fig. 8. Comparison of PAPR characteristics each systems.

DWT-OFDM 시스템의 PAPR 특성을 비교한다. Multi-mode DWT-OFDM 시스템도 OFDM 시스템보다 낮은 PAPR 특성을 갖는 것을 확인하였다.

그림 9와 10은 Multi-mode DWT-OFDM 시스템의 BER 성능을 나타낸다. AWGN과 다중경로 페이딩

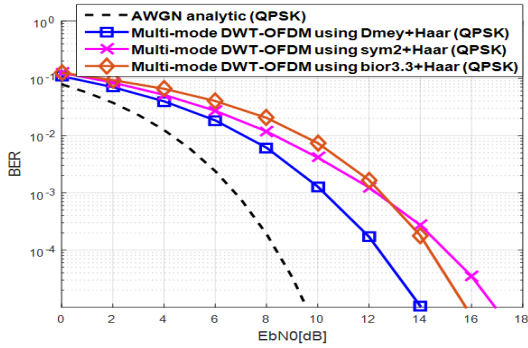


그림 9. Multi-mode DWT-OFDM 시스템의 BER 성능  
Fig. 9. BER performance of Multi-mode DWT-OFDM system.

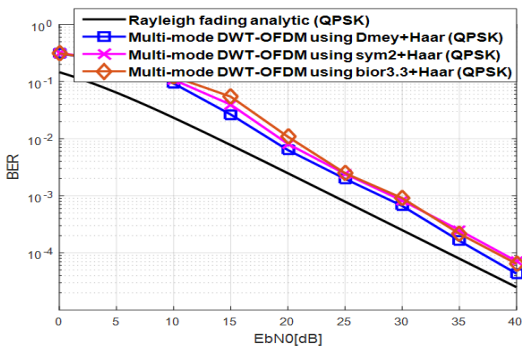


그림 10. Multi-mode DWT-OFDM 시스템의 레일리 페이딩 채널에서의 BER 성능  
Fig. 10. BER performance of Multi-mode DWT-OFDM system in Rayleigh fading channel.

채널에서 Discrete Meyer와 Haar 웨이블릿을 사용한 Multi-mode DWT-OFDM 시스템의 BER 성능이 가장 우수하였다. DWT-OFDM 시스템은 PAPR이 낮기 때문에 비선형 HPA를 통과하게 되는 신호의 왜곡의

표 3. 시뮬레이션 조건  
Table 3. Simulation conditions.

	Value
Modulation	Multi-mode DWT-OFDM (Dmey + Haar) OFDM
Encoder	Convolutional coding
Constraint length (CL)	7
Code rate for information bits	1/2
HPA model	Saleh model $\alpha_a = 1, \alpha_p = 0.06, \beta_a = 0.06, \beta_p = 0.01$
Channel	AWGN channel

정도를 줄인다. 이를 확인하기 위한 시뮬레이션 조건은 다음 표 3과 같다.

그림 11은 비선형 HPA 환경에서 두 시스템의 BER 성능을 비교한 것이다. SNR의 요구조건이 14dB인 경우 OFDM 시스템의 BER 성능은 약  $1.4 \times 10^{-4}$ 이고, Multi-mode DWT-OFDM 시스템의 BER 성능은 약  $1.5 \times 10^{-4}$ 으로 두 시스템이 거의 동일한 성능을 내는 것을 확인하였다. 그림 12는 OFDM 시스템과 Multi-mode DWT-OFDM 시스템의 송수신기에 부호화 및 복호화를 적용하여 두 시스템의 BER 성능을 비교하는 그림이다. 수신기에서 측정된 두 시스템의 BER 성능은  $10^{-5}$ 을 기준으로 거의 유사한 SNR 조건을 요구하게 된다.

표 4는 OFDM 시스템과 Multi-mode DWT-OFDM 시스템의 스펙트럼 효율을 비교한다. 컨볼루션 코딩을 적용하며 부호율 1/2을 갖기 때문에

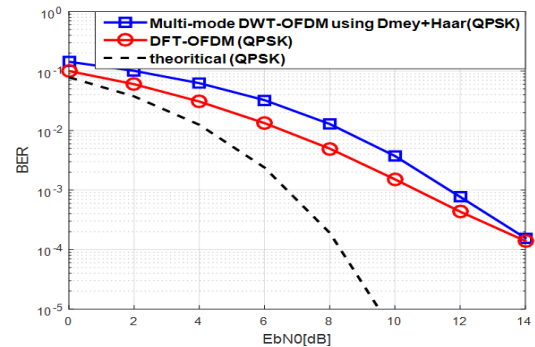


그림 11. 비선형 HPA 환경에서의 OFDM 시스템과 Multi-mode DWT-OFDM 시스템의 BER 성능 비교  
Fig. 11. Comparison of BER performance between OFDM system and Multi-mode DWT-OFDM system in nonlinear HPA environment.

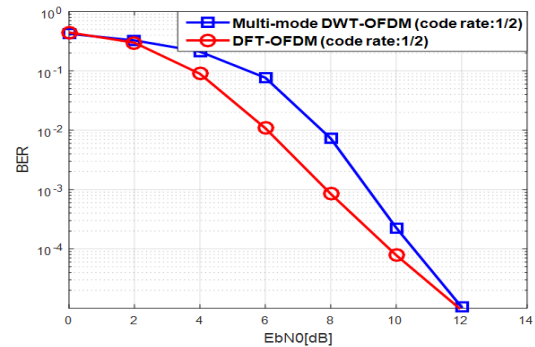


그림 12. 컨볼루션 코딩을 적용한 두 시스템의 비선형 HPA 환경에서의 BER 성능 비교  
Fig. 12. Comparison of BER performance in nonlinear HPA environment of each systems with convolutional coding.

표 4. OFDM 시스템과 Multi-mode DWT-OFDM 시스템의 스펙트럼 효율 비교  
 Table 4. Spectral efficiency comparison of OFDM system and Multi-mode DWT-OFDM system.

	OFDM	Multi-mode DWT-OFDM
Symbol type	QPSK	QPSK
SNR (at BER= $10^{-5}$ )	11.9 dB	12 dB
Code rate	1/2	1/2
Number of subcarriers	128	128
Transmitted bits	$256 \text{ bits} \times 1/2 = 128 \text{ bits}$	$256 \text{ bits} \times 1/2 = 128 \text{ bits}$ + 29 bits (index) Total = 157 bits
Spectral efficiency	$1 \text{ bits/s/Hz}$	$1.2266 \text{ bits/s/Hz}$

정보 비트 수가 절반으로 줄어  $1 \text{ bits/s/Hz}$ 의 스펙트럼 효율을 갖는다. 반면에 Multi-mode DWT-OFDM 시스템은 인덱스 비트는 그대로 보내지기 때문에 스펙트럼 효율이 향상된다. 따라서 스펙트럼 효율을 비교하면 Multi-mode DWT-OFDM 시스템이 약 22%의 스펙트럼 효율 향상 효과를 얻는 것을 확인할 수 있다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 Multi-mode DWT-OFDM 시스템과 1/2 부호율을 갖는 컨볼루션 코딩을 적용한 Multi-mode DWT-OFDM 시스템을 HPA 비선형 환경에서 성능 평가했다. 여러 웨이블릿을 사용하는 Multi-mode DWT-OFDM 시스템은 심볼을 매핑하는 정보 비트 외에 웨이블릿 함수를 인덱싱하는 인덱스 비트를 추가적으로 보낸다. 이는 약 11%의 스펙트럼 효율 향상 효과를 준다. 비선형 HPA 환경에서 Multi-mode DWT-OFDM 시스템은 SNR 요구조건이 14dB인 경우 DFT-OFDM 시스템과 BER 성능이 약  $1.5 \times 10^{-4}$ 으로 거의 동일한 성능을 나타냈다. 또한, 1/2 부호율을 갖는 컨볼루션 코딩을 적용한 Multi-mode DWT-OFDM 시스템과 기존 OFDM 시스템의 BER 성능은  $10^{-5}$ 을 기준으로 거의 유사한 SNR 조건을 요구했으며, 약 22%의 스펙트럼 효율이 향상했다. 따라서 Multi-mode DWT-OFDM 시스템은 비선형 HPA 환경에서 기존의 OFDM 시스템과 유사한 BER 성능을 갖고, 컨볼루션 코딩을 적용하면 기

존의 시스템보다 더 높은 스펙트럼 효율을 갖는 시스템을 확인하였다.

#### 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] 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, 2012.
- [3] 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.
- [4] E. Başar, et al., "Orthogonal frequency division multiplexing with index modulation," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 61, no. 22, pp. 5546-5549, 2013.
- [5] T. Mao, et al., "Dual-mode index modulation aided OFDM," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 50-60, 2017.
- [6] J. Lee and H.-G. Ryu, "Design and performance evaluation of multi-mode OFDM system using wavelet transform," *J. KICS*, vol. 44, no. 5, pp. 806-813, 2019.
- [7] J. Lee and H.-G. Ryu, "Performance comparison of OFDM based on fourier transform and wavelet OFDM based on wavelet transform," *J. KIEES*, vol. 29 no. 3, pp. 184-191, 2018.

김 다 영 (Dayoung Kim)



2018년 2월 : 충북대학교 전자  
공학과 졸업  
2018년 3월~현재 : 충북대학교  
전자공학과 석사과정  
<관심분야> 무선통신시스템,  
차세대 통신시스템

유 흥 균 (Heung-Gyoon Ryu)



1988년~현재 : 충북대학교 전자  
공학과 교수  
2002년 3월~2004년 2월 : 충북  
대학교 컴퓨터정보통신연구  
소 소장  
<관심분야> 무선통신시스템,  
B5G/6G 이동통신, 위성통  
신, 통신회로 설계 및 통신 신호 처리

이 준 구 (Jungu Lee)



2017년 2월 : 충북대학교 전자  
공학과 졸업  
2017년 3월~현재 : 충북대학교  
전자공학과 석사과정  
<관심분야> 무선통신시스템,  
차세대 통신시스템