

웨이블릿패킷변환 방식의 다중반송파 통신시스템의 설계와 스펙트럼 특성

김 다 영*, 안 창 영*, 유 흥 균^o

Design and Spectrum Characteristics Multicarrier Communication System Based on Wavelet Packet Transform

Dayoung Kim*, Changyoung An*, Heung-Gyoon Ryu^o

요 약

본 논문에서는 웨이블릿패킷 변환을 기반으로 하는 DWPT(Discrete Wavelet Packet Transform)-OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 시스템을 설계하고, 스펙트럼 특성을 확인한다. DWPT-OFDM 시스템은 기존의 OFDM 시스템과 다르게 FFT(Fast Fourier Transform) 연산이 아닌 DWPT 연산을 사용한다. 웨이블릿 패킷의 기반이 되는 웨이블릿 변환에는 여러 웨이블릿 모함수가 사용되기 때문에 푸리에 변환과는 다른 특징을 갖는다. 본 연구는 시뮬레이션 결과를 통해 DWPT-OFDM 시스템의 스펙트럼과 OOB(Out of Band) 특성을 확인하였다. DWPT-OFDM 시스템은 OFDM 시스템과 같이 Null data를 넣음으로써 주파수 할당을 세부적으로 할 수 있다. 이는 기존의 웨이블릿 변환을 사용하는 DWT(Discrete Wavelet Transform) -OFDM 시스템에 없었던 특징으로, DWPT-OFDM 시스템은 Null data를 넣음으로써 발생하는 빈 협대역 주파수 스펙트럼 자원을 NB(Narrow Band)-IoT(Internet of Things)와 같은 협대역 주파수 스펙트럼을 필요로 하는 시스템이나 센서와 공존하며 사용할 수 있는 장점이 있는 시스템을 확인하였다.

Key Words : OFDM, DWPT-OFDM, Spectrum, OOB, B5G

ABSTRACT

In this paper, we designed DWPT(Discrete Wavelet Packet Transform)-OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) and confirmed spectral characteristics. Unlike the conventional OFDM system, the DWPT-OFDM system uses the DWPT instead of FFT (Fast Fourier Transform). The wavelet transform, which is the basis of the wavelet packet, has a feature different from the Fourier transform since several wavelet set numbers are used. This study confirms the spectrum and OOB (Out of Band) characteristics of the DWPT-OFDM system through simulation results. The DWPT-OFDM system, like the OFDM system, can provide the details of the frequency assignment by entering null data. This is a feature that DWT (Discrete Wavelet Transform) -OFDM systems using existing wavelet transform does not have. The DWPT-OFDM system can use the narrow narrowband frequency spectrum resource generated by null data by coexisting with a system or sensor that requires narrowband frequency spectrum such as NB (Narrow Band) -IoT (Internet of Things).

※ 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
- 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 : 201908-146-A-RN, Received August 2, 2019; Revised September 4, 2019; Accepted September 5, 2019

I. 서론

최근 5G(5th Generation)와 B5G(Beyond 5G) 이 동통신 연구가 활발히 진행되고 있다^[1]. 5G 이동통신의 NSA(Non-Standalone) 물리계층 표준 변조 기술로 채택된 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 시스템은 이미 4G(4th Generation) 이동통신 방식의 핵심 기술로 사용되고 있다. 모바일 기기의 대부분이 무선통신 기술을 사용하게 되면서 스펙트럼 자원은 포화 상태에 가까워졌다. 이러한 이유로 최근 스펙트럼 효율을 높이기 위한 기술들의 여러 가지 연구가 진행되고 있다. OFDM 시스템은 높은 PAPR(Peak-to-Average Power Ratio) 등 여러 가지 단점이 있다. 이러한 단점을 개선하는 효율적인 시스템을 위한 연구 중, 웨이블릿 변환을 사용한 다중반송파 시스템에 대한 연구가 진행되고 있다^[2,3].

DWT(Discrete Wavelet Transform)-OFDM 시스템은 낮은 PAPR 특성을 갖는 장점을 가진 시스템이다^[3]. 기존의 OFDM 시스템의 단점을 개선하는 전력 효율적인 다중반송파 시스템으로 알려져 있다. 웨이블릿 기저함수를 사용하여 신호를 표현하는데 좀 더 유연한 장점이 있는 웨이블릿 변환은 송신신호의 특성을 개선시킬 수 있는 중요한 요인이 된다. 그러나 DWT-OFDM 시스템은 DWT 연산시 LPF(Low Pass Filter)와 HPF(High Pass Filter)를 한 블록으로 처리하기 때문에 기존 OFDM 시스템처럼 세부적인 주파수 할당이 불가능한 단점을 가진다.

DWPT(Discrete Wavelet Packet Transform)-OFDM 시스템은 Tree 구조로 Packet을 만들어 DWT 연산을 진행한다^[4]. DWPT-OFDM 시스템은 각 부채널에 일정 대역폭을 가지는 웨이블릿 패킷을 사용하여 다중경로 왜곡에 강하고, 비선형 왜곡에 강한 특성을 갖는다^[4]. 또한, 주파수 영역에서 기저파형으로 유연하게 설계할 수 있다. 또한, 데이터 송신시 Null data를 넣음으로써 주파수 할당을 세부적으로 할 수 있는 장점을 갖는다.

본 논문은 I 장의 서론에 이어 II장에서 OFDM 시스템과 DWPT-OFDM 시스템에 대하여 설명한다. 이어서 III장에서는 MATLAB 시뮬레이션을 통해 Discrete Meyer 웨이블릿 함수와 Symlets 15 웨이블릿 함수를 기저함수로 한 DWPT-OFDM 시스템과 OFDM 시스템의 스펙트럼 결과를 비교 및 분석한다. 또한, Null data를 데이터 심볼 여러 곳에 배치하며 그에 따른 스펙트럼 특성을 확인한다. 마지막으로 IV장에서는 시뮬레이션 결과를 토대로 결론을 도출한다.

II. 시스템 모델

2.1 OFDM

OFDM 시스템은 여러 개의 부반송파를 이용하여 심볼을 전송한다^[5]. 여러 개의 병렬 데이터 스트림으로 데이터를 전송하기 위하여 직교 부반송파 신호를 사용한다. 그림 1은 OFDM 시스템의 구성도를 간략히 표현한 것이다. 송신기에서는 데이터를 직렬에서 병렬로 변환한 후에 심볼을 IFFT(Inverse Fast Fourier Transform) 연산을 한다. 이 연산으로 시간영역의 신호로 바뀌면 뒤, 채널 통과 후 수신기에서는 FFT(Fast Fourier Transform) 연산을 진행하고, 송신기에서의 과정을 역으로 진행한다. 채널을 통과하면서 간섭을 방지하기 위한 방법으로 OFDM 시스템 송신기에서 데이터의 뒷부분을 앞부분에 복사하여 붙이는 CP(Cyclic Prefix)로 심볼 간 간섭을 방지한다.

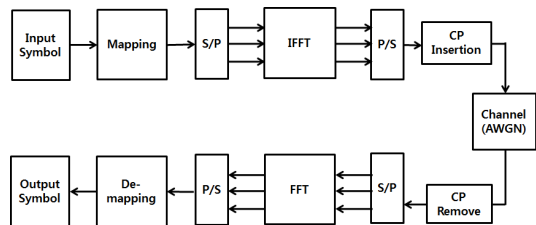


그림 1. OFDM 시스템 구성도
Fig. 1. Block diagram of OFDM system.

2.2 DWPT-OFDM

그림 2는 기존의 푸리에 변환을 기반으로 하는 OFDM 시스템이 아닌, 웨이블릿 패킷 변환을 기반으로 하는 DWPT-OFDM 시스템의 송신기를 설명하는 그림이다. 그림에서 확인할 수 있듯, 기존의 OFDM 시스템과 거의 동일하지만 IFFT(Inverse Fast Fourier Transform) 대신에 IDWPT(Inverse Discrete Wavelet Packet Transform) 연산을 사용하는 차이점을 갖는다.

그림 3은 송신기에서의 IDWT 연산을 설명하는 그

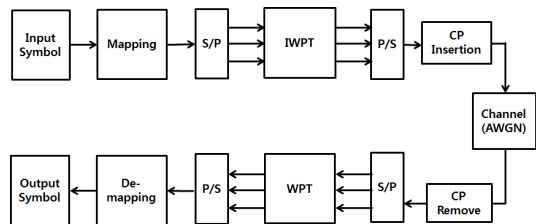


그림 2. DWPT-OFDM 시스템 구성도
Fig. 2. Block diagram of DWPT-OFDM system.

림이다. 기존의 IDWT 연산은 전송하고자 하는 데이터의 시간 샘플 길이와 동일한 길이의 zero padding이 더해져 원래 보내려던 신호보다 두 배의 시간샘플을 갖게 되는 심볼이 만들어진다^[2]. $h(n)$ 은 HPF(High Pass Filter)로 웨이블릿 함수이며, $g(n)$ 은 LPF(Low Pass Filter)로 스케일링 함수이다. IDWT 연산을 하면 $h(n)$ 에 Null data가, $g(n)$ 에는 data가 입력된다^[6].

그림 4는 송신기에서의 IDWPT 연산을 약식으로 설명하는 그림이다. 기존의 웨이블릿 연산을 사용하는 IDWT 연산과 다르게 HPF에 데이터가 입력되는 차이점을 갖는다. 하나의 데이터 심볼이 HPF와 LPF로 처리되는 IDWT와 달리, IDWPT 연산은 순차적으로 데이터 심볼이 두 심볼씩 묶여 IDWT 연산된다.

그림 5는 8개의 데이터 스트림이 입력될 때를 가정한 IDWPT 연산의 전체 심볼 구성이다. IDWPT의 Packet stage는 $\log_2 8$ 로 3개의 Stage를 갖는다. 그림

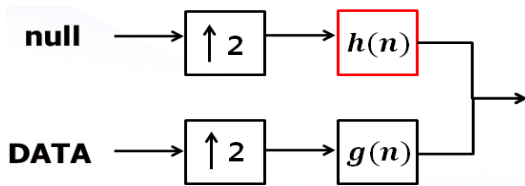


그림 3. IDWT 연산의 심볼 구성
Fig. 3. Symbol configuration of IDWT operation.

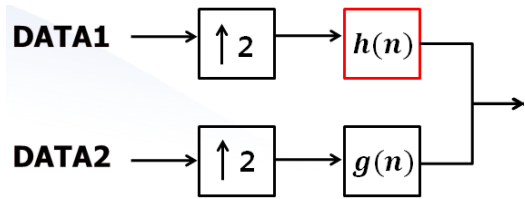


그림 4. IDWPT 연산의 심볼 구성
Fig. 4. Symbol configuration of IDWPT operation.

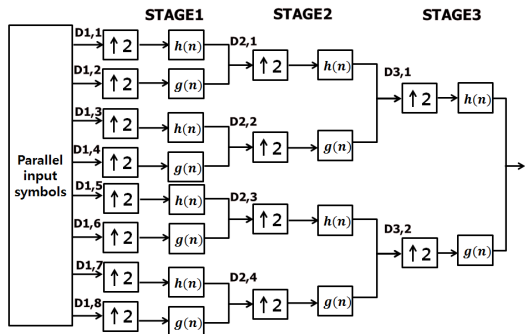


그림 5. IDWPT 연산의 전체 심볼 구성
Fig. 5. Full symbol configuration of IDWPT operation.

5와 같이 stage 1에 입력된 데이터 심볼은 순차적으로 두 데이터 심볼이 묶여 IDWT 연산을 진행한다. 이렇게 만들어진 네 개의 데이터 심볼은 Stage 2에서 두 데이터 심볼이 두 번의 IDWT 연산을 하게 되고 이는 Stage 3에서 한 번의 IDWT 연산으로 송신 단에서 IDWPT 연산이 끝나게 된다. 수신 단에서 DWPT 연산은 이와 반대로 연산하게 된다.

III. 시뮬레이션 결과 및 분석

본 논문에서는 MATLAB 프로그램을 사용하여 OFDM과 DWPT-OFDM 시스템을 설계하고 스펙트럼 특성을 확인하였다. 시뮬레이션은 기존의 OFDM과 DWPT-OFDM 두 시스템을 동일 조건에서 진행하였다. BPSK 변조를 사용했으며, 전체 FFT size 128 중 Null data 64, 사용하는 subcarrier 64를 시뮬레이션 조건으로 진행하였다. 전체 데이터 심볼이 128이 입력되기 때문에 IDWPT 연산에 사용된 Stage는 $\log_2 128$ 로 7단의 Stage로 연산되었다. 사용한 웨이블릿 함수는 Discrete Meyer와 Symlets 15이다. 사용하는 부반송파의 개수를 128개로 일치시킨다. 이렇게 두 가지의 웨이블릿 함수를 data 64와 Null data 64, Null data 64와 data 64, data 32와 Null data 64 data 32의 조합 등의 네 가지 형태로 나누어 시스템의 성능을 평가하였다.

그림 6은 시뮬레이션에 사용한 기저함수인 Discrete Meyer의 웨이블릿 함수와 스케일링 함수이다. 또한, 그림 7은 Symlets 15의 웨이블릿 함수와 스케일링 함수이다. 시뮬레이션은 Discrete Meyer와 Symlets 15 두 웨이블릿 함수로 세 가지 데이터 심볼 배치에서 IDWPT 연산을 진행하였다.

표 1. 시뮬레이션 조건
Table 1. Simulation conditions.

	Value
Symbol type	BPSK
Modulation	OFDM, DWPT-OFDM
FFT size	128
Null data	64
Number of subcarrier	64
Packet stage	\log_2^{128}
Wavelet function	Discrete Meyer Symlets 15
Channel	AWGN channel

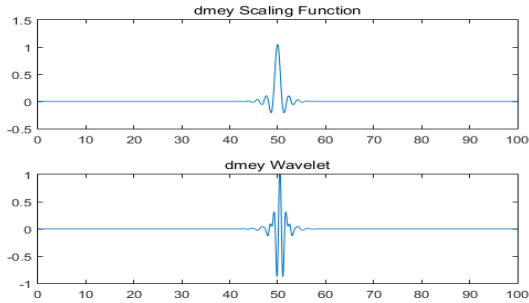


그림 6. Discrete Meyer의 웨이블릿 함수와 스케일링 함수
Fig. 6. Wavelet function and scaling function of Discrete Meyer.

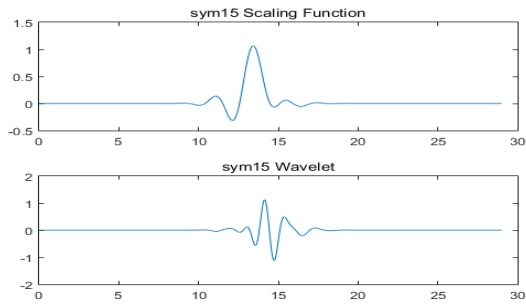


그림 7. Symlets 15의 웨이블릿 함수와 스케일링 함수
Fig. 7. Wavelet function and scaling function of Symlets 15.

그림 8의 데이터 심볼은 Data 64와 Null data 64로 배치한 심볼이다. 웨이블릿 패킷을 사용한 시스템과 기존의 OFDM 시스템의 시뮬레이션에 사용된 데이터는 64개로 동일하다. 기존의 OFDM 시스템과 사용한 데이터가 같기 때문에 동등한 주파수 효율 조건에서 시뮬레이션을 진행하였다. 그림 9는 그림 8의 데이터 심볼 조건에서 Discrete Meyer 웨이블릿 함수를 사용한 스펙트럼이다. 웨이블릿 패킷 시스템과 기존의 OFDM 시스템의 OOB 전력은 유사하나 스펙트럼 스퀘어 특성인 약간 나쁜 특성을 나타낸다.

그림 10은 그림 8의 데이터 심볼 조건에서 Symlets 15 웨이블릿 함수를 사용한 스펙트럼이다. 기존의 OFDM 시스템의 스펙트럼과 비교했을 때, OOB 전력이 좀 더 낮아지는 경향을 보인다. 이는 웨이블릿 연산이 HPF와 LPF로 필터링을 여러 번 하게 되므로

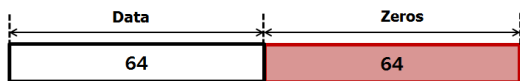


그림 8. Data 64와 Null data 64를 배치한 데이터 심볼
Fig. 8. Data symbol with Data 64 and Null data 64.

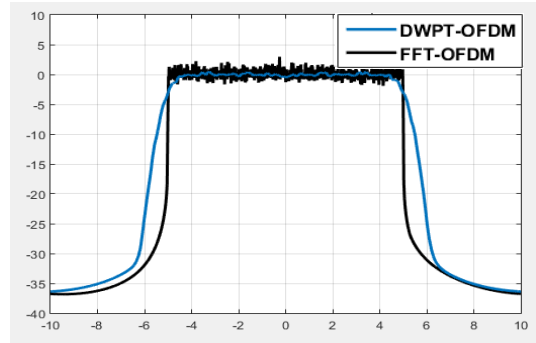


그림 9. 그림 8의 조건에서 Discrete Meyer 웨이블릿 함수를 사용한 스펙트럼
Fig. 9. Spectrum using Discrete Meyer wavelet function under the condition of Fig. 8.

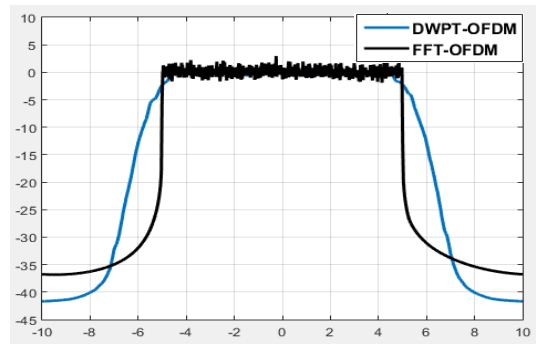


그림 10. 그림 8의 조건에서 Symlets 15 웨이블릿 함수를 사용한 스펙트럼
Fig. 10. Spectrum using Symlets 15 wavelet function under the condition of Fig. 8.

OOB 전력이 Discrete Meyer 웨이블릿 함수를 사용했을 때보다 낮아지는 것으로 볼 수 있다.

그림 11은 그림 8의 Null data 심볼을 반대로 배치했을 때의 조건이다. 그림 12와 13은 그림 11의 데이터 심볼 배치 조건에서 도출된 스펙트럼이다. 그림 12와 13에서 보듯 Null data 위치에 따라 IDWPT-OFDM 시스템의 스펙트럼은 자유롭게 주파수 할당이 가능한 것을 확인하였다.

그림 14는 Null data 16과 Data 16을 반복하여 배치한 심볼이다. 이는 Null data의 위치에 따라 웨이블릿 패킷의 스펙트럼의 변화를 확인하기 위한 데이터 배치이다.

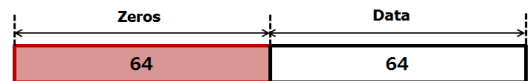


그림 11. Null data 64와 Data 64를 배치한 데이터 심볼
Fig. 11. Data symbol with Null data 64 and Data 64.

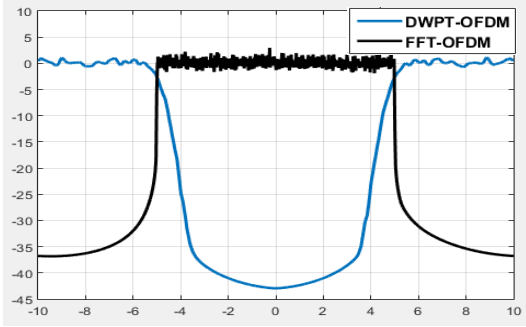


그림 12. 그림 11의 조건에서 Discrete Meyer 웨이블릿 함수를 사용한 스펙트럼
Fig. 12. Spectrum using Discrete Meyer wavelet function under the condition of Fig. 11.

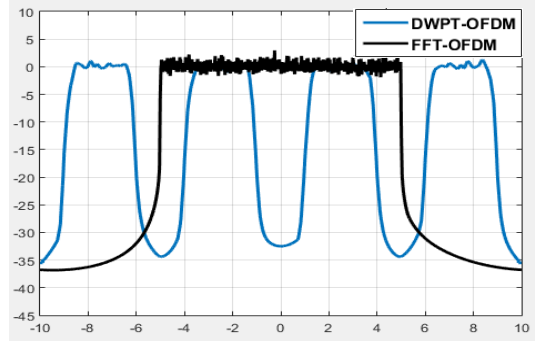


그림 15. 그림 14의 조건에서 Discrete Meyer 웨이블릿 함수를 사용한 스펙트럼
Fig. 15. Spectrum using Discrete Meyer wavelet function under the condition of Fig. 14.

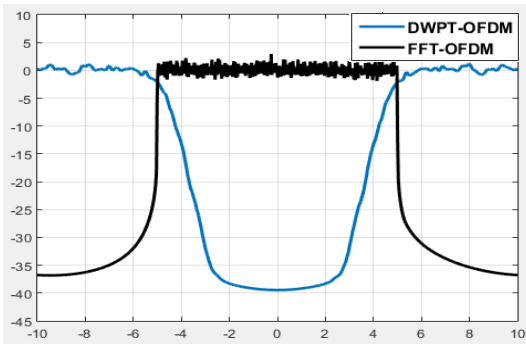


그림 13. 그림 11의 조건에서 Symlets 15 웨이블릿 함수를 사용한 스펙트럼
Fig. 13. Spectrum using Symlets 15 wavelet function under the condition of Fig. 11.

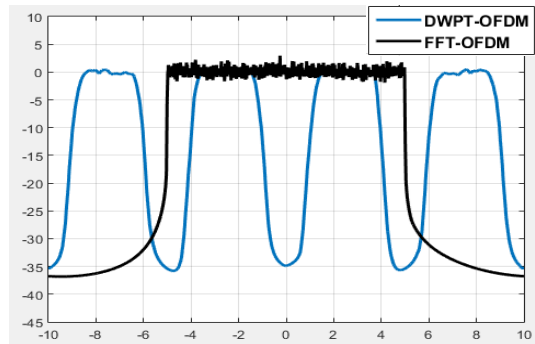


그림 16. 그림 14의 조건에서 Symlets 15 웨이블릿 함수를 사용한 스펙트럼
Fig. 16. Spectrum using Symlets 15 wavelet function under the condition of Fig. 14.

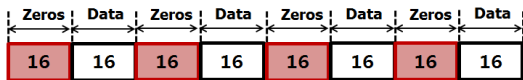


그림 14. Null data 16과 Data 16을 반복하여 배치한 심볼
Fig. 14. Data symbols arranged repeatedly with data 16 and data 16.

그림 15와 16은 그림 14의 주파수 할당 조건에서 Discrete Meyer와 Symlets 15 웨이블릿 함수를 사용한 스펙트럼이다. 두 웨이블릿 함수 모두 네 갈래로 스펙트럼이 나뉜 것을 볼 수 있다.

이처럼 DWPT-OFDM 시스템은 Null data와 Data의 위치에 따라 유연한 주파수 할당이 가능한 시스템임을 알 수 있다. NB-IoT의 대역폭은 180kHz가 최소 단위이다. 따라서 빈 주파수 대역에 NB-IoT 같은 협대역 주파수 대역을 필요로 하는 시스템 또는 센서와 공존하며 사용할 수 있음을 알 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 웨이블릿패킷 변환을 기반으로 하는 DWPT-OFDM 시스템을 설계하고 스펙트럼 특성을 확인하였다. 동일한 데이터양을 조건으로 시뮬레이션 한 결과, Discrete Meyer와 Symlets 15 웨이블릿 함수를 사용한 DWPT-OFDM 시스템의 OOB 전력은 기존 OFDM 시스템과 유사하나, 스펙트럼 스커트 특성은 약간 나쁜 특성을 나타냈다. 그러나 DWPT-OFDM 시스템은 기존의 웨이블릿 변환을 사용하는 DWT-OFDM 시스템과 다르게 Null data를 넣음으로써 주파수 할당을 세부적으로 할 수 있다. 따라서 DWPT-OFDM 시스템은 기존의 OFDM 시스템 보다 복잡도는 높으나, Null data를 넣음으로써 발생하는 빈 협대역 주파수 스펙트럼 자원을 NB-IoT와 같이 협대역 주파수 스펙트럼을 필요로 하는 시스템이나 센서와 공존하며 사용할 수 있는 장점이 있는 시스템을 확인하였다.

References

- [1] S. Y. Lien, S. L. Shieh, Y. Huang, B. Su, Y. L. Hsu, and H. Y. Wei, "5G new radio: Waveform, frame structure, multiple access, and initial access," in *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, no. 6, pp. 64-71, 2017.
- [2] R. Asif, et al., "Performance comparison between DWT-OFDM and FFT-OFDM using time domain zero forcing equalization," *Int. Conf. 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, Apr. 2012.
- [4] A. Jamin and P. Mahonen, "Wavelet packet modulation for wireless communications," *Wireless Commun. & Mob. Computing J.*, vol. 5, no. 2, pp. 123-137, Mar. 2005.
- [5] X. Zhang, L. Chen, J. Qiu, and J. Abdoli, "On the waveform for 5G," in *IEEE Commun. Mag.*, vol. 54, no. 11, pp. 74-80, Nov. 2016.
- [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.

안 창 영 (Changyoung An)



2013년 2월 : 충북대학교 전자공학과 (공학사)
 2015년 2월 : 충북대학교 전자공학과 (공학석사)
 2019년 8월 : 충북대학교 전자공학과 (공학박사)
 <관심분야> 차세대 이동통신시스템, 무선통신시스템, 디지털 신호처리

유 흥 균 (Heung-Gyoon Ryu)



1988년~현재 : 충북대학교 전자공학과 교수
 2002년 3월~2004년 2월 : 충북대학교 컴퓨터정보통신연구소 소장
 <관심분야> 무선통신시스템, B5G/6G 이동통신, 위성통신, 통신회로 설계 및 통신 신호 처리

김 다 영 (Dayoung Kim)



2018년 2월 : 충북대학교 전자공학과 (공학사)
 2018년 3월~현재 : 충북대학교 전자공학과 석사과정
 <관심분야> 무선통신시스템, 차세대 통신시스템