

다중경로 채널에서 윈도우 길이에 따른 WR-OFDM 시스템의 성능평가

김 다 영*, 유 흥 균^o

Performance Evaluation of WR-OFDM System According to Window Length in Multipath Channel

Dayoung Kim*, Heung-Gyoon Ryu^o

요 약

5세대 이후 (B5G) 이동통신 시스템의 파형(waveform) 연구를 위하여, 윈도우 함수(window function)를 적용한 WR-OFDM (window restructuring orthogonal frequency division multiplexing) 시스템의 윈도우 길이에 따른 성능변화 현상에 대하여 분석한다. WR-OFDM은 기존 CP(cyclic prefix)-OFDM을 기반으로 하는 시스템이다. 즉, 기존 OFDM 시스템의 OOB(out-of-band) 전력을 낮추기 위해 송신단에서 윈도우 함수(window function)를 적용하고, 수신단에서 Restructuring 과정으로 정보를 다시 복원하는 시스템이다. 기존 윈도우 적용 방식에서 사용하는 시간 연장(extension)등의 시간 자원의 소모 없이, WR-OFDM 시스템은 OOB 저감 효과를 갖는다. 그러나 윈도우를 적용함으로써 인하여 다중경로 지연 신호로 인해 부분적으로 간섭이 발생한다. 본 연구에서는 WR-OFDM 시스템에서 윈도우 길이가 BER 성능에 어떤 영향을 끼치는지, 다중경로 지연 신호의 각 탭마다 시뮬레이션을 진행하여 윈도우 길이와 다중경로 지연에 따른 성능 변화에 대한 관계식을 도출하였으며, 다중경로 채널에서 윈도우 길이의 설정에 따라 OOB 전력의 저감과 BER 성능간의 상반관계(trade-off) 특성을 조절할 수 있음을 확인하였다.

Key Words : B5G, WR-OFDM, OOB suppression, BER, trade-off

ABSTRACT

For waveform studies of B5G (beyond 5th generation) mobile communication systems, we analyze performance change phenomenon with window length of WR-OFDM (window restructuring orthogonal frequency division multiplexing) system applying window function. WR-OFDM system is based on conventional CP-OFDM (OFDM using cyclic prefix) system. The proposed system is designed to reduce the wide gap with adjacent channel and improve the efficiency of use of spectrum resources. In other words, the WR-OFDM system applies window function at transmitter to reduce OOB (out-of-band) power of the conventional OFDM system, and restores information by restructuring process at receiver. Without additional time resources, like time extension using in conventional window method, the WR-OFDM system has OOB reduction effect. However, the WR-OFDM system causes partial interference by applying window function and multi-path delay signal in multi-path channel. In this study, we have confirmed how the window length affects BER performance in WR-OFDM system, and we have found interaction formula between window length and multi-path delay by conducting simulation with each tap of multi-path delay signal. We have also confirmed that we can regulate trade-off feature between OOB power reduction and BER performance according to setting of window length in multi-path channel.

* 이 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 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@cbu.ac.kr, 정회원

논문번호 : 201811-352-A-RN, Received October 31, 2018; Revised January 24, 2019; Accepted February 12, 2019

I. 서론

스마트 모바일 통신시대에 들어서면서 모바일 장치 및 멀티미디어 서비스가 증가하고 있다. 미래의 스마트 모바일 통신 시대에 본격적으로 대비하기 위해서는 저전력 통신 시스템 개발이 중요하다. 현재 4G 이동통신 방법인 LTE 시스템의 핵심 기술은 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 시스템이다. 이 시스템은 Multi-carrier를 사용해 고속통신이 가능하다. 그러나 OFDM 시스템은 높은 PAPR(Peak to Average Power Ratio)과 높은 OOB(Out-of-band) 전력의 단점을 갖는다. 따라서 미래에 요구되는 저전력 고품질 통신 시스템의 필요성으로 인하여, 차세대 5G 이동 통신에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다¹⁻⁸⁾

본 논문에서는 경쟁력 있는 OOB 스펙트럼 특성을 나타내는 WR(windowing and restructuring)-OFDM 시스템의 윈도우 길이에 따른 성능열화에 대하여 분석한다. 이 시스템은 기존의 OFDM 시스템과 유사하지만, CP(cyclic prefix) 추가 단계 이후에 윈도우 적용 과정이 있어야한다⁹⁾. 즉, WR-OFDM 시스템은 CP-OFDM 시스템과 같은 송신 심볼 길이를 가지며, OOB 전력은 매우 낮은 장점을 가진다. 윈도우 함수를 곱하고, Restructuring을 함으로써, FBMC 및 UFMC 시스템의 OOB 스펙트럼 특성을 갖게 되어 주파수 자원을 절약하는 경쟁적인 OOB (Out-of-Band) 스펙트럼 특성을 얻을 수 있다⁹⁾.

그러나 이러한 WR-OFDM 시스템에서는 다중경로 채널에서 윈도우 길이에 따라 BER 성능이 복원되지 않는 성능열화가 발생할 수 있다. 이러한 부분은 CP-OFDM 심볼이 윈도우에 의해 손상되기 때문에 발생하게 된다. 따라서 윈도우 길이에 따라 성능열화 정도가 변하게 된다. 윈도우 길이가 늘어나면 OOB 전력은 보다 효과적으로 저감되지만, BER 성능열화가 더욱 심해지는 Trade-off 특성을 갖는다. 즉, WR-OFDM 시스템은 다중경로 채널 환경에서 OOB 전력과 BER 성능과의 상반관계가 발생하게 되며, 이러한 부분을 분석하여 효과적인 윈도우 길이를 파악하는 것이 중요하다. 따라서 본 논문에서는 이와 같은 상반관계를 정량적으로 평가 및 분석하고 수식으로 도출한다.

II. WR-OFDM 시스템

2.1 WR-OFDM

그림 1은 WR(windowing and restructuring)-OFDM 시스템의 블록 다이어그램을 보여준다. 기본적으로 기존의 OFDM 시스템과 유사하지만, CP(cyclic prefix) 추가 단계 이후에 윈도우링 과정이 포함되고, Restructuring 과정이 이루어지는 것이 차이점이다. 윈도우링 과정은 주파수 자원을 절약하고 OOB(out-of-band) 전력이 감소하는 특성을 얻게 한다. 또한, 송신 단에서 윈도우를 적용하면서 손상된 데이터로 발생한 BER 성능 열화를 Restructuring 과정으로 복원한다⁴⁾.

그림 2는 WR-OFDM 시스템의 심볼 구조를 보여준다. W_L 은 윈도우 길이를 나타낸다. CP는 OFDM 심볼의 오른쪽 부분을 복사한 데이터이기 때문에 데이터의 오른쪽 부분과 동일하다. 따라서 WR-OFDM 시스템의 Restructuring 과정을 통해 CP의 손상되지 않은 오른쪽 부분은 데이터의 오른쪽 부분에 대체된다.

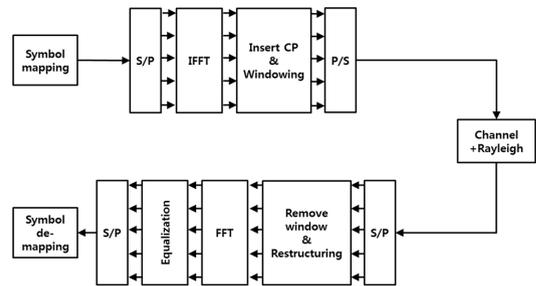


그림 1. WR-OFDM의 블록다이어그램
Fig. 1. Block diagram of WR-OFDM

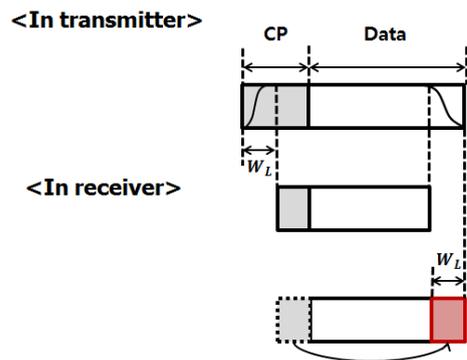


그림 2. WR-OFDM 시스템의 심볼 구조
Fig. 2. Symbol structure of WR-OFDM

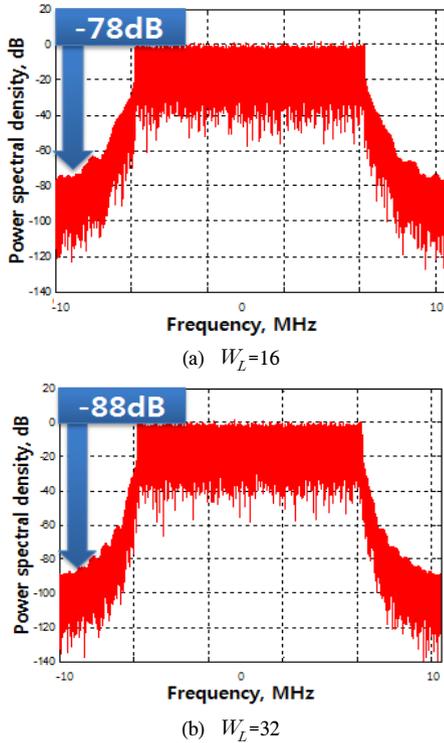


그림 3. 일반적인 윈도우 기술을 사용하는 OFDM의 스펙트럼 특성 (Hann 윈도우)
 Fig. 3. Spectrum characteristic of conventional OFDM with windowing technique (Hann window)

그림 3은 일반적인 윈도우를 사용하는 OFDM 시스템의 스펙트럼 특성을 나타낸다. 일반적으로 윈도우 길이가 늘어날수록 스펙트럼의 OOB 전력은 더욱 감소된다. 따라서 WR-OFDM 시스템에서도 윈도우의 길이를 늘릴 경우 스펙트럼의 OOB 전력이 더욱 감소되게 된다. 그러나 윈도우 길이가 증가할 경우 다중경로 채널에서 성능 열화가 심화될 수 있다.

III. WR-OFDM 시스템의 윈도우 길이에 따른 성능열화현상

그림 4는 수신 단에서 WR-OFDM의 복원방법을 나타낸다. CP의 길이는 32, W_L 은 8이다. Restructuring하는 CP의 오른쪽 부분은 데이터의 오른쪽 부분으로 복사된다. 이러한 WR-OFDM 시스템은 다중경로 지연 신호 간섭으로 인한 일부 데이터 손상을 복원시킬 수 있다.

그림 5는 WR-OFDM 시스템의 다중경로 지연 신호에 의한 간섭을 나타낸다. 예를 들어, 다중경로 채널에서

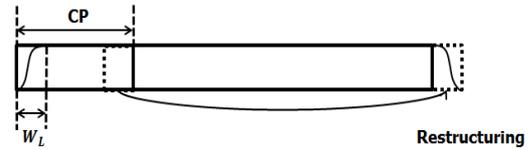


그림 4. 수신단에서 WR-OFDM 복원방법
 Fig. 4. WR-OFDM restructuring in receiver

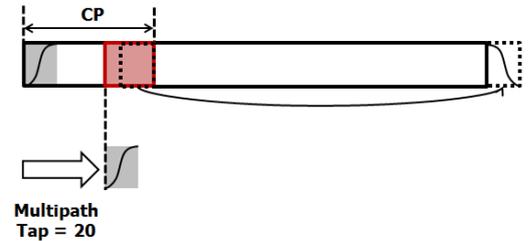


그림 5. 다중경로 지연 신호에 의한 간섭
 Fig. 5. Interference by multipath delay signal

널에서 CP의 길이가 32이고 윈도우 길이가 8일 때, Restructuring되는 오른쪽 부분의 8만큼을 제외한 CP의 24까지는 다중경로 지연 신호 간섭에 의한 성능 열화가 발생하지 않아야한다. 그러나 윈도우 길이가 8일 경우 다중경로 지연 신호 간섭에 의한 성능 열화가 CP의 20부터 발생할 수 있다. 이는 WR-OFDM 시스템에서 Restructuring 하기위해 복사되는 CP 부분이 윈도우 과정에 의해 손상되었기 때문이다. 이러한 현상은 윈도우 길이와 다중경로 지연이 길어질수록 심화될 수 있다. OOB 전력을 더욱 많이 저감시키기 위해서는 윈도우 길이를 증가시켜야 하는데^[7] 이렇게 될 경우 다중경로 채널에서 성능 열화가 심해질 수 있기 때문에 효과적인 윈도우 길이를 선택하는 것이 중요하다.

IV. 시뮬레이션 결과 및 분석

본 논문에서는 WR-OFDM 시스템에서 윈도우 길이에 따른 성능열화에 대하여 분석하였다. 시뮬레이션은 표 1과 같이 Rayleigh 다중경로 채널에서 시행하였다. 또한, 아래의 시뮬레이션 환경은 Wireless LAN 802.11a 64개 조건에서 파라미터를 확장시킨 128개 조건으로 진행하였다. 표 1은 WR-OFDM 시스템에서 윈도우 길이에 따른 성능열화를 확인하기 위한 시뮬레이션 파라미터이다.

그림 6과 7은 제로포싱 등화기를 적용한 WR-OFDM이 다중경로 지연신호 탭 20부터 성능열화가

발생한 것을 보인다.

표 1. 시뮬레이션 환경
Table 1. Simulation parameters.

Parameters	Value
Modulation	BPSK
FFT size	128
Number of subcarrier	104
CP length	32
Window function	Hann
Window length	8/8
Equalizer	Used
Channel	Rayleigh channel

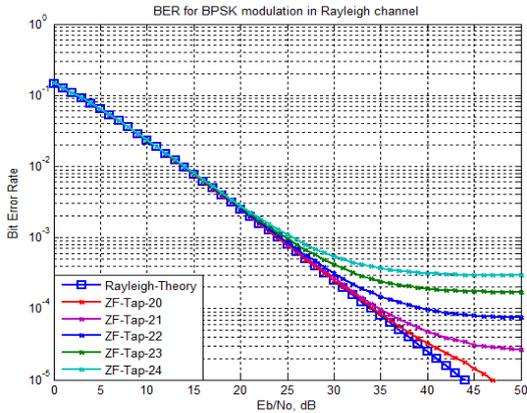


그림 6. 제로포싱 등화기를 적용한 WR-OFDM 시스템에서 다중경로 지연 신호에 따른 성능열화
Fig. 6. Performance degradation of WR-OFDM system with zero-forcing equalizer

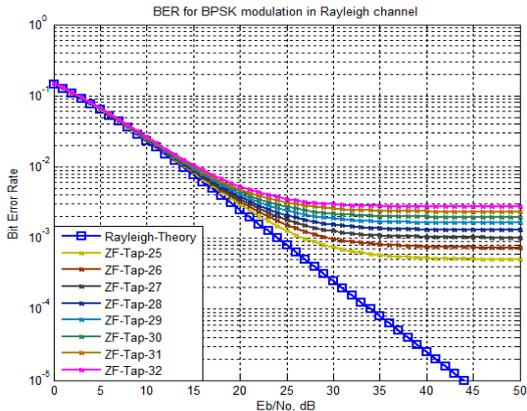


그림 7. 제로포싱 등화기를 적용한 WR-OFDM 시스템에서 다중경로 지연 신호에 따른 성능열화
Fig. 7. Performance degradation of WR-OFDM system with zero-forcing equalizer

그림 8은 제로포싱 등화기와 MMSE 등화기를 적용한 WR-OFDM의 BER 성능을 비교하기 위하여 다중경로 지연 신호 탭 각각 20, 26, 32로 시뮬레이션을 진행한 결과이다. MMSE 등화기를 적용한 WR-OFDM도 제로 포싱 등화기를 적용했을 때와 마찬가지로 탭 20부터 성능열화가 시작되었으며, 32일 때에 가장 심한 성능열화를 일으켰다.

그림 9는 MMSE 등화기를 적용한 WR-OFDM이 다중경로 지연신호 탭 20부터 성능열화가 발생한 것을 보인다. 제로포싱 등화기를 적용한 WR-OFDM과 마찬가지로 성능열화가 시작되는 지연신호 탭 20과 CP의 끝단인 32와 그 중간인 26을 넣어 시뮬레이션을 진행한 결과이다.

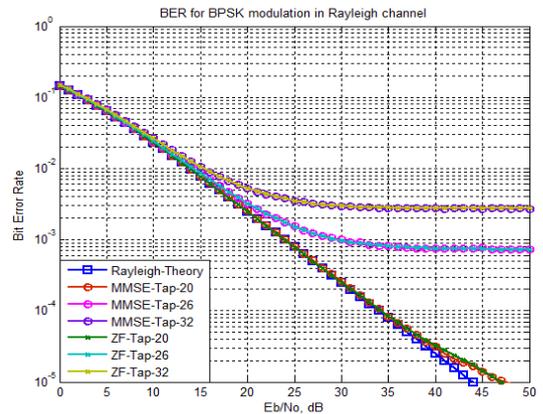


그림 8. 제로포싱과 MMSE 등화기를 적용한 WR-OFDM 시스템에서 다중경로 지연 신호에 따른 성능열화 비교
Fig. 8. Performance degradation of WR-OFDM system with zero-forcing and MMSE equalizer

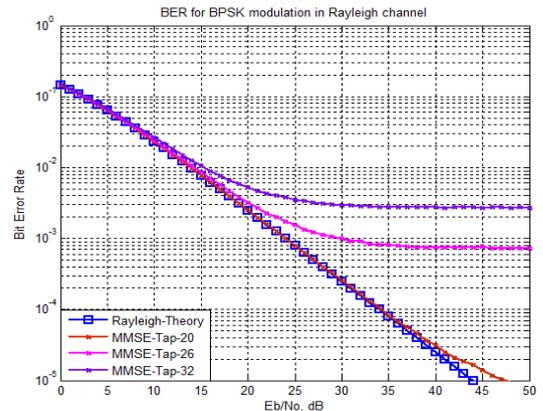


그림 9. MMSE 등화기를 적용한 WR-OFDM 시스템에서 다중경로 지연 신호에 따른 성능열화
Fig. 9. Performance degradation of WR-OFDM System with MMSE equalizer

표 2는 SNR이 40일 때 다중경로 채널에서 다중 경로 지연의 각 탭마다의 BER 성능과 이론상 BER 성능의 차이를 나타낸다. 이는 다중경로 지연 탭마다의 성능열화 정도를 의미한다. 또한, 다중경로 지연 탭이 늘어날수록 이론상 BER과의 차이가 늘어남을 알 수 있다.

표 2의 제로포싱 등화기를 적용한 WR-OFDM 시스템의 성능열화정도는 그림 10과 같이 이차함수로 나타난다. 이는 제로포싱 등화기를 적용한 WR-OFDM 시스템의 성능열화 정도가 다중경로 지연 탭에 따라 점점 증가했음을 알 수 있다.

그림 11은 MMSE 등화기도 제로포싱 등화기와 마찬가지로 다중경로 지연 탭에 따라 이차함수 곡선으

표 2. 다중경로 채널의 지연에 따른 WR-OFDM 시스템과 기존 OFDM 시스템 간 BER 성능 차이
Table 2. BER performance difference between WR-OFDM and conventional OFDM system according to delay of multipath channel.

	ZF ($\times 10^{-5}$)	MMSE ($\times 10^{-5}$)
Tap 20	0.745	0.62
Tap 21	2.212	-
Tap 22	7.368	-
Tap 23	16.77	-
Tap 24	28.86	-
Tap 25	50.08	-
Tap 26	73.37	71.65
Tap 27	101.7	-
Tap 28	129.3	-
Tap 29	163.1	-
Tap 30	196.2	-
Tap 31	234.6	-
Tap 32	274.3	274.3

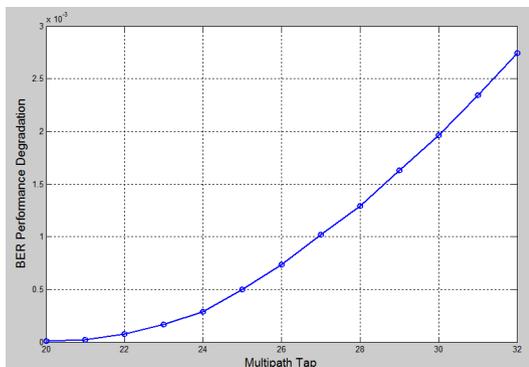


그림 10. SNR이 40일 때 제로포싱 등화기를 사용하는 WR-OFDM 시스템의 성능열화
Fig. 10. Performance degradation of WR-OFDM with ZF equalizer in SNR 40dB

로 성능열화가 증가했음을 알 수 있다.

표 3은 다중경로 지연 탭마다의 BER 성능이 이론상의 BER 성능과 1dB 성능 차이가 발생한 SNR을 지점을 나타낸다. 이는 다중경로 지연 탭이 증가할수록 BER 성능 열화지점이 더 앞쪽에서 발생하는 것을 알 수 있다. 다중경로 지연 탭이 20일 때에는 제로포싱 등화기를 적용한 WR-OFDM 시스템은 이론상 BER 성능과 비교했을 때 SNR 39dB에서 1dB 성능 열화가 일어났다. 그러나 다중경로 지연 탭이 32일 때에는 동일한 등화기를 적용한 WR-OFDM 시스템에서 SNR 10dB인 지점에서부터 이미 1dB 성능열화가

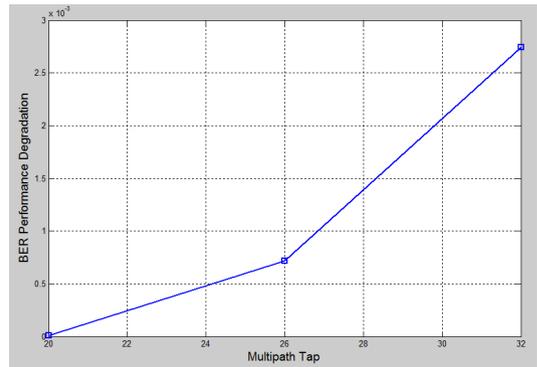


그림 11. SNR이 40일 때 MMSE 등화기를 사용하는 WR-OFDM 시스템의 성능열화
Fig. 11. Performance degradation of WR-OFDM with MMSE equalizer in SNR 40dB

표 3. 다중경로 환경에서 WR-OFDM 시스템의 성능 열화가 시작되는 SNR condition
Table 3. SNR condition at which performance degradation of WR-OFDM system begins in multipath channel.

	ZF(dB)	MMSE(dB)
Tap 20	39	40
Tap 21	35	-
Tap 22	29	-
Tap 23	26	-
Tap 24	22	-
Tap 25	20	-
Tap 26	19	19
Tap 27	17	-
Tap 28	16	-
Tap 29	14	-
Tap 30	12	-
Tap 31	11	-
Tap 32	10	12

일어났다. 이는 다중경로 지연 탭이 증가함에 따라 성능열화가 더 낮은 SNR에서 발생하며, Restructuring을 함에도 불구하고 성능을 완전히 복원시키지 못함을 알 수 있다.

시뮬레이션 결과를 통해, W_L 의 윈도우 길이를 사용하는 WR-OFDM 시스템이 큰 성능열화 없이 최대한으로 견딜 수 있는 다중경로 지연을 수식으로 도출하면 식 (1)과 같다.

$$T_{delay} = (CP_L - 2W_L) + 0.4 \times W_L \quad (1)$$

CP_L 은 CP의 길이를, W_L 은 시스템에 적용한 양쪽 윈도우의 각 길이를 뜻한다. 성능열화는 송신단에서 적용한 윈도우 함수로 손상된 데이터가 Rayleigh 다중경로 채널을 통과하며 그림 5와 같이 밀리면서 수신되면서 발생한다. 이때, 윈도우 길이가 길어질수록 송신단에서 손상된 데이터도 늘어나며, BER 성능열화 정도 또한 증가한다. 그림 5는 Restructuring을 위해 복사하는 심볼 부분이 윈도우를 적용한 데이터가 다중경로 채널을 통과하며 손상된 것을 보이는 그림이다. 이는 T_{delay} 는 W_L 에 따라 결정되는 것을 나타낸다. 본 논문에서 수행한 시뮬레이션에 따르면 CP의 길이가 32이고, 윈도우 길이가 8인 조건에서 Rayleigh 다중경로 탭 20부터 성능열화가 발생하였다.

성능열화는 CP의 $\frac{20}{32}$ 지점부터 발생한 것을 알 수 있으며, 이는 식 (1)로 표현 할 수 있다. 식 (1)을 통하여 도출해낸 성능열화 구간과 그림 6 및 그림 7의 시뮬레이션 결과를 통해 도출한 성능열화 구간이 같음을 확인할 수 있다.

결과적으로 현재 채널상황에서 WR-OFDM 시스템이 견딜 수 있는 최대 다중경로 지연을 파악할 수 있으며, 성능열화 없이 OOB 전력을 효과적으로 저감시킬 수 있는 윈도우 길이를 결정할 수 있다. 즉, 식 (1)을 통해 OOB 전력과 BER 성능간의 Trade-off 특성을 조절하는 효율적인 윈도우 길이의 결정이 가능하다.

V. 결 론

윈도우 과정을 적용하면 더 나은 OOB 스펙트럼 특성을 얻을 수 있다. 따라서 WR-OFDM 시스템으로 BER 성능 복원과 주파수 자원을 절약하는 장점을 얻을 수 있다. 그러나 WR-OFDM 시스템은 다중경로

채널에서 윈도우의 길이에 따라 성능열화가 발생한다. 시뮬레이션 결과, 윈도우 길이가 8이고 CP의 길이가 32일 때에 다중경로 지연 탭 20부터 성능열화가 일어났다. 다중경로 지연이 강할수록, BER 성능열화가 심화되었다. 이는 WR-OFDM 시스템은 윈도우 길이에 따라 성능열화가 일어나는 것을 말한다. 성능열화는 다중경로 지연 탭이 커질수록 더 낮은 SNR에서 발생했다. 또한, 같은 SNR을 기준으로 다중경로 지연 탭을 비교했을 때에 성능열화가 이차함수 곡선으로 증가했다. 이론상 WR-OFDM 시스템에서 CP의 오른쪽에서 데이터의 오른쪽으로 복사하는 부분을 뺀 24까지 BER 성능복원이 되어야한다. 하지만 성능열화는 윈도우 적용으로 손상된 데이터가 다중경로 지연으로 인한 간섭도 더해져 다중경로 지연보다 더 길게 영향을 미친다. 이러한 이유로 WR-OFDM 시스템에서 CP의 20부터 성능열화가 일어난다. 결과적으로 WR-OFDM 시스템은 다중경로 채널에서 다중경로 지연 탭에 따라 BER 성능열화가 나타나는 것을 확인했다. 본 논문에서는, 이러한 시뮬레이션 결과를 전체적으로 정리하여 다중경로 채널에서 WR-OFDM 시스템이 견딜 수 있는 최대한의 다중경로 지연 길이를 계산할 수 있는 수식을 도출하였다. 또한, 이 수식을 이용하여 다중경로 채널에서 윈도우 길이의 조절을 통해 OOB 전력 저감과 BER 성능간의 Trade-off 특성을 조절할 수 있다. 추가적으로, 다중경로 채널에서의 지연이 CP길이와 가깝게 일어나는 상황에서 발생하는 성능 열화는 복원하기 어렵다. 이러한 부분은 향후 수신부의 추가적인 신호처리 연구를 통해 극복되어야 할 필요가 있다.

References

- [1] M. Sahidullah and G. Saha, "A novel windowing technique for efficient computation of MFCC for speaker recognition," *IEEE Signal Process. Lett.*, vol. 20, no. 2, pp. 149-152, Feb. 2013.
- [2] X. Cheng, et al., "A filtered OFDM using fir filter based on window function method," *2016 IEEE VTC Spring*, pp. 1-5, Nanjing, China, 2016.
- [3] C. An and H.-G. Ryu, "Design and performance evaluation of cpp-ofdm (cyclic prefix and postfix) system for spectral efficiency improvement," *J. KICS*, vol. 42, no.

- 12, pp. 2255-2262, 2017.
- [4] C. An, B. Kim, and H. Ryu, "Design and evaluation of spectrum efficient WR-OFDM system for 5G and B5G mobile system," *2017 IEEE COMCAS*, pp. 1-5, Tel-Aviv, Israel, 2017.
- [5] C. An, B. Kim, and H. Ryu, "WR-OFDM system and OOB spectrum comparison," *ICUFN*, pp. 373-377, Milan, Italy, 2017.
- [6] Z. You, J. Fang, and I-Tai Lu. "Out-of-band emission suppression techniques based on a generalized OFDM framework," *EURASIP J. Advances in Signal Process.*, vol. 1, pp. 1-14, 2014.
- [7] A. D. S. Jayalath and C. Tellambura, "Reducing the out-of-band radiation of OFDM using an extended guard interval," *IEEE VTC Fall 2001*, vol. 2, pp. 829-833, Atlantic City, NJ, USA, Oct. 2001.
- [8] P. Banelli, S. Buzzi, G. Colavolpe, A. Modenini, F. Rusek, and A. Ugolini, "Modulation formats and waveforms for 5G networks: Who will be the heir of OFDM?," *IEEE Signal Process. Mag.*, pp. 80-93, Nov. 2014.
- [9] J. Lee and H.-Gy. Ryu, "Performance evaluation of DFT spreading SSB WR-OFDM system for spectral efficiency Improvement," *J. IEIE*, vol. 55, no. 11, pp. 3-8, Nov. 2018.

김 다 영 (Dayoung Kim)



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

유 흥 균 (Heung-Gyoon Ryu)



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