

## 5세대 이동통신을 위한 필터된 OFDM 파형 분석 및 평가

김병재\*, 안창영\*, 이준구\*\*, 장경수\*\*\*, 유흥균°

Analysis and Evaluation of Filtered-OFDM Waveforms for 5G  
Mobile Communications

Byeongjae Kim\*, Changyoung An\*, Jungu Lee\*\*, Kyeonsoo Jang\*\*\*, Heung-Gyoon Ryu°

## 요약

본 논문에서는 Filtered-OFDM의 스펙트럼과 성능 분석을 통해 5세대 이동통신에 적합한지 확인한다. Filtered-OFDM은 기존 OFDM 시스템을 각 Sub-Band 별로 나누어 필터링 후 중첩하여 OOB 전력 방출을 줄일 수 있다. 시뮬레이션 결과, 필터 길이가 길어짐에 따라 OOB 전력 저감 효과는 더 많이 나타나게 된다. 하지만 BER 특성의 경우 필터 길이가 달라지는 경우에도 일정하며 이론적인 BER 성능보다 낮은 것을 확인 하였다. 더욱 중요한 것은 필터링으로 인하여 생기는 위상회전 문제를 해결하기 위해서 송신기에서 사전 보상(Pre-Compensation)을 해주어야 한다. 여러 가지 변조 레벨에 따라 사전 보상하는 과정은 무척 복잡하다. 결과적으로 Filtered-OFDM이 5세대 이동통신에 사용되기 위해서는 필터 길이, 시간 자원 손실, 사전보상과 관련한 시스템 복잡도와 연산 과정, 등 고려해야 할 사항들이 있으며 개선해야 할 사항들이 있다.

**Key Words** : Filtered-OFDM, Filtering, Filter length, 5G Waveform, OOB

## ABSTRACT

In this paper, we analyze and evaluate the spectrum and BER performance of the filtered-OFDM. Filtered-OFDM is a method that divides an existing OFDM system into several sub-bands and filtering is used for OOB reduction and finally, the several subbands are added together to make one large OFDM symbol. Simulation results show that the OOB power reduction effect becomes more obvious as the filter length becomes longer. However, it is confirmed that the BER performance is constant even when the filter length is varied. The serious problem is that the filtered-OFDM must use the pre-compensation in the transmitter because the phase rotation problem is produced at the filtering process. This pre-compensation must work at every different many kinds of modulation levels, which is really complicated process in the transmitter. As a result, we have to consider some serious factors of the filtered-OFDM such as filter length, some loss in time domain, and complicated process in tx, which should be improved for the system realization of 5G mobile communication.

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

◆ First Author: Department of Electronic Engineering, Chungbuk National University, bj5236@nate.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

\*\* Department of Electronic Engineering, Chungbuk National University, 5949kyo@naver.com, 학생회원

\*\*\* Department of Electronic Engineering, Chungbuk National University, rfol9252, 학생회원

논문번호 : KICS2017-02-035, Received February 3, 2017; Revised June 19, 2017; Accepted July 20, 2017

## I. 서 론

최근 다양한 모바일 기기의 등장과 서비스에 따른 사용자의 요구가 증가함에 따라 5세대 모바일 이동통신이 대두 되고 있다. 현재 4세대 이동통신의 핵심 기술로 사용되고 있는 Waveform인 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 시스템의 경우 낮은 변조레벨의 입력신호를 FFT를 통해 다중 부반송파를 사용하고 비교적 간단한 Frequency-Domain Equalizer를 사용함으로써 고속전송에 용이할 뿐만 아니라 부반송파 간의 직교성과 함께 ISI(Inter Symbol Interference)에 강인한 시스템이다<sup>[1,2]</sup>. 때문에 OFDM 시스템은 4세대 이동통신에 채택되어 다양하게 통신 분야에 사용되고 있다. 하지만 이러한 장점으로 4세대 이동통신의 핵심기술로 채택되었지만 5세대 이동통신을 위해서는 개선되어야 할 부분들이 있다. 우선적으로 PAPR(Peak to Average Power Ratio)이 높은 문제점이 있다. 이는 OFDM 시스템이 다중 부반송파를 사용하기 때문에 발생하는 문제이고 DFT-s-OFDM과 같은 해결방안 또한 제시되고 있으며 또 다른 문제점으로는 높은 OOBE(Out-Of-Band Emission)을 꼽을 수 있다<sup>[3]</sup>. 각 부반송파는 주파수 영역에서 Side-Lobe Level이 높은 Sinc 함수 형태를 가지기 때문에 부반송파가 일정 간격으로 직교성을 유지하며 중첩되어 있는 OFDM 시스템의 경우 그로인한 OOB 누설 전력이 늘어나게 되고 다른 대역에 영향을 주지 않기 위해서 보호대역을 필요하기 때문에 스펙트럼 효율이 낮아지게 된다<sup>[4]</sup>.

5세대 이동통신에서는 높은 스펙트럼 효율이 요구되고 있는 만큼 기존 OFDM 시스템의 높은 OOB Emission 문제점은 중요하게 살펴보고 있는 부분이며 이를 개선하기 위해서 UFMC, FBMC, GFDM 등 기존의 OFDM 시스템을 대신할 새로운 Waveform들이 제시되고 있다<sup>[5]</sup>. 이러한 가운데 OFDM 시스템을 개선한 Waveform 중 하나인 Filtered-OFDM 시스템이 있다<sup>[6,7]</sup>. Filterd-OFDM 시스템은 기존 OFDM 시스템과 유사한 형태를 가진다. 차이점은 Filterd-OFDM 시스템의 경우 스펙트럼의 OOB Emission을 줄이기 위해서 각 Sub-Band 별로 나누고 iDFT를 적용한 다음 각각 CP를 붙이고 Sub-band 별로 Filtering을 적용하여 심볼들을 중첩시켜 보낸다. 주파수 영역에서는 각 Sub-Band 별로 Filtering이 되어 스펙트럼 측면에서 OOB Emission이 크게 줄어든다. 하지만 일반적으로 Filtering은 시간영역의 신호가 길어지고 Filterd-OFDM은 Sub-Band로 나누어 iDFT된 심볼

들이 중첩되기 때문에 문제가 발생할 수 있다. 때문에 본 논문에서는 5세대 이동통신 Waveform 후보로 꼽히는 Filterd-OFDM 시스템을 Hanning Filter와 Chebyshev Filter를 사용하여 적용한 Filter 길이에 따라 스펙트럼 및 BER 성능을 확인하여 Filterd-OFDM이 5세대 이동통신에 적합한지를 평가한다.

## II. Filterd-OFDM 시스템

### 2.1 OFDM

기존의 OFDM 시스템의 송수신기 모델은 그림 1과 같다. OFDM 시스템은 낮은 변조 레벨의 심볼을 병렬로 나누어 iDFT 연산을 사용하여 주파수 영역에서 시간영역의 신호로 바꾸어준다. 이때 병렬로 나누어진 각 심볼들은 각각 직교하는 부반송파에 맵핑된다. 그다음 Multi-Path Fading을 고려하여 심볼의 뒷부분을 가져와 앞부분에 복사하는 CP(Cyclic Prefix)를 추가한다. 이렇게 생성된 OFDM 신호는 RF Chain을 통해서 기저대역에서 원하는 주파수 대역으로 천이되어 채널을 통해 전송된다. 그리고 수신기에서는 RF Chain을 통해 기저대역으로 천이된 신호를 송신기의 과정의 역으로 진행된다. 심볼에 추가된 CP를 제거하고 병렬로 나누어 DFT 연산을 수행하여 시간영역의 신호를 주파수 영역의 신호로 바꾸어준다. 그리고 OFDM 시스템의 장점인 Frequency-Domain Equalizer를 사용하여 Equalization을 수행하고 심볼로부터 데이터를 얻어 낸다. 하지만 이러한 과정들 가운데 OFDM 시스템의 송신 신호의 스펙트럼을 살펴보면 각각의 부반송파가 Sinc 형태를 가지고 있기 때문에 높은 Side-Lobe로 인한 높은 OOB Emission을 가지는 문제점이 있다. 이는 인접대역에 영향을 끼칠 수 있어 보호대역이 요구되어 스펙트럼 효율이 나빠진다.

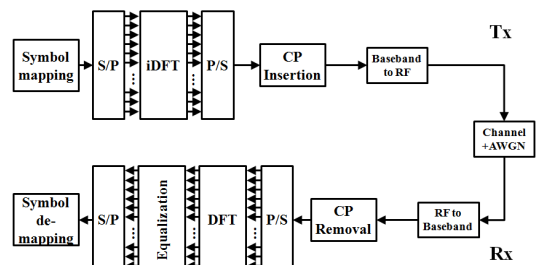


그림 1. OFDM 송수신기의 구성도  
Fig. 1. Block diagram of OFDM transmitter and receiver.

2.2 Filtered-OFDM

그림 2는 OFDM 시스템에서 OOB Emission으로 인한 스펙트럼 효율 저하를 개선하여 5세대 이동통신에 적합한 형태의 Waveform 후보 중 하나인 Filtered-OFDM 시스템이다. 각 Sub-Band 로 나누어져 iDFT 연산을 수행하는 것과 Filtering을 적용하는 것을 제외하면 Multi-Path를 고려한 CP 등 기존 OFDM 시스템과 거의 유사한 형태를 지닌다. 순차적으로 병렬로 나누어 각부반송파 및 각 Sub-Band 별로 맵핑하기 위한 iDFT연산 후 CP를 추가하고 각 Sub-Band 별로 Filtering을 한다. 이때 Sub-Band 별로 나누어서 진행하기 때문에 전체적인 스펙트럼을 확인하게 되면 OOB 저감 효과를 가져온다. 그리고 수신기에서는 역변환으로 수신된 신호를 각 Sub-Band별로 Filtering 하고 CP를 제거한 다음 DFT 연산을 통해 데이터 심볼을 찾아낸다. 하지만 여기서 하나의 문제점이 발생한다. Filtering으로 인해 위상이 회전되는 문제점이 생기게 되는데 때문에 송신기에서 이를 고려하여 iDFT 연산전에 Pre-Compensation 과정을 수행한다.

그리고 이러한 Filtered-OFDM 시스템은 UFMC와 비슷한 형태를 가진다. 하지만 UFMC와 비교할 때 UFMC의 경우 CP 대신 0을 넣어 Guard Interval을 형성하고 적용되는 Filter의 길이 또한 다르다. 그리고 심볼간의 간섭 또한 차이점이 있다.

그림 3은 Filtered-OFDM 시스템의 심볼을 보여주고 있다. 전체적인 형태는 하나의 심볼을 이루고 있지

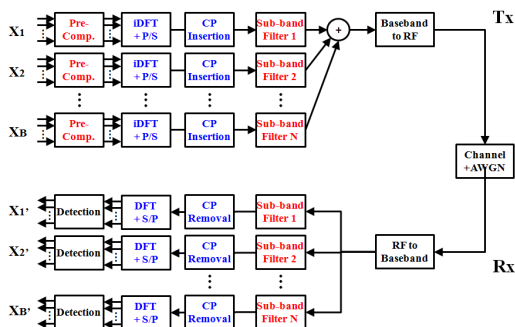


그림 2. F-OFDM 송수신기의 구성도  
Fig. 2. Block diagram of F-OFDM transmitter and receiver.



그림 3. Filtered-OFDM의 심볼  
Fig. 3. Symbol of filtered-OFDM.

만 기존 OFDM 시스템의 심볼과는 분명한 차이점이 있다. 먼저 Filtered-OFDM의 심볼은 각 Sub-Band 별로 Filtering 된 심볼들이 중첩된 형태이다. 기존 OFDM 시스템의 경우 Sub-Band로 나누더라도 DFT 성질에 의해서 각각의 부반송파에 맵핑된 신호이기 때문에 중첩된 심볼은 OFDM 심볼과 동일하지만 Filterd-OFDM 심볼은 Filtering 이후 중첩되기 때문에 차이가 있다. 때문에 수신기에서도 각 Sub-Band별 Filtering 후 DFT 연산을 수행하게 된다. 뿐만 아니라 심볼의 길이가 늘어나고 다음 심볼과 중첩되는 현상도 있다. 이 역시 Filtering에 의한 이유이다. 주파수 영역에서의 곱은 시간영역에서는 Convolution으로 연산되므로 시간영역에서 볼 때 심볼이 길어지는 것을 관찰할 수 있다. 하지만 Sub-Band 별로 나누어 진행하기 때문에 OOB 저감 효과를 얻는 것뿐만 아니라 전체적으로 Filtering 하는 경우보다 시간영역의 심볼이 짧다.

III. Filtering 및 Chebyshev, Hanning Filter

신호 처리에서 Filtering은 신호에서 원하지 않는 대역을 제거 혹은 원하는 대역만을 선택하여 얻어내는 방법으로써 일반적으로 일정 대역크기를 가지는 Filter를 시간영역에서 Convolution하는 형태로 이루어진다. 이때 푸리에 변환에 의해서 시간영역에서의 Convolution은 주파수 영역에서의 곱이 되고 설계된 Filter로 원하는 대역만을 얻어 낼 수 있다. Filterd-OFDM 시스템에서는 각 Sub-Band별로 나누어 Filtering을 수행한다. 만약 기존 OFDM 시스템의 심볼에 그대로 Filtering을 적용하게 된다면 OFDM 스펙트럼의 전체 대역을 얻어낼 수 있는 Filter가 있어야 하고 주파수영역에서 볼 때 원하지 않는 대역뿐만 아니라 OFDM 스펙트럼 또한 제한하게 되어 데이터 손실을 가져올 수 있고 또한 시간영역에서 Convolution으로 인해 신호의 길이가 급격히 길어지는 문제가 발생한다. 때문에 Filterd-OFDM은 Sub-Band로 나누어 각 Sub-Band의 크기별로 Filtering을 수행하고 각 심볼들을 중첩한다.

일반적으로 Filterd-OFDM의 경우 Raised Cosine Filter를 사용한다. 하지만 본 논문에서는 Filterd-OFDM의 성능을 평가하기 위하여 두 가지 Filter를 선정하였다. Chebyshev Filter라고 불리는 Dolph-Chebyshev Filter와 Hann Filter라고 불리는 Hanning Filter 이다. 각각의 시간영역 및 주파수 영역에서의 형태는 다음과 같다.

그림 4는 Filtered-OFDM에 적용하기 위한 Chebyshev Filter의 시간영역과 주파수 영역의 모습이다.  $-N/2 \leq n \leq N/2$  일 때 Chebyshev Filter의 수식은 다음과 같다.

$$f(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} F_0(k) \cdot e^{j2\pi kn/N} \cdot F_0(k) \cos \left\{ N \cos^{-1} \left[ \beta \cos \left( \frac{\pi k}{N} \right) \right] \right\} = \frac{\cos \left\{ N \cos^{-1} \left[ \beta \cos \left( \frac{\pi k}{N} \right) \right] \right\}}{\cosh \left[ N \cosh^{-1}(\beta) \right]} \quad (1)$$

그림 5는 Filtered-OFDM에 적용하기 위한 Hanning Filter의 시간영역과 주파수 영역의 모습이다. Hanning Filter는 Raised Cosine Filter의 한 종류로써  $0 \leq n \leq N-1$  일 때 수식은 다음과 같다.

$$f(n) = 0.5 \left( 1 - \cos \left( \frac{2\pi n}{N-1} \right) \right) \quad (2)$$

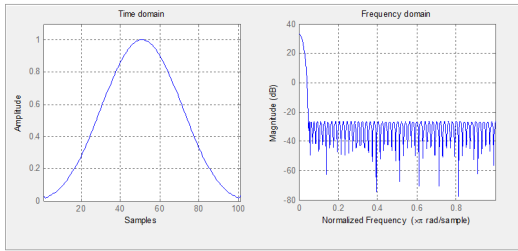


그림 4. Chebyshev filter의 시간 및 주파수영역 형태  
Fig. 4. Chebyshev filter in time and frequency domain.

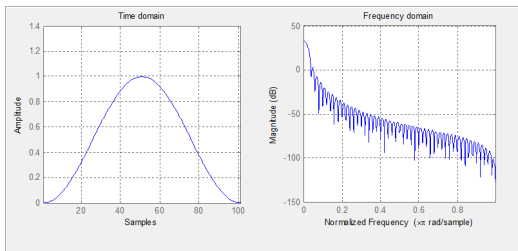


그림 5. Hanning filter의 시간 및 주파수영역 형태  
Fig. 5. Hanning filter in time and frequency domain.

#### IV. 시뮬레이션 결과 및 분석

본 논문에서 평가하고자 하는 Filtered-OFDM 시스템을 Hanning Filter와 Chebyshev Filter를 사용하여 각각 Filter의 길이에 따라 스펙트럼 및 BER 성능

표 1. 시뮬레이션 환경  
Table 1. Simulation parameters

iFFT size for transmitter	1024
FFT size for receiver	1024
# of used sub-carrier	601
Modulation	4-QAM
CP length	256
Filter type	Chebyshev and Hanning

을 분석하기 위해서 시뮬레이션을 MATLAB 프로그램을 이용하여 진행하였다.

본 논문에서 Filtered-OFDM을 Chebyshev Filter와 Hanning Filter를 각각 사용한 경우 따라 성능을 확인하여 평가하고자 시뮬레이션을 진행하기 위해서 시뮬레이션 환경을 표 1과 같이 설정하고 진행하였다. 먼저 송수신기의 FFT 및 iFFT Size는 1024로 고정하였다. 그리고 OOB Emission 확인을 용이하게 하기 위해서 601개의 Sub-Carrier를 사용하였고 데이터 변조는 4-QAM 변조를 사용하였다. 또한 CP의 길이는 OFDM 시스템에서 통상적으로 사용하는 FFT Size의 1/4 값으로 설정하여 1024의 1/4인 256으로 설정하고, 앞서 언급한바와 같이 각 Sub-Band를 Filtering에는 Chebyshev Filter와 Hanning Filter를 사용하여 각각 Filter 길이에 따라 확인하였다.

$$BER_{EbN0} = 0.5 \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right) \quad (3)$$

식 (3)은 4-QAM을 사용하는 OFDM 시스템의 BER 이론치를 계산하는 식이다. 본 논문에서는 4-QAM을 사용하는 OFDM 시스템 및 F-OFDM 시스템의 BER 성능을 비교 분석하였다.

그림 6은 기존 OFDM 시스템의 스펙트럼을 나타낸다. OOB 전력의 크기는 약 -40dB 임을 확인할 수 있다.

그림 7과 그림 8은 각각 Filtered-OFDM 시스템에 Chebyshev Filter를 적용한 스펙트럼과 BER 성능이다. 이때 각 Sub-Band에 Filtering 하는 Filter Length를 26, 51, 101, 151, 201로 설정하고 시뮬레이션을 진행한 다음 스펙트럼과 BER 성능을 확인하였다. 시뮬레이션 결과 그림 6의 스펙트럼으로 확인할 수 있듯이 Filter Length가 길어짐에 따라 OOB Emission이 더 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 적용하는 Filter Length에 따라 스펙트럼에 영향을 미치며 기존 OFDM 대비 OOB Emission을 크게 낮출 수 있

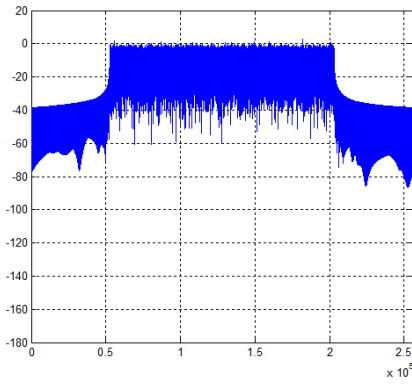


그림 6. 기존 OFDM 시스템의 스펙트럼  
Fig. 6. Spectrum of conventional OFDM system.

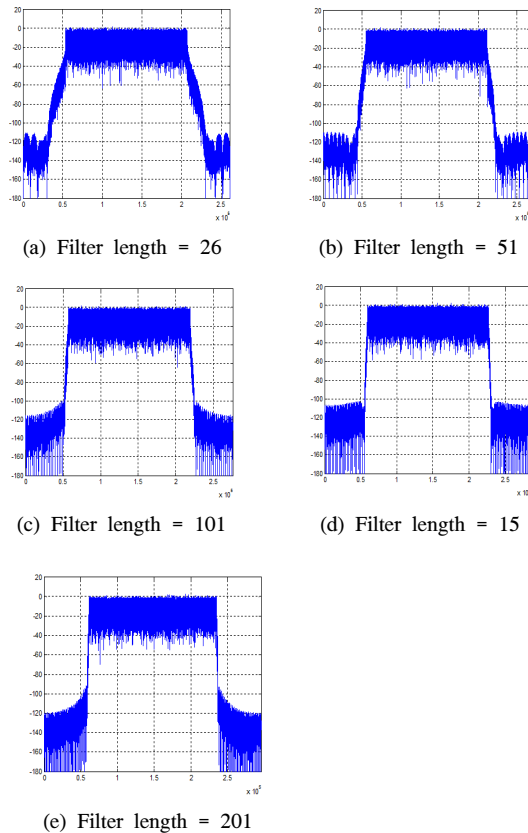


그림 7. Chebyshev filter를 적용한 Filtered-OFDM 스펙트럼  
Fig. 7. Spectrum of filtered-OFDM with Chebyshev filter.

다. 또한 그림 7에서 Filter Length가 변화 하더라도 BER 성능이 동일하고 이론적인 BER 성능보다는 낮은 것을 확인 할 수 있다.

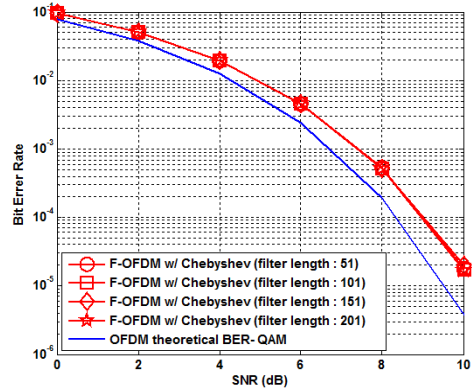


그림 8. Chebyshev filter를 적용한 Filtered-OFDM BER 성능  
Fig. 8. BER Performance of filtered-OFDM with Chebyshev filter.

그림 9와 그림 10은 Filtered-OFDM 시스템에 Hanning Filter를 적용한 스펙트럼과 BER 성능이다. Filter Length를 26, 51, 101, 151, 201로 다르게하여 각 Sub-Band에 Filtering 하여 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션 결과 그림 8에서는 Filter Length가 길어지는 것이 OOB Emission을 더 낮게 만드는 것을 스펙트럼을 통해 알 수 있다. 뿐만 아니라 Filtering 하는 Filter는 적용하는 Filter Length에 따라 스펙트럼에 영향을 주는 요소이며 기존 OFDM 대비 OOB Emission을 크게 낮추는 것을 확인 하였다. 그리고 그림 9에서 앞서 Chebyshev Filter를 적용한 Filtered-OFDM 시스템의 BER 성능과 동일하게 Filter Length에는 영향이 없지만 이론적인 성능보다 낮은 것을 확인 할 수 있다. 그림 6, 그림 7, 그림 9를 종합하여 볼 때, 기존 OFDM 대비 F-OFDM 시스템은 필터 길이를 201개 사용하였을 때, Chebyshev 필터의 경우 -40dB에서 -120dB로 OOB 전력이 감소되며, Hanning 필터의 경우 -160dB로 OOB 전력이 감소됨을 확인할 수 있다.

두 시뮬레이션 결과를 종합하여 볼 때 Filter Length는 Filtered-OFDM OOB에 영향을 미치는 중요한 요소이다. 일반적으로 Filter Length가 길어짐에 따라서 OOB 성능이 좋아지지만 Filtering은 시간영역의 심볼이 길어지는 문제점도 있다. 또한 Filtered-OFDM은 Sub-Band별로 나누어진 심볼이 중첩되기 때문에 이로 인한 간섭으로 BER 성능에 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

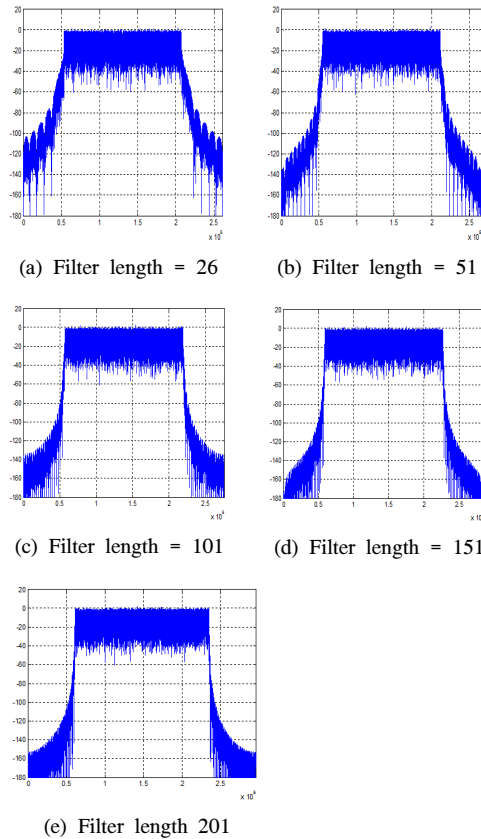


그림 9. Hanning filter를 적용한 Filtered-OFDM 스펙트럼  
 Fig. 9. Spectrum of filtered-OFDM with Hanning filter.

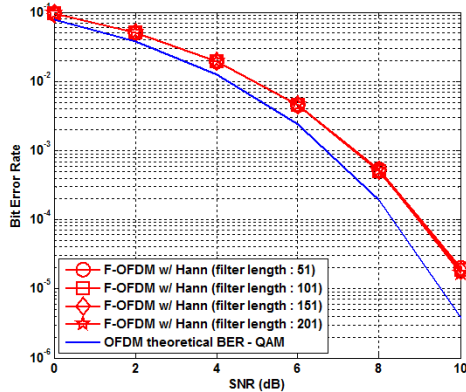


그림 10. Hanning filter를 적용한 Filtered-OFDM BER 성능  
 Fig. 10. BER of filtered-OFDM with Hanning filter.

### V. 결론

OFDM 시스템은 다양한 장점으로 고속전송에 용

이하여 4세대 이동통신의 핵심기술로 사용되어 왔다. 하지만, 스펙트럼을 살펴보면 높은 OOB Emission을 가지는 문제점이 있다. 이는 인접대역에 영향을 끼칠 수 있어 보호대역이 요구되어 스펙트럼 효율이 나빠진다. 높은 스펙트럼 효율을 요구하는 5세대 이동통신에는 OFDM은 적합하지 않고 그 때문에 많은 Waveform들이 제시되고 있고 그중 하나가 OFDM 시스템을 개량한 형태인 Filtered-OFDM 시스템이다. 본 논문에서는 Filtered-OFDM 시스템이 5세대 이동통신에 적합한지 알아보기 위하여 Filtered-OFDM 시스템의 핵심인 Filtering 조건을 달리하여 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션 결과 Filtered-OFDM은 OFDM 대비 OOB 전력이 크게 저감되는 것을 확인할 수 있다. 또한 Filter Length에 따라 OOB 저감 성능이 달라지는 것 또한 확인이 가능하다. BER 성능의 경우 Filter Length에 무관하며 이론적인 BER 성능보다 나쁜 것을 확인할 수 있다. 하지만 일반적으로 Filtering은 시간영역의 심볼이 길어지도록 만들며 연산속도에 영향을 미친다 뿐만 아니라, 더욱 중요한 것은 필터링으로 인하여 생기는 위상회전 문제를 해결하기 위해서 송신기에서 사전 보상(Pre-Compensation)을 해주어야 한다. 여러 가지 변조 레벨에 따라 사전 보상은 과정은 무척 복잡하다. 결과적으로 Filtered-OFDM이 5세대 이동통신에 사용되기 위해서는 필터 길이, 시간 자원 손실, 사전 보상과 관련한 시스템 복잡도와 연산 과정, 등 고려해야 할 사항들이 있으며 개선해야할 사항들이 있다.

### References

- [1] J. J. van de Beek, O. Edfors, M. Sandell, S. K. Wilson, and P. O. Borjesson, "On channel estimation in OFDM systems," *IEEE 45th VTC*, vol. 2, pp. 815-819, Chicago, IL, 1995.
- [2] T. Hwang, C. Yang, G. Wu, S. Li, and G. Y. Li, "OFDM and its wireless applications: a survey," in *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 58, no. 4, pp. 1673-1694, May 2009.
- [3] J. Van De Beek and F. Berggren, "Out-of-band power suppression in OFDM," in *IEEE Commun. Lett.*, vol. 12, no. 9, pp. 609-611, Sept. 2008.
- [4] X. Huang, J. A. Zhang, and Y. J. Guo, "Out-of-band emission reduction and a unified framework for precoded OFDM," in *IEEE*

*Commun. Mag.*, vol. 53, no. 6, pp. 151-159, Jun. 2015.

[5] 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?: an overview of alternative modulation schemes for improved spectral efficiency," in *IEEE Sign. Process. Mag.*, vol. 31, no. 6, pp. 80-93, Nov. 2014.

[6] M. Sahidullah and G. Saha, "A novel windowing technique for efficient computation of MFCC for speaker recognition," in *IEEE Sign. Process. Lett.*, vol. 20, no. 2, pp. 149-152, Feb. 2013.

[7] X. Cheng, Y. He, B. Ge, and C. He, "A filtered OFDM using FIR filter based on window function method," *2016 IEEE 83rd VTC Spring*, pp. 1-5, Nanjing, 2016.

[8] X. Li and L. J. Cimini, "Effects of clipping and filtering on the performance of OFDM," *1997 IEEE 47th VTC, Technol. in Motion*, vol. 3, pp. 1634-1638, Phoenix, AZ, 1997.

**김 병 재 (Byeongjae Kim)**



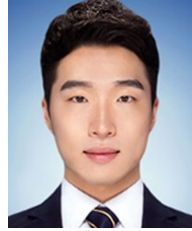
2016년 2월 : 충북대학교 전자공학과(공학사)  
 2016년 3월~현재 : 충북대학교 전자공학과 석사과정  
 <관심분야> 무선통신시스템, 신호처리

**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

**이 준 구 (Jungu Lee)**



2017년 2월 : 충북대학교 전자공학과(공학사)  
 2017년 3월~현재 : 충북대학교 전자공학과 석사과정  
 <관심분야> 무선통신시스템, 차세대 통신시스템

**장 경 수 (Kyeongsoo Jang)**



2017년 2월 : 충북대학교 전자공학과(공학사)  
 2017년 3월~현재 : 충북대학교 전자공학과 석사과정  
 <관심분야> 무선통신시스템, 신호처리

**유 흥 균 (Heung-Gyoon Ryu)**



1988년~현재 : 충북대학교 전자공학과 교수  
 2002년 3월~2004년 2월 : 충북대학교 컴퓨터정보통신연구소 소장  
 1996년~현재 : IEEE, IET 논문심사위원

2002년 : 한국전자파학회 학술상 수상  
 2008년 : ICWMC 2008 국제학술대회 "Best Paper Award" 수상  
 2009년 : SPACOMM 2009 국제학술대회 "Best Paper Award" 수상  
 <관심분야> 무선통신시스템, 위성통신, 5G/B5G 이동통신 시스템, 통신회로 설계 및 통신 신호처리