The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication (IIBC)
Vol. 17, No. 6, pp.89-95, Dec. 31, 2017. pISSN 2289-0238, eISSN 2289-0246

https://doi.org/10.7236/JIIBC.2017.17.6.89
JIIBC 2017-6-12

UFMC 시스템에서 필터성능 비교

The Comparison of Filter Performance in UFMC systems

이규섭*, 최진규**

Kyuseop Lee*, Ginkyu Choi**

요 약 UFMC(Universal Filtered Multi Carrier)는 OFDM(Orthogonal Frequency Division Modulation)보다 비동기적인 상황과 ICI(Inter Carrier Interference)에 강한 장점으로 5G 무선통신 시스템의 후보로 주목 받고 있다. UFMC 시스템에서는 부밴드 마다 필터링을 하기 때문에 필터의 성능이 매우 중요하다. 기존 UFMC 시스템의 필터는 대역외 방사가 작다는 장점으로 필터를 사용해 왔다. 그러나 이 필터는 부밴드 내의 왜곡이 있고 스커트 특성이 좋지 않다. 따라서 부밴드 내의 왜곡을 줄일 수 있으며 스커트 특성이 뛰어난 새로운 형태의 UFMC 필터에 대한 연구가 필요하다. 본 논문은 UFMC 시스템에서 필터의 주파수 응답 형태가 미치는 영향을 분석하고 기존 시스템에서 사용되어 왔던 Dolph-ChebyShev 필터를 대체할 필터로 Wavelet 기반의 필터를 제시한다. 모의실험을 통해 wavelet 필터가 기존의 필터 보다 다중 경로 페이딩 채널에서 더 나은 BER(Bit Error Rate)성능을 보임을 확인 하였다.

Abstract UFMC is known as a candidate for the 5G wireless communication system because it is robust against ICI and better performs in asynchronous situation than OFDM. In the UFMC system, the filtering is performed for each subband so the performance of the filter is very important. The Dolph-Chebyshev filter has been used in conventional UFMC system because of its small out-of-band radiation. However it has distortion in the sub-band and skirt characteristics is not good enough. Therefore, it is necessary to study a new type of UFMC filter which reduces the distortion in the subband and has sharp skirt characteristics. In this paper we analyze the effect of filter frequency response in UFMC system and suggest the wavelet based type of filter that substitutes the Dolph-ChebyShev filter used in the conventional UFMC system. The simulation results show that wavelet filter has better BER performance in multipath fading channels than conventional filters

Key Words : UFMC, Wavelet, PAPR, BER, Dolph-Chebyshev, Filter

Ⅰ. 서 론

OFDM은 다양한 이점으로 여러 시스템에 널리 사용되어 왔다. 하지만 OFDM은 미래 5G 무선 통신 시스템에서 요구되는 여러 조건들을 만족시키기에는 분명한 한계점이 존재한다. 즉 5G에서 요구되는 분산 스펙트럼 환경에 부적합한 특징이 있다[1]. 또한 ICI(Inter Carrier Interference)에 취약 하다는 단점이 있어 5G에서 요구되는 비동기적인 통신 방식에는 잘 맞지 않는다[2]. 더군다나 비동기적이고 산발적인 데이터를 전송하는 시나리오에서 OFDM의 높은 PAPR(Peak power to Average

*준회원, 홍익대학교 전자전산공학과
**종신회원, 홍익대학교 전자전기공학과
접수일자: 2017년 9월 14일, 수정완료: 2017년 10월 24일
게재확정일자: 2017년 12월 8일

Received: 14 September, 2017 / Revised: 24 October, 2017 / Accepted: 8 December, 2017
**Corresponding Author: gkchoi@hongik.ac.kr
Dept. of Electronic & Electrical Engineering, Hongik University, Korea

Power Ratio)과 동기화에 사용되는 높은 전력은 이러한 장치의 사용을 어렵게 한다. 또한 OFDM의 CP의 사용은 주파수 대역의 비효율뿐만 아니라 지연시간을 높여 Tactile Internet에서 요구되는 낮은 전송 지연시간을 만족하기 어렵게 한다[3]. 이러한 시점에서 FBMC(Filter Bank Multi Carrier)는 OFDM을 대신할 5G 무선 통신 시스템의 전송 방식 후보 중 하나로 대두되고 있다[4][5]. FBMC의 심볼은 각각의 부반송파가 독립적인 필터를 통과하여 전송하므로 대역외의 Side-lobe 크기가 작아 ICI에 강한 장점과 CP를 사용하지 않아 OFDM에 비해 높은 스펙트럼 효율을 갖는다. 하지만 FBMC에 적용되는 필터는 각각의 부반송파에 적용되기 위해 협대역의 필터를 사용하여 5G 시스템에서 요구되는 낮은 지연시간과 짧은 상향 버스트 전송을 어렵게 한다. 또한 FBMC는 OQAM(Offset Quadrature Amplitude Modulation)을 사용하기 때문에 모든 타입의 MIMO(Multiple Input Multiple Output) 적용이 어렵다는 단점 또한 갖고 있다[6].

UFMC는 위에서 언급한 OFDM과 FBMC의 특징을 합치고 단점을 보완한 다중 반송파 전송 방식이다[7]. UFMC는 OFDM과 같이 심볼 전체에 필터링을 하거나 FBMC처럼 각각의 부반송파에 필터링을 하는 것과는 다르게 부반송파를 묶은 부밴드 단위로 필터링을 한다. 이러한 방식을 통해 UFMC는 FBMC보다는 필터 임펄스 응답 크기를 줄일 수 있고 OFDM보다는 비동기적 상황에서의 성능을 향상 시켰다. 그리고 FBMC와는 다르게 QAM을 사용하기 때문에 모든 방식의 MIMO를 사용 할 수 있는 장점이 있다. 또한 FFT와 IFFT를 이용한 빠르고 효율적인 송수신기 설계가 가능하다[8][9].

UFMC 시스템의 주요한 특징 중 하나는 각각의 부밴드 마다 필터를 사용한다는 점이다. 필터를 사용함으로써 UFMC 신호의 side-lob 크기를 줄일 수 있어 부밴드 간의 간섭을 최소화 하여 부밴드의 간섭 없이 전송된 원본 신호를 복원 할 수 있다. 또한 CFO에 의한 부밴드간의 간섭도 최소화 할 수 있다는 특징이 있다. 따라서 UFMC시스템에서 부밴드에 적용할 필터를 결정하는 것은 시스템 성능에 큰 영향을 미친다. 본 논문에서는 UFMC시스템에서 요구되는 필터의 특징을 분석한다. 기존의 UFMC에서 주로 사용되고 있는 Dolph-ChebyShev 필터, DPSS(Discrete Prolate Spheroidal Sequence) 필터 그리고 Wavelet 기반의 필터간의 특징을 분석하고 각각의 필터를 사용한 UFMC시스템의 BER 성능을 비교한다.

II. Wavelet 필터

이산시간 Wavelet 변환과 Wavelet 기저함수의 생성은 업-샘플(Up-Sample)과 다운-샘플(Down-Sample) 그리고 필터를 이용한 다해상도(Multi resolution) 신호처리를 이용하여 수행할 수 있다. 부대역 필터뱅크(Subband filter bank)는 필터들을 이용하여 신호를 각각의 부대역으로 분리할 수 있는데 완전 재생이 가능한 부대역 필터 뱅크를 만들고 이 필터 뱅크의 특정 부분을 이용하면 Wavelet의 기저 함수를 생성 할 수 있다. 완전 재생이 가능한 필터를 만드는 다양한 방법이 있지만 본 논문에서 사용한 방법으로는 Paraunitary 방식을 이용하였다[10][11].

Wavelet 기저 함수를 생성하기 위해서 본 논문에서는 다음과 같은 방법을 이용하였다[10]. 즉 웨이브렛(wavelet)함수 $\psi(t)$와 스케일링(scaling)함수 $\phi(t)$는 다음과 같이 주어진다.

$$\phi(t) = \sum_n h_0[n]\phi[2t-n] \tag{1}$$

$$\psi(t) = \sum_n h_1[n]\phi[2t-n] \tag{2}$$

$h_0[n]$이 식 (3)과 같이 4-tap 필터라고 가정하면 이것의 z변환 신호 $H_0(z)$를 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다. 또한 이 4-tap 필터를 이용한 스케일링 함수는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$h_0[n] = [a\ b\ c\ d] \tag{3}$$

$$H_0(z) = a + bz^{-1} + cz^{-2} + dz^{-3} \tag{4}$$

$$\begin{aligned}\phi(t) = {} & a\phi(2t) + b\phi(2t-1) \\ & + c\phi(2t-2) + d\phi(2t-3)\end{aligned} \tag{5}$$

위의 식 (5)로 표현된 스케일링 함수의 푸리에 변환을 통한 주파수 영역 표현은 식 (6)과 같다.

$$\begin{aligned}\Phi(\Omega) = {} & \frac{a}{2}\Phi(\frac{\Omega}{2}) + \frac{b}{2}e^{-j\frac{1}{2}\Omega}\Phi(\frac{\Omega}{2}) \\ & + \frac{c}{2}e^{-j\frac{2}{2}\Omega}\Phi(\frac{\Omega}{2}) + \frac{d}{2}e^{-j\frac{3}{2}\Omega}\Phi(\frac{\Omega}{2}) \\ = {} & \frac{1}{2}\Phi(\frac{\Omega}{2})[a + be^{-j\frac{1}{2}\Omega} + ce^{-j\frac{2}{2}\Omega} + de^{-j\frac{3}{2}\Omega}]\end{aligned}$$

$$= \frac{1}{2}\frac{1}{2}[\Phi(\frac{\Omega}{4})](a+be^{-j\frac{1}{2}\Omega}+ce^{-j\frac{2}{2}\Omega}+de^{-j\frac{3}{2}\Omega})$$
$$(a+be^{-j\frac{1}{4}\Omega}+ce^{-j\frac{2}{4}\Omega}+de^{-j\frac{3}{4}\Omega})$$
$$= \frac{1}{2}\frac{1}{2}\frac{1}{2}[\Phi(\frac{\Omega}{8})](a+be^{-j\frac{1}{2}\Omega}+ce^{-j\frac{2}{2}\Omega}+de^{-j\frac{3}{2}\Omega})$$
$$(a+be^{-j\frac{1}{4}\Omega}+ce^{-j\frac{2}{4}\Omega}+de^{-j\frac{3}{4}\Omega})$$
$$(a+be^{-j\frac{1}{8}\Omega}+ce^{-j\frac{2}{8}\Omega}+de^{-j\frac{3}{8}\Omega})$$
$$\vdots \quad (6)$$

스케일링 함수는 주파수 영역의 표현식인 식 (6) 처럼 무한 곱으로 표현 된다. 따라서 이것을 극한을 통해 정리하면 다음 식 (7)과 같다.

$$\Phi(\Omega) = \lim_{L\to\infty}\frac{1}{2^L}\Phi(\frac{\Omega}{2^L})\prod_{m=1}^{L}H_0(\frac{\Omega}{2^m}) \quad (7)$$

$$\lim_{L\to\infty}\Phi(\frac{\Omega}{2^L}) \cong \Phi(0) = \int\phi(t)dt = 1 \quad (8)$$

위의 식 (7)이 식 (8)을 만족 한다면 시간영역에서의 스케일링 함수 $\phi(t)$는 주파수 영역의 스케일링 함수 $\Phi(\Omega)$의 푸리에 역변환을 통해 구할 수 있다. 따라서 스케일링 함수 $\phi(t)$는 식 (9)와 같이 무한의 시간 컨벌루션으로 표현된다.

$$\phi(t) = \frac{1}{2^L}\left[\sum_n h_0[n]\delta_a(2t-n) * \sum_n h_0[n]\delta_a(4t-n) * \sum_n h_0[n]\delta_a(8t-n)\cdots\right] \quad (9)$$

만약 Daubechies가 제안한 필터 계수 $h_0[n]$를 이용한다면 스케일링 함수 $\phi(t)$를 그림 1과 같이 나타낼 수 있다. 본 논문에서는 UFMC에 적용하고 다른 필터와 비교하기 위해 L=26인 Daubechies Wavelet 스케일링 함수를 생성 하였다. 이 스케일링 함수는 주파수영역에서 앞에서 생성 했던 필터들에 비해 side-lobe 레벨 크기가 크다는 특징이 있다. 하지만 dB레벨로 그래프를 그렸기 때문에 side-lobe의 크기가 비교적 크게 보이는 것이며 main-lobe와 비교 했을 때는 상대적으로 매우 작은 크기를 갖는다. 또한 Wavelet 함수의 주파수 특성은 날카로운 스커트 특성을 갖고 있다.

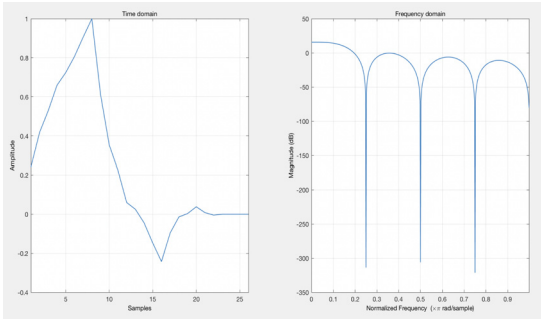

그림 1. Daubechies 필터의 스케일링 함수
Fig. 1. Scaling Function of Daubechies Filter

Ⅲ. UFMC 필터 디자인

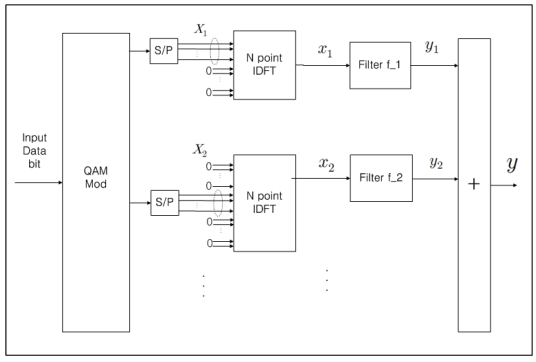

그림 2. UFMC 시스템의 송신 블록 다이어그램
Fig. 2. Transmission Block Diagram of UFMC system

UFMC의 전송 심볼 y는 그림 2에서 보이는 것과 같이 각각의 서브 블록을 N-Point IDFT 하여 부밴드 신호로 만들고 그 신호를 필터에 통과시킨 후 합쳐지는 구조를 갖고 있다. 이때 필터는 각각의 부밴드 신호가 차지하는 주파수 영역 신호를 최대한 왜곡 없이 통과 시키고 부밴드의 대역외 방사 신호는 최대한 억제시키는 역할을 수행해야 한다.

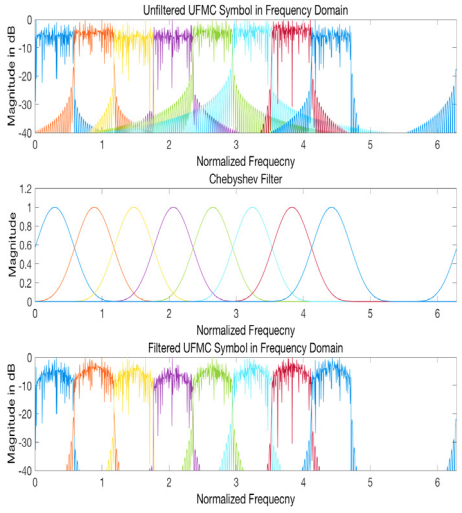

그림 3. UFMC 부밴드의 주파수 영역 신호
Fig. 3. Frequency Domain in UFMC Subband

그림 3의 첫 번째 그래프는 필터를 통과 하지 않은 부밴드 신호들을 모아서 나타낸 것이다. 여기서 필터를 거치지 않은 각각의 부밴드 신호들은 자신의 대역 외부로 신호를 방사시켜 IBI(Inter Band Interference)를 야기하고 시스템의 성능을 저하 시킨다. 따라서 부밴드 외부로 방사되는 신호를 제한하기 위해 두 번째 그래프와 같이 적절한 필터를 사용하여 부밴드 외부로의 신호 방사를 억제해야 한다. 세 번째 그래프는 첫 번째 그래프의 부밴드 신호들에 두번째 그래프의 필터를 적용한 것이다. 세 번째 그래프에서 각각의 부밴드의 대역외 신호들은 필터에 의해 적절히 제한되었다. 하지만 필터에 의한 부밴드 내의 왜곡이 존재하는 것을 볼 수 있다.

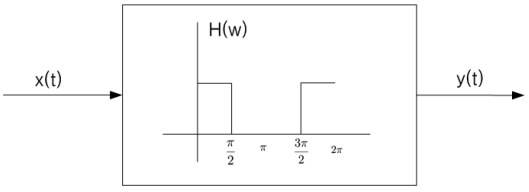

그림 4. 이상적인 저역 통과 필터
Fig. 4. Ideal Low Pass Filter

UFMC 시스템에 적합한 필터를 디자인하는 기준은 그림 3 에서 x(t)를 UFMC 심볼중 1개의 부밴드에 해당하는 신호라고 가정한다면 이 신호가 이상적인 저역 통과 필터를 거쳤을 때 나오는 출력을 y(t)라고 하고 우리가 설계할 필터를 통과한 신호를 $\hat{y}(t)$라고 한다면 주어진 조건 하에서 식 (10)의 에러를 최소화 할 수 있는 필터를 설계하는 것이다.

$$|y(t)-\hat{y}(t)| = error \tag{10}$$

그림 3을 보면 UFMC 심볼의 부밴드 블록은 부밴드 내에서는 신호의 에너지가 집중되어 있고 부밴드 외의 대역에는 약간의 신호 누설이 있다. 따라서 필터를 설계할 때 부밴드 신호의 대역외의 방사를 최대한으로 줄이는 것도 중요하지만 대역내의 신호를 최대한 왜곡 없이 통과 시킬 수 있는 필터의 형태가 더 적합하다. 일반적으로 대역내의 신호의 왜곡을 줄이기 위해 필터의 임펄스 응답 길이를 늘려 좀 더 날카로운 형태의 스커트 특성을 얻을 수 있지만 필터의 길이를 늘리는 것은 시스템 복잡도와 전송 심볼의 길이를 증가시키기 때문에 고정된 필터 길이에서 더 높은 성능을 얻기 위해서는 필터 대역의 크기가 작은 것 보다는 통과 저지대역이 최대한 부밴드에 일치하고 가파른 스커트 특성을 갖고 있어야한다.

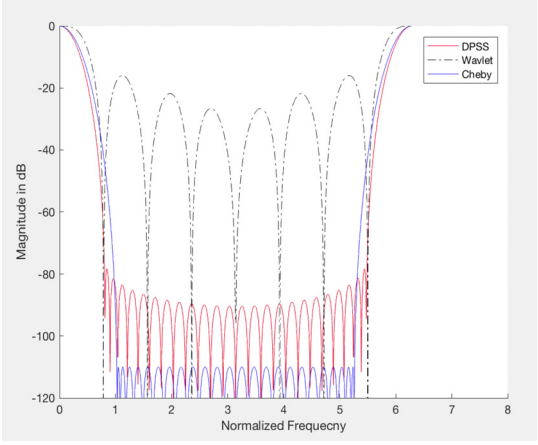

그림 5. 필터별 주파수 스펙트럼 비교
Fig. 5. Frequency Spectrum Comparison of filters

그림 5와 6은 DPSS, Wavelet, Dolph-Chebyshev 등 세 가지 필터의 특성을 시간 영역과 주파수영역에서 각각 비교 하였다. 주파수 영역에서의 그래프를 보면 세 필터 모두 차단 주파수의 값은 같고 통과 저지대역의 최대 크기도 같다. 하지만 스커트 특성과 각 저지대역의 특성이 모두 다른 것을 확인 할 수 있고 그 특징은 표 1에 나타내었다.

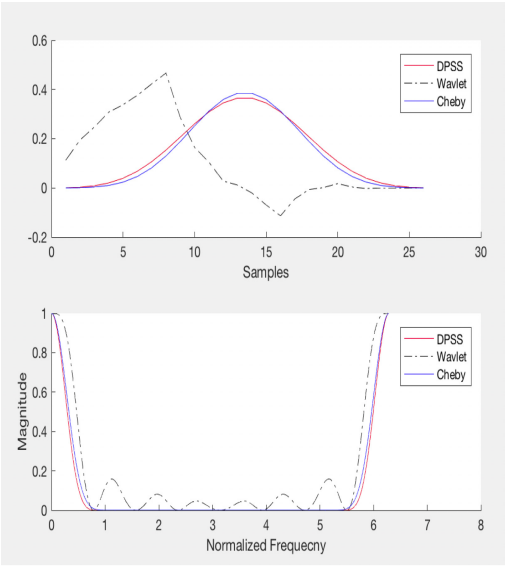

그림 6. 필터별 시간영역과 주파수 영역 그래프
Fig. 6. Time and Frequency Domain of filters

표 1. 필터별 스커트 특성과 저지대역 특성
Table 1. Skirt and Stopband Characteristics of filters

	DPSS	Wavelet	Chebyshev
스커트 특성	Bad	Good	Bad
저지대역 특성	Good	normal	Good

위의 표 1에서 나타낸 것과 같이 DPSS와 Dolph-Chebyshev는 저지 대역의 특성은 좋지만 스커트 특성이 나쁘고 Wavelet은 저지 대역 특성이 뛰어나지 않지만 스커트 특성은 좋은 것을 알 수 있다.

V. 결과 및 분석

본 논문에서는 DPSS, Dolph-chebyshev, Wavelet 세 가지 필터 기반의 UFMC 시스템의 성능을 비교 하였다. BER성능 비교를 위해 채널 모델로 3GPP(release 10)[12] 에서 제안된 채널 모델을 사용 하였다. 정확한 데이터의 획득을 위해 100만개의 데이터를 임의로 생성하여 BER을 계산하고 평균을 하여 각각의 상황에 대한 성능을 비교 하였다. UFMC 시스템의 시뮬레이션 파라미터로는 표 2에서 나타낸 파라미터를 이용 하였다. 또한 DPSS, Dolph-Chebyshef, Wavlet 세 필터 모두 26개의 동일한 필터 길이를 갖게 하여 성능을 비교함으로써 제한된 필터길이에 따른 성능을 적절히 비교 할 수 있도록 하였다. 또한 모든 필터는 모두 UFMC 심볼의 부밴드 주파수 대역의 경계에서 차단 주파수가 발생하도록 필터를 생성함으로써 모두 동일한 조건하에서 필터가 비교 될 수 있도록 하였다.

표 2. UFMC 시스템 파라미터
Table 2. UFMC System Parameter

항목	값
FFT Size	1024
필터의 길이	26
부밴드의 수	8
부밴드 당 부반송파의 수	96

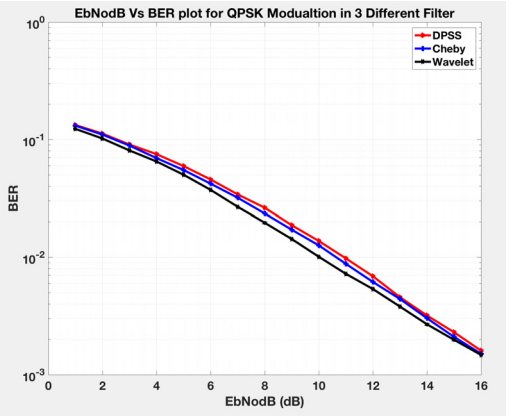

그림 7. 구릉 지형에서 필터들의 BER 성능 비교
Fig. 7. BER Performance comparison of filters in Hilly terrain

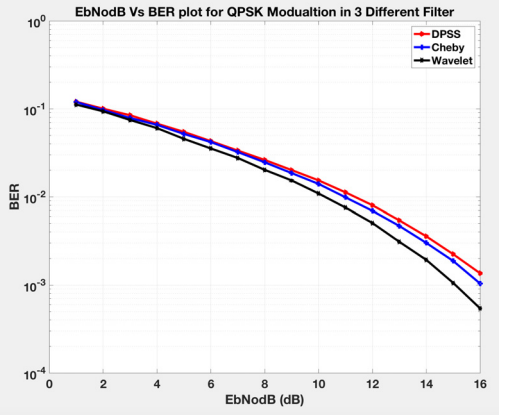

그림 8. 도시 환경에서 필터들의 BER 성능 비교
Fig. 8. BER Performance comparison of filters in Urban Environment

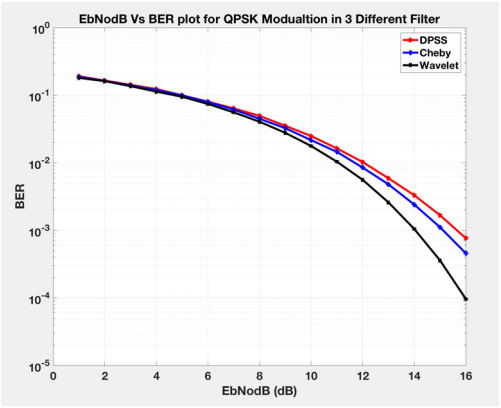

그림 9. 시골 환경에서 필터들의 BER 성능 비교
Fig. 9. BER Performance comparison of filters in Rural Environment

그림 7, 8, 9는 각각 언덕 많은 지형, 도시 환경, 시골 환경 채널에서 필터별 BER성능을 비교 하였다. 주파수 선택적 특성은 언덕 많은 지형이 가장 크고 그 다음으로는 도시 환경, 시골 환경 순으로 주파수 선택적 채널 특성이 강하다. 전체적인 BER성능은 채널이 주파수 선택적이면 나빠지는 경향이 있어 시골 환경, 도시 환경, 구릉 지형 순으로 좋은 성능이 나오는 것을 볼 수 있다. 필터별 성능은 모든 채널 환경에서 Wavelet이 가장 좋은 BER성능을 보였고 그 다음으로는 Dolph-Chebyshev 그리고 DPSS 순으로 나타났다. 특히 Wavelet은 시골 환경 BER그래프의 3×10^{-3} 위치에서 Dolph-ChebyShev 필터 보다는 대략 1.2dB, DPSS보다는 1.8dB 각각 더 좋은 성능을 나타냈으며 더 높은 EbNo일때 더 큰 성능 차이를 보여 주고 있다. 또한 채널이 시골 환경과 같이 주파수 플랫 할수록 필터에 대한 영향이 큰 것을 확인 할 수 있다.

Ⅵ. 결 론

본 논문에서는 다양한 채널환경에서 UFMC시스템의 필터가 성능에 미치는 영향에 대하여 조사하고 더 좋은 성능을 갖기 위한 필터의 주파수 영역 특징에 관하여 분석하고 성능 평가를 실시하였다. UFMC 시스템에서 요구되는 필터의 특징은 필터 임펄스 응답의 길이가 같을 때 좀 더 날카로운 스커트 특성을 갖는 것이 저지대역의 크기를 줄이는 것보다 성능향상에 유리할 것으로 예측되었고 가장 날카로운 스커트 특성을 갖는 Wavelet 필터의 BER성능이 가장 좋게 나왔다. 또한 전송 채널 환경이 주파수 선택적일 수록 필터에 덜 민감한 것을 확인 하였는데 다양한 채널에서 모두 Wavelet 필터가 가장 좋은 BER 성능을 보여주었다. 따라서 Wavelet 필터 기반의 UFMC 시스템을 사용한다면 기존의 UFMC시스템에서 사용되어 왔던 Dolph-Chebychev 필터를 사용하는 것 보다 향상된 시스템 성능을 달성 할 수 있을 것으로 예측된다.

References

[1] A. Loulou and M. Renfors, “Enhanced OFDM for fragmented spectrum use in 5G systems,” Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, vol. 26, no.1, pp. 31 - 45, 2014.

[2] Gerhard Wunder, Peter Jung, Martin Kasparick, Thorsten Wild, and more authors, “GNOW: non-orthogonal, asynchronous waveforms for future mobile applications”, IEEE Communications Magazine, Vol. 52, no.2, pp. 97-105, Feb. 2014.

[3] K. S. Yeo, M. C. Chian, and T. Ng, “Internet of Things: Trends, challenges and applications,” 2014 International Symposium on Integrated Circuits (ISIC), pp. 568 - 571, 2014.

[4] B. Farhang-Boroujeny, “OFDM versus filter bank multicarrier”, IEEE Signal Process. Mag., Vol. 28, pp. 92 -112, May 2011.

[5] Kyuseop Lee and Ginkyu Choi, “Performance Evaluation for Speed of Mobile Devices in UFMC Systems”, The Journal of the Institue of Internet, Broadcasting and Communication(JIIBC), Vol. 17, No. 1, pp. 53-58, Feb. 28, 2017.

[6] Young-Jin Hong, “Performance of M-ary OSTBC MIMO System”, Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society(JKAIS), Vol. 16, No. 9, pp. 6269-6273, 2015.

[7] Thorsten Wild, Frank Schaich, Stephan ten Brink, and Jean-François Frigon, “Universal Filtered Multi-Carrier Technique for Wireless Systems Beyond LTE”, 9th Int. Workshop on Broadband

Wireless Access IEEE Globecom'13, Atlanta, Dec. 2013.

[8] Thorsten Wild, Frank Schaich, and Yejian Chen, "5G Air Interference Design based on Universal Filtered (UF-) OFDM", Int. Conf. on Digital Signal Processing, DSP14, Hongkong, Aug. 2014.

[9] Kyuseop Lee and Ginkyu Choi, "Effect of CFO on UFMC System", The Journal of the Institue of Internet, Broadcasting and Communication(JIIBC), Vol. 16, No. 3, pp. 97-102, Jun. 30, 2016.

[10] P. P. Vaidyanathan, Multirate Systems and Filter Banks, Prentice Hall NJ, 1993.

[11] Ali N. Akansu and Richard A. Haddad, Multiresolution Signal Decomposition, Academic Press 2001.

[12] 3rd Generation Partnership Project, Technical Specification Group Radio Access Network, Deployment aspects (Release 10), April 2001.

저자 소개

이 규 섭(준회원)

- 2009년: 홍익대학교 전자전기공학과 (BS)
- 2011년: 홍익대학교 전자전산공학과 (MS)
- 2011년 - 2017년: 홍익대학교 전자전산공학과 (Ph.D)

<주관심분야> : 차세대이동통신, wavelet, uwb, 통신신호처리

최 진 규(종신회원)

- 1983년: 성균관대학교 전자공학과 (BS)
- 1990년: (미)Polytechnic Univ. 전자전기공학과 (MS)
- 1994년: (미)Polytechnic Univ. 전산과학과 (MS)
- 1996년: (미)Polytechnic Univ. 전자전기공학과 (Ph.D)
- 1983년-1986년: LG 전자, Motolora Korea 연구원
- 1996년-2004년: 삼성전자 통신연구소 수석연구원
- 2004년 - 현재: 홍익대학교 과학기술대 전자전기공학과 교수

<주관심분야> : 차세대이동통신, 초광대역 통신, 통신신호처리

※ 이 논문은 2015학년도 홍익대학교 학술연구진흥비에 의하여 지원되었음. 교신저자 : 최진규