

# 5세대 이동통신을 위한 후보 변조기술들의 시간과 주파수 자원 비교 분석

## Comparison Analysis of Time and Frequency Resource of Candidate Waveforms for 5G Mobile Communications

안 창 영 · 유 흥 균

Changyoung An · Heung-Gyoon Ryu

### 요 약

5세대 이동통신을 위한 후보변조기술에서 중요한 평가 요인 중 하나는 OOB(Out of Band) 전력 저감을 통한 주파수 효율 향상 특성이다. 본 논문에서는 5세대 이동통신을 위한 후보변조기술로 주목받고 있는 UPMC(Universal Filtered Multi-Carrier), FBMC(Filter Bank Multi-Carrier), W-OFDM(Weighted Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 시스템에 대한 시간 자원 할당에 대한 주파수 자원의 효율을 평가하고 비교 분석한다. 시뮬레이션을 통해 시간 자원 할당에 대한 스펙트럼 효율 향상 특성을 확인하였으며, 추가적으로 확보할 수 있는 주파수 자원을 확인하였다. 본 논문에서는 동일한 데이터 비트를 전송하며, 4개의 심볼을 전송하는 조건에서, 시스템이 선형일 때, 각 시스템은 모두 유사한 시간-주파수 자원 활용 효율을 보이나, 비선형 조건에서는 FBMC의 시간-주파수 자원 활용 효율이 가장 크게 저하되는 것을 확인하였다.

### Abstract

One of evaluation indicators of candidate waveforms for 5G mobile communication is spectral efficiency improvement by OOB(Out of Band) power reduction technique. In this paper, time-frequency resource allocation characteristic of UPMC(Universal Filtered Multi-Carrier), FBMC(Filter Bank Multi-Carrier), and W-OFDM(Weighted Orthogonal Frequency Division Multiplexing) system is evaluated and analyzed. As simulation results, spectral efficiency characteristic of these systems have been improved according to time resource allocation. In this paper, we can confirm that each system has similar time-frequency efficiency characteristic when the number of transmission bit is same and four symbols are transmitted with the linear system condition. Also, we can conclude that FBMC system has the lowest time-frequency resource efficiency under the nonlinear condition.

Key words: Time Resource, Frequency Resource, Spectral Efficiency, 5G Mobile Communication, New Waveform

### I. 서 론

새로운 고화질, 고용량 및 고차원 멀티미디어 서비스

에 대한 요구가 증가하고 있다. 이와 같은 서비스를 지원하기 위한 고성능 무선접속 기기들의 수가 전 세계적으로 급증하고 있는 추세이다. 이러한 차세대 무선접속 기

「이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 정보통신기술진흥센터의 지원을 받아 수행된 연구임(No. R0101-16-244, 초연결 스마트 서비스를 위한 5G 이동통신 핵심 기술 개발), 그리고 이 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2016R1D1A1B01008046), 그리고 본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 정보통신·방송 연구개발사업의 일환으로 수행하였음 [B0717-16-0081, 밀리미터파 대역 5G 안테나 3차원 빔 측정설비 기반구축].」

충북대학교 전자공학과(Department of Electronics Engineering, Chungbuk National University)

· Manuscript received August 22, 2016 ; Revised October 21, 2016 ; Accepted November 8, 2016. (ID No. 20160822-090)

· Corresponding Author: Heung-Gyoon Ryu (e-mail: ecomm@cnu.ac.kr)

기들은 높은 무선통신용량을 요구한다. 이와 같은 흐름은 현재 4G(4th Generation) 이동통신에서 5G(5th Generation) 이동통신으로 세대교체를 이끌고 있다<sup>[1]</sup>. 5G 이동통신은 4G 이동통신보다 다양한 서비스 시나리오를 지원해야 한다. 5G 이동통신을 위한 주요 시나리오는 고용량 모바일 통신(Enhanced Mobile Broadband: eMBB), 다수의 기기 지원(Massive Machine Type Communication: mMTC) 및 고신뢰와 초저지연 무선통신(Ultra-reliable and Low-latency Communication: URLLC)로 구성된다<sup>[2]</sup>. mMTC를 위해서 단일반송파 기반의 변조기술이 고려되고 있으며, eMBB 및 URLLC를 위해서는 다중반송파 기반의 변조 기술이 고려되고 있다.

무선통신용량을 향상시키기 위한 가장 직관적인 방법은 보다 넓은 주파수 대역을 사용하는 것이다. 그러나 현재 주파수 자원 부족으로 인하여 넓은 주파수 대역을 할당하기가 어려운 상황이다. 따라서 현재 주어진 주파수 자원을 효율적으로 사용할 수 있는 기술이 5G 이동통신을 위한 기술로 큰 주목을 받고 있다. 주파수 효율을 향상시키기 위해 고려되고 있는 사항중 하나로 OOB(Out of Band) 전력을 저감시키는 기술에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다.

OOB를 저감시키는 기술은 크게 시간영역의 필터링 기법과 윈도우 기법으로 나뉜다<sup>[3][4]</sup>. 시간영역의 필터링 기법을 사용하는 후보변조기술로 UFMC(Universal Filtered Multi-Carrier) 기술이 있으며, 시간영역의 윈도우 기법을 사용하는 후보변조기술로는 FBMC(Filter Bank Multi-Carrier) 기술이 있다<sup>[5]</sup>. 추가로 최근 4G 이동통신 상용 무선통신에서 사용되고 있는 W-OFDM(Weighted Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 기술도 5G 이동통신을 위한 후보변조기술로 고려되고 있다. 이 기술은 시간영역 윈도우 기술을 사용한다. 주요 후보기술인 UFMC, FBMC 그리고 W-OFDM 기술은 모두 OOB를 효과적으로 저감시킬 수 있으나, 실제 시스템의 구현에서 발생할 수 있는 HPA(High Power Amplifier) 비선형성과 같은 요인으로 인해 OOB 전력 저감 성능이 열화될 수 있음이 많은 연구를 통해 밝혀졌다<sup>[6]~[8]</sup>. 각 기술은 서로 상이한 특성을 가지고 있기 때문에, 적합한 시나리오에 선택적으로 사용되는 것이 고려되고 있다. 각 시나리오는 서로 다른 시간 자원 및

주파수 자원이 할당된다. 따라서 각 시나리오에 적합한 후보변조기술을 파악하기 위해서는 시간 및 주파수 자원의 할당에 대한 전체적인 비교 분석 결과가 요구된다.

본 논문에서는 선형 및 비선형 조건에서 UFMC, FBMC 그리고 W-OFDM 시스템의 시간영역 자원할당 및 주파수 자원 특성을 종합적으로 비교 분석 및 평가하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 각 시스템이 동일한 양의 데이터 정보를 전송할 때 요구되는 시간자원 요구량을 분석하며, 시뮬레이션을 통해 동일한 데이터 비트를 전송하는 조건에서 시간자원 사용 대비 주파수 스펙트럼 특성 및 주파수 자원 효율 특성을 비교 분석한다.

## II. 5세대 이동통신 후보 변조기술

### 2-1 OFDM

그림 1은 CP(Cyclic Prefix)-OFDM 시스템의 송수신기 모델을 나타낸다. OFDM 시스템은 iDFT(inverse Digital Fourier Transform) 및 DFT 연산을 통해 다수의 데이터 심볼을 각 부반송파에 맵핑 및 디맵핑한다<sup>[9]</sup>.

OFDM 송신기에서는 CP(Cyclic Prefix)를 추가하여 다중경로에 의한 ISI(Inter-Symbol Interference)를 완화하여 수신기에서 저복잡도의 단일 탭 등화기를 사용할 수 있게 한다. 이와 같은 수신기의 고속 처리를 통해 고속 데이터의 송수신을 가능하게 하여 4G 이동통신의 핵심기술로 선정되었다. 그러나 기본적인 CP-OFDM 시스템은 각 부반송파에 Rectangular Window가 사용되기 때문에 주파수 스펙트럼에서 OOB 전력이 높은 단점을 가지고 있다<sup>[9][10]</sup>. 이와 같은 높은 OOB 전력으로 인하여, CP-OFDM 시스템

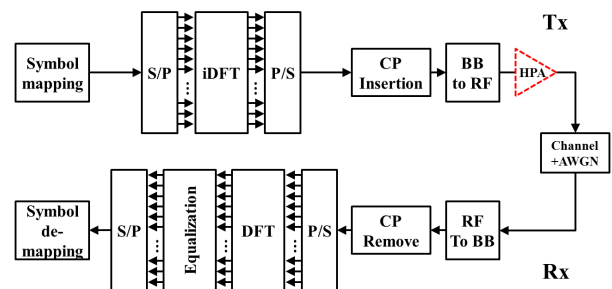


그림 1. CP-OFDM 송수신기의 구성도  
Fig. 1. Block diagram of CP-OFDM transceiver.

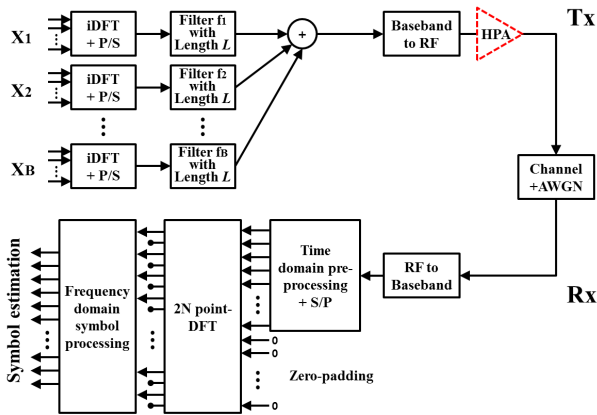


그림 2. UFMC 송수신기의 구성도  
Fig. 2. Block diagram of UFMC transceiver.

은 양 끝단의 많은 부반송파를 사용하지 못하여 스펙트럼 효율이 저하된다.

### 2-2 UFMC

그림 2는 UFMC 시스템의 송수신기 구성을 나타낸다. UFMC는 기존의 OFDM의 부반송파를 서브밴드로 나누고, 시간영역 필터링 기법을 사용하여 전송 신호의 OOB 전력을 저감시킨다<sup>[11],[12]</sup>. 시간영역 필터링을 하게 되면 필터의 응답성분이 생기기 때문에 필터링 전에 기존 CP-OFDM에서 CP에 해당 하는 부분에 ZP(Zero Padding)을 추가한 다음, 시간영역 필터링을 수행한다. UFMC 시스템에서 시간영역 필터링을 통해 저감시킨 OOB 전력은 실제 시스템 구성에서 발생할 수 있는 HPA 비선형 특성에 의해 열화될 수 있다.

### 2-3 FBMC

그림 3은 FBMC 시스템의 송수신기 구성을 나타낸다. FBMC 시스템은 Synthesis Filter Bank에서 시간영역 윈도우 기법을 사용하여 OOB 전력을 저감시킨다<sup>[13]</sup>. 선형 조건에서 FBMC는 가장 좋은 OOB 특성을 보인다<sup>[14]</sup>. 즉, 스펙트럼의 OOB가 매우 작아서 낭비되는 스펙트럼 영역이 줄고, 이로 인해 높은 스펙트럼 효율을 갖게 된다<sup>[15]</sup>.

그러나 FBMC 역시 HPA 비선형성에 의해 OOB 저감 성능이 열화된다. 더욱이 FBMC는 OQAM(Offset Quadrature Amplitude Modulation) 변조를 사용하기 때문에 시스

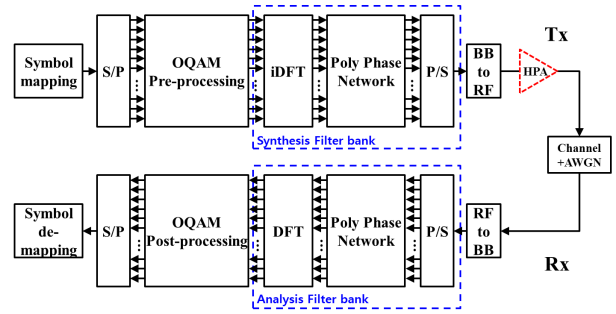


그림 3. FBMC 송수신기의 구성도  
Fig. 3. Block diagram of FBMC transceiver.

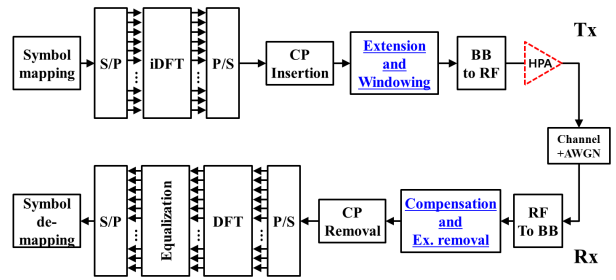


그림 4. W-OFDM 송수신기의 구성도  
Fig. 4. Block diagram of W-OFDM transceiver.

템 복잡도가 향상되며, MIMO(Multiple Input Multiple Output) 기술과 같은 기존 기술과의 결합이 쉽지 않은 단점이 있다<sup>[15]</sup>.

### 2-4 W-OFDM

그림 4는 W-OFDM 시스템의 송수신기 구성을 나타낸다. W-OFDM 시스템은 시간영역 윈도우 기법을 사용하여 송신신호 스펙트럼의 OOB 전력을 저감시킨다<sup>[15]</sup>.

W-OFDM 시스템은 기존의 CP-OFDM 시스템과 동일한 방법으로 신호를 생성한 후, 신호의 시작과 끝을 일부 확장한 뒤 시간영역 윈도우 기법을 수행한다. W-OFDM 시스템의 송신신호 OOB 특성도 HPA 비선형 특성에 의해 열화될 수 있다.

## III. 시간 자원 할당

본 논문에서는 OFDM, UFMC, FBMC, W-OFDM 시스템의 시간 주파수 자원 할당 비교를 위해 우선, 동일한 데이터 심볼을 전송하기 위한 시간 영역의 자원 요구량을

파악한다. III장에서는 데이터 심볼 256개를 전송할 때 요구되는 전체 시간 자원 및 오버헤드를 파악한다.

### 3-1 OFDM

그림 5는 CP-OFDM 시스템의 시간 자원 할당 구성을 보여준다. CP-OFDM 시스템의 송신신호는 데이터가 맵핑된 OFDM 심볼과 ISI 영향을 줄이기 위한 CP로 구성된다. CP의 크기는 다중경로의 딜레이에 의해 결정된다. 본 논문에서는 iDFT 크기를 64로 고려하여 시스템의 송신신호 분석을 수행하였다. iDFT 크기가 64이고, CP가 9일 경우, CP-OFDM 한 심볼의 시간영역 샘플의 수는 총 73이 된다. 이런 CP-OFDM 심볼을 4개 전송할 경우, 총 전송신호의 길이는  $73 \times 4 = 292$ 가 된다. 즉, 추가적인 오버헤드는 36이 된다.

### 3-2 UFMC

그림 6은 UFMC 시스템의 송신신호의 시간 자원 할당 구성을 나타낸다. UFMC 시스템의 송신신호는 CP-OFDM 시스템의 송신신호 길이와 같다. 두 시스템의 차이점은 UFMC 시스템은 CP 대신 ZP를 사용하는 것이다. ZP는 OFDM 심볼이 시간영역 필터링되었을 때, 필터의 응답 길이만큼 할당된다. 일반적으로 ZP의 길이는 CP의 길이와 같은 길이로 구성된다. 이에 따라 UFMC 한 심볼의 길이는 총 73으로 CP-OFDM 한 심볼의 길이와 같다. 따라서 4개의 심볼을 전송할 경우, 총 전송신호의 길이는  $73 \times 4 = 292$ 가 된다. 즉, 추가적인 오버헤드는 36이 된다.

### 3-3 FBMC

그림 7은 FBMC 시스템에서 한 심볼의 시간 자원 할당 방식을 보여준다. 여기에서  $T$ 는 iDFT 크기를 나타낸다.

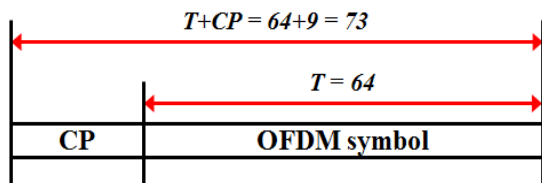


그림 5. CP-OFDM 시스템의 시간 자원 할당  
Fig. 5. Time resource allocation of CP-OFDM system.

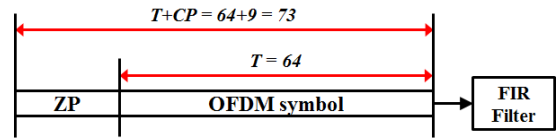


그림 6. UFMC 시스템의 시간 자원 할당  
Fig. 6. Time resource allocation of UFMC system.

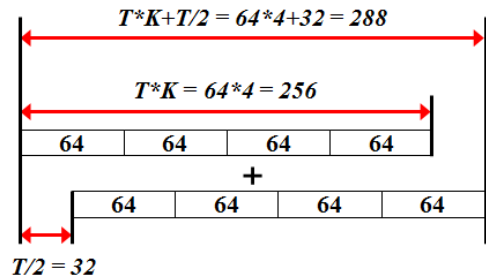


그림 7. FBMC 시스템에서 한 심볼의 시간 자원 할당  
Fig. 7. Time resource allocation of a symbol in FBMC system.

FBMC 시스템은 OQAM 변조를 사용한다. 하나의 스트림과  $T/2$ 만큼 지연된 또 다른 스트림이 더해져 하나의 심볼이 생성된다. 본 논문에서는 Overlapping Factor가 4인 FBMC를 고려하여, 하나의 스트림은 iDFT 크기의 4배에 해당하는 256이 되며, 또 다른 스트림은 32만큼 지연되어 더해지므로 한 심볼 전체의 길이는 288이 된다. CP-OFDM 및 UFMC와 비교해 보면 한 심볼의 길이가 매우 긴 특징이 있다.

그림 8은 FBMC 시스템에서 다중 심볼의 전송하는 방법을 나타낸다. FBMC 시스템은 하나의 심볼을 완벽하게 분리해서 각각 전송하는 것이 아니라, 그림 8과 같이 추가적으로 전송하는 심볼을  $T$ 만큼 지연시켜 중첩하여 전송함으로써 시간 자원을 보다 효율적으로 사용하게 된다. 이와 같은 방식으로 4개의 심볼을 전송하게 될 경우, 전송신호의 길이는 총  $288+64+64+64=480$ 이 된다. 즉, 추가적인 오버헤드는 224가 된다. 4개의 심볼을 전송함에 있어서 CP-OFDM 및 UFMC 시스템과 비교하여 더욱 많은 시간 자원을 사용하게 되지만, 더욱 많은 심볼을 전송할 경우 지속적으로 64씩 길이가 증가되므로, 73씩 증가하는 CP-OFDM 및 UFMC 시스템에 비하여 시간 자원 효율이 향상되게 된다.

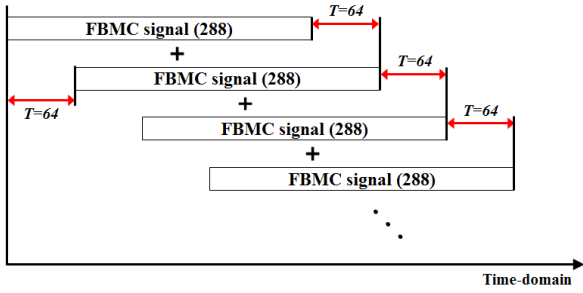


그림 8. FBMC 시스템에서 다중 심볼 전송  
Fig. 8. Multiple symbols transmission in FBMC system.

### 3-4 W-OFDM

그림 9는 W-OFDM 시스템에서 한 심볼의 시간 자원 할당 구성을 나타낸다. W-OFDM 시스템의 한 심볼은 CP-OFDM 심볼에서 시작과 끝에 길이가 Ex만큼 확장된다. 본 논문에서는 확장 길이 Ex를 6을 고려하였다. W-OFDM 시스템에서 Ex의 길이를 증가시킬 경우, 주파수 스펙트럼에서 더욱 좋은 OOB 특성을 보이게 되지만, 시간 자원을 더욱 많이 소비하는 단점이 있다.

그림 10은 W-OFDM 시스템에서 다중 심볼 전송을 위한 방법을 보여준다. 4개의 심볼을 전송할 때, 완전히 분리하여 4개의 심볼을 전송하는 것이 아니라, 각 심볼의

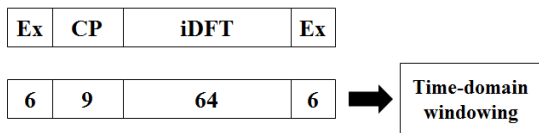


그림 9. W-OFDM 시스템에서 한 심볼의 시간 자원 할당  
Fig. 9. Time resource allocation of a symbol in W-OFDM system.

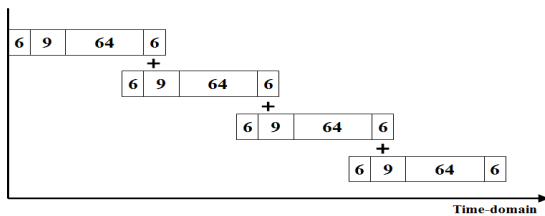


그림 10. W-OFDM 시스템에서 다중 심볼 전송  
Fig. 10. Multiple symbols transmission in W-OFDM system.

Ex 부분이 그림 10과 같이 겹치도록 하여 신호를 전송하게 된다. 따라서 각 심볼이 더해질 때마다 CP-OFDM 및 UFMC와 같이 길이가 73씩 증가하게 되며, 전체 송신 신호의 시작과 끝에 존재하는 Ex 길이만큼 추가적으로 확장되게 된다. 따라서 4개의 심볼을 전송할 때, 송신 신호의 총 길이는  $6 + 73 \times 4 + 6 = 304$ 가 된다. 즉, 추가적인 오버헤드는 48이 된다.

## IV. 시뮬레이션 결과 및 분석

본 논문에서는 각 시스템의 시간 자원 할당에 대한 주파수 영역의 스펙트럼 특성을 비교 분석하기 위하여 표 1과 같은 시뮬레이션 조건을 사용하였다.

본 논문에서는 각 시스템에서 전송하는 비트의 수를 모두 128개로 동일하게 설정하였다. 전송 비트를 128개로 하기 위하여 각 시스템은 모두 동일한 16개의 부반송파를 사용하였으며, 2비트를 한 번에 전송하는 QAM 및 OQAM 변조를 고려하였다. 그리고 4개의 심볼을 전송하는 상황을 고려하였다. UFMC 시스템에서 시간영역 필터링을 위한 필터로 Chebyshev 필터를 사용하였으며, CP-

표 1. 시뮬레이션 환경  
Table 1. Simulation parameters.

Parameter	Value
Modulation	QAM
# of total subcarrier (Total system)	64
# of used subcarrier (Total system)	16
# of null subcarrier (Total system)	48
CP & ZP length for CP-OFDM and UFMC	9
Filter for UFMC	Chebyshev Attenuation=60 dB Length=10
Filter for FBMC	Phydyas prototype $H_0=1$ $H_1=0.97196$ $H_2=0.7071$ $H_3=0.235147$
# of sub-band in UFMC	64/8
Extension length for W-OFDM	6

표 2. HPA 비선형 조건(Saleh 비선형 HPA 모델)

Table 2. Condition of HPA nonlinearity(Saleh nonlinear HPA model).

Condition	AM-AM	AM-PM
0 (linear)	$\alpha_A=1$	$\alpha_\phi=0$
	$\beta_A=0$	$\beta_\phi=0.01$
1	$\alpha_A=1$	$\alpha_\phi=0.01$
	$\beta_A=0.01$	$\beta_\phi=0.01$
2	$\alpha_A=1$	$\alpha_\phi=0.03$
	$\beta_A=0.02$	$\beta_\phi=0.01$
3	$\alpha_A=1$	$\alpha_\phi=0.05$
	$\beta_A=0.03$	$\beta_\phi=0.01$
4	$\alpha_A=1$	$\alpha_\phi=0.07$
	$\beta_A=0.04$	$\beta_\phi=0.01$

OFDM의 CP 길이와 같은 필터 응답을 고려하기 위해 Chebyshev 필터의 길이를 10으로 설정하였다.

본 논문에서는 각 시스템에 비선형 HPA 상황을 고려하기 위하여 Saleh 모델을 사용하였다. Saleh 모델의 비선형 강도는 Saleh 모델의 파라미터 수치를 조절하여 변경할 수 있다. 본 논문에서 고려한 비선형 특성의 파라미터는 표 2와 같다. 조건 0은 선형 조건을 나타내며, 조건 1에서 4는 비선형 조건을 나타낸다. 조건 1은 가장 약한 비선형 조건을 나타내며, 조건 4는 가장 강한 비선형 조건을 나타낸다. 본 논문에서는 각 HPA 비선형 조건에 대한 스펙트럼 특성을 각 시스템별로 평가하고 분석하였다.

본 논문에서는 OOB 전력의 제한을 -50 dB로 설정하였다. 이는 송신 전력을 23 dBm으로 설정하고, 4G LTE 시스템의 OOB Emission limit가 -25 dBm이며, 약간의 추가

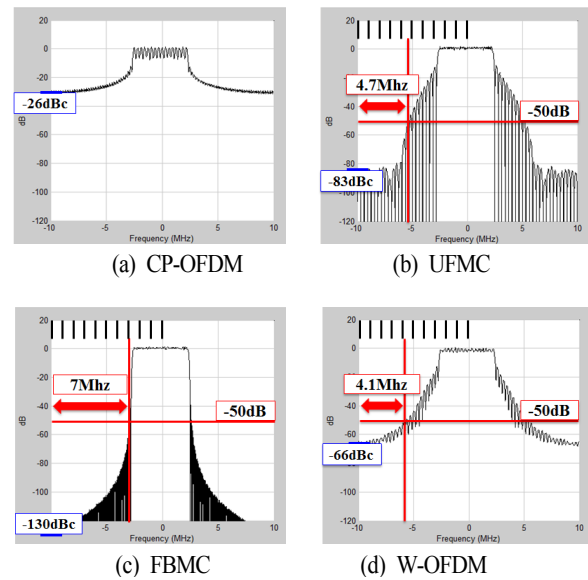


그림 11. 선형 HPA 조건에서 각 시스템의 스펙트럼 특성  
Fig. 11. Spectrum characteristic of each system in linear HPA condition.

마진을 고려하여 차이 50 dB를 OOB 전력으로 고려하였다.

그림 11은 각 시스템의 선형 조건에서의 스펙트럼 특성을 나타낸다. 최외각의 부반송파로부터 Offset이 7.5 MHz인 부분의 OOB 전력을 dBc 단위로 표현하였다. 그림 11에서 UFMC, FBMC, W-OFDM 시스템은 OOB 저감 기술을 통해 각각 4.7 MHz, 7 MHz, 4.1 MHz의 추가적인 주파수 자원을 확보할 수 있음을 확인할 수 있다.

그림 12에서 그림 14는 비선형 HPA 조건에서의 최외각 부반송파로부터 Offset이 7.5 MHz 부분의 OOB 전력과 추가적으로 확보할 수 있는 주파수 자원의 크기를 보여준다. 그림 12에서 그림 14를 모두 확인해 보면, 비선형

표 3. HPA 비선형 조건에 따른 시간 자원 할당 및 OOB 특성 비교

Table 3. Time resource allocation and OOB characteristic comparison according to condition of HPA nonlinearity.

	OFDM	UFMC	FBMC	W-OFDM
Linear	-26 dBc / 292	-83 dBc / 292	-130 dBc / 480	-66 dBc / 304
HPA condition 1	-26 dBc / 292	-82 dBc / 292	-85 dBc / 480	-66 dBc / 304
HPA condition 2	-26 dBc / 292	-74 dBc / 292	-75 dBc / 480	-66 dBc / 304
HPA condition 3	-26 dBc / 292	-66 dBc / 292	-67 dBc / 480	-65 dBc / 304
HPA condition 4	-26 dBc / 292	-63 dBc / 292	-65 dBc / 480	-63 dBc / 304

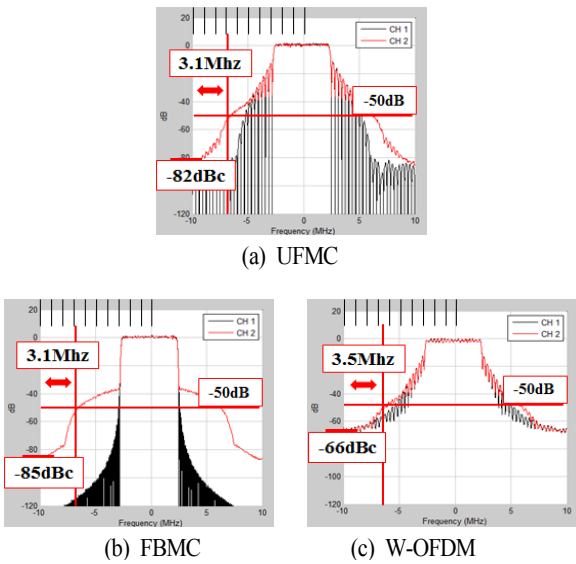


그림 12. 비선형 HPA 조건 1에서 각 시스템의 스펙트럼 특성  
 Fig. 12. Spectrum characteristic of each system in nonlinear HPA condition 1.

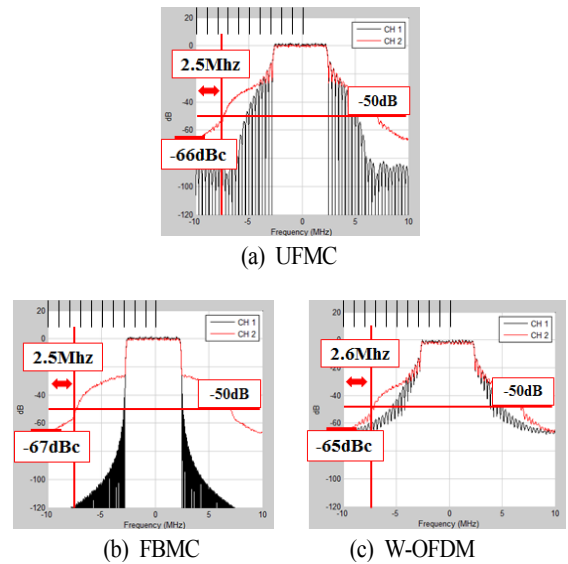


그림 14. 비선형 HPA 조건 3에서 각 시스템의 스펙트럼 특성  
 Fig. 14. Spectrum characteristic of each system in nonlinear HPA condition 3.

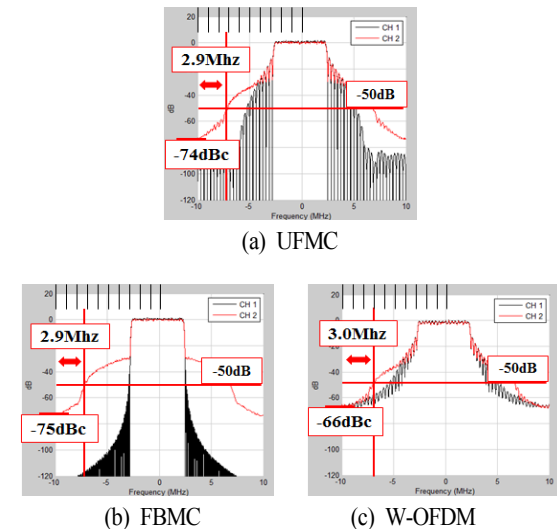


그림 13. 비선형 HPA 조건 2에서 각 시스템의 스펙트럼 특성  
 Fig. 13. Spectrum characteristic of each system in nonlinear HPA condition 2.

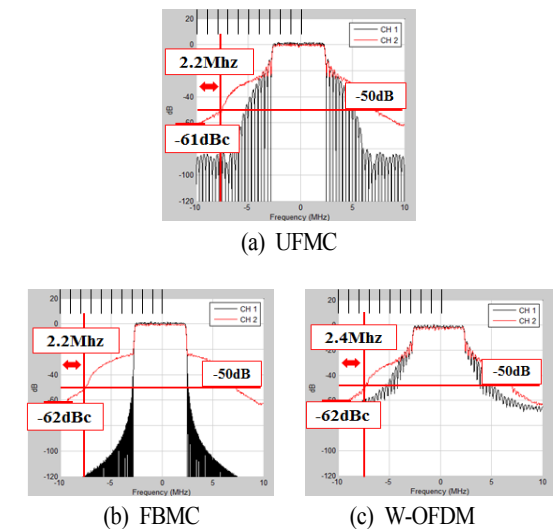


그림 15. 비선형 HPA 조건 4에서 각 시스템의 스펙트럼 특성  
 Fig. 15. Spectrum characteristic of each system in nonlinear HPA condition 4.

강도가 증가할수록 확보할 수 있는 주파수 자원이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 그림 11에서 그림 14의 시뮬레이션 결과는 표 3과 표 4에 정리되어 있다.

표 4에서 비선형 특성이 존재할 경우, 각 시스템의 추가적인 주파수 자원 확보 특성이 유사해짐에 따라 동일한 데이터 정보 심볼 256개를 전송할 때 시간 자원을 가

표 4. HPA 비선형 조건에 따른 각 시스템의 시간 및 주파수 자원 특성 비교(추가 확보 가능한 주파수 자원 / 시간 자원 할당)

Table 4. Time and frequency resource characteristic comparison according to condition of HPA nonlinearity(Additionally securable frequency resource / Time resource allocation).

	UFMC	FBMC	W-OFDM
Linear	4.7 MHz / 292	7 MHz / 480	4.1 MHz / 304
HPA condition 1	3.1 MHz / 292	3.1 MHz / 480	3.5 MHz / 304
HPA condition 2	2.9 MHz / 292	2.9 MHz / 480	3.0 MHz / 304
HPA condition 3	2.5 MHz / 292	2.5 MHz / 480	2.6 MHz / 304
HPA condition 4	2.2 MHz / 292	2.2 MHz / 480	2.4 MHz / 304

장 많이 사용하게 되는 FBMC가 가장 시간 자원 대비 주파수 활용의 효율이 좋지 않은 것을 확인할 수 있다.

### V. 결 론

본 논문에서는 5G 이동통신을 위한 후보변조기술로 주목받고 있는 UFMC, FBMC, W-OFDM 기술의 시간 할당 방식과 이에 따른 주파수 자원 활용 특성을 정량적으로 파악하고 비교 분석하였다. 시뮬레이션의 결과로 OFDM 시스템에 비하여 UFMC, FBMC, W-OFDM은 OOB 저감 기술을 통해 추가적인 주파수 자원을 확보할 수 있으나, 비선형 조건이 인가됨에 따라 추가적인 주파수 자원 확보량이 감소되는 것을 확인할 수 있다. 비선형 조건에서 각 시스템이 4개의 심볼을 연속해서 전송할 때, FBMC 시스템이 가장 좋지 않은 시간-주파수 자원 활용 효율을 보이며, UFMC 및 W-OFDM 시스템은 유사한 효율을 보임을 확인할 수 있다.

### References

[1] E. Dahlman, G. Mildh, S. Parkvall, J. Peisa, J. Sachs, Y. Selén, and J. Sköld, "5G wireless access: requirements and realization", *Communications Magazine, IEEE*

*EE*, vol. 52, no. 12, pp. 42-47, Dec. 2014.

[2] Shanzhi Chen, Jian Zhao, "The requirements, challenges, and technologies for 5G of terrestrial mobile telecommunication", *Communications Magazine, IEEE*, vol. 52, no. 5, pp. 36-43, May 2014.

[3] G. Wunder et al., "5GNOW: non-orthogonal, asynchronous waveforms for future mobile applications", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 2, pp. 97-105, Feb. 2014.

[4] P. Banelli et al., "Modulation formats and waveforms for the physical layer of 5G wireless networks: Who will be the heir of OFDM?", in *arXiv: 1407.5947*, Jul. 2014.

[5] F. Schaich, T. Wild, "Waveform contenders for 5G - OFDM vs. FBMC vs. UFMC", *Communications, Control and Signal Processing (ISCCSP), 2014 6th International Symposium on*, pp. 457-460, 21-23 May 2014.

[6] H. Lajnef, M. C. Dakhli, and M. H. R. Bouallegue, "The nonlinear distortion cancellation for the effect of HPA nonlinearities in filter bank based multi-carrier(FBMC) for cognitive radio systems", *2016 International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, Paphos, 2016, pp. 638-643.

[7] Dong-Hyung Lee, Changyoung An, Kyung-Lok Kung, Byeongjae Kim, and Heung-Gyoon Ryu, "Nonlinear effect on the BER and spectrum shape of OFDM, UFMC and FBMC for 5G mobile communication", *Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers*, pp. 3-14, Jun. 2016.

[8] Changyoung An, Heung-Gyoon Ryu, "Combination system design of 5G candidate modulation and full duplex communication for the spectrum efficiency enhancement", *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, pp. 369-376, Apr. 2016.

[9] V. Vakilian, T. Wild, F. Schaich, S. ten Brink, and J. -F. Frigon, "Universal-filtered multi-carrier technique for wireless systems beyond LTE", in *Globecom Workshops (GC Wkshps), 2013 IEEE*, pp. 223-228, 9-13 Dec. 2013.

[10] B. Farhang-Boroujeny, "OFDM versus filter bank multi-carrier", in *Signal Processing Magazine, IEEE*, vol. 28,



- no. 3, pp. 92-112, May 2011.
- [11] Wonsuk Chung, Beomju Kim, Moonchang Choi, Hyungju Nam, Hyunkyu Yu, Sooyoung Choi, and Daesik Hong, "Synchronization error in QAM-Based FBMC system", in *Military Communications Conference (MILCOM), 2014 IEEE*, pp. 699-705, Oct. 2014.
- [12] Mukherjee Mithun, Lei Shu, Kumar Vikas, Kumar Prashant, and Matam Rakesh, "Reduced out-of-band radiation- based filter optimization for UFMC systems in 5G", in *Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2015 International*, pp. 1150-1155, 24-28 Aug. 2015.
- [13] Zs. Kollar, L. Varga, and K. Czimer, "Clipping-based iterative PAPR-reduction techniques for FBMC", in *17th International OFDM Workshop 2012 (InOWo'12)*, pp. 1-7, Aug. 2012.
- [14] M. Chaffi, J. Palicot, and R. Gribonval, "Closed-form approximations of the PAPR distribution for multi-carrier modulation systems", in *Signal Processing Conference (EUSIPCO), 2014 Proceedings of the 22nd European*, pp. 1920-1924, Sep. 2014.
- [15] H. Mahmoud, T. Yucek, and H. Arslan, "OFDM for cognitive radio: merits and challenges", in *Wireless Communications, IEEE*, vol. 16, no. 2, pp. 6-15, Apr. 2009.

안 창 영



2013년 2월: 충북대학교 전자공학과 (공학사)  
 2015년 2월: 충북대학교 전자공학과 (공학석사)  
 2015년 3월~현재: 충북대학교 전자공학과 박사과정  
 [주 관심분야] 차세대 무선통신시스템,

신호처리

유 흥 균



1988년~현재: 충북대학교 전자공학과 교수  
 2002년 3월~2004년 2월: 충북대학교 컴퓨터정보통신연구소 소장  
 1996년~현재: IEEE, IET 논문 심사위원  
 2002년: 한국전자파학회 학술상 수상  
 2008년: ICWMC 2008 국제학술대회 "Best

Paper Award' 수상

2009년: SPACOMM 2009 국제학술대회 "Best Paper Award" 수상  
 [주 관심분야] 무선통신시스템, 위성통신, B5G/6G 이동통신 시스템, 통신회로 설계 및 통신 신호 처리