

# 5세대 이동통신을 위한 FBMC와 UFMC 시스템의 비선형 특성 평가

## Nonlinear Characteristics Evaluation of the FBMC and UFMC System for the 5G Mobile Communication

안 창 영 · 유 흥 균

Changyoung An · Heung-Gyoon Ryu

### 요 약

5세대 이동통신 시스템에서 스펙트럼 효율을 향상시키기 위한 새로운 후보 변조기술들이 제안되고 있다. 후보 변조 기술로 다중반송파 기반의 UFMC(Universal Filtered Multi-Carrier), FBMC(Filter Bank Multi-Carrier)가 큰 주목을 받고 있으며, 최근 저복잡도 처리가 가능한 W(Weighted)-OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 시스템 또한 주목받고 있다. 본 논문에서는 기본적인 OFDM 시스템과 함께 UFMC, FBMC, W-OFDM 시스템에 HPA(High Power Amplifier) 비선형 특성이 고려되었을 경우, 각 시스템의 스펙트럼 특성과 BER(Bit Error Rate) 특성을 종합적으로 평가하여 보다 유력한 시스템을 찾는다. 시뮬레이션 결과로, 동일한 비선형 HPA 환경에서는 UFMC, FBMC, W-OFDM 시스템이 모두 유사한 스펙트럼 특성과 BER 특성을 보이는 것을 확인할 수 있다. 이러한 이유로 비선형 HPA 환경에서는 시간영역에서 저복잡도의 Windowing 처리만을 요구하는 W-OFDM 시스템이 다른 시스템에 비하여 유리함을 확인할 수 있다.

### Abstract

Recently, novel candidate waveform techniques for spectral efficiency improvement was proposed in order to satisfy key performance indicators(KPIs) of 5th generation(5G) mobile communication. Multi-carrier based universal filtered multi-carrier(UFMC) and filter bank multi-carrier(FBMC) are very famous as 5G candidate waveform techniques. Also, weighted orthogonal frequency division multiplexing (W-OFDM) that has low-complexity is receiving the spotlight slowly. In this paper, firstly, we describe a basic OFDM system. And then, we also describe UFMC, FBMC, and W-OFDM system. Next, we evaluate and analyze spectrum and BER performance of these systems under the nonlinear high power amplifier(HPA) environment. As simulation results, spectrum characteristic and BER performance of UFMC, FBMC, and W-OFDM are similar to each other. Therefore, under the nonlinear HPA environment, W-OFDM system is more advantageous because W-OFDM system uses a simple time-domain windowing technique and has similar characteristics to the others.

Key words: FBMC, UFMC, W-OFDM, HPA Nonlinearity, Low Complexity

### I. 서 론

5G(5th Generation) 이동통신을 위한 다양한 연구가 진

행되고 있다. 5G 이동통신은 4G 이동통신 시스템에 비하여 더욱 높은 KPI(Key Performance Indicator)를 요구한다<sup>[1]</sup>. 이러한 KPI를 요구하는 5G 이동통신의 주요 시나리오

「이 논문은 2015년도 충북대학교 학술연구지원사업의 교내연구비 지원에 의하여 연구되었음(This work was supported by the intramural research grant of Chungbuk National University in 2015).」

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

· Manuscript received April 7, 2016 ; Revised June 27, 2016 ; Accepted July 28, 2016. (ID No. 20160407-037)

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

는 향상된 광대역 모바일 통신(eMBB: Enhanced Mobile Broadband), 초 다수 디바이스 통신(Massive Internet of Things), 저지연과 고신뢰성 통신(Mission-critical Services)으로 분류할 수 있다<sup>[2],[3]</sup>. 5G 이동통신의 시나리오를 실현하기 위하여 주요 KPI를 만족시키기 위한 다양한 연구가 통신의 각 계층에서 활발히 이루어지고 있다<sup>[3]</sup>. 특히, 물리계층에서는 스펙트럼 효율을 향상시키기 위해 효과적인 스펙트럼 파형(waveform)을 생성할 수 있는 새로운 변조 기술에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다<sup>[4],[6]</sup>.

현재 5G 이동통신을 위한 후보 기술로는 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)과 같은 다중반송파 기반의 기술들이 주목 받고 있다<sup>[5]</sup>. 주요 후보기술로는 UFMC(Universal Filtered Multi-Carrier), FBMC(Filter Bank Multi-Carrier) 기술 등이 있으며<sup>[5],[6]</sup>, 최근 W(Weighted)-OFDM 기술 또한 주목받고 있다. 이러한 기술들은 스펙트럼의 OOB(Out-of-Band) 전력을 효과적으로 저감시키는 기술이다. OOB 전력을 저감시킬 경우, 인접 스펙트럼간의 간섭을 방지하기 위해 사용되는 보호대역(guard band)을 효과적으로 줄여 전체적인 스펙트럼 효율을 향상시킬 수 있다.

OFDM 기술은 서로 직교하는 다중반송파를 사용하여 데이터를 전송하는 기술로, 다수의 데이터를 각각의 부반송파에 맵핑하기 위하여 IDFT(inverse Discrete Fourier Transform) 및 DFT(Discrete Fourier Transform) 기술을 사용한다<sup>[6]</sup>. OFDM 기술은 CP(Cyclic Prefix)를 사용하여 다중경로페이딩 간섭을 최소화 하여 수신기의 등화 복잡도를 단일반송파 시스템에 비하여 획기적으로 줄여 고속전송을 하는 기술이다<sup>[6],[7]</sup>. 즉, 단일반송파 시스템의 경우, 높은 처리 시간을 요구하는 복잡한 등화기를 사용한 반면, OFDM 기술은 단일 탭 등화기를 사용하여 주파수 영역에서 빠르게 등화를 수행한다. 이러한 장점으로 인하여 5G 이동통신 시스템에서는 OFDM 기반의 후보 변조 기술들이 주로 연구되어지고 있다.

UFMC 기술은 다수의 부반송파를 나누어 서브밴드를 구성하고, 각 서브밴드별로 필터링을 수행하여 OOB 전력을 저감시키는 기술이다<sup>[8],[9]</sup>. FBMC 기술은 다수의 부반송파를 각각 필터링하여 OOB 전력을 저감시키는 기술이며, 가장 낮은 OOB 전력 특성을 가지고 있다<sup>[10],[11]</sup>. W-OFDM 기술은 기존 CP를 사용하는 OFDM 기술에 Win-

dowing 기법을 사용하여 OOB 전력을 저감시킨 기술이다. Windowing 기법은 상업적인 4G LTE 통신 시스템에 많이 사용되고 있으나, 3GPP(3rd Generation Partnership Project)의 표준 기술로는 등록되어 있지 않다.

이러한 후보 변조기술들은 선형 디지털 처리 후에 좋은 OOB 전력 특성을 보이지만, 실제 시스템을 구현할 때 존재하는 HPA(High Power Amplifier) 비선형성 특성으로 인해 OOB 전력이 다시 증가하게 된다. 이러한 이유는 이러한 후보 변조기술들이 다중반송파 기반의 기술이기 때문에 PAPR(Peak to Average Power Ratio)가 높고, 높은 PAPR을 갖는 신호가 HPA에서 비선형 증폭되면, 혼변조 성분이 다수 발생하여 스펙트럼의 OOB 전력이 증가하게 된다. 즉, 실제 시스템에서는 후보 변조기술들의 OOB 특성이 열화된다. 결과적으로, 실제 환경의 시스템에서도 OOB 전력이 낮은 기술이 좋으며, 만약 OOB 전력의 특성이 모두 유사하다면, 송수신 처리가 간단한, 저 복잡도 시스템이 더욱 좋은 기술로 평가될 수 있을 것이다.

본 논문의 목적은 5G 후보 변조기술들이 실제 시스템 구성에서 발생할 수 있는 HPA 비선형 환경을 고려했을 경우, 어떠한 시스템이 보다 유리한 특성을 갖는지 확인하는 것이다. 이러한 목적을 확인하기 위하여, 우선 OFDM 시스템을 시작으로 UFMC, FBMC에 대해 소개하고, 최근 새롭게 주목받고 있는 W-OFDM 시스템에 대해 심층적으로 분석하도록 한다. 그 다음, 시뮬레이션을 통해 각 시스템의 선형 및 비선형 HPA 조건에서의 스펙트럼과 BER 성능 특성을 확인한다. 최종적으로 각 시스템의 장단점과 스펙트럼 및 BER 성능을 종합적으로 비교 분석한다.

## II. 5세대 이동통신 후보 변조기술

### 2-1 OFDM

그림 1은 OFDM 시스템의 구성도를 나타낸다. 송신기에서는 IDFT연산을 이용하여 다수의 데이터 심볼을 각각의 직교 부반송파에 맵핑한다<sup>[6]</sup>. 수신기에서는 DFT 연산을 통해 각각의 부반송파에 있는 수신된 심볼을 디맵핑한다. OFDM 시스템은 CP 및 단일 탭 등화기를 사용하여 수신기가 간단하고, 이로 인해 고속 수신 처리를 할 수 있

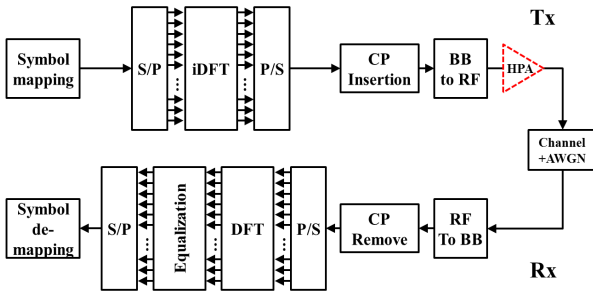


그림 1. OFDM 시스템의 구성도  
Fig. 1. Block diagram of OFDM system.

는 장점이 있지만, 스펙트럼이 높은 OOB 전력을 갖는다<sup>[6],[7]</sup>.

### 2-2 UFMC

그림 2는 UFMC 시스템의 구성도를 나타낸다. OFDM 시스템과의 차이점은 UFMC는 다수의 데이터를 그룹단위로 나누어 각각의 서브밴드에 맵핑한 후 서브밴드별로 필터링을 한 뒤 전송한다<sup>[8]</sup>. 수신기에서는 2N 크기의 DFT를 수행한 후, 각각의 서브밴드에 맵핑된 데이터를 수신한다<sup>[9]</sup>. 이러한 UFMC는 OOB 전력을 효과적으로 저감시킬 수 있다. 그러나 이러한 장점은 HPA 비선형성에 의해 열화될 수 있다.

### 2-3 FBMC

그림 3은 FBMC 시스템의 구성도를 나타낸다. FBMC

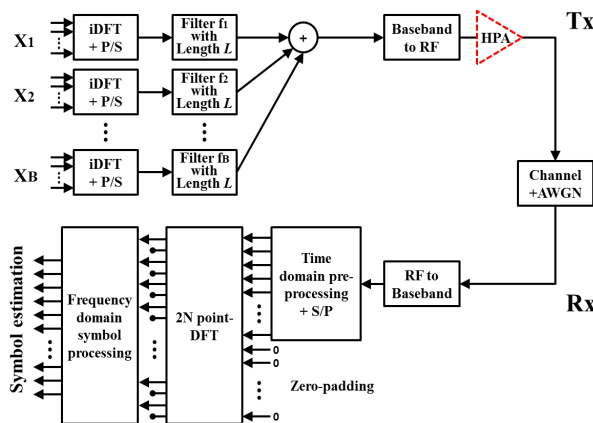


그림 2. UFMC 시스템의 구성도  
Fig. 2. Block diagram of UFMC system.

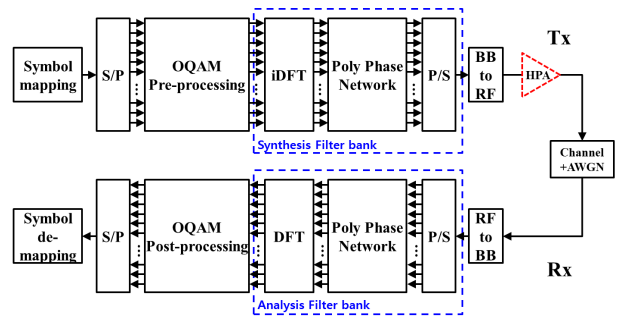


그림 3. FBMC 시스템의 구성도  
Fig. 3. Block diagram of FBMC system.

시스템은 다중반송파를 사용하는 시스템이다. 그러나 OQAM(Offset Quadrature Amplitude Modulation) 변조를 사용하며, Synthesis Filter Bank 처리를 통해 개별 반송파 단위로 필터링을 수행한다<sup>[10]</sup>. 수신기에서는 Analysis Filter Bank 처리를 통해 데이터 심볼을 수신한다. FBMC는 가장 낮은 OOB 전력 저감 특성을 보인다<sup>[11]</sup>. 일반적인 FBMC 시스템의 경우, 가장 우수한 OOB 특성을 보이지만, 높은 구현 복잡도를 갖는다<sup>[12]</sup>. 그러나 이 OOB 특성의 장점은 HPA 비선형성에 의해 열화될 수 있다.

### 2-4 W-OFDM

W-OFDM 시스템은 OFDM 기반의 시스템에 Windowing 기법을 사용한 시스템이다. 일반적으로 Windowing 기법을 사용할 경우, 간단한 시간영역의 처리만으로 OOB 전력을 효과적으로 저감시킬 수 있다. 즉, 저 복잡도 처리로도 OOB 전력을 효과적으로 저감시킬 수 있다<sup>[12]</sup>. 이와 같은 Windowing 기법은 기존의 LTE(Long-term Evolution) 및 WLAN(Wireless Local Area Network) 등에서도 사용되고 있는 기술이다. 시스템 복잡도의 큰 증가 없이 OOB 전력을 효과적으로 저감시킬 수 있음이 이미 검증되었다. 5G 이동통신에 대한 연구 동향은 초기에 우선 UFMC 및 FBMC 등과 같은 새로운 기술들이 제안되고 큰 주목을 받았다. 그러나 실제 구현에서 다양한 문제점이 발생할 수 있음이 발견되었다. 이러한 연구 결과를 통해 연구 동향은 점차적으로 기존의 기술들에 대한 재조명이 시작되면서 보다 이동통신 표준화의 핵심기구인 3GPP 등을 중심으로 효율적인 5G 이동통신을 위한 후보 기술을 찾는 방향으로 연구가 진행되고 있다<sup>[12]</sup>.

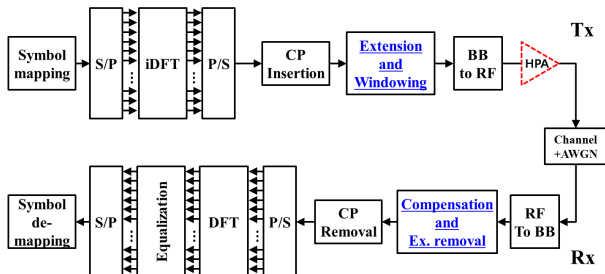


그림 4. W-OFDM 시스템의 구성도  
Fig. 4. Block diagram of W-OFDM system.

그림 4는 W-OFDM 시스템의 구성도를 나타낸다. W-OFDM 시스템은 OFDM의 송신기에서 CP를 추가한 후, 추가적인 신호 길이를 확장한다. 그 다음, Windowing을 수행하여 전송한다.

그림 5는 W-OFDM 시스템의 송신기에서 송신 신호를 생성하는 방법을 나타낸다. W-OFDM 송신 신호는 기존의 CP-OFDM 신호에 앞뒤로 Extension을 추가한 다음, Windowing 함수를 곱해서 생성한다. 이와 같은 Windowing 기술로 W-OFDM 시스템은 OOB 전력을 효과적으로 저감시킬 수 있다. 이 때, 확장되는 영역의 길이를 늘릴 경우, OOB 전력을 보다 효과적으로 저감시킬 수 있다.

그림 6은 확장 길이에 따른 W-OFDM 시스템의 송신신호 스펙트럼을 나타낸다. W-OFDM 송신 신호를 구성할 때 확장 길이를 증가시키고, 심볼의 시작과 끝을 보다 완만하게 형성할 경우, 주파수 영역의 스펙트럼에서 OOB 전력의 크기가 보다 빠르게 감소되는 것을 확인할 수 있다. 그림 6의 (a)는 양 끝 확장 길이가 10일 때를 나타내

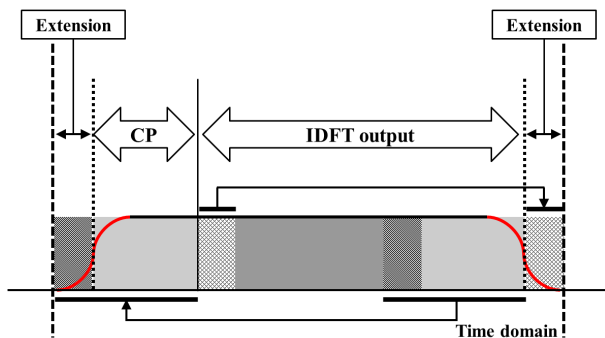
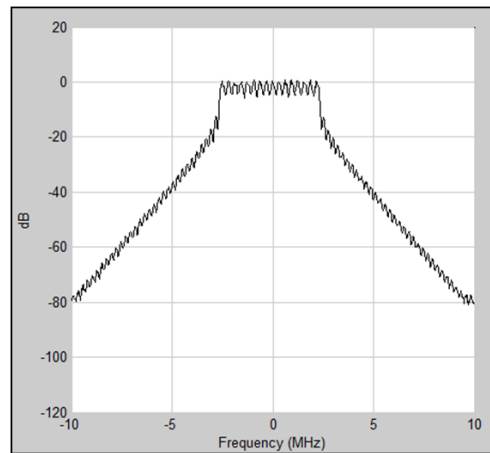
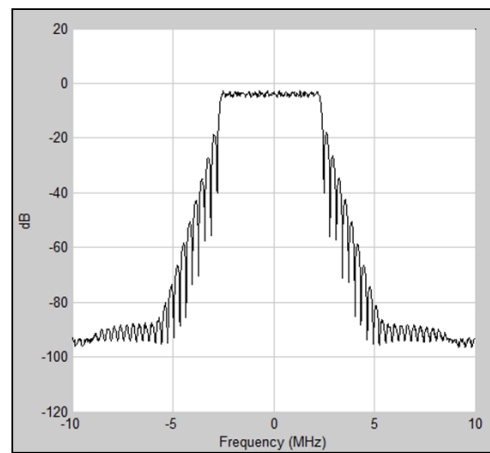


그림 5. W-OFDM 시스템의 송신 신호 생성  
Fig. 5. Tx signal generation of W-OFDM system.

며, 그림 6의 (b)는 확장 길이가 30일 때의 스펙트럼 특성을 나타낸다. 그림 6의 (a)와 (b)를 비교해보면, 사용하는 부반송파 대역 이외의 OOB 대역 크기가 확장 길이가 길수록 빠르게 감소되는 것을 확인할 수 있다. 확장 길이를 늘릴수록 OOB 전력을 더욱 효과적으로 저감시킬 수 있다. 그러나 확장 영역의 길이를 늘릴 경우, TTI(Transmission Time Interval)의 길이가 늘어나서 전송 효율을 감소시킬 수 있다. 따라서 스펙트럼 특성이 좋으면서 TTI를 짧게 할 수 있는 조건을 선택해야 한다.



(a) Extension length : 10



(b) Extension length : 30

그림 6. 확장 길이에 따른 W-OFDM 송신신호의 스펙트럼 특성

Fig. 6. Spectrum characteristic of W-OFDM transmit signal according to extension length.

### III. 비선형 HPA 모델

#### 3-1 Saleh 모델

이상적인 HPA는 신호를 선형적으로 증폭하며, 증폭 후 위상 회전이 일어나지 않는다. 그러나 실제 시스템을 구현하기 위한 소자들은 비선형 특성을 가지고 있다. 이러한 HPA 비선형 특성을 시스템 레벨의 시뮬레이션을 하기 위해 모델링할 수 있으며, 다양한 비선형 증폭, 위상 회전을 고려한 모델들이 존재한다. 본 논문에서는 그 중 하나인 Saleh 모델을 사용한다. 다음은 비선형 HPA 모델인 Saleh 모델의 AM-AM 특성과 AM-PM 특성에 대한 수식이다<sup>[13]</sup>.

$$G[A(t)] = \frac{\alpha_A A(t)}{1 + \beta_A A^2(t)} \quad (1)$$

$$\Phi[A(t)] = \frac{\alpha_\Phi A(t)^2}{1 + \beta_\Phi A(t)^2} \quad (2)$$

식 (1)은 Saleh 모델의 AM-AM 특성을 나타낸다. 여기에서  $A(t)$ 는 입력신호이고,  $\alpha_A$ 와  $\beta_A$ 는 입력 신호의 크기에 대한 이득을 조절하는 계수이다. 이 계수를 변경하여 비선형성을 조절할 수 있다.

식 (2)는 Saleh 모델의 AM-PM 특성을 나타낸다. AM-PM 특성은 입력신호의 크기에 대한 위상 회전량을 나타낸다. 위상 회전량은 입력 크기에 따라 비선형적으로 증가하게 된다.  $\alpha_\Phi$ 와  $\beta_\Phi$ 는 비선형 위상회전 강도를 조절하는 계수이다.

#### 3-2 시뮬레이션을 위한 비선형 조건

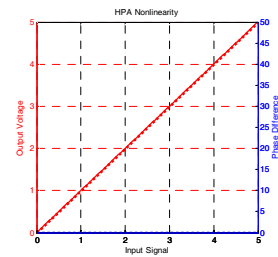
본 논문에서는 OFDM, UFMC, FBMC, W-OFDM 시스템에 대한 비선형 HPA 환경에서의 스펙트럼 특성 및 BER 특성을 비교 분석하기 위하여 선형 조건 및 4개의 다른 비선형 조건을 고려하였다.

표 1은 본 논문에서 고려한 HPA 비선형 조건을 생성하기 위한 Saleh 모델의 파라미터를 나타낸다. 표 1의 각 파라미터를 식 (1)과 식 (2)에 대입하여 HPA 비선형 조건을 생성한다.

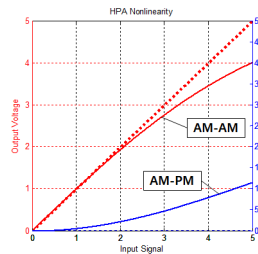
표 1. HPA 비선형 조건

Table 1. Condition of HPA nonlinearity.

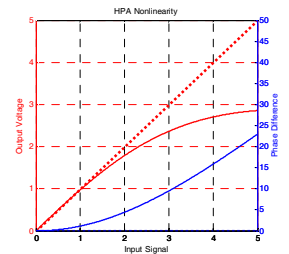
Condition	AM-AM	AM-PM
0 (Linear)	$\alpha_A=1$	$\alpha_\Phi=0$
	$\beta_A=0$	$\beta_\Phi=0.01$
1	$\alpha_A=1$	$\alpha_\Phi=0.01$
	$\beta_A=0.01$	$\beta_\Phi=0.01$
2	$\alpha_A=1$	$\alpha_\Phi=0.03$
	$\beta_A=0.02$	$\beta_\Phi=0.01$
3	$\alpha_A=1$	$\alpha_\Phi=0.05$
	$\beta_A=0.03$	$\beta_\Phi=0.01$
4	$\alpha_A=1$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



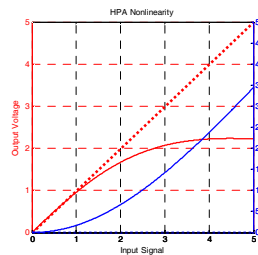
(a) Condition 0(linear)



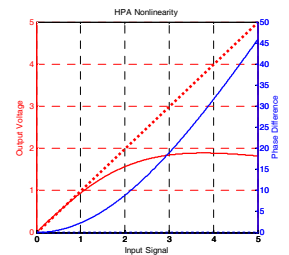
(b) Condition 1



(c) Condition 2



(d) Condition 3



(e) Condition 4

그림 7. 시뮬레이션을 위한 HPA 비선형 조건

Fig. 7. Condition of HPA nonlinearity for simulation.

그림 7은 본 논문에서 고려한 선형 및 비선형 조건을 나타낸다. 조건 0는 선형 조건을 나타내며, 조건 1~조건 4는 비선형 HPA 특성을 나타낸다. 조건 1은 비선형성이 가장 작으며, 조건 4는 비선형성이 가장 크다.

#### IV. 시뮬레이션 결과 및 분석

본 논문에서는 각 시스템의 HPA 비선형 환경에서의 특성을 비교 분석하는 것이 목표이다.

표 2는 시뮬레이션 파라미터를 나타낸다. 각 시스템은 전체 부반송파 수를 64개로 고려하였고, 스펙트럼 분석에서는 16개의 부반송파를 사용하였다. BER 측정에서는 32개의 부반송파를 사용하였다. 여기에서 데이터가 맵핑되는 부반송파는 중심주파수쪽에 구성되어 있으며, 사용하지 않는 부반송파는 가장 외곽쪽에 구성하였다. 즉, 64개 중 16개의 부반송파를 사용할 경우, 48개의 부반송파를 사용하지 않는다. 이때 구성은 좌측으로부터 1~24번의 좌측 24개 부반송파는 0를 할당하였으며, 25~40번의 부반송파에는 전송하기 위한 심볼을 할당하였고, 41~64번의 우측 24개 부반송파는 0를 할당하였다.

표 2. 시뮬레이션 환경  
Table 2. Simulation parameters

Parameter	Value
Modulation	QAM
# of total subcarrier (Total system)	64
# of used subcarrier (Total system)	16(For spectrum) 32(For BER)
Filter for FBMC	Phydyas prototype H0=1 H1=0.97196 H2=0.7071 H3=0.235147
Filter for UFMC	Chebyshev Attenuation=60 dB # of taps=10
# of sub-band in UFMC	64/8
Extension length in W-OFDM	16*2
# of cyclic prefix for OFDM and W-OFDM	9

DC 부반송파에 대한 영향은 본 논문에서 고려하지 않아 일반적인 데이터 심볼을 맵핑하였다. W-OFDM 시스템은 시간영역 신호의 좌우 Windowing을 위하여 Chebyshev 필터의 시간영역 응답을 이용하였다.

OFDM 및 W-OFDM 시스템에서 CP(Cyclic Prefix)의 길이는 9를 사용하였으며, UFMC의 Zero Padding 길이도 이와 같은 길이 9를 고려하였다. UFMC의 Zero Padding 부분은 송신기의 마지막에 존재하는 시간영역 필터링 후에 응답 신호로 채워지게 된다. 즉, OFDM의 CP 길이와 UFMC의 필터링 후 시간영역으로 확장되는 길이가 동일하다. 본 논문에서는 UFMC를 위한 Chebyshev 필터의 길이를 10으로 고려하였으며, 이때 필터 응답에 의해 추가되는 길이는 필터 길이에서 1을 뺀 길이가 된다.

FBMC를 위한 필터의 탭은 4개로 구성되어 있으며, 필터 탭이 4인 PPN 구조를 사용하기 때문에 FBMC를 위한 시간영역 필터 길이는 4배의 부반송파 개수와 같은 256을 고려하였다. 이는 기존의 CP가 없는 조건의 OFDM 시스템 심볼의 시간영역 길이와 비교해 보면 시작과 끝 부분에 각각 부반송파 개수의 1.5배에 해당하는 길이의 응답이 추가적으로 소요되는 결과를 가져온다. 이러한 점으로 인해 FBMC는 데이터 전송시 Short Burst 전송을 할 경우, 응답 길이만큼 시간영역의 손실을 보기 때문에 좋지 않는 점이 있다. 하지만 많은 데이터를 연속으로 보내는 Long Burst 전송을 하게 되면, 전체 시간영역 송신신호에서 시작과 끝 부분의 응답 길이의 비율은 상대적으로 작아지며, 보다 시간영역 신호를 효율적으로 사용하게 된다.

그림 8은 선형 영역에서 각 시스템의 송신 신호 스펙트럼을 나타낸다. 그림 9~12는 각각 OFDM, UFMC, FBMC, W-OFDM 시스템의 각 비선형 조건에서의 송신 신호 스펙트럼을 나타낸다. 전체적으로 비선형성이 조건 1에서 조건 4로 증가할수록 OOB 전력이 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 조건 4에서 UFMC, FBMC, W-OFDM 각 시스템의 OOB 전력이 약 61~63 dB로 유사해지는 것을 확인할 수 있다.

표 3은 그림 8~12의 각 시스템의 OOB 전력을 정리한 것이다. OFDM은 전체 조건에서 가장 높은 OOB 전력을 가지고 있으며, FBMC는 선형조건에서만 가장 낮은 OOB

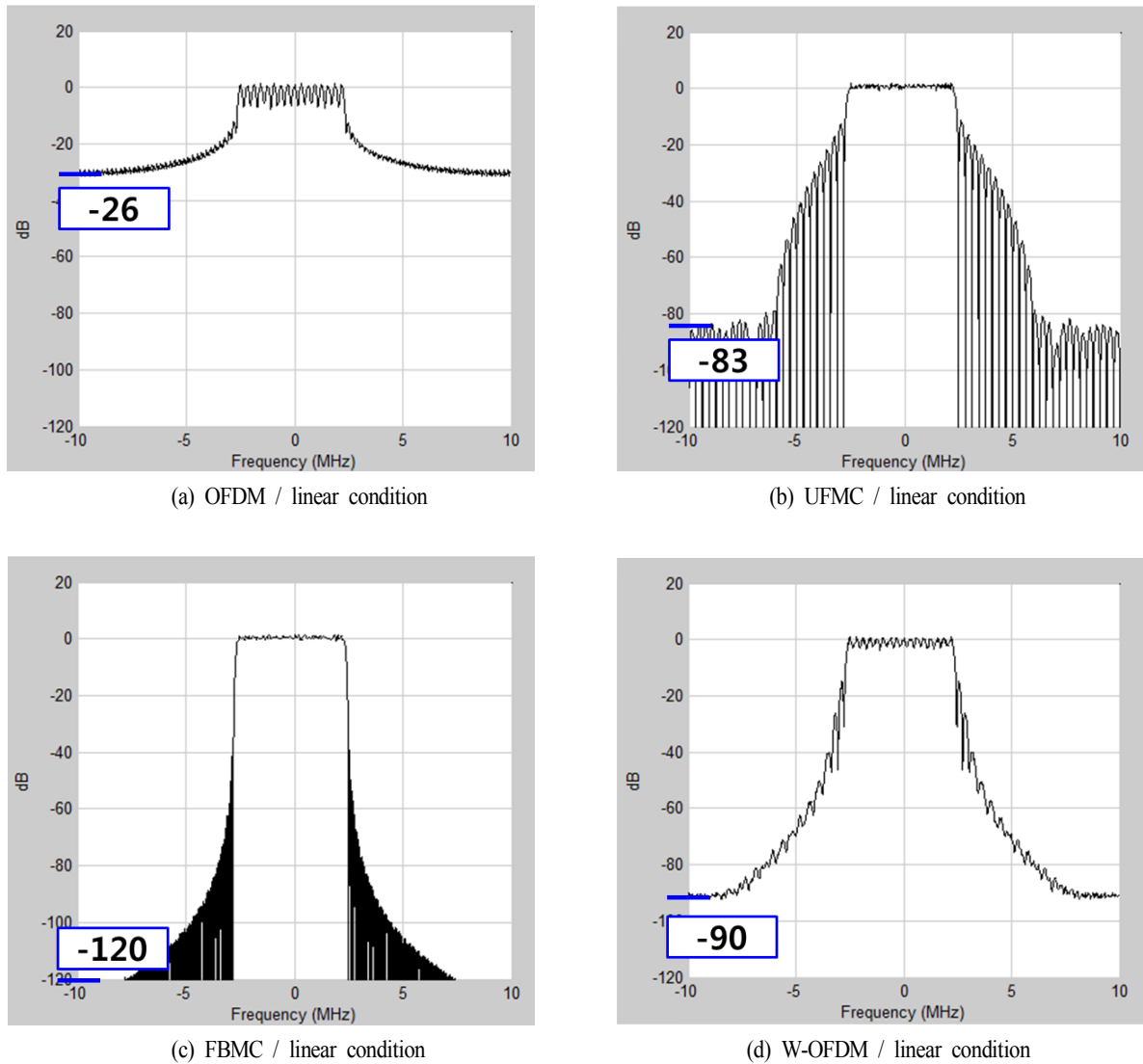


그림 8. 선형 HPA 조건에서 각 후보파형들의 스펙트럼

Fig. 8. Spectrum of the candidate waveforms under the linear HPA condition.

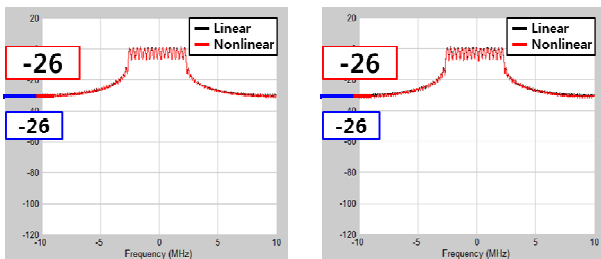
표 3. OOB 전력의 비교

Table 3. Comparison of OOB power.

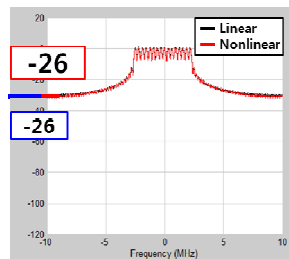
Condition	OFDM	UFMC	FBMC	W-OFDM
0	-26 dB	-83 dB	-120 dB	-90 dB
1	-26 dB	-82 dB	-85 dB	-85 dB
2	-26 dB	-74 dB	-75 dB	-75 dB
3	-26 dB	-66 dB	-67 dB	-69 dB
4	-26 dB	-61 dB	-62 dB	-63 dB

전력을 보여준다. 여기에서 OOB 전력은 데이터 심볼의 전송 흐름에 따라 약 1~2 dB 정도 상하로 변동이 발생하게 된다. 이러한 특성을 고려하여 전체적인 시스템의 비교 평가를 하면 비선형 특성에서 대체적으로 유사한 OOB 특성을 나타내는 것을 확인할 수 있다.

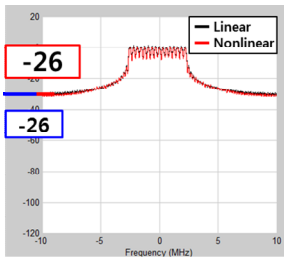
그림 13~16은 각각 OFDM, UFMC, FBMC, W-OFDM 시스템의 HPA 비선형 조건에 대한 BER 성능을 보여준다. 각 시스템의 BER 특성을 살펴보면, HPA 비선형 조건



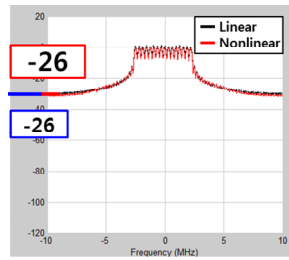
(a) Condition 1



(b) Condition 2

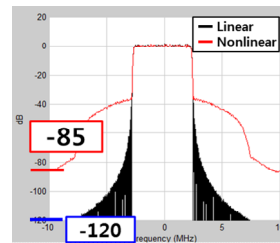


(c) Condition 3

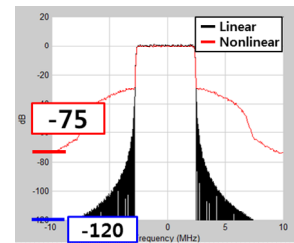


(d) Condition 4

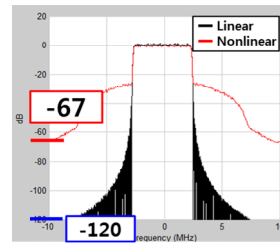
그림 9. 비선형 조건에 따른 OFDM 시스템의 송신 신호 스펙트럼  
Fig. 9. Tx spectrum of OFDM system according to HPA nonlinearity condition.



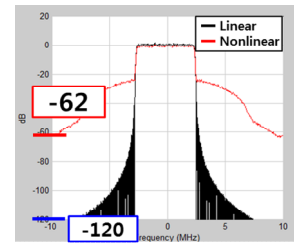
(a) Condition 1



(b) Condition 2

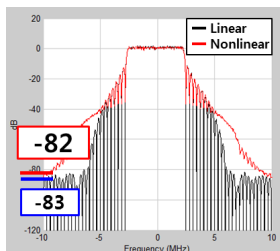


(c) Condition 3

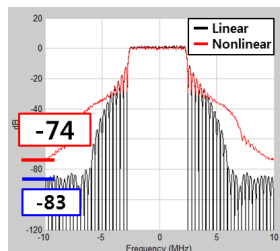


(d) Condition 4

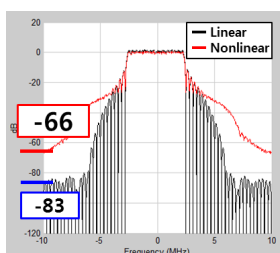
그림 11. 비선형 조건에 따른 FBMC 시스템의 송신 신호 스펙트럼  
Fig. 11. Tx spectrum of FBMC system according to HPA nonlinearity condition.



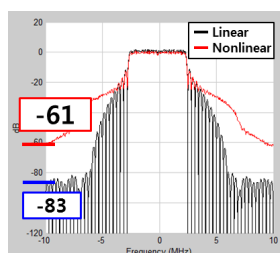
(a) Condition 1



(b) Condition 2

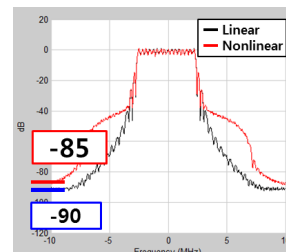


(c) Condition 3

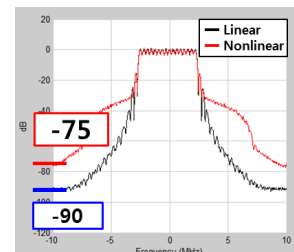


(d) Condition 4

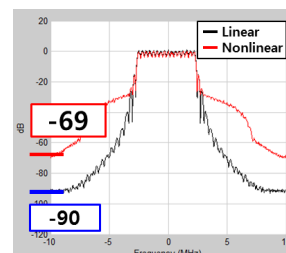
그림 10. 비선형 조건에 따른 UFMC 시스템의 송신 신호 스펙트럼  
Fig. 10. Tx spectrum of UFMC system according to HPA nonlinearity condition.



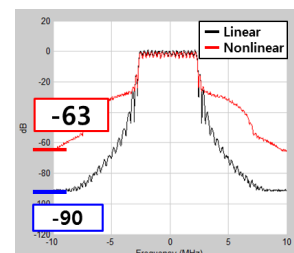
(a) Condition 1



(b) Condition 2



(c) Condition 3



(d) Condition 4

그림 12. 비선형 조건에 따른 W-OFDM 시스템의 송신 신호 스펙트럼  
Fig. 12. Tx spectrum of W-OFDM system according to HPA nonlinearity condition.



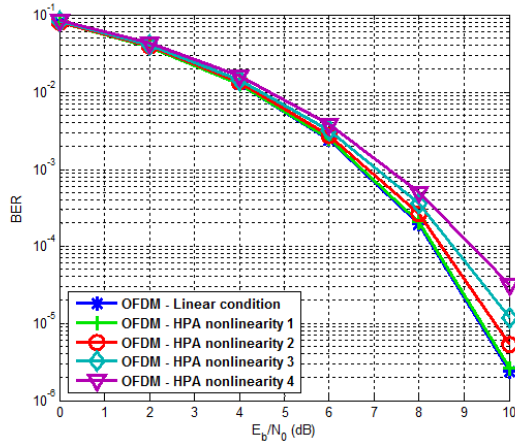


그림 13. 비선형 조건에 따른 OFDM 시스템의 BER 성능  
Fig. 13. BER performance of OFDM system according to HPA nonlinearity condition.

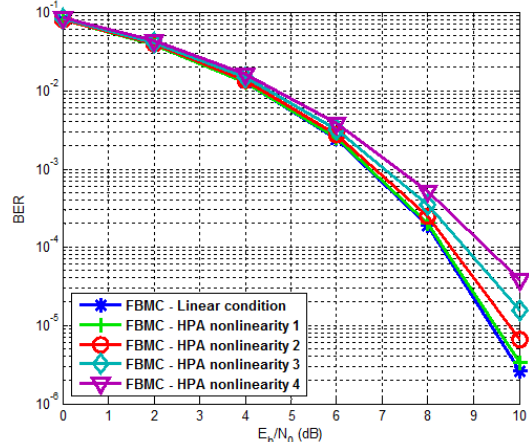


그림 15. 비선형 조건에 따른 FBMC 시스템의 BER 성능  
Fig. 15. BER performance of FBMC system according to HPA nonlinearity condition.

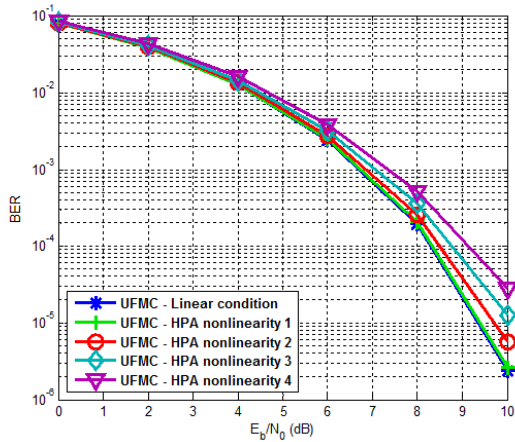


그림 14. 비선형 조건에 따른 UFMC 시스템의 BER 성능  
Fig. 14. BER performance of UFMC system according to HPA nonlinearity condition.

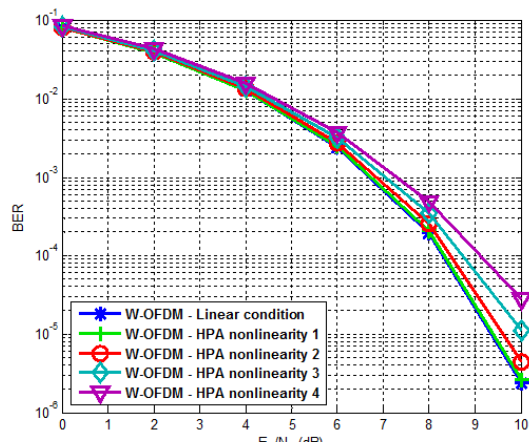


그림 16. 비선형 조건에 따른 W-OFDM 시스템의 BER 성능  
Fig. 16. BER performance of W-OFDM system according to HPA nonlinearity condition.

에 따라 전체적으로 BER 특성이 유사함을 확인할 수 있다. 이로 다중반송파를 사용하는 각 시스템이 대체적으로 유사한 PAPR을 갖음을 확인할 수 있다.

### V. 결 론

각 시스템의 스펙트럼 특성과 BER 특성에 대한 시뮬레이션 결과를 종합해 보면, 각 시스템에 인가된 HPA 비선형 조건이 같을 경우, 각 시스템의 BER 특성은 서로 유

사하며, OFDM을 제외한 UFMC, FBMC, W-OFDM 시스템의 스펙트럼 특성이 서로 유사하기 때문에, 이 시스템들 중 복잡도가 적은 시스템이 보다 유리한 시스템으로 선택될 수 있다. 따라서 간단한 Windowing 방법으로 OOB 전력을 효과적으로 저감시킬 수 있는 W-OFDM 시스템이 복잡도가 높은 FBMC나 UFMC 시스템에 비하여 우수한 시스템으로 고려될 수 있다.

References

[1] 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.

[2] E. Dahlman, G. Mildh, S. Parkvall, J. Peisa, J. Sachs, Y. Selén, and J. Sköld, "5G wireless access: requirements and realization", *Communications Magazine, IEEE*, vol. 52, no. 12, pp. 42-47, December 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(ISCSP), 2014 6th International Symposium on*, pp. 457-460, 21-23 May 2014.

[6] G. Berardinelli, K. Pajukoski, E. Lahetkangas, R. Wichman, O. Tirkkonen, and P. Mogensen, "On the potential of OFDM enhancements as 5G waveforms", *Vehicular Technology Conference(VTC Spring), 2014 IEEE 79th*, Seoul, pp. 1-5, 2014.

[7] 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, April 2009.

[8] 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.

[9] Mukherjee, Mithun, Shu Lei, 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.

[10] B. Farhang-Boroujeny, "OFDM versus filter bank multicarrier", in *Signal Processing Magazine, IEEE*, vol. 28, no. 3, pp. 92-112, May 2011.

[11] Wonsuk Chung, Beomju Kim, Moonchang Choi, Hyungju Nam, Hyunkyung Yu, Sooyoung Choi, and Daesik Hong, "Synchronization error in QAM-Based FBMC system", in *Military Communications Conference(MILCOM), 2014 IEEE*, pp. 699-705, 6-8 Oct. 2014.

[12] 3GPP TSG-RAN WG1, "R1-162199(waveform candidates)", 3GPP, 11-15 April 2016.

[13] P. Drotar, J. Gazda, D. Kocur, and P. Galajda, "MC-CDMA performance analysis for different spreading codes at HPA Saleh model", *18th Int. Conf. Radioelektronika*, pp. 1-4, Prague, Apr. 2008.

안 창 영



신호처리

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

유 흥 균



Paper Award' 수상

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, 5G/B5G 이동통신 시스템, 통신회로 설계 및 통신 신호 처리