

논문 2016-53-6-1

5세대 이동통신을 위한 OFDM, UFMC, FBMC 시스템의 BER과 스펙트럼의 비선형 특성 평가

(Nonlinear Effect on the BER and Spectrum Shape of OFDM,
UFMC and FBMC for 5G Mobile Communication)

이 동 형*, 안 창 영**, 궁 경 록**, 김 병 재**, 유 흥 균***

(Dong-Hyung Lee, Changyoung An, Kyung-Lok Kung, Byeongjae Kim, and Heung-Gyoon Ryu[©])

요 약

최근 5G 모바일 통신 시스템에서 요구하는 KPI(Key Performance Indicator)를 만족시키기 위해 새로운 Waveform 연구가 활발하게 진행되고 있다. 연구 중인 차세대 Waveform 중 OOB의 전력을 획기적으로 감소시킬 수 있는 기술로 UFMC 및 FBMC가 잘 알려져 있다. 본 논문에서는 OFDM, UFMC, FBMC 각 시스템의 HPA 비선형성에 대한 특성을 스펙트럼 및 BER 성능 측면에서 평가하고 분석한다. 각 시스템을 설계한 후 HPA 선형 및 비선형 조건에 대한 스펙트럼 및 BER 특성을 평가해본 결과, HPA 비선형 특성이 증가할수록 OFDM, UFMC, FBMC 신호 모두 OOB의 전력 크기가 증가하는 것을 확인할 수 있으며 FBMC가 가장 큰 폭으로 OOB의 전력이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한 BER 성능 측면에서 보면 HPA 비선형성이 증가할 때, 모든 시스템의 성능이 열화 되는 것을 확인할 수 있다. 즉, 본 논문에서는 실제 시스템을 구현할 때, HPA 비선형성에 의해서 BER 성능 및 OOB 전력 특성이 열화되어 유사한 특성을 갖게 되므로, 낮은 복잡도와 고속 처리를 할 수 있는 시스템이 유리하다는 것을 확인할 수 있다.

Abstract

Recently, researches for new waveforms have been carried in order to satisfy KPI for 5G mobile communication system. UFMC and FBMC are well known as ways to reduce OOB power. In this paper, we analyze spectrum of OFDM, UFMC, and FBMC system under nonlinear HPA environment. And then we evaluate and analyze performance of these systems under the same environment. As simulation results, OOB power of OFDM, UFMC, and FBMC increases with HPA nonlinearity increasement. Especially, OOB power of FBMC is the largest increase due to HPA nonlinearity. Also, BER performance of these systems is degraded by increasement of HPA nonlinearity. Therefore, In this paper, we can confirm that a system with low-complexity and high-speed processing is advantageous, because BER performance and OOB power characteristic of these systems are degraded to similar level, when these systems are implemented in real world.

Keywords : new waveform, OFDM, FBMC, UFMC, HPA nonlinearity

* 정회원, SK 텔레콤 (SK Telecom)

** 학생회원, *** 정회원, 충북대학교 전자공학과/컴퓨터
정보통신연구소 (Department of Electronic Engineering
/Research Institute for Computer and Information
Communication, Chungbuk National University)

© Corresponding Author (E-mail : ecomm@cnu.ac.kr)

Received ; October 22, 2015 Revised ; May 30, 2016

Accepted ; June 2, 2016

I. 서 론

최근 다양한 모바일 기기 및 멀티미디어 서비스의 증가로 인하여 모바일 트래픽이 급격하게 증가하고 있다^[1]. 또한 모바일 트래픽의 증가는 더욱 가속화되고 있다. 미래에 요구되어지는 막대한 모바일 트래픽은 현재의 이동통신 기술로 지원하는데 한계가 있다^[2]. 따라서

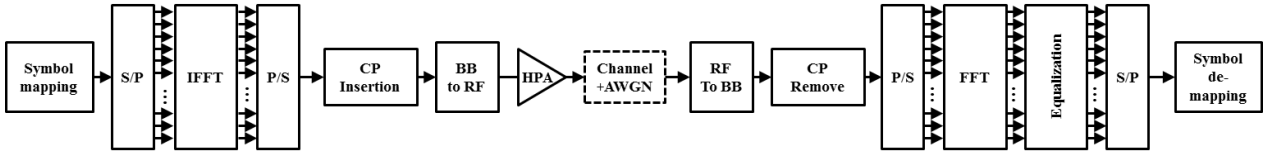


그림 1. OFDM 시스템의 구성도
Fig. 1. Block diagram of OFDM system.

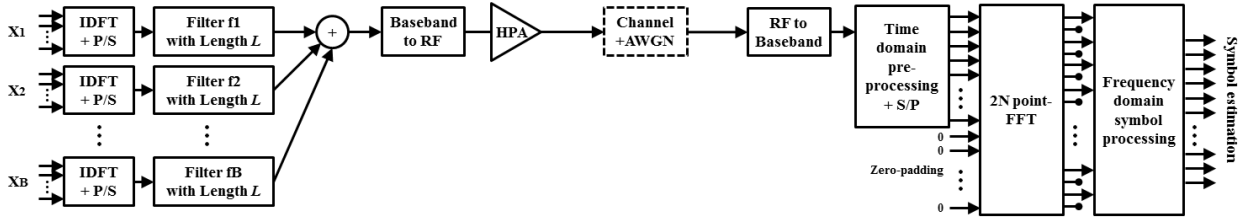


그림 2. UFMC 시스템의 구성도
Fig. 2. Block diagram of UFMC system.

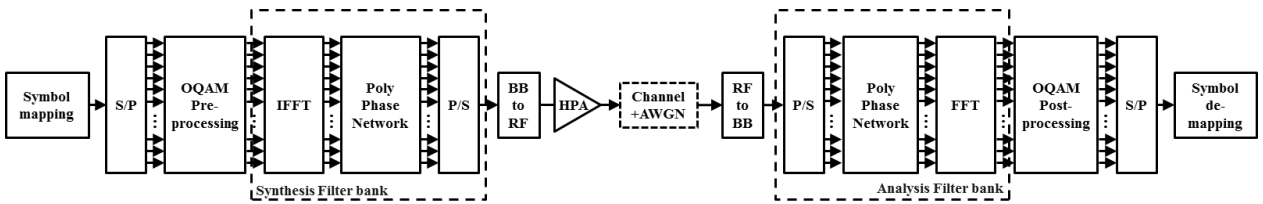


그림 3. FBMC 시스템의 구성도
Fig. 3. Block diagram of FBMC system.

세계적으로 차세대 이동통신 기술 연구가 활발히 진행되고 있다^[3~4].

기존 다중반송파를 사용하는 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 기술은 높은 전력의 OOB(Out-of-Band) 특성을 갖는다^[5]. 이러한 특성은 인접대역에 간섭을 일으킬 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 OFDM 기술은 넓은 보호 대역을 사용해야 한다. 이러한 이유로 인해 다수의 모바일 기기들이 다중접속을 하는 상황에서는 스펙트럼 자원의 낭비가 심화된다. 차세대 모바일 통신시스템은 매우 높은 수준의 KPI(Key Performance Indicator)를 요구한다. OFDM 기술은 이 KPI를 만족시키기 어렵다. 이 KPI를 만족시키기 위한 변조기술로 UFMC(Universal Filtered Multi-Carrier)와 FBMC(Filter Bank Multi-Carrier)가 주목받고 있다^[6~7]. 이 기술들은 OFDM 기술에 필터링 기술이 결합되어 낮은 OOB 전력 특성을 갖는다. 따라서 높은 수준의 스펙트럼 효율을 갖는다. FBMC 기술은 각각의 부반송파를 개별 필터링하며, UFMC 기술은 부반

송파를 묶은 서브밴드 단위로 필터링을 한다^[8~9].

그러나 이러한 OFDM 기술기반의 UFMC, FBMC 기술들은 OFDM과 같이 HPA(High Power Amplifier)의 비선형성에 취약하다. OFDM은 다수의 부반송파 신호가 중첩되기 때문에 PAPR(Peak-to-Average Power Ratio)이 높다. 높은 PAPR을 갖는 신호는 HPA를 포화시켜 비선형 왜곡이 발생하게 된다. 마찬가지로 OFDM과 같이 다중반송파 기반의 UFMC나 FBMC의 변조신호도 높은 PAPR을 갖기 때문에^[10~11], 이 변조된 신호들이 비선형 HPA를 통과하면 신호가 왜곡되어 OOB의 전력이 다시 증가한다. 즉, 새로운 변조신호의 장점을 잃게 된다. 따라서 차세대 이동통신을 위한 새로운 변조기술은 이러한 문제점을 해결해야 한다.

본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위한 첫 번째 단계로 HPA 비선형성에 의한 FBMC, UFMC 변조신호들의 왜곡특성을 스펙트럼과 성능 측면에서 파악 것을 목표로 한다. 첫째로 OFDM, UFMC, FBMC에 대한 시스템을 각각 설계한다. 그다음 선형조건에서 각각의 시

시스템의 스펙트럼 특성과 BER 성능을 평가하고 비교 분석한다. 둘째로 OFDM, UFMC, FBMC 각각의 시스템에 비선형 HPA 모델을 적용한 후 스펙트럼 특성과 BER 성능을 평가하고 비교 분석한다.

II. 시스템 모델

1. OFDM

그림 1은 OFDM 시스템의 블록도를 나타낸다. 먼저 송신기를 살펴보면, 데이터 심볼들이 S/P를 거쳐 직렬 스트림에서 병렬 스트림으로 변환된다. 변환된 각각의 심볼들은 IFFT를 거쳐 각 직교부반송파에 맵핑되고 시간영역 신호로 변환된다. 그 다음 시간 영역의 신호는 P/S를 통하여 전송을 위한 직렬 스트림으로 변환된다. 그 다음 다중경로에 의한 신호왜곡영향을 줄이기 위하여 CP를 추가한다. 그 다음 기저대역 신호는 RF단을 통과하고 HPA를 거쳐 증폭된다. 최종 증폭된 신호는 안테나를 통하여 송신된다. 수신기는 송신기와 반대의 구조를 가지며, 디지털 영역에서 등화기를 사용하여 왜곡된 신호를 등화시킨다.

OFDM 시스템은 CP의 사용으로 부반송파의 직교성 유지 및 ISI(Inter-Symbol Interference)영향을 감소시켜 간단한 구조의 단일 탭 등화기를 이용하여 고속등화를 할 수 있는 장점을 갖는다^[12]. 그러나 OFDM 시스템에서 사용하는 직교부반송파는 사이드 로브가 크다. 이로 인해 인접 대역의 채널에 간섭을 일으킬 수 있어 채널과 채널 사이에 보호 대역(Guard Band)을 구성해야 한다. 이러한 보호 대역을 사용하게 되면 스펙트럼 효율이 감소되는 단점이 발생한다^[12]. 게다가 OFDM 신호는 다수의 직교부반송파들이 중첩되어 높은 PAPR을 갖는다^[12]. 높은 PAPR을 갖는 신호가 비선형 HPA를 통과하게 되면 OOB의 전력을 증가시키는 문제가 발생할 수 있다.

2. UFMC

UFMC 시스템은 OFDM 시스템과 같이 다수의 부반송파를 사용한다. UFMC 시스템은 전체 부반송파를 서브 밴드로 나누고 필터링을 하여 스펙트럼의 OOB 전력을 효과적으로 감소시킨다^[6].

그림 2는 UFMC 시스템의 블록도를 나타낸다. 우선 송신기 구조를 살펴보면, IDFT 통해 병렬 스트림으로

구성된 데이터 심볼들은 나뉘어져 각각의 서브 밴드에 맵핑된다. 그 다음 각각의 서브 밴드 신호들은 P/S를 통해 직렬 스트림으로 변환된다. 그 다음 각 직렬 스트림 신호는 필터링 된다. 각각 필터링 된 서브 밴드의 신호는 모두 더해진 후 RF단을 통과한다. 마지막으로 HPA에서 증폭이 된 후 안테나를 통해 송신된다. 다음 수신기 구조를 살펴보면, 수신된 신호는 RF를 거쳐 기저대역 디지털 신호로 변환된다. 그 다음 시간 영역에서 선행 처리를 수행하고 직렬 데이터 스트림을 병렬 데이터 스트림으로 변환한다. 변환된 후 $2N$ 크기를 갖는 FFT를 통해 시간영역 신호를 주파수 영역으로 변환시킨다^[6]. 그 다음 홀수 번째 데이터 심볼들을 선택하여 채널 등화를 수행한다. UFMC 신호는 OFDM 신호에 비하여 OOB의 전력이 작은 장점이 있다. 그러나 UFMC 신호 역시 다수의 부반송파들이 중첩되었기 때문에 높은 PAPR로 인하여 HPA 비선형 특성에 의해 신호가 왜곡될 수 있다^[6].

3. FBMC

FBMC 시스템은 OFDM 시스템과 같이 다수의 부반송파를 사용한다. 여기에서 FBMC 는 각 부반송파별로 필터링을 하여 스펙트럼의 OOB 전력을 효과적으로 감소시킨다^[7].

그림 3은 FBMC 시스템의 송수신기 구성도를 나타낸다. 우선 송신기의 구조를 살펴보면, 데이터 심볼들은 S/P를 통해 직렬 스트림에서 병렬 스트림으로 변환된다. 그 다음 각각의 데이터 심볼은 다시 OQAM(Offset Quadrature Amplitude Modulation)으로 변조된다^[7]. 변조된 OQAM 신호는 IFFT, Poly Phase Network로 구성된 Synthesis Filter Bank를 거쳐 각 부반송파별로 필터링이 된 신호로 변환된다^[7]. 최종 필터링된 신호는 RF단을 거치고 HPA를 통해 증폭되어 송신된다. FBMC 는 UFMC보다 OOB의 전력이 더욱 낮은 것이 장점이다. 그러나 FBMC 신호는 다수의 부반송파가 중첩되었기 때문에 높은 PAPR 특성을 갖는다. 이러한 특성으로 인해 최종 송신 신호가 비선형 HPA를 통과할 경우 신호의 왜곡이 발생할 수 있다.

III. HPA 비선형

본 논문에서는 각 OFDM, UFMC, FBMC 시스템에

표 1. 시뮬레이션 환경

Table 1. Simulation parameters.

Parameter	Value
Modulation	QPSK
# of total subcarrier	64
# of used subcarrier	16, 32
Filter for FBMC	Phydys prototype H0 = 1 H1 = 0.97196 H2 = 0.7071 H3 = 0.235147
Filter for UFMC	Chebyshev Attenuation = 60dB Length = 10
# of sub-band in UFMC	64/8
# of used sub-band in UFMC	2, 4

표 2. HPA 비선형 조건

Table 2. Condition of HPA nonlinearity.

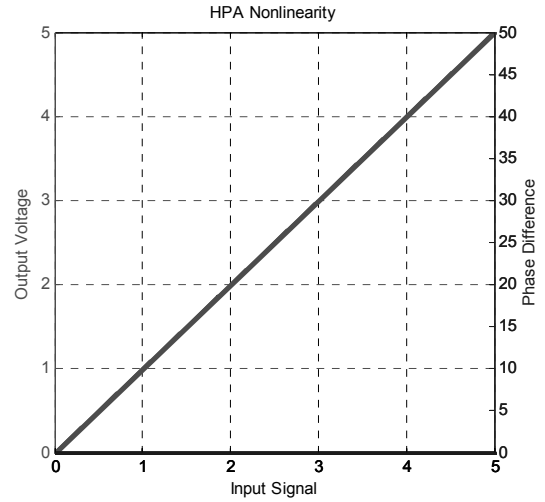
Condition	AM-AM	AM-PM
0 (Linear)	$\alpha_A = 1$	$\alpha_\phi = 0$
	$\beta_A = 0$	$\beta_\phi = 0.01$
1	$\alpha_A = 1$	$\alpha_\phi = 0.01$
	$\beta_A = 0.01$	$\beta_\phi = 0.01$
2	$\alpha_A = 1$	$\alpha_\phi = 0.03$
	$\beta_A = 0.02$	$\beta_\phi = 0.01$
3	$\alpha_A = 1$	$\alpha_\phi = 0.05$
	$\beta_A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

실제 구현에서 고려되어야 할 비선형 HPA에 대한 스펙트럼 특성 분석 및 성능 평가를 하는 것이 목적이다. 따라서 각 시스템을 설계하고 송신기에 비선형 HPA 모델을 적용하였다.

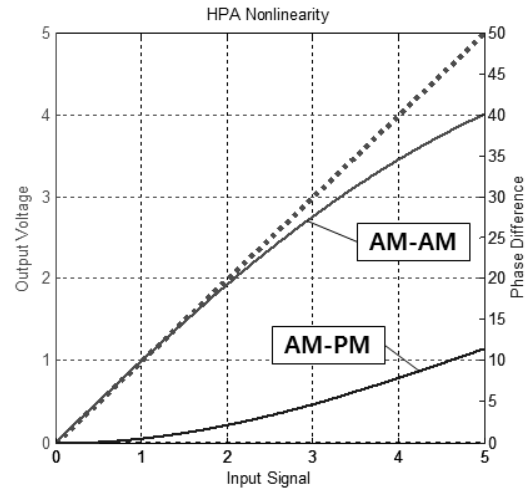
본 논문에서는 각 시스템에 적용할 비선형 HPA 모델로 Saleh 모델을 사용하였다. HPA 비선형 특성은 입력 신호의 진폭에 대한 출력 신호의 진폭 특성을 나타내는 AM-AM 특성과, 입력 신호의 진폭에 대한 출력 신호의 위상 천이 특성을 나타내는 AM-PM 특성이 있다. 비선형 HPA인 Saleh 모델의 AM-AM 특성과 AM-PM 특성은 다음과 같이 나타낼 수 있다^[13].

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

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



(a) condition 0



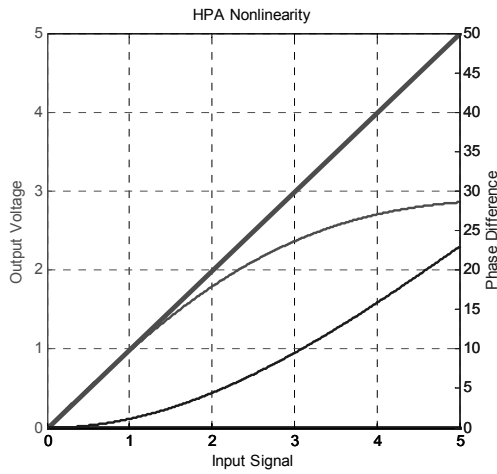
(b) condition 1

식 (1)은 비선형 HPA 모델 중 하나인 Saleh 모델의 AM-AM 특성을 나타낸다. 여기에서 A는 입력 신호이고, α_A 와 β_A 는 입력 신호의 크기에 대한 출력 신호의 크기 변화를 조절하는 계수이다. 즉, 식 (1)은 입력 신호의 크기에 대한 출력 신호의 크기를 나타낸다.

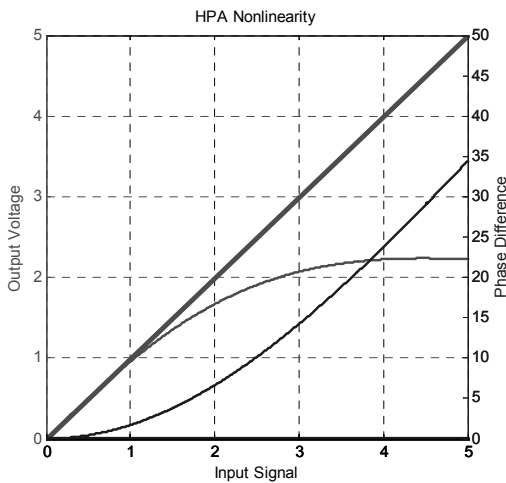
식 (2)는 HPA의 AM-PM 특성을 나타낸다. 여기에서 α_ϕ 와 β_ϕ 는 입력 신호의 크기에 대한 위상 변화를 조절하는 HPA의 특성을 나타내는 계수이다.

IV. 시뮬레이션 결과 및 분석

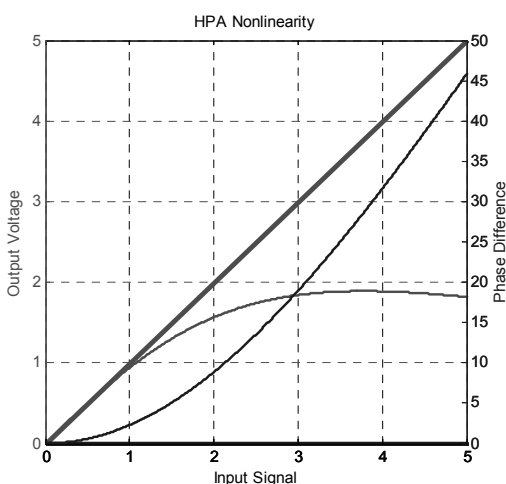
본 논문에서는 비선형 HPA가 적용된 OFDM, UFMC, FBMC 시스템의 스펙트럼 특성과 BER 성능을 평가하고 비교 분석한다. 시뮬레이션을 위한 각 파라미터는 표 1과



(c) condition 2



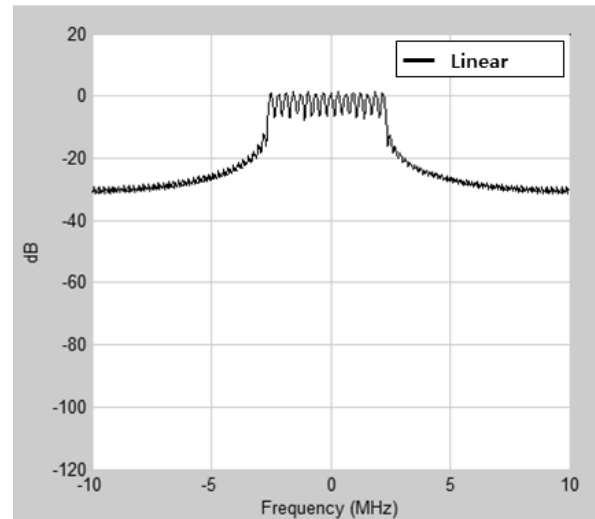
(d) condition 3



(e) condition 4

그림 4. HPA 비선형 조건에 대한 AM-AM 및 AM-PM 특성

Fig. 4. Characteristics of AM-AM and AM-PM according to nonlinear HPA conditions.



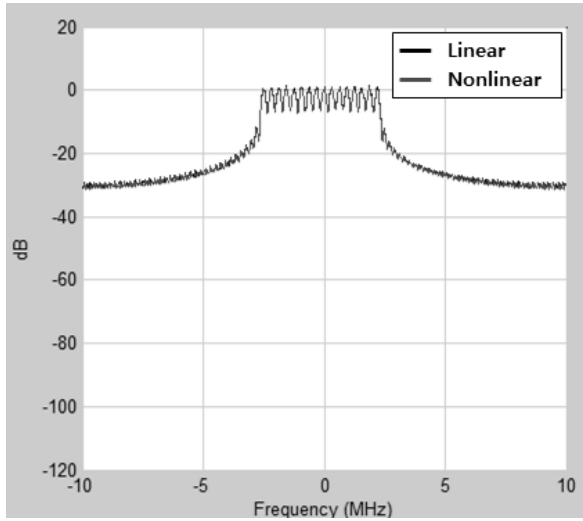
(a) condition 0

같다. 스펙트럼 평가에서는 16개의 부반송파를, BER 평가에서는 32개의 부반송파를 사용하였다.

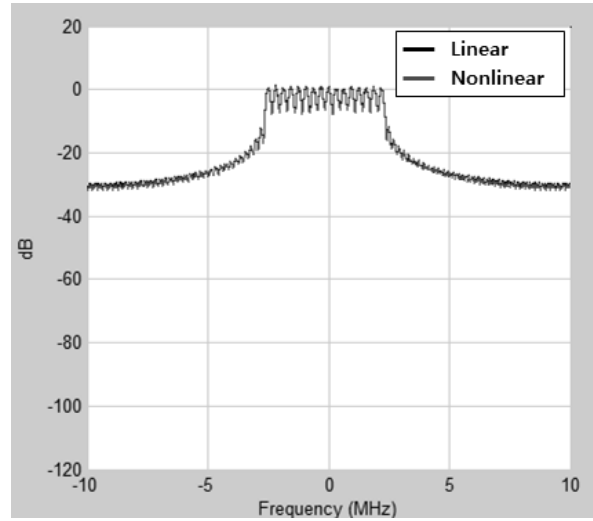
표 2는 본 논문에서 고려하는 비선형 HPA 조건에 대한 조건을 나타낸 것이다. Condition 0는 선형 HPA를 의미하고 Condition 1 ~ Condition 4는 비선형 HPA의 특성을 나타낸다. Condition 1은 가장 약한 비선형 특성을 갖는 HPA 특성을 생성하는 파라미터를 나타내며, Condition 4는 가장 강한 비선형 특성을 갖는 HPA 특성을 생성하는 파라미터를 나타낸다. 이 파라미터들은 식 (1)과 식 (2)에 각각 적용된다.

그림 4는 표 2의 HPA 비선형 조건 파라미터에 의해 생성된 비선형 HPA 모델의 AM-AM 특성과 AM-PM 특성을 나타낸다. 각 그래프의 가로축은 입력 신호의 크기를 나타내며, 왼쪽 세로축은 출력 신호의 진폭을 나타내고, 오른쪽 세로축은 출력 신호의 위상 특성을 나타낸다. condition 0는 입력 신호에 대한 출력 진폭 특성과 출력 위상 특성이 모두 선형임을 확인할 수 있다. 또한 condition 4는 가장 큰 진폭 왜곡과 위상 왜곡 특성을 갖는 것을 확인할 수 있다.

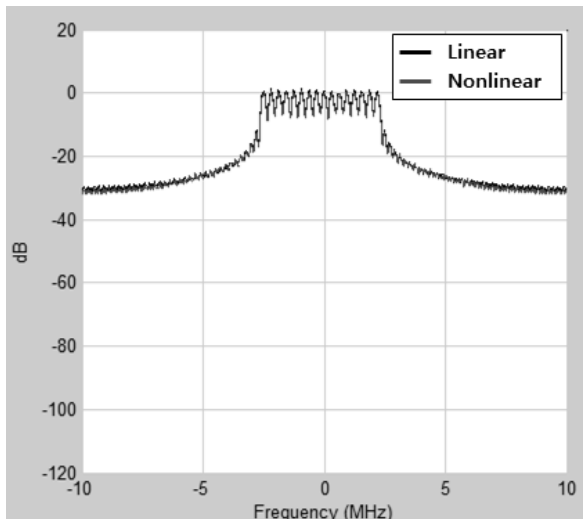
그림 5는 표 2의 HPA 비선형 조건에 대한 OFDM 신호의 스펙트럼 특성을 나타낸다. 그림 5. (a)는 OFDM 시스템의 HPA가 선형 특성을 갖을 경우의 스펙트럼을 나타낸다. 64개의 부반송파를 모두 사용할 경우 20MHz의 대역폭을 사용하며 16개의 부반송파를 사용할 경우 5MHz의 대역폭을 사용한다. 그림 5에서는 비선형 특성이 증가할수록 OOB의 전력이 소폭 상승하는 것을 확인할 수 있다.



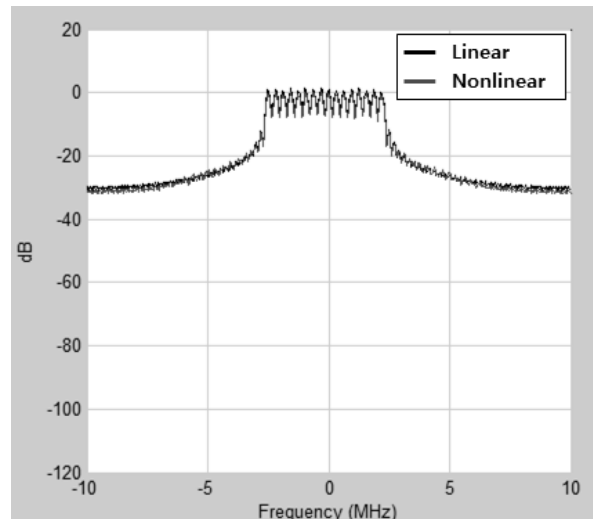
(b) condition 1



(c) condition 2



(d) condition 3



(e) condition 4

그림 5. HPA 비선형 조건에 대한 OFDM 신호의 스펙트럼

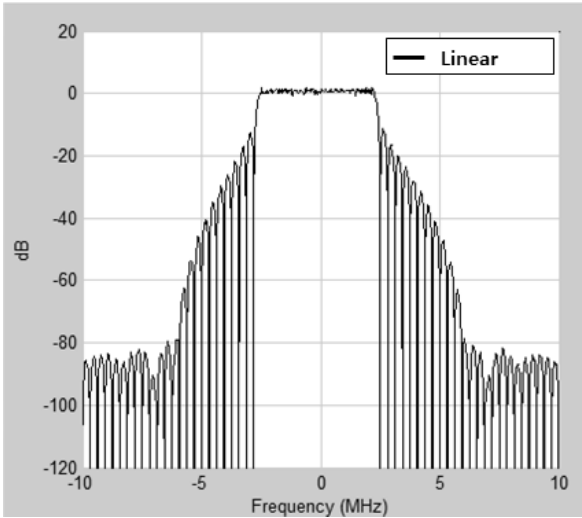
Fig. 5. Spectrum of OFDM signal according to nonlinear HPA conditions.

그림 5는 표 2의 HPA 비선형 조건에 대한 OFDM 신호의 스펙트럼 특성을 나타낸다. 그림 5. (a)는 OFDM 시스템의 HPA가 선형 특성을 갖을 경우의 스펙트럼을 나타낸다. 64개의 부반송파를 모두 사용할 경우 20MHz의 대역폭을 사용하며 16개의 부반송파를 사용할 경우 5MHz의 대역폭을 사용한다. 그림 5에서는 비선형 특성이 증가할수록 OOB의 전력이 소폭 상승하는 것을 확인할 수 있다.

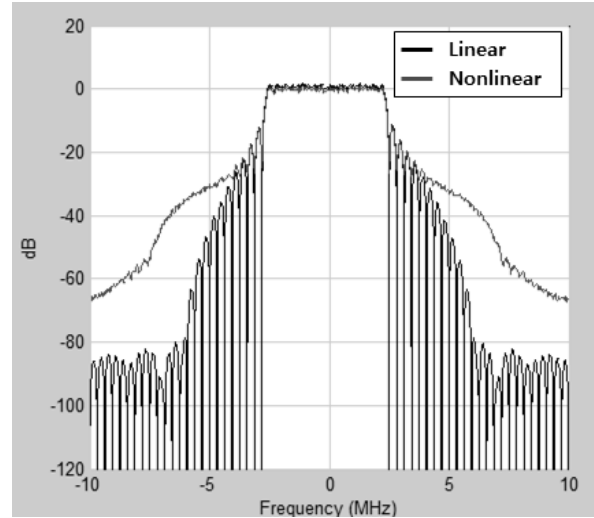
그림 6은 표 2의 HPA 비선형 조건에 대한 UFMC 신호의 스펙트럼 특성을 나타낸다. 그림 6. (a)는 UFMC 시스템의 HPA가 선형 특성을 갖을 경우의 스펙트럼

를 나타낸다. OOB의 전력은 약 -83dB를 나타낸다. 그러나 그림 5. (b)와 같이 HPA 비선형성이 적용될 경우 OOB의 전력은 다시 상승하는 것을 확인할 수 있다. 그림 5 (e)와 같이 가장 강한 HPA 비선형 특성이 적용될 경우 OOB의 전력이 크게 증가하여 -60dB의 크기를 갖는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 HPA 비선형성이 강해질수록 UFMC 시스템이 갖는 OOB 전력 저감의 장점이 약화되는 것을 나타낸다.

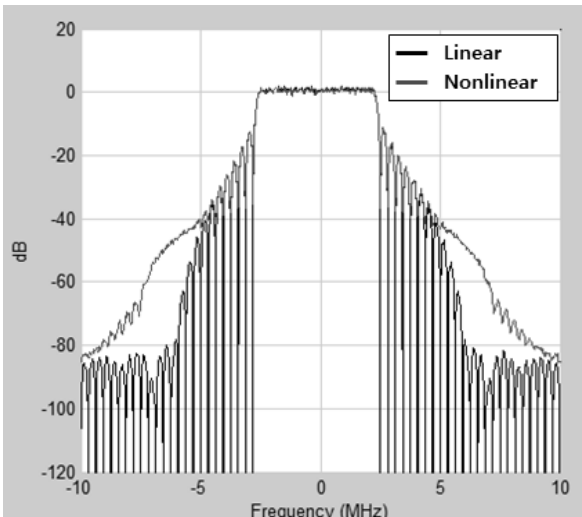
그림 7은 표 2의 HPA 비선형 조건에 대한 FBMC 신호의 스펙트럼 특성을 나타낸다. 그림 7. (a)는 FBMC 시스템의 HPA가 선형 특성을 갖을 경우의 스펙트럼



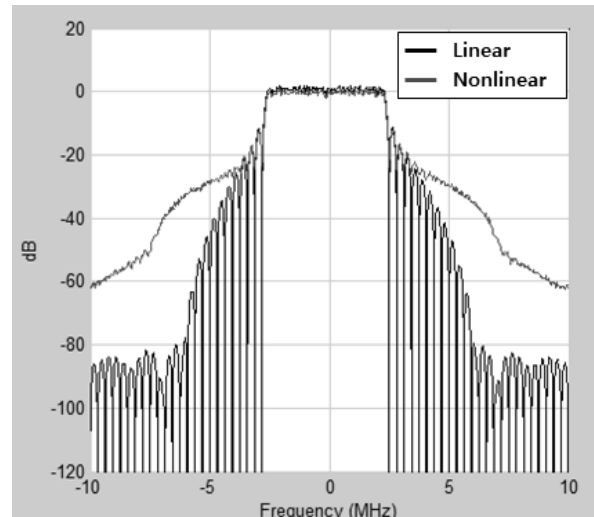
(a) condition 0



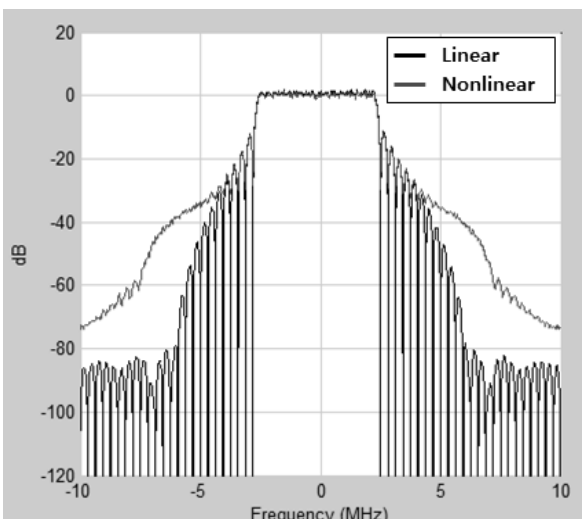
(d) condition 3



(b) condition 1



(e) condition 4



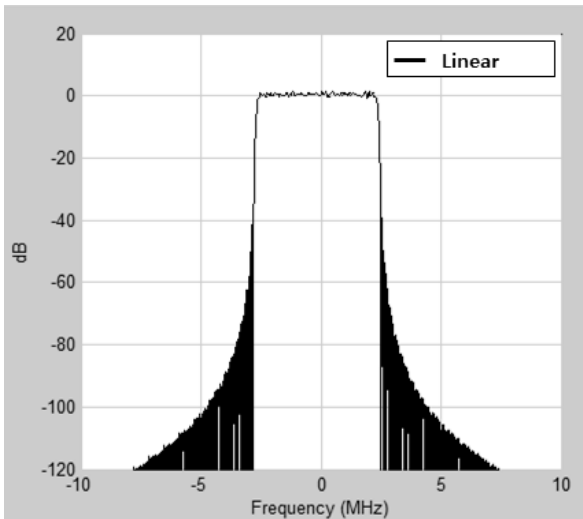
(c) condition 2

그림 6. HPA 비선형 조건에 대한 UFMC 신호의 스펙트럼
Fig. 6. Spectrum of UFMC signal according to nonlinear HPA conditions.

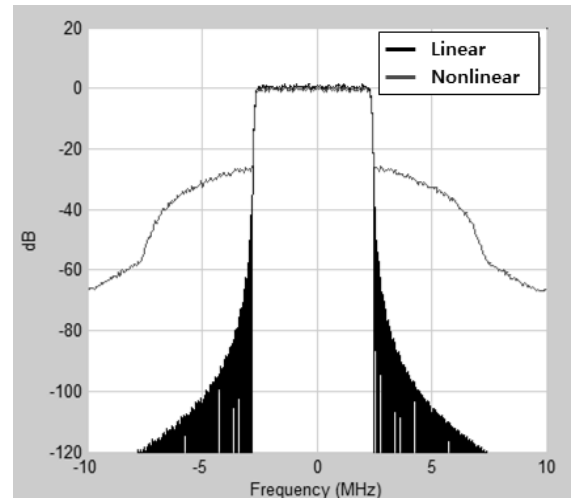
표 3. OOB 전력의 비교
Table 3. Comparison of OOB power.

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

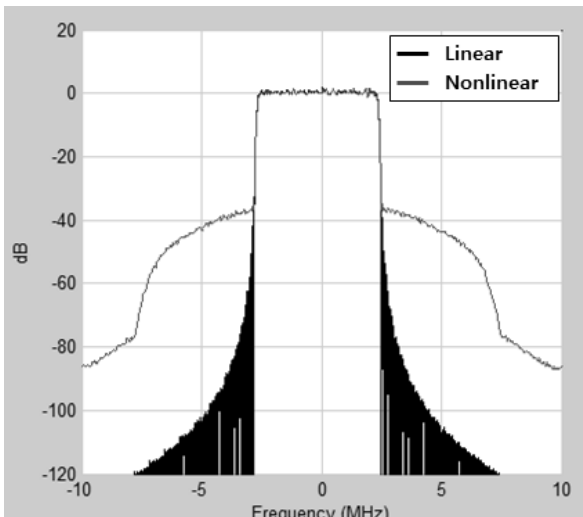
스펙트럼을 나타낸다. 이때 OOB의 전력은 약 -120dB를 나타낸다. OFDM 및 UFMC와 비교해서 가장 낮은



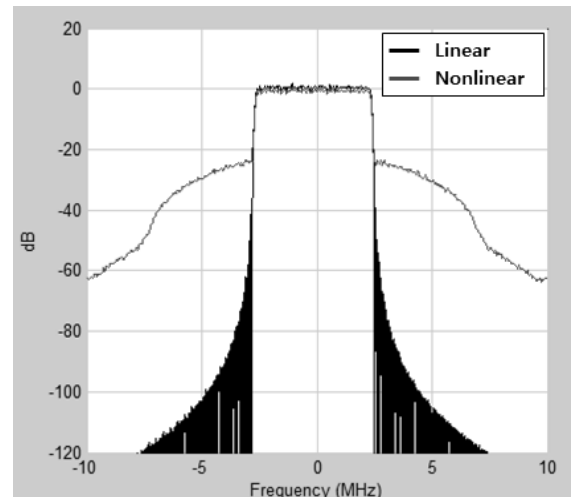
(a) condition 0



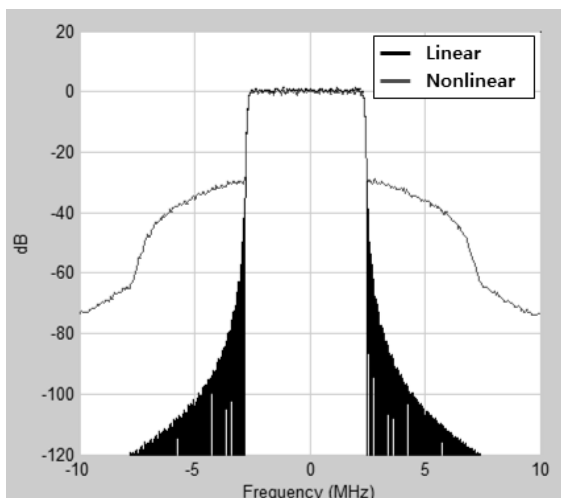
(d) condition 3



(b) condition 1



(e) condition 4



(c) condition 2

그림 7. HPA 비선형 조건에 대한 FBMC 신호의 스펙트럼
Fig. 7. Spectrum of FBMC signal according to nonlinear HPA conditions.

OOB 전력을 갖는 것을 확인할 수 있다. 그러나 그림 7. (b)~그림 7. (e)를 보면 FBMC 시스템에 HPA 비선형 특성이 적용될 경우 OOB 전력의 크기가 크게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 즉, HPA 비선형에 의해 FBMC의 장점을 잃게 된다.

표 3은 그림 5, 그림 6 그리고 그림 7의 결과를 정리한 것이다. 표 3은 OFDM, UFMC, FBMC 신호의 HPA 선형 및 비선형 조건에 대한 OOB의 크기를 나타낸다.

선형 HPA 조건에서는 FBMC가 가장 낮은 OOB 특성을 갖지만 HPA 비선형성이 증가할수록 점차적으로 UFMC 및 FBMC의 OOB가 증가하여 유사해지는 것을 확인할 수 있다.

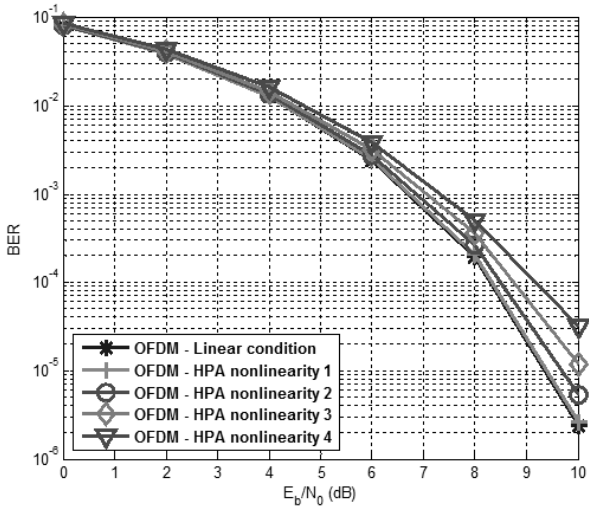


그림 8. 비선형 조건에 대한 OFDM 시스템의 BER 성능
Fig. 8. BER performance of OFDM system according to nonlinear HPA conditions.

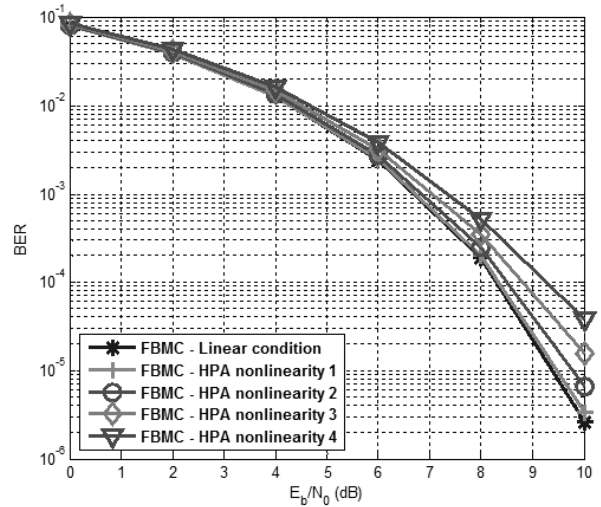


그림 10. 비선형 조건에 대한 FBMC 시스템의 BER 성능
Fig. 10. BER performance of FBMC system according to nonlinear HPA conditions.

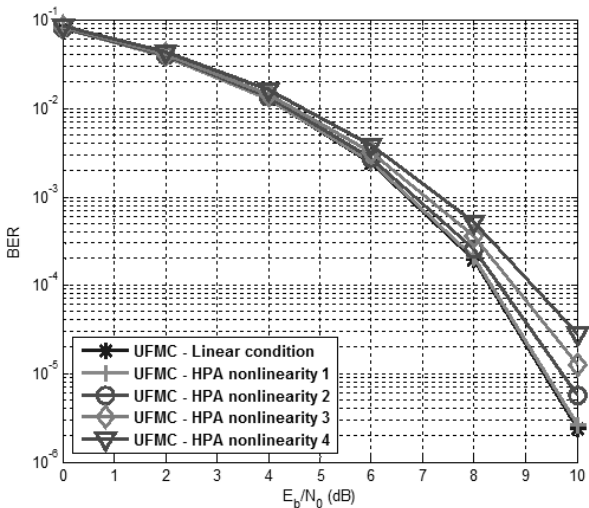


그림 9. 비선형 조건에 대한 UFMC 시스템의 BER 성능
Fig. 9. BER performance of UFMC system according to nonlinear HPA conditions.

그림 8, 그림 9, 그림 10은 각각 OFDM, UFMC, FBMC 시스템의 선형 및 비선형 조건에 대한 BER 성능을 나타낸 것이다. OFDM, UFMC, FBMC 시스템 모두 선형 조건에서 가장 좋은 성능을 내며 비선형성이 증가할 경우 점차적으로 성능열화가 발생하는 것을 확인할 수 있다.

그림 5에서 그림 7까지의 각 시스템의 송신 신호 스펙트럼 특성을 비교 분석해보면, OFDM은 높은 OOB 크기를 갖는 반면, 필터링 기법을 이용한 UFMC 및 FBMC는 낮은 OOB 전력 크기를 보이는 것을 확인할 수 있다.

여러 어플리케이션들이 한정된 스펙트럼 대역을 사용할 때, OOB의 크기가 작을수록 서로 다른 어플리케이션의 주파수 대역간의 보호 대역을 줄일 수 있고 서로 근접하게 주파수 대역을 할당할 수 있다. 보호 대역의 크기가 줄이는 것은, 사용하지 못하고 버려지는 대역을 줄이는 것과 같은 것이므로 전체적인 스펙트럼 효율을 향상시키는 효과가 있다. 또한 현재 OFDM 기반의 기술을 사용하는 다양한 어플리케이션은 넓은 보호 대역을 사용하고 있다. 2개의 주파수 대역이 사용 중이고 그 사이에 보호 대역이 있는 상황에서, OOB 전력의 크기가 매우 작은 스펙트럼 특성을 갖는 시스템이 있다면, 이 보호 대역을 활용하여 통신을 할 수 있을 것이다. 이렇게 되면 사용하지 못하는 보호 대역을 사용함으로써 스펙트럼 효율을 크게 향상시킬 수 있을 것이다. 그러나 보호 대역을 활용할 때, 보호대역 양쪽의 주파수 대역에 간섭을 일으키면 안 되기 때문에 OOB를 최소화 하는 것은 매우 중요하다. 본 논문의 시뮬레이션 결과와 같이 UFMC 및 FBMC와 같은 필터링 기법을 사용한 시스템은 OOB 전력의 크기를 획기적으로 저감시킬 수 있음을 확인하였다. 그러나 실제 시스템을 구현함에 있어서 사용되는 다양한 RF 소자들의 Non-ideal 특성이나 특히 HPA 비선형 특성으로 인하여 신호 왜곡이 발생할 수 있다. 이러한 신호 왜곡은 특히 PAPR이 높을 경우 심화되는데, OFDM, UFMC 및 FBMC는 모두 다중반송파 기반의 시스템으로 단일 반송파 시스템에 비하여 높은 PAPR 특성을 갖는다. 따라

서 실제 시스템에서 HPA 비선형성에 의해 신호 왜곡이 발생할 수 있다. 이러한 비선형 왜곡이 발생할 경우 주파수 혼변조 성분이 발생하여 OOB 전력이 크게 증가하게 된다. 물론, 선형성이 높은 HPA를 사용하게 될 경우 이러한 비선형 왜곡에 의한 OOB 전력 상승 문제를 일부 해결할 수 있으나, 높은 선형성을 갖는 HPA는 고비용, 고 전력소비의 문제점을 가지고 있다. 따라서 각 시스템에 따라 적합한 HPA를 사용하여야 하는데, 이때 부분적인 HPA 부분적인 비선형성이 고려되게 된다. 따라서 실제 시스템을 설계할 경우 이러한 비선형성을 고려하여야 한다. 본 논문에서는 HPA 비선형성의 강도에 따라서 각 시스템의 스펙트럼과 BER 특성의 변화 추이를 비교 분석하였다. 결론적으로 UFMC 및 FBMC는 선형조건에서는 매우 좋은 OOB 특성을 나타내나, 실제 환경과 같은 비선형 조건이 존재할 경우 OOB 특성이 크게 열화 되는 것을 확인할 수 있다. 즉, 인접 주파수 대역 사이에 보호 대역을 구성하거나, 기존 보호 대역을 활용하는 통신을 할 경우 인접 어플리케이션의 주파수 대역에 간섭을 일으키지 않도록 이러한 OOB 전력의 상승을 고려하여 보호 대역의 크기를 결정하고, 현재 시스템의 OOB 전력에 따라서 인접 대역에 간섭을 일으키지 않는 크기를 갖는 보호대역을 선택하여 활용해야 할 것이다. 추가로 이러한 HPA 비선형성에 의한 OOB 전력의 상승 및 BER 특성의 열화는 높은 PAPR 특성에 의해 심화되기 때문에, PAPR을 효과적으로 저감하는 기술에 대한 연구가 추가적으로 이루어져야 할 것이다.

V. 결 론

본 논문에서는 보호 대역을 최소화하고, 보호 대역을 활용한 통신을 하여 스펙트럼 효율을 효과적으로 향상시킬 수 있도록 하기 위하여, OFDM, UFMC, FBMC 각 시스템의 HPA 비선형성에 대한 특성을 스펙트럼 및 BER 성능을 평가하고 비교 분석한다. 각 시스템을 설계한 후 HPA 선형 및 비선형 조건에 대한 스펙트럼 및 BER 특성을 평가해본 결과, HPA 비선형 특성이 증가할수록 OFDM, UFMC, FBMC 신호 모두 OOB의 전력 크기가 증가하는 것을 확인할 수 있으며 FBMC가 가장 큰 폭으로 OOB의 전력이 증가하는 것을 확인하였다. 이러한 결과로 HPA 비선형 조건이 있을 경우

OOB 성능이 열화 되어 유사한 특성을 갖기 때문에, 선형 조건에서의 스펙트럼 특성이 좋은 것을 선택하는 것보다, 전체적인 시스템의 복잡도가 낮으면서 OOB 전력을 저감시키는 기술이 유리함을 확인할 수 있다. 또한 BER 성능 측면에서 보면 HPA 비선형성이 증가할 때, 모든 시스템의 성능이 열화 되는 것을 확인하였다. 즉, 실제 시스템을 설계하고, 주파수 할당을 함에 있어서 HPA 비선형 특성을 고려하여 요구되는 인접 대역간 보호 대역의 크기를 결정해야 할 것이며, 보호 대역을 활용하는 통신을 할 경우, HPA에 의해 열화될 OOB 전력 크기를 고려하여, 인접 대역에 간섭을 일으키지 않으면서 통신을 할 수 있는 보호 대역을 선택하도록 해야 할 것이다.

REFERENCES

- [1] Osseiran, A.; Boccardi, F.; Braun, V.; Kusume, K.; Marsch, P.; Maternia, M.; Queseth, O.; Schellmann, M.; Schotten, H.; Taoka, H.; Tullberg, H.; Uusitalo, M.A.; Timus, B.; Fallgren, M., "Scenarios for 5G mobile and wireless communications: the vision of the METIS project," in *Communications Magazine*, IEEE, vol. 52, no. 5, pp. 26-35, May 2014.
- [2] Dahlman, E.; Mildh, G.; Parkvall, S.; Peisa, J.; Sachs, J.; Selén, Y.; Sköld, J., "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, July 2014.
- [5] Schaich, F.; Wild, T., "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] Vakilian, V.; Wild, T.; Schaich, F.; ten Brink, S.; Frigon, J.-F., "Universal-filtered multi-carrier technique for wireless systems beyond LTE," in *Globecom Workshops (GC Wkshps)*, 2013 IEEE, pp. 223-228, 9-13 Dec. 2013.

- [7] Farhang-Boroujeny, B., "OFDM Versus Filter Bank Multicarrier," in *Signal Processing Magazine*, IEEE, vol. 28, no. 3, pp. 92-112, May 2011.
- [8] Wonsuk Chung; Beomju Kim; Moonchang Choi; Hyungju Nam; Hyunkyu Yu; Sooyoung Choi; Daesik Hong, "Synchronization Error in QAM-Based FBMC System," in *Military Communications Conference (MILCOM)*, 2014 IEEE, pp. 699-705, 6-8 Oct. 2014.
- [9] Mukherjee, Mithun; Shu, Lei; Kumar, Vikas; Kumar, Prashant; 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] Daiming Qu; Shixian Lu; Tao Jiang, "Multi-Block Joint Optimization for the Peak-to-Average Power Ratio Reduction of FBMC-OQAM Signals," in *Signal Processing*, IEEE Transactions on, vol. 61, no. 7, pp. 1605-1613, April, 2013.
- [11] Chafii, M.; Palicot, J.; Gribonval, R., "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, 1-5 Sept. 2014.
- [12] Elshirkasi, A.M.; Siddiqi, M.U.; Habaebi, M.H., "Generalized Discrete Fourier Transform Based Minimization of PAPR in OFDM Systems," in *Computer and Communication Engineering (ICCCE)*, 2014 International Conference on, pp. 205-208, 23-25 Sept. 2014.
- [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.

저 자 소 개



이 동 형(정회원)
 1999년 2월 충북대학교 전자공학과
 공학사
 2001년 2월 충북대학교 전자공학과
 공학석사
 2001년~현재 SK 텔레콤 근무

2007년 3월~현재 충북대학교 전자공학과 박사과정
 <주관심분야: 차세대 이동통신시스템, 디지털신호
 처리>



안 창 영(학생회원)
 2013년 2월 충북대학교 전자공학과
 공학사
 2015년 2월 충북대학교 전자공학과
 공학석사
 2015년 3월~현재 충북대학교 전자
 공학과 박사과정

<주관심분야: 5G 이동통신시스템, 무선통신, 디지
 털신호처리>



공 경 록(학생회원)
 2016년 2월 충북대학교 전자공학과
 공학사
 2016년 3월~현재 충북대학교 전자
 공학과 석사과정
 <주관심분야: 디지털통신, 신호처
 리>



김 병 재(학생회원)
 2016년 2월 충북대학교 전자공학과
 공학사
 2016년 3월~현재 충북대학교 전자
 공학과 석사과정
 <주관심분야: 이동통신시스템,
 신호처리>



유 흥 균(정회원)
 1988년~현재 충북대학교 전자공학
 과 교수
 1988년~현재 충북대학교 컴퓨터
 정보통신연구소 연구원
 2002년 3월~2004년 2월 충북대학교
 컴퓨터정보통신연구소 소장

1996년~현재 IEEE, IET 논문 심사위원
 2002년 한국전자과학회 학술상 수상
 2008년 ICWMC 2008 국제학술대회 “Best Paper
 Award” 수상
 2009년 SPACOMM 2009 국제학술대회 “Best Paper
 Award” 수상
 <주관심분야: 무선통신시스템, 위성통신, B5G/6G
 이동통신 시스템, 통신회로 설계 및 통신 신호 처
 리>