

16-QAM 시스템에서 HPA 비선형성을 보상하기 위한 사전왜곡기의 설계 및 성능 평가

Design and Performance Evaluation of Predistorter to Compensate HPA Nonlinearity in 16-QAM System

장 경 수 · 유 흥 균

Kyeongsoo Jang · Heung-Gyoon Ryu

요 약

초고속 통신을 위해 HPA(High Power Amplifier)를 사용할 때, HPA의 비선형 특성은 전력 효율 및 BER(Bit Error Rate) 성능 및 스펙트럼 효율 등을 열화시키는 원인이 된다. 초고속 통신을 위한 충분한 송신 전력을 얻기 위해서는 HPA의 사용이 불가피하므로 사전왜곡기를 사용하여 HPA의 비선형성을 보상시켜줄 필요가 있다. 본 논문에서는 HPA의 비선형성을 보상해주기 위한 용도의 사전왜곡기를 HPA의 앞단에 사용하여 비선형 왜곡을 보상하여, 이를 성좌도, 스펙트럼, BER 성능 등으로 비교하여 분석하였다. 시뮬레이션 결과, 사전왜곡기를 사용하여 HPA의 비선형성을 보상해줌으로써 이상적인 선형 증폭기와 비슷한 수준의 BER 성능을 얻을 수 있었으며 스펙트럼 마스크도 충족하는 것을 확인할 수 있었다.

Abstract

When using a high-power amplifier(HPA) for high-speed communication, the nonlinear characteristics of the HPA deteriorate power efficiency, bit error rate(BER) performance, and spectral efficiency. Because it is inevitable to use the HPA to obtain sufficient transmission power for high-speed communication, it is necessary to compensate for nonlinearity of the HPA by using a predistorter. In this study, a predistorter was used to compensate for the nonlinearity of the HPA, and the nonlinear distortion was compensated using the predistorter. Simulation results show that the compensation of the nonlinearity of the HPA using the predistorter achieves a BER performance similar to that of an ideal linear amplifier, and that the spectral mask is also satisfied.

Key words: Predistorter, HPA Nonlinearity, Saleh Model, 16-QAM, Linearization

I. 서 론

기존 4G LTE 대비 데이터 용량은 약 1,000배 많고 속도는 200배 빠른 차세대 이동통신인 5G 기술에 대한 연

구가 이어지는 가운데, 이러한 초고속 통신을 위한 전력 증폭기의 효율성을 높이기 위한 연구가 진행되고 있다^[1]. HPA(High Power Amplifier)의 효율성을 높이기 위해 최대 출력 전력을 얻을 때, HPA의 동작점을 포화 영역 근처에

「이 연구는 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2016R1D1A1B01008046).」

「이 연구는 2017년도 한국항공우주연구원(KARI)의 지원을 받아 수행된 연구임.」

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

· Manuscript received July, 11, 2017 ; Revised September, 22, 2017 ; Accepted November, 30, 2017. (ID No. 20170711-065)

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

설정하여야 하는데, 이때 HPA의 입출력은 비선형적 특성을 갖게 된다^[2]. 이러한 비선형 왜곡은 전력 효율을 감소시킬 뿐만 아니라 BER(Bit Error Rate) 성능을 감소시키고 스펙트럼 마스크를 충족하지 못하는 등 시스템 성능을 크게 저하시키는 원인이 된다^[3]. 그러므로 이동통신이나 위성통신 등 송신 전력을 최대한으로 증폭시키기 위해서 HPA를 사용하는 경우 비선형 왜곡을 선형화시키는 사전왜곡 기술(predistortion technology) 등의 보상 기술이 요구되어지므로 이에 따른 선형화 기술에 대한 연구가 필요하다^[4].

글로벌 정보 기술의 급속한 발전은 위성을 통한 높은 데이터 속도 전송을 요구하며, 이는 대역폭을 효율적으로 사용할 수 있는 효율적인 변조 기술을 필요로 한다^[5]. 이 경우 다중 레벨 변조 기술(M-ary)이 유리한 후보가 되는데, 기존의 M-ary 변조 기술 중에서 M-QAM(Quadrature Amplitude Modulation) 변조는 최대 전력/스펙트럼 효율을 제공하며^{[6][7]}, 위성 통신을 위한 매력적인 변조 방식인 것으로 보인다.

본 논문에서는 16-QAM을 변조방식으로 HPA의 비선형 모델은 Saleh 모델을 적용한 시스템을 구현하였다. 또한 설계된 HPA의 비선형 모델의 역의 특성을 갖는 사전왜곡기를 설계하여 사전왜곡기 사용 전, 후의 시스템 성능을 평가하고 분석하였다. II장에서는 HPA 모델에 대해 설명하였고, III장에서는 사전왜곡기 모델을, IV장에서는 시뮬레이션 결과 및 분석, V장에서는 결론을 맺었다.

II. HPA 모델

전체적인 HPA 및 사전왜곡기를 사용한 16-QAM 시스템의 구성도는 그림 1과 같다.

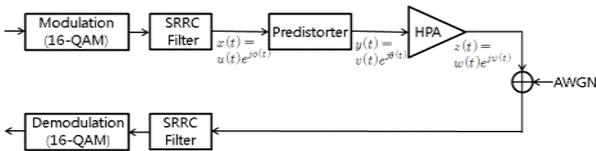


그림 1. HPA와 사전왜곡기를 사용한 16-QAM 시스템의 구성도

Fig. 1. Block diagram of the overall 16-QAM system with HPA and predistorter.

이상적인 HPA를 사용할 경우, 신호는 선형적으로 증폭하고 증폭 후 신호의 위상 왜곡이 발생하지 않는다. 하지만 최대 출력 전력을 얻기 위해서 포화 영역 근처에 동작점을 설정하게 된다면 비선형 왜곡이 발생하게 된다. 이러한 비선형 왜곡은 시스템의 성능을 저하시키는 원인이 된다.

본 논문에서는 HPA 비선형 모델로 Saleh 모델을 사용하여 비선형 특성에 의한 성능 분석 및 사전왜곡기를 사용한 성능 보상을 확인한다. Saleh 모델은 아래와 같이 4개의 파라미터를 통하여 입력 신호의 크기에 대한 출력 신호의 크기 특성(AM-AM), 입력 신호의 크기에 대한 출력 신호의 위상 특성(AM-PM)을 조절한다^[8].

$$G[v(t)] = \frac{\alpha_a v(t)}{1 + \beta_a v(t)^2} \tag{1}$$

$$\Phi[v(t)] = \frac{\pi}{3} \frac{\alpha_p v(t)^2}{1 + \beta_p v(t)^2} \tag{2}$$

식 (1)은 HPA의 AM-AM 특성 식으로 $v(t)$ 는 입력신호, α_a, β_a 는 비선형 조건에서의 AM-AM 특성식의 파라미터들로 이 값들에 따라 증폭기의 이득과 비선형 왜곡이 발생한다. 식 (2)는 HPA의 AM-PM 특성 식으로 입력신호 A의 크기에 따른 출력 신호의 위상 변화를 나타내며, 출력 신호의 위상 회전 정도는 α_p, β_p 로 구성된 파라미터에 의해 결정된다.

III. 사전왜곡기 모델

그림 2는 사전왜곡기의 원리를 나타낸다. HPA의 비선형적 입출력 특성에 대해 역의 특성을 갖도록 사전왜곡기를 설계하여 둘의 특성이 결합한다면 서로 갖고 있던



그림 2. 사전왜곡기의 원리

Fig. 2. Principle of predistorter.

비선형적 특성이 상쇄되어 선형적인 응답을 갖는 시스템을 구현할 수 있다⁹⁾. QAM 시스템에서 비선형 신호 왜곡을 보상하기 위해 신호 성좌도의 사전왜곡이 참고문헌 [10]에서 처음으로 설명되었다. 본 논문은 16-QAM 시스템에서 Saleh 모델을 적용하여 비선형성을 보상하기 위한 사전왜곡 기술을 제안한다.

선형적 응답을 갖는 시스템을 구현하기 위한 사전왜곡기를 설계할 때, 우선 HPA의 출력에서 아래 식 (3)과 식 (4)가 만족되어야 한다¹¹⁾.

$$w(t) = G[v(t)] \tag{3}$$

$$\psi(t) = \theta(t) + \Phi(t) \tag{4}$$

여기서 $v(t)$ 와 $\theta(t)$ 는 각각 HPA의 입력에서 신호의 진폭과 위상이다. 사전왜곡기가 비선형성을 보상하기 위해서는 아래 식 (5)와 식 (6)을 만족하여야 한다.

$$v(t) = G^{-1}[u(t)] \tag{5}$$

$$\theta(t) = \phi(t) - \Phi(t) \tag{6}$$

여기서 $G^{-1}[u(t)]$ 함수는 $u(t) \geq \sqrt{\frac{\alpha_a^2}{4\beta_a}}$ 에 대해서만 존재하므로 사전왜곡기의 입력을 제한하여 진폭이 $\sqrt{\frac{\alpha_a^2}{4\beta_a}}$ 을 초과하지 않도록 해야 한다. 따라서 식 (7)과 식 (8)을 만족하여야 한다¹²⁾.

$$v(t) = \begin{cases} \frac{\alpha_a - \sqrt{\alpha_a^2 - 4\beta_a u(t)^2}}{2\beta_a u(t)}, & 0 < u(t) < \sqrt{\frac{\alpha_a^2}{4\beta_a}} \\ G^{-1}\left(\sqrt{\frac{\alpha_a^2}{4\beta_a}}\right) = \frac{1}{\sqrt{\beta_a}}, & u(t) \geq \sqrt{\frac{\alpha_a^2}{4\beta_a}} \end{cases} \tag{7}$$

$$\theta(t) = \phi(t) - \frac{\alpha_p v(t)^2}{1 + \beta_p v(t)^2} \tag{8}$$

IV. 시뮬레이션 결과 및 분석

시스템의 성능 평가를 위해 MATLAB 툴을 통해 Saleh 모델의 비선형 HPA와 비선형성을 보상해주는 사전왜곡기를 설계하여 시스템 성능을 평가하였다. HPA의 비선

표 1. 시뮬레이션 조건

Table 1. Conditions of simulation.

Parameters	Value
Modulation	16-QAM
SRRC filter	Roll-off factor: 0.5, Upsampling factor: 8
HPA model	Saleh model
HPA coefficients	$\alpha_a=2.0587, \beta_a=1.0517,$ $\alpha_p=18.233, \beta_p=9.004$
E_b/N_0	0~20 dB
Channel	AWGN channel

형 계수 및 SRRC(Square Root Raised Cosine) 필터 특성 등 설계된 시스템에서의 시뮬레이션 조건들은 표 1과 같다.

그림 3은 시스템에서 사용한 비선형 계수에 대한 HPA의 AM-AM 및 AM-PM 특성 그래프이다. 그림 4는 HPA를 사용한 16-QAM 시스템에서 HPA 출력 후 채널을 통과한 신호의 성좌도이다. 왼쪽은 사전왜곡기를 사용하지 않은 것이고, 오른쪽은 사전왜곡기를 사용한 것이다. 보이는 바와 같이 사전왜곡기를 사용함으로써 HPA로 발생하는 비선형 왜곡을 보상해주는 효과를 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다.

그림 5는 HPA를 사용한 16-QAM 시스템의 스펙트럼을 나타낸 것이다. Spectrum mask 1은 SFCG 21-2R2 Mask for 9.35 Msps이며, Spectrum mask 2는 NTIA Mask for 6 MHz necessary BW이다¹³⁾. 사전왜곡기 없이 HPA만 통과한 경우 HPA의 비선형성으로 인하여 OOB(Out of Band)가 증가되어 스펙트럼 마스크에 충족하지 못하지만 사전왜곡

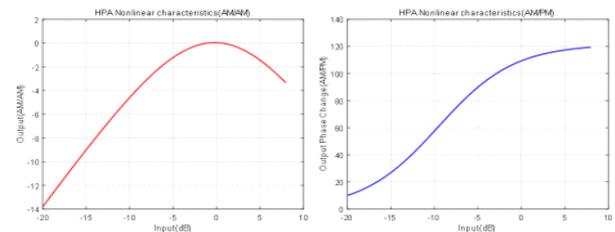


그림 3. HPA 비선형 조건에 대한 AM-AM 및 AM-PM 특성

Fig. 3. Characteristics of AM-AM and AM-PM according to nonlinear HPA conditions.

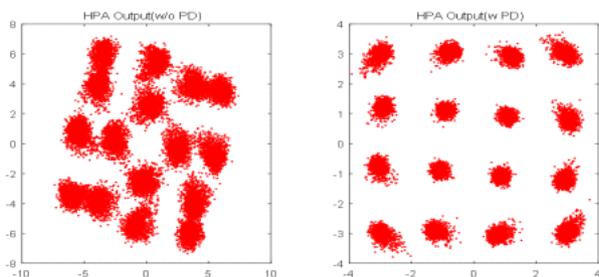


그림 4. HPA를 사용한 16-QAM 시스템의 성좌도
Fig. 4. Constellation of 16-QAM system with HPA.

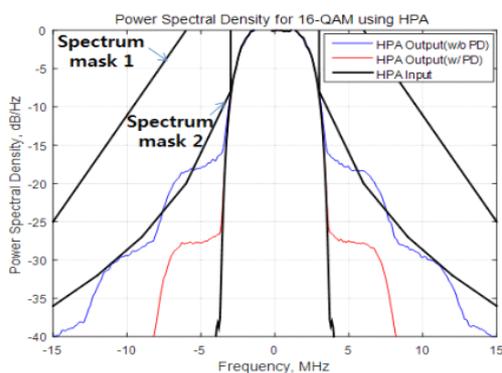


그림 5. HPA를 사용한 16-QAM 시스템의 스펙트럼
Fig. 5. Spectrum of 16-QAM system with HPA.

기를 통과한 후 HPA를 통과한 경우에는 스펙트럼 마스크에 충족하므로 사전왜곡기를 통해 HPA의 비선형 왜곡이 보상되었다고 할 수 있다.

그림 6은 각 조건에 따른 16-QAM의 BER 성능으로 사

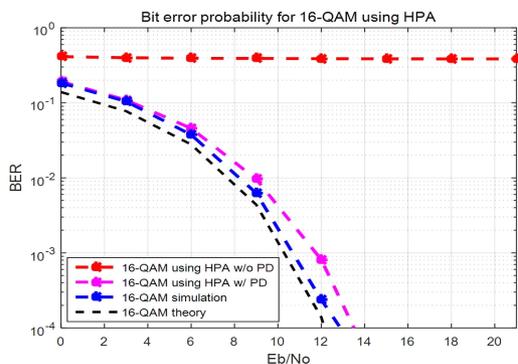


그림 6. HPA를 사용한 16-QAM 시스템의 BER 성능
Fig. 6. BER performance of 16-QAM system with HPA.

전왜곡기를 사용하는 경우 이론치와 10^{-4} 의 경우 약 3 dB 차이로 근접한 이론값에 근접한 BER 성능을 나타낸다.

그림 7 및 그림 8은 사전왜곡기가 없는 HPA 시스템에서 IBO(Output Back-off)에 따른 16-QAM 시스템의 스펙트럼과 BER 성능을 나타낸다. IBO 수치가 높을수록 HPA 비선형 왜곡이 발생하는 포화 영역에서 선형적인 구간으로 동작점이 이동하게 된다. 결과적으로 약 20 dB의 IBO 값을 가질 때에 16-QAM 시스템의 스펙트럼과 BER 성능 등

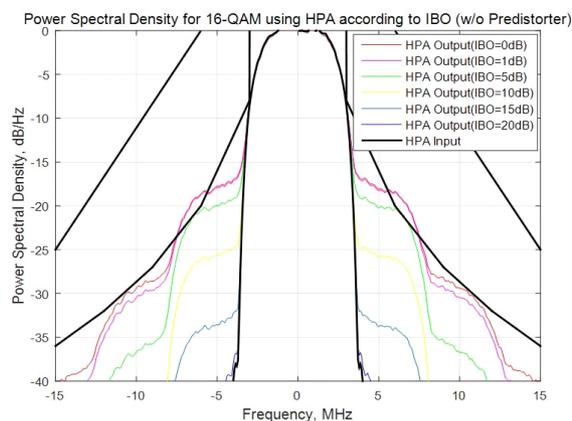


그림 7. IBO에 따른 사전왜곡기없이 HPA를 사용한 16-QAM 시스템의 스펙트럼
Fig. 7. Spectrum 16-QAM system using HPA without predistorter according to IBO.

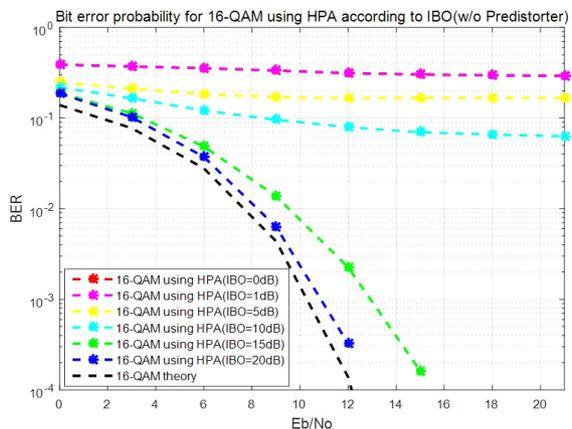


그림 8. IBO에 따른 사전왜곡기없이 HPA를 사용한 16-QAM 시스템의 BER 성능
Fig. 8. BER performance of 16-QAM system using HPA without predistorter according to IBO.

이 이론값에 가까운 성능을 갖는 것을 확인할 수 있었다.

그림 9 및 그림 10은 사전왜곡기가 있는 HPA 시스템에서 IBO에 따른 16-QAM 시스템의 스펙트럼과 BER 성능을 나타낸다. 사전왜곡기가 없는 경우에 대한 성능을 나타내는 그림 7 및 그림 8과 비교하였을 때에 전체적인 Spectrum과 BER 성능이 모두 이론값에 가까워지는 것을 확인할 수 있다. 표 2는 사전왜곡기를 사용한 경우와 그렇지 않은 경우, 일반적인 16-QAM 시스템의 성능과 비슷한 성

표 2. IBO 값에 따른 16-QAM 시스템의 성능 비교

Table 2. Performance comparison of 16-QAM system according to IBO value.

Condition	Required input-back-off value
16-QAM(w/o predistorter)	20 dB
16-QAM(w/ predistorter)	15 dB

능을 갖도록 요구되어지는 IBO 값들을 나타낸다.

V. 결 론

본 논문에서는 일반적인 통신 시스템에서 실제 시스템 구현에서 발생할 수 있는 HPA 비선형 모델을 적용 후 HPA의 AM-AM 및 AM-PM 특성과 사전왜곡기 사용 전, 후의 성좌도 및 스펙트럼과 BER 성능 등을 평가하고 분석하였다. 시뮬레이션 결과로 HPA의 비선형 특성으로 인한 OOB가 증가된 스펙트럼을 사전왜곡기를 사용하여 저감시킬 수 있다. HPA만 사용할 경우 스펙트럼 마스크를 침범하지만 사전왜곡기를 같이 사용할 경우 OOB가 저감되어 스펙트럼 마스크를 충족시키는 것을 확인할 수 있었다. BER 성능 분석 결과는 HPA만 사용할 경우에는 HPA의 비선형 특성으로 인해 BER 성능이 크게 열화되었고, 사전왜곡기와 함께 사용한 경우 BER 성능이 10^{-4} 에서 이론값과 약 3 dB 차이로 비슷한 수준까지 향상되는 것을 확인할 수 있었다.

IBO를 각각 1, 5, 10, 15, 20 dB 등으로 설정하여 사전왜곡기 유/무에 따른 HPA로 인한 16-QAM 시스템의 스펙트럼과 BER 성능도 확인하였다. 사전왜곡기가 없는 경우 IBO가 증가하면서 스펙트럼과 BER 성능이 크게 향상되는 것을 확인하였다. 사전왜곡기가 있는 경우는 변화의 폭은 비교적 작지만 사전왜곡기가 없는 경우에 비해 전체적인 시스템의 스펙트럼 및 BER 성능이 월등히 높다는 것을 확인할 수 있었다.

References

[1] A. Pärssinen, "Multimode-multiband transceivers for next generation of wireless communications," in *2011 Proceedings of the European Solid-State Device Research*

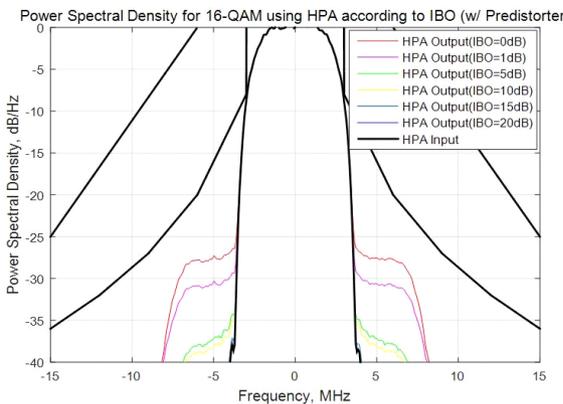


그림 9. IBO에 따른 사전왜곡기와 함께 HPA를 사용한 16-QAM 시스템의 스펙트럼

Fig. 9. Spectrum performance of 16-QAM system using HPA with predistorter according to IBO.

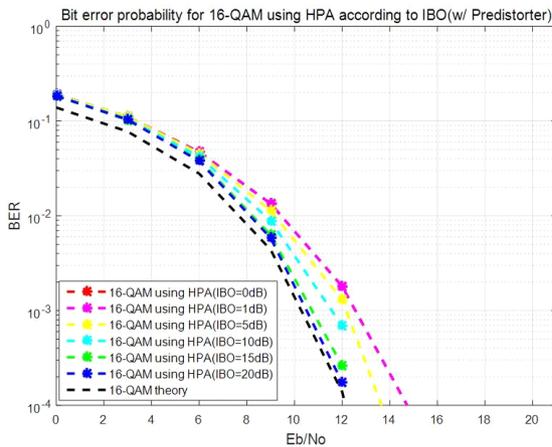


그림 10. IBO에 따른 사전왜곡기와 함께 HPA를 사용한 16-QAM 시스템의 BER 성능

Fig. 10. BER performance of 16-QAM system using HPA with predistorter according to IBO.

- Conference(ESSDERC), Helsinki, Sep. 2011, pp. 42-53.
- [2] P. Kenington, *High-linearity RF Amplifier Design*, Norwood, USA: Artech House, 2000.
- [3] H.-G. Ryu, Y.-H. Lee, "A new combined method of the block coding and predistortion for the nonlinear distortion compensation," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 49, no. 1, pp. 27-31, Jun. 2003.
- [4] T. Kubo, N. Fudaba, H. Ishikawa, H. Hamada, K. Nagatani, and H. Hayashi, et al., "A highly efficient adaptive digital predistortion amplifier for IMT-2000 base station," in *The 57th IEEE Semiannual Vehicular Technology Conference, 2003. VTC 2003-Spring*, Jeju, vol. 4, Apr. 2003, pp. 2206-2210.
- [5] M. Ibnkahla, Q. M. Rahman, A. I. Sulyman, H. A. Al-Asady, Jun Yuan, and A. Safwat, "High-speed satellite mobile communications: technologies and challenges," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 92, no. 2, Feb. 2004, pp. 312-339.
- [6] A. J. Goldsmith, S.-G. Chua, "Variable-rate variable-power MQAM for fading channels," *IEEE Journals & Magazines*, vol. 45, no. 10, pp. 1218-1231, Oct. 1997.
- [7] W. T. Webb, R. Steel "Variable rate QAM for mobile radio," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 43, no. 7, pp. 2223-2230, Jul. 1995.
- [8] A. A. M. Saleh, "Frequency independent and frequency dependent nonlinear model of TWT amplifiers," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 29, no. 11, pp. 1715-1720, Nov. 1981.
- [9] O. Hammi, F. M. Ghannouchi, "Power alignment of digital predistorters for power amplifiers linearity optimization," *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 55, no. 1, pp. 109-114, Mar. 2009.
- [10] J. Grabowski, R. C. Davis, "An experimental M-QAM modem using amplifier linearization and baseband equalization techniques," in *NTC'82; National Telesystems Conference*, Galveston, TX, Nov. 1982, pp. E3-2.
- [11] D. Di Zenobio, G. Santella, and F. Mazzenga, "Adaptive linearization of power amplifier in orthogonal multicarrier schemes," in *Proceeding of the 1995 IEEE Wireless Communication System Symposium*, New York, 1995, pp. 225-230.
- [12] M. M. Shammasi, S. M. Safavi, "Performance of a predistorter based on Saleh model for OFDM systems in HPA nonlinearity," in *2012 14th International Conference on Advanced Communication Technology(ICAICT)*, PyeongChang, pp. 148-152, Feb. 2012.
- [13] C. C. Wang, M. K. Sue, and F. Manshadi, "Techniques to minimize adjacent band emissions from earth exploration satellites to protect the space research(Category B) Earth Stations in the 8,400~8,450 MHz band," in *Space Frequency Coordination Group 23 Meeting*, Perros-Guirec, France, Sep. 2004.

장 경 수



2017년 2월: 충북대학교 전자공학과 (공학사)
 2017년 3월~현재: 충북대학교 전자공학과 (공학석사)
 [주 관심분야] 무선통신시스템, 신호처리

유 흥 균



1988년~현재: 충북대학교 전자공학과 교수
 2002년 3월~2004년 2월: 충북대학교 컴퓨터정보통신연구소 소장
 [주 관심분야] 무선통신, B5G/6G 이동통신, 위성통신, 통신회로 설계 및 통신 신호처리