

비선형 증폭기의 위상 오차 보정을 위한 적응형 보상 시스템

한상민^{1*}, 임종식¹, 손태호¹, 윤원상², 표성민², 김영식²
¹순천향대학교 정보통신공학과, ²고려대학교 컴퓨터전파통신공학과

An Adaptive Phase Error Correction System for Nonlinear Amplifiers

Sang-Min Han^{1*}, Jongsik Lim¹, Tae-Ho Son¹, Won-Sang Yoon²,
Seongmin Pyo² and Young-Sik Kim²

¹Depr. of Information & Communication Eng., Soonchunhyang University,

²Dept. of Computer and Radio Communications Eng., Korea University

요약 본 논문에서는 비선형 증폭기의 위상 오차의 보정 방법을 채용한 시스템을 제안하였다. 간단한 위상 벡터의 적응형 응답 방식을 이용하여, 다양한 입력 전력 변화에 대해 매우 큰 폭의 AM/PM 왜곡 감소 효과를 얻을 수 있었다. 제안된 방법은 다양한 위상 오차 변화 환경에 대해 본 보정 시스템을 채용하지 않았을 경우와 비교하여, AM/PM 왜곡을 최대 80 %까지 감소시킬 수 있는 것으로 평가되었다. 또한 추가적으로 입력 신호에 대한 포락선 보상 기법을 추가하여 출력 신호의 인접채널 전력 비율의 향상시킨 결과를 보였다.

Abstract A novel adaptive phase calibration method is proposed for nonlinear amplifiers. Based on the adaptive process of simple phase vector calculations, the AM/PM distortion can be significantly reduced for various input power. The performance of the proposed method is evaluated for up to 80 % improvements in AM/PM distortions, compared with the distortion of a conventional amplifier. Moreover, by means of an additional envelope-compensation technique, the improvement of the adjacent channel power ratio (ACPR) is presented.

Key Words : Phase Distortion, AM/PM, AM/AM, Calibration, Nonlinear Devices.

1. 서론

최근의 전력증폭기는 폴라 송신기 (Polar Tx.), 포락선 추적 증폭기(Envelop Tracking Amplifier), LINC와 같은 시스템 송신기 구조 형태로 발전하여 오고 있다. 이는 10 dB 이상의 최대전력 대 평균전력비(Peak-to-Average Power Ratio, PAPR)를 갖는 OFDM과 같은 신호원을 선형적으로 증폭하기 위해 증폭기의 성능이 더욱 지능적이고 능동적으로 설계할 필요성이 요구됨에 따른 것이다 [1]. 이러한 매우 빠른 속도로 변화하는 입력 신호의 크기와 위상을 보정하여 선형적인 증폭을 수행하기 위해 기존에 수행되었던 보정 방식을 feedforward, feedback,

pre-distortion (PD)과 같이 크게 3가지로 분류할 수 있다. 특히 디지털 방식의 PD (Digital PD, DPD)는 DSP에 의한 정확한 보정 성능으로 최근 활발한 연구가 진행되고 있는 분야이다[2,3]. 그러나 기본적으로 PD 방식은 적용되는 증폭기 각각의 비선형 특성을 측정하여, 이의 역함수 매트릭스를 산출하여야 하는 어려움이 따른다[4]. 또한 높은 PAPR로 인해 DPD는 매우 빠른 OFDM 신호를 검출해야 하므로, DSP의 복잡한 프로세싱을 요구하는 단점을 가지고 있는 실정이다 [3-6].

본 논문에서는 AM/PM 왜곡을 적응형으로 보상할 수 있는 보정 시스템을 제안하였다. 제안된 시스템은 변화하는 입력 위상 오차에 대해 동적인 측정 및 보상을 동시에

*교신저자 : 한상민 (smhan@sch.ac.kr)

접수일 09년 07월 13일

수정일 09년 09월 04일

게재확정일 09년 09월 16일

수행함은 물론 매우 간단한 벡터 계산에 의해 이루어지므로 프로세스의 과부하 없이 빠른 보정을 능동적으로 수행하는 장점을 가지고 있다. 또한 적응형의 알고리즘은 증폭기 뿐만 아니라 위상 오차를 줄여야 하는 모든 비선형 소자에 적용할 수 있으며, 사전에 비선형 소자의 왜곡 특성을 측정하지 않아도 되는 이점이 있다. 제2장에서는 제안된 위상 오차 보정 시스템의 이론을 소개하고, 제3장에서 다양한 입력 전력 변화 즉, 다양한 위상 오차 변화에 따른 보정 성능을 검증하였다. 또한 제4장에서 제안된 시스템에 AM/AM 보정 시스템을 부가하여 스펙트럼 성능을 평가하고, 제5장에서 결론을 맺었다.

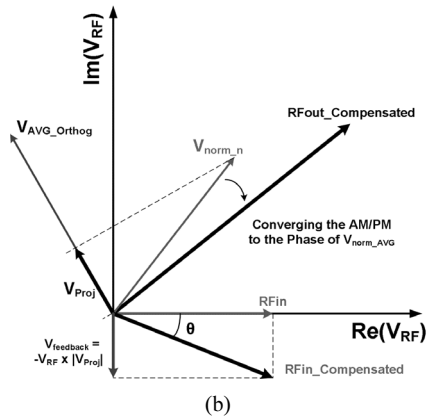
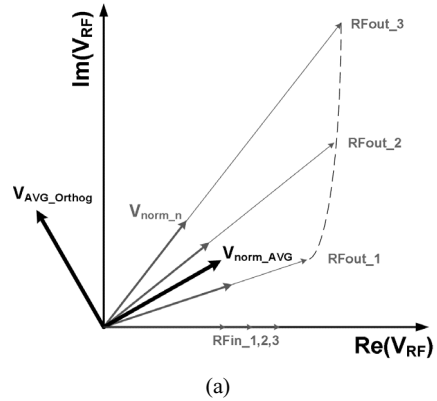
2. 적응형 위상 보정 시스템

제안된 위상 보정 시스템은 증폭기 입력의 변화에 따른 위상 오차를 효과적인 특정 위상으로 안정화 시키도록 설계되었다. 즉 적절한 평균 위상값과의 위상 편차를 줄이는 방식으로 수행된다. 그림 1은 제안된 위상 오차 보정 알고리즘을 도식화한 위상 다이어그램이다. 그림 1(a)에서 서로 다른 크기와 기준 위상을 갖는 신호들 ($RF_{in_1, 2, 3}$)은 증폭기 출력에 의해 서로 다른 크기와 위상 변화 출력($RF_{out_1, 2, 3}$)으로 나타난다. 여기서 위상 변화는 입력 신호 크기에 비례하는 것으로 가정하였으며, 다른 위상 변화 값을 가져도 무방하다. 보상 시스템에 의해 수집된 출력 신호의 샘플은 동일한 크기로 정규화 (V_{norm_n})되고, 일정 구간 동안 수집된 신호들에 의해 평균 위상(V_{norm_AVG})을 얻게 된다. 이는 식 (1)과 같은 간단한 계산에 의해 직교 벡터 성분(V_{AVG_Orthog})으로 계산되어 기준 위상으로 저장된다.

$$V_{AVG_Orthog} = (-Im(V_{norm_AVG}), Re(V_{norm_AVG})) \quad (1)$$

그림 1 (b)에서 보는 바와 같이 이후 입력된 신호들은 정규화(V_{norm_n})되어 아래 식 (2)에 의해 V_{AVG_Orthog} 벡터로 정사영(V_{proj})되어 기준 위상인 V_{norm_AVG} 에서의 위상 이격을 정량화 하게 된다. V_{proj} 의 절대값이 기준 위상으로 부터의 위상 이격 지표가 된다.

$$V_{Proj} = Re(V_{norm_n}) \times Re(V_{AVG_Orthog}) + Im(V_{norm_n}) \times Im(V_{AVG_Orthog}) \quad (2)$$



[그림 1] 위상 다이어그램 (a) 평균 및 직교 위상 단계 (b) 정사영 및 보정 단계

오차 보정을 위한 값으로 $V_{feedback}$ 은 $|V_{proj}|$ 과 입력 신호의 -90 도 위상 곱으로 형성되며, 이 값이 위상 오차 보상을 위한 보정 계수가 되어 입력 신호와의 벡터 곱에 의해 입력 신호의 위상을 θ 만큼 변화 시키게 된다. 여기서 보정되는 위상값은 아래 식 (3)에 의해 결정된다. 결국 출력된 신호의 위상은 최초 V_{norm_n} 의 위상에서 $RF_{out_Compensated}$ 만큼으로 줄어들게 된다. 여기서 보정을 위한 위상 신호는 단위 크기를 가지므로 입력 신호원의 크기에 영향을 주지 않고 위상만을 보정할 수 있게 된다.

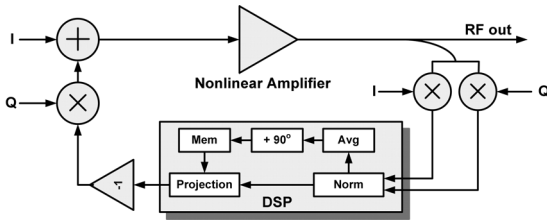
$$\theta = \tan^{-1} \frac{|V_{feedback}|}{|RF_{in}|} \quad (3)$$

이와 같은 위상 보정 기능은 그림 1의 예시와 같이 증폭기에 의한 입력력 위상 변화가 양(+)의 값을 가질 경우 θ 는 양의 값을 가지며, 증폭기 위상 변화가 음(-)의 값을 가질 경우 θ 도 음의 값을 나타내 결국 특정 위상으로 수렴함을 알 수 있다. 그러므로 계속적으로 변화하는 입력

신호의 위상 변화에 대해 설정된 기준 위상으로 능동적으로 보정이 가능하며, 간단한 산술에 의해 보정이 가능하므로 빠른 보정 기능을 가지고 있음을 알 수 있다.

3. 적응형 위상 보상 시스템 성능 평가

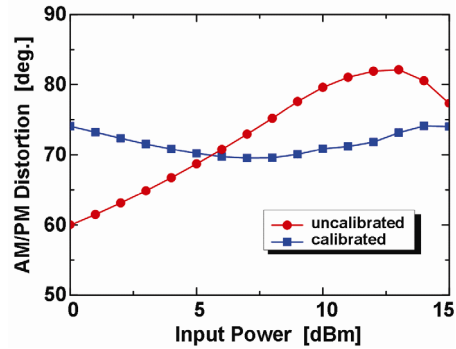
제안된 시스템의 성능을 AM/PM 왜곡 감소율로 평가하였다. 앞 장에서 제안된 알고리즘은 그림 2에서 보이는 바와 같이 각 기능들을 구성하였으며, 비선형 증폭기의 비선형 영역 모델을 Cann의 모형 [7]에 의해 고조파 생성 및 증폭 한계를 고려하였다. 평가 모델은 Agilent사의 ADS로 구현되었으며, 구현된 비선형 증폭기는 7.6 dB의 선형 이득과 20 MHz 이상의 대역폭, AM/AM 및 AM/PM 왜곡을 1 GHz의 중심주파수에서 나타내었다. 설계된 비선형 증폭기의 입력 전력에 따른 비선형 특성을 4장에서 다시 보이게 된다.



[그림 2] 적응 위상 보정을 채용한 시스템 구조도

제안된 보정 회로를 포함한 증폭기 구조는 비선형 증폭기를 포함하여 직교위상 변환기와 벡터 연산을 담당하는 DSP, 반전 위상을 위한 버퍼 등으로 구성되어있다. 증폭기의 출력 신호는 직교 위상의 하향 변환기에 의해 두 개의 다른 위상을 갖는 기저대역 신호로 DSP에 입력되며, 간단한 벡터 연산을 거쳐 위상 보정을 위한 $V_{feedback}$ 을 증폭기 입력에 전력 합성기를 통해 삽입하게 된다.

보정 시스템의 성능을 평가하기 위해 두 가지 전력 레벨 범위에 대해 위상 오차 보상 평가를 수행하였다. 위상 오차의 값은 입력 신호 레벨에 의해 결정되기 때문에, 보정 시스템을 채용한 경우와 보정 시스템을 채용하지 않은 경우에 대해 각각 15 dB 와 10 dB의 입력 전력 범위를 설정하였다. 여기서 입력 신호는 지정된 시간 범위동안 설정된 입력 전력 범위 내에 균등하게 확률 분포하는 것으로 가정하였다.

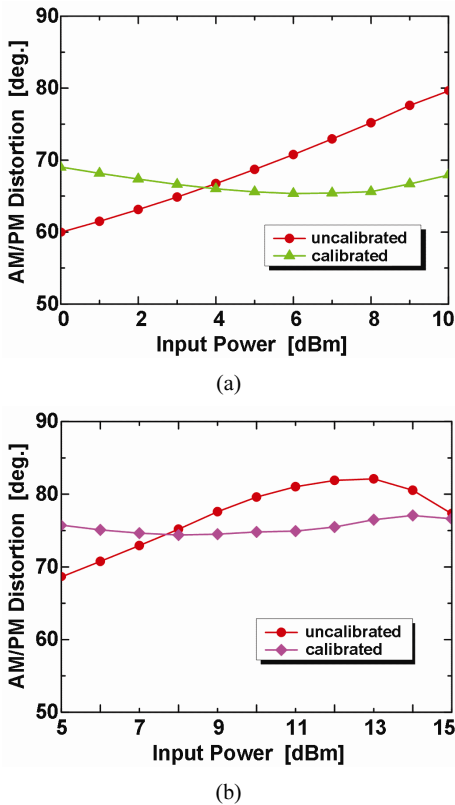


[그림 3] 15 dB 입력전력범위의 위상보정 성능평가

먼저 15 dB의 전력 범위 실험을 위해 0 dBm에서 15 dBm의 입력 전력이 증폭기에 입력될 경우에 대해 위상 변화를 측정하였다. 그림 3에서 보이는 바와 같이 측정 결과 보정 회로를 사용하지 않은 경우 60.0 - 82.1도의 출력 위상이 측정된 반면, 보정시스템을 채용한 증폭기는 출력 위상이 69.5 - 74.1도까지로 위상 변화가 22.1도에서 4.6도로 크게 줄어 든 것을 볼 수 있다.

이같은 15 dB 전력 범위에서의 시스템 성능은 급격한 큰 폭의 전력 레벨의 변화가 있는 환경에 대한 성능 분석이며, 10 dB 정도의 적은 전력 변화 범위에서의 위상 보정 성능에 대해 다음에서 분석하였다.

적은 전력 범위인 10 dB 범위에 대해서는 두 가지 전력 범위를 나누어 성능 분석을 실시하였다. 그림 4에서 보이는 바와 같이 각각 0 - 10 dBm의 범위와 5 - 15 dBm의 범위로 나누어 각각 중전력 레벨과 고전력 레벨 환경에 대한 평가를 실시하였다. 먼저 0 - 10 dBm의 입력 전력 범위에 대해서는 보정 회로가 없는 경우 60.0 - 79.6도의 위상 변화가 있었던 반면, 보정 회로를 이용한 증폭기 회로의 경우 65.4 - 69.0도의 위상 변화를 보였다. 이는 69.2도의 평균 위상을 기준으로 설정한 시스템 동작으로 위상 오차가 19.6도에서 3.6도로 크게 감소함을 알 수 있다. 고 입력 전력 실험인 5 - 15 dBm의 범위의 경우, 보정 회로가 없을 때 68.7도에서 82.1도의 출력 위상 변화를 보인 증폭기 출력은 74.4도에서 77.1도의 위상 출력을 보여 13.4도의 위상 오차범위를 2.7도로 크게 감소시킴을 알 수 있다. 이 실험은 77.07도의 평균 위상을 기준값으로 수행되었다. 제안된 시스템은 앞서 수행된 결과에 의해 다양한 입력 전력 변화 범위와 전력 레벨에 대해 각각 79.5 %, 81.2 %, 80.1 %의 위상 오차의 감소를 나타내었다.



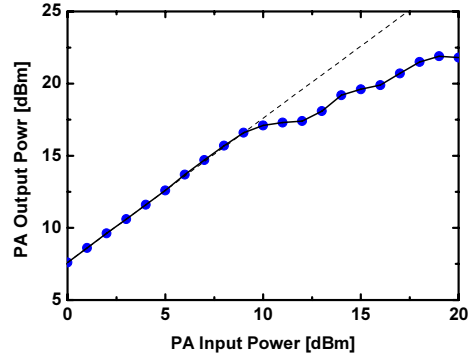
[그림 4] 10dB의 입력전력범위의 위상 보정 성능 평가 (a) 0-10 dBm (b) 5-15 dBm

4. ACPR 향상을 고려한 보정 회로 성능

불균일한 스펙트럼 전력을 갖는 포락선 변조 신호인 AM, QAM 및 OFDM 신호는 비선형 소자의 출력에서 AM/PM 뿐만 아니라 AM/AM 왜곡에 의해 스펙트럼 특성을 열화시킨다. 이러한 문제점 해결을 위해 포락선 추적 증폭기, 플라 송신기 등에 대한 연구가 수행되어 왔다. 본 장에서는 위상 보정 회로의 성능을 포락선 추적 방식의 보정회로와 함께 ACPR의 성능 향상을 보임으로써 비선형 증폭기의 성능 향상을 검증하였다. ACPR은 채널 대역을 점유하는 신호의 평균전력과 이와 인접한 채널 대역을 점유하는 비선형 출력 전력의 비율로 증폭기와 같은 비선형 소자의 출력 신호로 소자의 비선형성을 판별하는 지표로 활용되고 있다.

증폭기가 비선형 구간에서 동작되도록 입력 신호 레벨을 설정하기 위해 설계된 증폭기의 선형 특성을 측정하였다. 그림 5는 위상 보정 시스템에 사용된 증폭기의 입

력 전력 증가에 따른 선형 특성을 나타내고 있다. 출력 P_{1dB} 는 약 18.2 dBm으로 입력 전력 기준으로 10.6 dB이 상에서 비선형 구간을 형성함을 알 수 있다.



[그림 5] 증폭기의 입력 전력에 따른 선형 특성

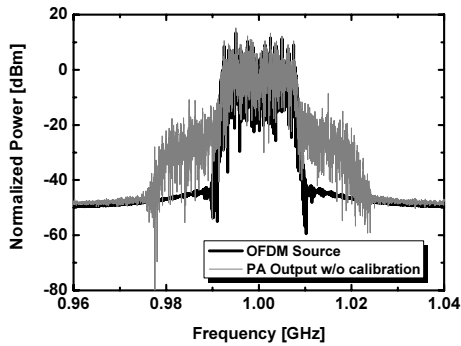
포락선 보상 회로는 비선형 증폭기의 DC 바이어스 회로의 바이어스 크기를 조절하는 방식에 의해 신호 포락선을 추적하는 일반적인 방법을 취하였다. 이를 위해 두 개의 DC 바이어스 레벨을 설정한 후 기준 전압으로부터 이를 선택적으로 변화하여 증폭 특성을 변화시켰다. 측정에 사용된 OFDM 신호는 256개의 FFT 사이즈를 가지며, 20 MHz의 대역폭 신호를 1 GHz 중심 주파수에서 구현하였다. 생성된 채널의 입력 채널 전력은 990 - 1010 MHz에서 28.6 dBm이며, 인접 채널 전력은 28.6 dBm으로 44.7 dB의 ACPR을 갖는다.

그림 6은 증폭기의 출력 스펙트럼을 보정 회로가 있는 경우와 없는 경우에 대해 각각 나타내었다. 보정 회로가 없는 경우, 출력 채널 전력은 30.5 dBm이고, 인접 채널 전력은 4.5 dBm으로 26.0 dB의 ACPR을 나타낸다. 반면 보정 회로가 있는 경우는 29.0 dBm의 채널 전력에 -8.4 dBm의 인접 채널 전력으로 37.4 dB의 ACPR을 나타내었다. 부가적인 보정 회로에 의한 전력 손실로 증폭기 이득은 다소 줄어들었으나 11.4 dB의 ACPR 향상을 나타내었다.

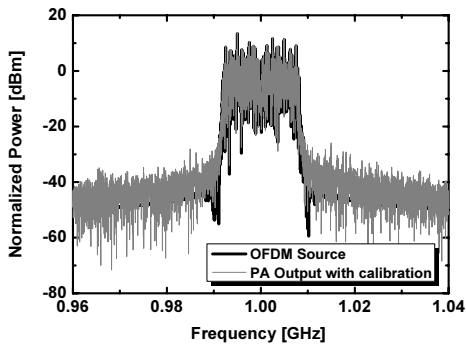
5. 결론

본 논문에서는 비선형 증폭기의 위상 오차 보정을 위한 적응형 보정 시스템을 제안하였다. 제안된 시스템은 다양한 입력 전력 범위에 따른 위상 변동 환경에 대해 모두 80 %의 높은 위상 변동을 감소 성능을 나타내었다. 또한 제안된 구조는 비선형 증폭기 뿐만아니라 모든 비선

형 위상 오차를 발생시키는 시스템의 교정을 위해 채용될 수 있다. 기존의 위상, 포락선 보상 회로와 같이 비선형 소자의 위상 변화 특성을 미리 측정할 필요가 없으며, 간단한 벡터 연산에 의해 보정이 가능하므로 복잡한 매트릭스 연산을 요구하는 DPD 보다 빠르고 효율적인 적용이 가능한 시스템이다. 제안된 시스템은 능동적인 위상 오차 보정 기능으로 다양한 환경과 시스템에 적용될 수 있을 것으로 기대된다.



(a)



(b)

[그림 6] 위상 보정 회로 유무에 따른 비선형 증폭기의 OFDM 입출력 신호 비교 (a) 위상 보정 회로가 없는 경우 (b) 위상 보정 회로를 채용한 경우

[3] M. K. Nezami, "Fundamentals of power amplifier linearization using digital pre-distortion," *High Frequency Electronics*, pp. 54 - 60, Sep. 2004.

[4] W. J. Jung, *et al.*, "Digital predistorter using multiple lookup tables," *Electronics Letters*, vol. 39, no. 19, pp. 1386 - 1388, Sep. 2003.

[5] E. G. Jeckin, *et al.*, "Adaptive baseband/RF predistorter for power amplifiers through instantaneous AM-AM and AM-PM characterization using digital receivers," in *Proc. IEEE Int'l Symp. on Microwave Theory and Tech.*, June 2000, pp. 489 - 492.

[6] J. A. Sills and R. Sperlich, "Adaptive power amplifier linearization by digital pre-distortion using genetic algorithms," in *Proc. IEEE RAWCON*, Aug. 2002, pp. 229 - 232.

[7] A. J. Cann, "Nonlinearity model with variable knee sharpness," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Sys.* vol. 16, pp. 874 - 877, Nov. 1980.

한 상 민(Sang-Min Han)

[정회원]



- 1996년 2월 : 고려대학교 전파공학과(공학사)
- 1998년 8월 : 고려대학교 대학원 전파공학과 (공학석사)
- 2003년 8월 : 고려대학교 대학원 전파공학(공학박사)
- 2003년 10월 ~ 2004년 11월 : 미 UCLA Post-Doctoral Research Fellow

- 2005년 1월 ~ 2007년 8월 : 삼성종합기술원 전문연구원
- 2007년 9월 ~ 현재 : 순천대학교 정보통신공학과 조교수

<관심분야>

RF Systems, Low-Power Transceivers, Active Antennas

References

[1] M. Talonen and S. Lindfors, "System requirements for OFDM polar transmitter," in *Proc. European Conf. on Circuit Theory and Design*, vol.3, Aug. 2005, pp.69 - 72.

[2] A. Katz, "Linearization: Reducing distortion in power amplifiers," *IEEE Microwave Magazine*, vol. 2, no. 4, pp. 37 - 49, Dec. 2001.

임 종 식(Jongsik Lim)

[정회원]



- 1991년 2월: 서강대 전자공학과 (공학사)
- 1993년 2월 : 서강대 대학원 전자공학과 (공학석사)
- 2003년 2월 : 서울대 대학원 전기컴퓨터공학부 (공학박사)
- 1993년 2월 ~ 2005년 2월 한국 전자통신연구원 선임연구원
- 2005년 3월 ~ 현재 : 순천향대학교 전기통신공학과 조교수

<관심분야>

초고주파 무선 회로/부품 설계, 능동/수동 소자 모델링 및 회로 응용, 주기 구조의 모델링 및 회로 응용 등

손 태 호(Tae-Ho Son)

[정회원]



- 1979년 2월 : 한양대학교 전자통신공학과(공학사)
- 1986년 2월 : 한양대학교 전자통신공학과(공학석사)
- 1990년 3월 : 한양대학교 전자통신공학과(공학박사)
- 1980년 ~ 1981년 : 영국 Ferranti 연구원
- 1978년 2월 ~ 1987년 : 금성정밀 중앙연구소 선임연구원
- 1990년 3월 ~ 현재 : 순천향대학교 정보통신공학과 교수

<관심분야>

위성통신, 휴대폰, RFID용 안테나설계, 자동차용 전장품 개발, 전자파 생체영향 등

윤 원 상(Won-Sang Yoon)

[정회원]



- 1997년 2월 : 고려대학교 전파공학과(공학사)
- 1999년 2월 : 고려대학교 통신시스템학과(공학석사)
- 2007년 8월 ~ 현재 : 고려대학교 컴퓨터전파통신공학과 박사과정
- 1999년 3월 ~ 현재 : 삼성탈레스 종합연구소 전문연구원

<관심분야>

Reconfigurable antenna, Microwave&RF front-end system, Active component for wireless system

표 성 민(Seongmin Pyo)

[정회원]



- 2002년 2월 : 고려대학교 전기전자전파공학부 (공학사)
- 2004년 2월 : 고려대학교 전파공학과 (공학석사)
- 2004년 1월 ~ 2007년 3월 : (주) 팬택&큐리텔 내수그룹 중앙연구소 전임연구원
- 2007년 3월 ~ 2008년 8월 : 고려대 정보통신기술연구소 연구원
- 2008년 9월 ~ 현재 : 고려대학교 컴퓨터전파통신공학과 박사과정

<관심분야>

Metamaterial-based RF circuit, device and system

김 영 식(Young-Sik Kim)

[정회원]



- 1978년 3월 ~ 1982년 1월 : 홍익공업대학 전자과 조교수
- 1988년 5월 : Univ. of Massachusetts at Amherst (공학박사)
- 1988년 5월 ~ 1989년 2월 : Univ. of Massachusetts at Amherst, Post-Doc.
- 1989년 3월 ~ 1993년 2월 : 한국전자통신연구원 이동통신연구단 무선기술연구실 실장
- 1993년 3월 ~ 현재 : 고려대학교 컴퓨터전파통신공학과 교수

<관심분야>

RF front-end system, Antennas