

## 직렬 궤환을 이용한 아날로그 전치왜곡 선형화기

# An Analog Predistortion Linearizer using Series Feedback Structure

김일규\*, 전기경\*, 김 영\*, 윤영철\*\*

Ell-Kou Kim\*, Ki-Kyung Jeon\*, Young Kim\*, and Young-Chul Yoon\*\*

### 요 약

본 논문에서는 증폭기의 비선형 특성인 AM/AM 과 AM/PM 현상을 보상해주는 새로운 형태의 선형화기를 제안하였다. 이 선형화기는 공통 이미터 증폭기와 쇼트키 다이오드를 이미터와 접지 사이에 연결한 형태로 구성되어 있어, 쇼트키 다이오드의 접합 저항 값이 변화함에 따라 이득 증가 와 위상 확장 특성을 얻을 수 있다. 이러한 결과를 이용하여 증폭기의 비선형 특성을 개선시킬 수 있으며, 셀룰라 기지국 주파수 밴드의 증폭기를 제작하여 증폭기의 비선형 특성 개선을 확인하였다. 반송파 2톤 신호를 인가하였을 때, 주파수 간격이 1MHz에서 3차 혼변조 신호는 10.4dB 개선되었고, IS-95 CDMA 1FA 신호에서는 인접채널 전력비가 9.6dB 개선됨을 확인하였다.

### Abstract

This paper proposes a new predistortion linearizer to compensate for AM/AM and AM/PM in the nonlinear characteristics of amplifier. This consists of common-emitter amplifier and schottky diode that is connected between emitter and ground. When effective resistance of the schottky diode with bias condition varies, common-emitter amplifier with series feedback has a increase of amplitude and expansion of phase. This makes a amplifier nonlinear characteristics are to be improved. The proposed linearizer and amplifier has been manufactured and tested to operate in cellular base station frequency (869~894MHz). The test results show that third order intermodulation distortion (IMD3) cab be removed by more than 10.4dB in case of CW 2-tone signals  $\Delta f=1\text{MHz}$ , and the adjacent channel power ratio (ACPR) also can be improved by more than 9.6dB for CDMA IS-95 1FA signals.

Key words : Power Amplifier, Predistortor, Linearizer, Intermodulation Distortion

### I. 서 론

CDMA와 같은 디지털 변조 방식을 사용하는 현대 무선통신 시스템 환경에서 전력 증폭기의 성능 중 효율 과 고 선형성은 시스템 성능의 중요한 지표가 되

어 많이 연구되고 있다. 전력 효율을 향상시키기 위해서 전력증폭기는 낮은 Q점을 갖는 클래스 B 또는 AB의 바이어스를 사용한다. 그러나 위의 바이어스 조건은 전력 증폭기의 AM/AM 과 AM/PM 비선형 특성을 만들어낸다. 트랜지스터의 낮은 Q점에서 동작

\* 금오공과대학교 전파통신과 RF회로설계연구실(Radio Communication Eng., Kumoh National Institute of Technology)

\*\* 관동대학교 전자정보통신공학부(Electronics and Information Communication Eng., Kwandong University)

· 제1저자 (First Author) : 김일규

· 접수일자 : 2006년 6월 12일

하는 전력증폭기는 적절한 선형성을 유지하기 위해서 전력레벨을 낮추어서 사용하며, 이것은 효율을 더욱더 낮게 만들게 된다. 현재 효율을 개선하기 위해서 논의되고 있는 방법으로는 EER(Envelope Elimination and Restoration), Chireix's Outphasing, 도허티 기술 등이 있다[1],[2].

한편, 전력의 백 오프(Back-off)양은 선형화기에 의해서 줄일 수 있으며 이것은 결국 효율을 개선시키는 것이다. 여러 가지 선형화 방법 중에서 전치왜곡 선형화 방법은 전력 증폭기에서 발생하는 왜곡 성분의 역 왜곡 성분을 전력 증폭기의 앞단에 미리 발생시켜 상쇄시키는 방법이다[3]-[6]. 이러한 선형화 방법은 광 대역 폭 과 넓은 동작 범위를 가지며, 상대적으로 회로 구성이 간단하고, 소형, 경량으로 구현할 수 있는 장점이 있으나, 전력증폭기와 역이되는 이득 왜곡 특성(AM/AM)과 위상 왜곡 특성(AM/PM)을 만들기 어려우며, 전치왜곡 선형화기에 의한 입력 신호의 감쇄가 큰 단점이 된다[7],[8]. 기존에 발표된 전치왜곡 선형화기는 10dB 이상의 손실을 갖는 수동적인 특징을 갖고 있다. 버퍼 증폭기는 이러한 손실을 보상하기 위해서 전치왜곡 선형화기 후에 필요하며, 결국 이것은 단말기 또는 집적회로 응용에 제한을 갖게 된다.

본 논문에서 제시한 전치왜곡 선형화기는 공통 이미터 증폭기(Common-emitter Amplifier)와 쇼트키(Schottky) 다이오드로 구성되어 있으며, 쇼트키 다이오드의 바이어스 전압 값을 변화시킴으로서 쇼트키 다이오드의 접합 저항 값을 변화시켜, 이것으로 인한 전압 케환을 조절하여 이득과 위상 왜곡 특성을 만들었다. 결국 입력 전력에 따라 접합저항의 크기를 조절함으로써 케환되는 전압을 양을 조절하는 방법으로 선형화기를 구현하였다. 이러한 방법은 작은 크기로 구현이 가능하여, 트랜지스터에 의한 증폭 작용을 이용한 것이므로 전치왜곡 선형화기에서 일정 정도의 이득을 얻을 수 있어 기존 방법의 손실을 보상하면서 전력증폭기의 비선형성을 개선할 수 있는 장점을 갖고 있다.

II. 회로의 동작원리

그림 1은 본 논문에서 제안한 전치왜곡 선형화기를 나타낸 것이다.

전치왜곡 선형화기의 회로는 그림 1의 (a)에서와 같이 입력 RF 신호를 증폭시켜주기 위한 공통 이미터 증폭용 트랜지스터와 트랜지스터의 이미터 와 접지 사이에 쇼트키 다이오드가 삽입된 형태로 구성되어 있다.

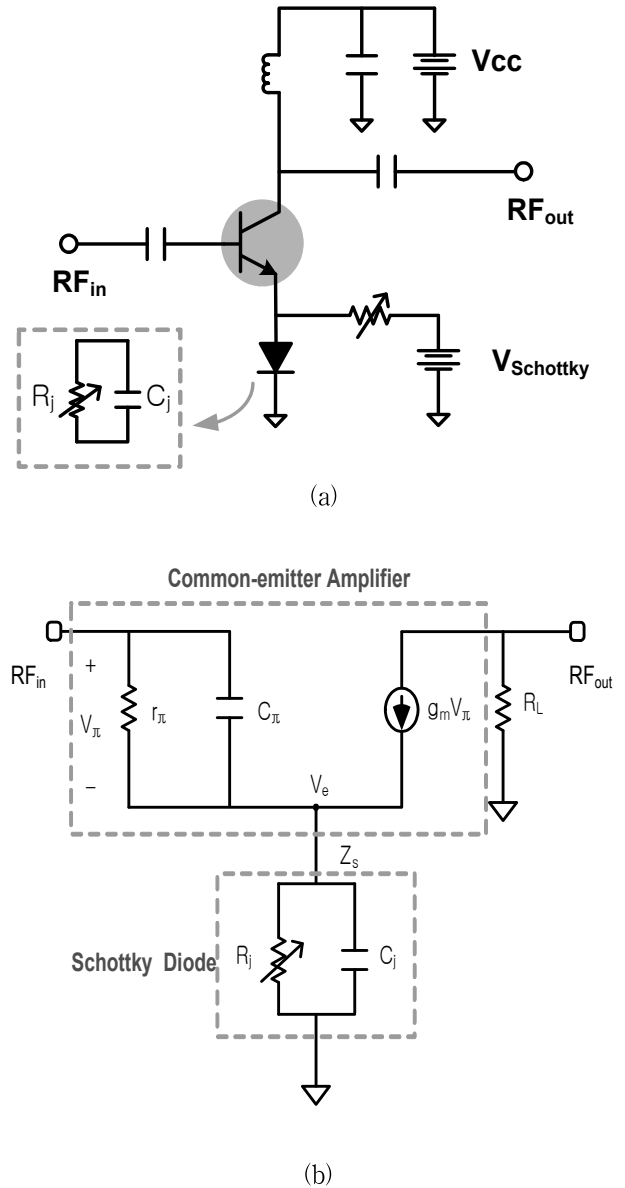


그림 1. 제안한 전치왜곡 선형화기 (a) 회로도 (b) 등가 회로도

Fig. 1. The proposed predistortion linearizer (a) Schematic (b) Equivalent circuit.

그림 1의 (a)의 회로에서 쇼트키 다이오드가 포워드 바이어스 일 때 비선형 특성의 접합 저항  $R_j$  와 접합 캐패시턴스  $C_j$  의 병렬 연결된 회로로 나타낼 수 있으므로 그림 1의 (b)와 같은 등가회로로 나타낼 수 있다. 이러한 등가회로는 키르히호프의 전압 법칙을 사용하여 회로를 해석할 수 있다. 이 때 입력 전압과 출력 전압은 식 (1)과 (2)와 같이 베이스와 이미터 전압에 걸리는 전압  $v_\pi$  의 향으로 표현할 수 있다.

$$RF_{in} = v_\pi + v_e$$

$$= v_\pi + Z_s(g_m v_\pi + v_\pi g_{r_\pi} + v_\pi g_{c_\pi}) \quad (1)$$

$$RF_{out} = -g_m v_\pi R_L \quad (2)$$

여기서 계수는 다음과 같다.

$$g_{r_\pi} = \frac{1}{r_\pi}, \quad g_{c_\pi} = j\omega c_\pi$$

식 (1)과 (2)의 전압 식으로 부터 전압이득을 유도하면 식 (3)과 같이 표현된다.

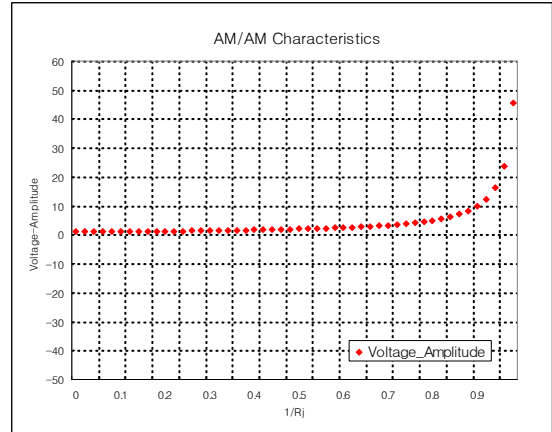
$$V_{Gain} = \frac{RF_{out}}{RF_{in}} = \frac{-g_m R_L}{1 + R_j(g_m + j\omega C_\pi)} \quad (3)$$

식 (3)으로 부터 전압 이득의 크기와 위상을 표현하면 각각 식 (4) 와 (5) 같이 표현할 수 있다.

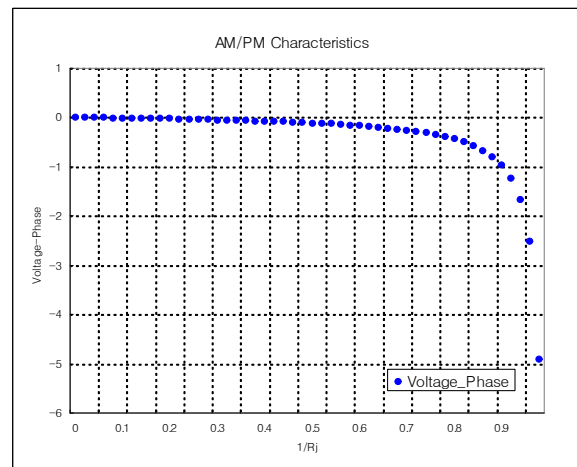
$$Amplitude = \left| \frac{g_m R_L}{\sqrt{(1 + R_j g_m)^2 + (\omega R_j C_\pi)^2}} \right| \quad (4)$$

$$Phase = \left\{ 180 - \tan^{-1} \left( \frac{\omega C_\pi}{\frac{1}{R_j} + g_m} \right) \right\} \quad (5)$$

식 (4)와 (5)을 살펴보면, 전치왜곡 선형화기의 이득과 위상 왜곡 특성은 쇼트키 다이오드의 저항 성분  $R_j$  가 변화함에 따라 이득은 확장하고 위상은 빨라지는 특성을 볼 수 있으며,  $R_j$  값의 변화에 따라 이득과 위상 변화 그래프는 그림 2에 나타내었다.



(a)



(b)

그림 2.  $R_j$  의 변화에 의한 전치왜곡 선형화기의 비선형 전달 특성 (a) 이득 왜곡 특성 (b) 위상 왜곡 특성

Fig. 2. Nonlinear transfer characteristics of predistortion linearizer with  $R_j$  variation (a) Characteristic of gain distortion (b) Characteristic of phase distortion.

일반적인 전력증폭기는 입력이 증가할 때 크기는 줄어들고 (AM/AM 현상), 위상은 치지는 현상 (AM/PM 현상)이 생긴다. 이 논문에서 설명하는 전치 왜곡 선형화기의 특성을 보면 쇼트키 다이오드의 접

합 저항  $R_j$  값이 바이어스 전압에 의해서 변화함에 따라서 증폭기의 비선형 전달 특성과 역이되는 이득과 위상 왜곡 특성을 보여주고 있어, 본 논문에서 제안하는 회로 구성의 타당성을 입증하고 있다.

또한, 전력이득은 식 (6)과 같이 전압이득의 제곱에 비례하는 것으로 표현할 수 있다.

$$P_G = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{(RF_{out})^2}{(RF_{in})^2} \frac{R_{in}}{R_L} = (V_{Gain})^2 \frac{R_{in}}{R_L} \quad (6)$$

전력이득의 이득과 위상 왜곡은 전압이득의 제곱으로 표현되므로 그림 2와 유사한 특성으로 나타낼 수 있다.

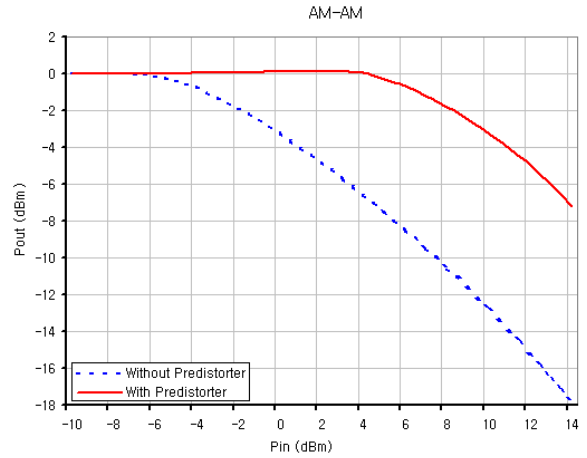
### III. 실험 결과

본 논문에서 제안한 회로한 회로의 타당성을 보이기 위하여 셀룰라(Cellular) 대역의 증폭기를 제작하였다.

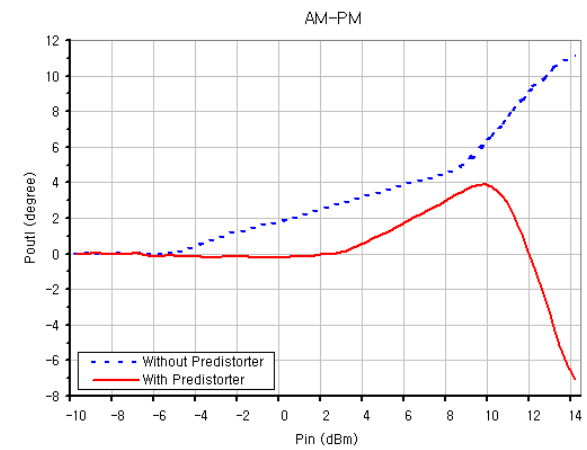
여기서 사용한 증폭기는 와킨 존슨 사의 AH1을 2단 종속(Cascade) 연결하여 구성하였고, 869-894MHz의 주파수 범위에서 26dB의 이득과 1dB 압축점(P1dB)이 21dBm 특성을 얻었다.

또한, 전치왜곡 선형화기는 엔질런트(Agilent)사의 MSA-1120으로 공통 이미터 증폭기를 구성하였고, 이미터에 사용한 다이오드는 HP사의 HSMS-2860 쇼트키 다이오드를 사용하였다.

위와 같은 특성을 갖는 증폭기와 전치왜곡 선형화기를 결합시켜 네트워크 분석기로 측정된 결과인 그림 3을 보면 증폭기의 이득과 위상은 선형화 전후를 비교해보면 선형화기가 있는 회로가 5dB 이상 더 높은 입력 조건까지 평탄한 이득과 위상 특성을 갖고 있어 증폭기의 비선형 특성을 보상하는 것을 확인하였다.



(a)



(b)

그림 3. 전치왜곡 선형증폭기의 비선형 특성 (a) 이득 왜곡 특성 (b) 위상 왜곡 특성

Fig. 3. Nonlinear characteristics of predistortion amplifier (a) Characteristic of gain distortion (b) Characteristic of phase distortion.

또한, 그림 4는 중심 주파수가 880MHz이고, 주파수 간격이 1MHz 인 반송파 2-톤 신호 인가 했을 때, 12.9dBm/tone의 출력 전력에서 3차 혼변조 신호의 크기가 10.4dB 개선되는 것을 보여주고 있다. 이와 같은 결과는 쇼트키 다이오드의 바이어스 전압을 변화시켜 다이오드의 접합 저항 값을 변화하게 함으로서 얻을 수 있는 것이다.

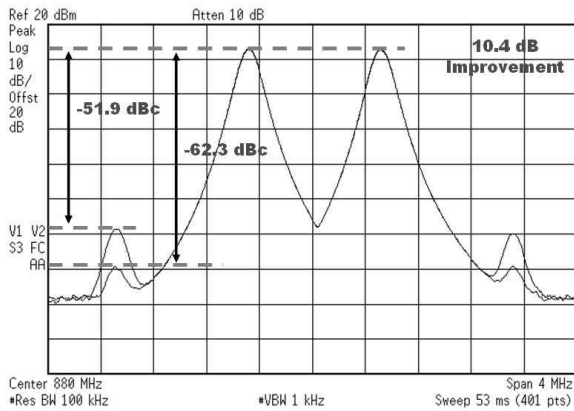


그림 4. 반송파 2-톤 입력 시 선형화 전·후의 증폭기의 비선형 특성 비교 ( $\Delta f=1\text{MHz}$ ,  $P_o=12.9\text{dBm}/\text{tone}$ )

Fig. 4. Nonlinear characteristics of amplifier with/without linearizer at 2-tone signals ( $\Delta f=1\text{MHz}$ ,  $P_o=12.9\text{dBm}/\text{tone}$ ).

또한, 그림 5는 그림 4와 동일 조건에서 출력전력 변화에 따른 혼변조 신호 개선효과를 보여주고 있다. 출력이 높아짐에 따라 선형화 효과는 적어지고 출력이 낮아짐에 따라 선형화가 많이 되는 것을 보여주고 있다.

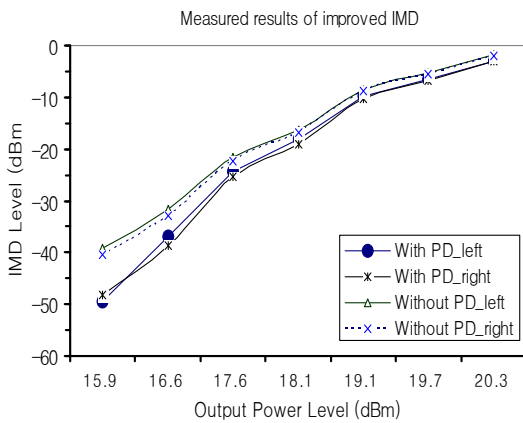


그림 5. 주파수 간격이  $\Delta f=1\text{MHz}$ 인 2-톤 신호의 출력 변화에 따른 3차 혼변조 신호의 개선 특성

Fig. 5. Third order IMD improvements for power variation with frequency spacing 1MHz in 2-tone signals.

그림 6은 중심주파수 880MHz에서 CDMA IS-95 1FA 신호 인가 시, 출력전력이 11.5dBm이고, 중심주파수에서 이격지점이 885KHz에서 인접채널 전력 간섭비 (ACPR)이 9.6dB 개선되는 것을 보여주고 있으

며, 그림 7은 그림 6과 동일한 조건에서 출력전력 변화에 따른 ACPR 개선효과를 확인하였다.

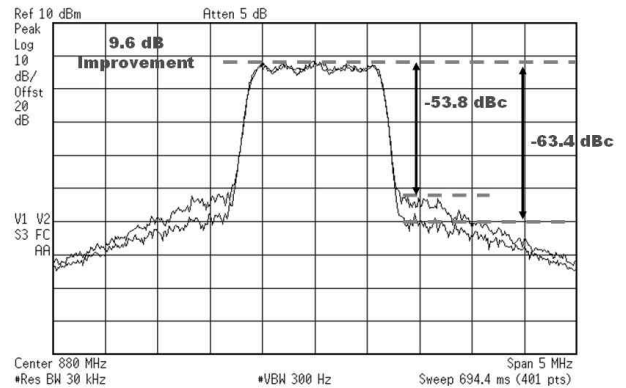


그림 6. CDMA 신호 입력 시 선형화 전·후의 증폭기의 비선형 특성 비교 (1FA,  $P_o=11.5\text{dBm}$ )

Fig. 6. Nonlinear characteristics of amplifier with/without linearizer at CDMA signal (1FA,  $P_o=11.5\text{dBm}$ ).

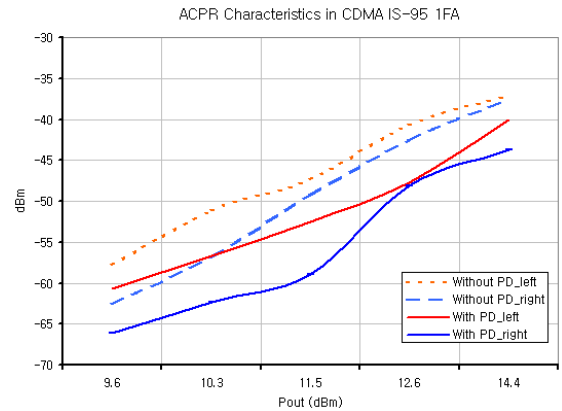


그림 7. CDMA IS-95 1FA 신호의 출력 변화에 따른 인접채널 간섭비 개선 그래프

Fig. 7. ACPR improvements for power variation with CDMA IS-95 1FA signals.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 공통 이미터 증폭기의 이미터에 쇼트키 다이오드를 연결하여 다이오드의 비선형 저항 값 변화를 이용한 전치왜곡 선형화 방법을 제시하였다. 트랜지스터 이미터 단에 쇼트키 다이오드를 연결하여, 이 회로를 등가적으로 해석하고 전압이득과 전력이득을 얻음으로서 증폭기의 비선형 전달 특성과는 역이되는 이득과 위상 왜곡 특성을 얻었다. 이 결

과의 타당성을 보기 위해서 셀룰라 대역의 증폭기와 선형화기를 제작하였다.

그 결과, 중심 주파수 880MHz에서 1MHz 간격의 반송파 2-톤 신호 인가 시, 출력전력 12.9dBm/톤에서 3차 혼변조신호가 10.4dB 개선되는 것을 확인하였고, CDMA IS-95 1FA 신호를 인가하여 출력전력이 11.5dBm일 때, 중심 주파수에서 이격지점 885KHz에서 ACPR 개선량이 9.6dB되는 것을 확인하였다.

이렇게 제안한 전치왜곡 선형화기는 직렬 케환을 이용한 것으로 선형화기의 이득을 얻을 수 있는 장점을 갖고 있으며, 소형 및 경량, 저가로 구현할 수 있어서 중계기와 기지국 및 단말기에도 적용될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 금오공과대학교 학술연구비에 의하여 연구된 논문입니다.

참 고 문 헌

[1] P. B. Kenington, *High-Linearity RF Amplifier Design*, Norwood, MA, Artech House, 2000.

[2] Steve C. Cripps, *Advanced Techniques in RF Power Amplifier Design*, Norwood, MA, Artech House, 2002.

[3] C. S. Aitchison, "The current status of RF and microwave amplifier intermodulation performance," *IEEE Radio Freq. Integrated Circuits Symp.*, Boston, MA, pp. 113-116, Jun. 2000.

[4] M. R. Mozzam and C. S. Aitchison, "A low third order intermodulation amplifier with harmonic feedback circuitry," *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, pp. 827-830, Jun. 1996.

[5] 김 영, 장익수, 장형순, "Harmonic Generator의 저주파 혼변조 신호 성분을 이용한 전치왜곡 선형화기 설계", *전자공학회 논문지*, 제39권 TC편, 제 9호, 398~403, 2002. 9.

[6] S.-Y. Kim, M.-A. Jang, K.-K. Jeon, Y. Kim, and Y.-C. Jeong, "An analog linearizer using second harmonic signals feedforwarding," *European Microwave Conference 2005*, Sep. 2005.

[7] J. S. Kenney and A. Leke, "Design considerations for multicarrier CDMA base station power amplifier," *Microwave J.*, vol. 42, no. 2, pp.76-84, 1999.

[8] C. G. Rey, "Predistorter linearizes CDMA power amplifiers," *Microwave RF*, pp.114-123, Oct. 1998.

김 일 규



2006년 2월 : 금오공과대학교 전자공학부 전자공학전공(공학사)  
 2006년 2월 ~ 현재 : 금오공과대학교 대학원 전자통신공학과 재학중  
 관심분야 : RF 및 microwave 회로 설계, 전력 증폭기 및 선형화기 설계

전 기 경



2005년 2월 : 금오공과대학교 전자공학부 전자통신공학전공(공학사)  
 2005년 2월 ~ 현재 : 금오공과대학교 대학원 전자통신공학과 재학중  
 관심분야 : RF 및 microwave 회로 설계, 전력증폭기 및 선형화기 설계

김 영



1988년 2월 : 서강대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)  
 2002년 8월 : 서강대학교 대학원 전자공학과 (공학박사)  
 1988년 1월 ~ 1993년 5월 : 이즈텔 시스템즈(주) 연구소 선임연구원  
 1993년 6월 ~ 1998년 2월 : 삼성전자(주) 정보통신사업본부 선임연구원  
 1998년 3월 ~ 2003년 2월 : 두원공과대학 정보통신과 조교수  
 2003년 3월 ~ 현재 : 금오공과대학교 전자공학부 조교수  
 관심분야 : RF 및 Microwave 회로해석 및 설계, 전력 증폭기 및 선형화기 설계

## 윤 영 철



1978년 2월 : 서강대학교 전자공학과(공학사)

1982년 2월 : 서강대학교 대학원 전자공학과(공학석사)

1989년 2월 : 서강대학교 대학원 전자공학과(공학박사)

1987년 9월 ~ 현재 : 관동대학교 전자정보통신공학부 교수

관심분야 : RF 및 Microwave 회로설계