

역위상 기법을 이용한 전력 증폭기 선형성 개선

The Improvement of Linearity in Power Amplifier Using Anti Phase Intermodulation Distortion Linearization Technique

장 정 석* 도 지 훈** 강 동 진** 김 대 응** 김 대 희** 홍 의 석***
(Jeong-Seok Jang) (Ji-Hoon Do) (Dong-Jin Kang) (Dae-Woong Kim) (Dae-Huo Kim) (Ui-Seok Hong)

요 약

본 논문에서는 구동단의 IMD 특성과 최종단의 IMD 특성을 조절하여 선형성을 개선하는 방법에 대하여 제안을 하였다. WCDMA 4FA의 입력 신호를 사용하였을 때 평균 전력 50W에서 약 -48dBc@5MHz offset의 ACLR 특성을 얻었다. 제안된 역위상화 선형화 기법은 추가적인 선형회로 없이 구동 증폭단을 이용하여 전치왜곡 효과를 얻을 수 있었다. 이러한 점은 기존 analog predistortion 방식과 feedforward 방식의 단점을 보완하였음에 큰 의미를 가진다.

Abstract

This paper proposes linearization technique that the linearity is improved by controlling IMD between the drive stage and the output stage. From the experimental results of W-CDMA 4FA input signal, this amplifier has ACLR of -48dBc@5MHz offset at 50W average power. Proposed linearization technique provides predistortion effect for using drive amplifier without additional circuit, which is the significant in this paper that it makes up for the weak point of analog predistortion method and feedforward method.

Key words : IMD, linearization, WCDMA, HPA, ACPR

I. 서 론

현대의 통신기술은 과거부터 지금까지 발전해온 것보다 훨씬 급격한 발전을 보여주고 있다. 이런 통신기술의 급격한 발전만큼이나 이에 요구되는 조건들 또한 많은 변화가 있었다. 특히 이동통신과 위성통신에서는 그 폭발적인 수요의 확대와 전송 데이

터 량의 증가로 인하여 보다 더 정확하고 대량의 데이터 전송능력이 요구되었다. 이러한 요구를 만족하기 위해서는 통신시스템의 전력 증폭기의 효율(Power Added Efficiency)과 선형성(Linearity)이 매우 중요한 설계 규격이 된다[1].

이 중 효율 개선 방안으로는 EER, LINC 및 Doherty 기법 등이 있으며, 이들 중 Doherty 기술은

본 연구는 2006년도 광운대학교 교내학술연구비 지원에 의해 연구되었음.

* 주저자 : 광운대학교 전자 공학과 박사과정

** 공저자 : 광운대학교 전자 공학과 박사과정

*** 공저자 : 광운대학교 전자 공학과 정교수

† 논문접수일 : 2008년 3월 7일

추가적인 회로 없이 효율을 향상시킬 수 있어 근래에 많은 연구가 진행되고 있는 추세이다.

선형성 개선 방법으로는 크게 Back-off 기법과 Feedforward 기법, Feedback 기법, Predistortion 기법 등이 있지만, 일반적으로 Back-off 방식 이외 기법들은 추가적인 회로를 사용해야 하고 그에 따른 전체적인 크기와 가격의 상승을 가져오는 단점이 있다.

근래에는 고주파 전력증폭기에 사용되는 증폭소자의 성능 개선으로 인하여, 제품개발 시에 추가적인 선형화기를 사용하지 않고 고주파 전력 증폭기를 개발하려는 연구가 많이 진행 중에 있다. 증폭소자는 기존의 LDMOS보다 성능이 우수한 것으로 알려진 GaN HEMT로 연구가 진행되고 있지만, 아직 이에 대한 상품화 진행은 더딘 상태이다.

본 논문에서는 기존의 LDMOS를 사용하여 추가적인 선형화 회로를 사용하지 않고 전력 증폭기의 선형성을 개선하는 기법을 제안하였다. 제안된 기법의 주된 개념은 구동 증폭단의 출력 왜곡신호를 최종 증폭단의 출력 왜곡 신호와 역 위상 신호로 만들어 최종 선형성을 개선하는 것이다.

제안된 기법을 사용하여 평균전력 50W(47dBm)에 20MHz의 Bandwidth를 갖는 W-CDMA 용 대전력 증폭기를 개발하였다.

II. 본 론

1. Power series를 이용한 AM to AM 왜곡 해석

2 단자 망에 기억성이 없으며, 출력 전압이 입력 전압에 대해 동시성을 가진다고 가정을 하게 되면 입력 전압 $V_i(t)$ 에 대해 출력 전압 $V_o(t)$ 는 다음과 같이 표현할 수가 있다.

$$v_i(t) = A(\cos\omega_1 t + \cos\omega_2 t) \quad (1)$$

$$v_o(t) = k_1 v_i(t) + k_3 v_i^3(t) + k_5 v_i^5(t) + \dots \quad (2)$$

여기서 k_1, k_3, k_5 는 전력 증폭기의 이득과 왜곡을 나타내는 계수이며, A는 신호의 크기이며, ω_1, ω_2 는 기본 각주파수이다. 위 식을 정리하면 아래와 같다[2].

<표 1> 이득 편파와 IMD 위상

<Table. 1> Gain deviation and IMD phase

Gain deviation ($V_{out} w_1$)	IMD phase ($V_{out} 2w_1 - w_2$)	3rd and 5th degree components
Expansion	In-phase	$\frac{k_3}{k_1}, \frac{k_5}{k_1} > 0$
Compression	Anti-phase	$\frac{k_3}{k_1}, \frac{k_5}{k_1} < 0$

$$v_o(t)_{fund} = (k_1 A + \frac{9}{4} k_3 A^3 + \frac{25}{4} k_5 A^5) \cdot (\cos\omega_1 t + \cos\omega_2 t) \quad (3)$$

$$v_o(t)_{IM3} = (\frac{3}{4} k_3 A^3 + \frac{25}{8} k_5 A^5) \cdot \{\cos(2\omega_1 - \omega_2 t) + \cos(2\omega_2 - \omega_1 t)\} \quad (4)$$

$$v_o(t)_{IM5} = (\frac{5}{8} k_5 A^5) \{\cos(3\omega_1 t - 2\omega_2 t) + \cos(3\omega_2 t - 2\omega_1 t)\} \quad (5)$$

신호 주파수식 값인 식 (3)에서 신호의 크기 값인 A의 모든 값에 대하여 $k_3/k_1, k_5/k_1$ 값은 정(+)의 값을 갖게 된다. In-phase IMD 위의 $k_3/k_1, k_5/k_1$ 값은 정(+)의 값을 갖는 경우는 이득확장 현상이 나타나게 된다. 식 (4)에서의 부호 역시 식 (3)과 동일하다. 이렇게 증폭기의 이득 확장 구간에서는 IMD와 주신호의 부호가 동일하다. 그러나 증폭기의 이득 압축 구간에서는 위 $k_3/k_1, k_5/k_1$ 값이 (-)의 값을 갖게 된다. 다음 표 1은 $k_3/k_1, k_5/k_1$ 의 값에 따라 이득 편파와 IMD 위상의 형태를 말해 준다[3].

2. 역위상(Anti-Phase) 선형화 기법

1) 제안 배경

일반적인 전력 증폭기 설계 방법은 각각의 증폭기의 특성을 최대 전력 또는 최적화된 선형화 특성을 갖도록 한다. 이 방법은 전체 시스템의 선형화 특성의 한계를 지니게 된다. 따라서 이 제한된 선형성 개선을 위해서는 추가적인 회로가 필요하게 되며, 또한 광대역 폭을 가지는 WCDMA 신호용 대전력 증폭기의 경우, 추가 회로를 사용하는 기존 선형화 방식은 고출력, 광대역 특성을 만족시키려면 크기가 커지고 비용이 많이 든다.

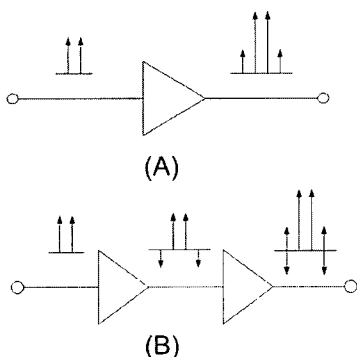
본 논문에서는 위와 같은 여러 가지 문제점에 추가적인 선형화 회로 없이 최종 증폭기의 왜곡 특성을 보완할 수 있는 선형화 기법을 제안하였다.

제안된 선형화 기법은 최종 증폭단의 왜곡 특성을 보상할 수 있도록 구동 증폭단의 왜곡특성을 최종 증폭단의 왜곡특성과의 역 위상(Anti-phase)이 되도록 하였다. 이때의 구동 증폭단과 최종 증폭단 각각이 갖는 개별적 선형 특성은 의미가 없으며, 상호 연결하여 결합되었을 때에 나타나는 최종 선형화 특성만을 중요시하게 된다.

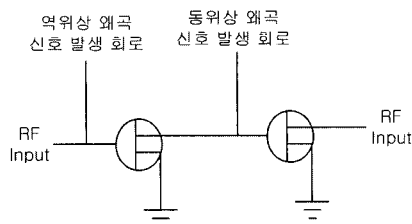
전력증폭기가 Class B 이하로 동작하면 이득확장(gain-expansion) 특성을 가지지만, ACLR(Adjacent Channel Leakage Power Ratio) 특성은 나빠지게 된다. 그 이유는 Back-off 영역에서 AM-to-AM 왜곡이 일어나기 때문이다. 전력 증폭기의 이득편향(gain-deviation)을 통하여 AM-to-AM 왜곡을 줄이는 것은 이미 실험적으로나 이론적으로 증명이 되어있다[2-5]. 이득확장(gain-expansion) 증폭기와 이득압축(gain-compression) 증폭기를 결합하여 이득편향(gain-expansion)을 최소화하는 것이다. 그러나 이득압축 증폭기는 낮은 출력에서 높은 PAE를 얻을 수 없다. 따라서 드라이브단과 최종 출력단에 높은 PAE를 얻을 수 있는 Class B 근처의 증폭기를 이용하여 IMD 상쇄기법을 제시하였다.

2) 동작 원리

이 상쇄 기법의 주된 핵심은 구동 증폭단에서 역 위상(anti-phase)의 IMD를 발생시켜 최종 증폭단의



<그림 1> 역 위상 상쇄 원리
<Fig. 1> Principle of anti-phase linearization



<그림 2> 음(-)전압 바이어스 회로 원리
<Fig. 2> Principle of negative voltage bias circuit

IMD를 제거하는 것이다. <그림 1>에서의 반전된 스펙트럼은 역 위상 신호임을 나타낸다. 일반적인 이득 확장(gain-expansion) 증폭기는 <그림 1>의 (A)와 같은 형태의 스펙트럼을 보인다. 그렇지만 (B)와 같이 구동 증폭단의 IMD의 위상이 역방향이면 최종 증폭단의 IMD는 상쇄가 된다.

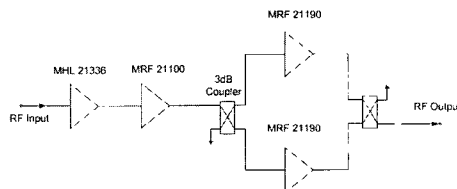
이를 위해서 <그림 2>와 같이 구동 증폭단에 부(-)의 전압값을 갖도록 하는 바이어스 회로를 적용하면 구현이 가능하다.

또한, 증폭기의 입력단 바이어스 회로에 R-C 병렬회로를 사용하여 증폭기의 이득의 기울기를 감소 시킴으로써 k_1/k_3 , k_3/k_1 값을 부(-)의 값으로 변환하는 회로도 제안되었으며, 저전력 (27dBm) MMIC 용으로 성능을 확인하였다[3].

본 논문에서는 동일 계열 소자인 LDMOS FET를 사용하여 대전력, 광대역 역위상 IMD 특성을 갖도록 하는 방법을 제안하였다.

3. 설계 방법

본 논문에서는 다음 그림과 같이 증폭기를 구성하였다. 다음 <표 2>와 같이 설계 사양을 목표로 하였다. 역위상 기법을 적용하기 위하여 우선 구동단과

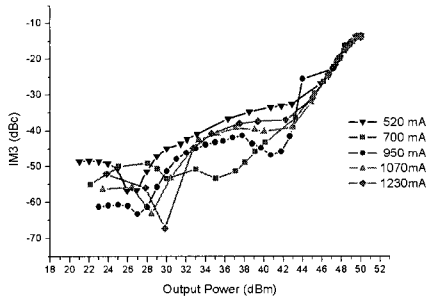


<그림 3> 대전력 증폭기 구성도
<Fig. 3> High power amplifier block diagram

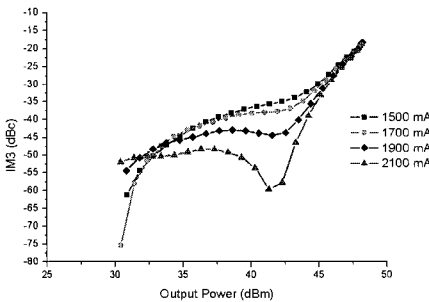
<표 2> 전력 증폭기 설계 사양

<Table. 2> Design spec. of power amplifier

구 분	설 계 사 양
Frequency[MHz]	2140
Output Power[W]	50
ACLR[dBc] (±5MHz offset)	45



(a) 구동 증폭단 바이어스에 따른 IMD 특성(시뮬레이션)



(b) 최종 증폭단 바이어스에 따른 IMD 특성(시뮬레이션)

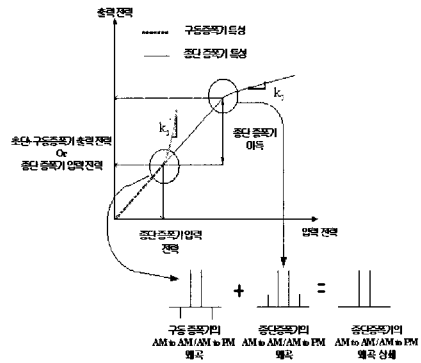
<그림 4> 2 tone 신호의 IMD 특성

<Fig. 4> IMD performances for 2-tone signal

최종 증폭단의 각 바이어스에 따른 특성을 확인하였다. 다음 <그림 4>는 구동단과 최종 증폭단의 각 바이어스에 따른 특성을 보여준다.

중단증폭기의 이득을 고려하여야 하며, 기본적으로 중단소자의 IMD3특성과 반대 특성을 가져야만 한다. <그림 5>는 이의 개념을 나타낸다[6].

증폭기가 1dB 점을 지나서 비선형영역에 동작점을 잡으면, 이득의 증가량이 감소하게 되며, 이는 IMD가 증가함을 나타낸다. 즉, 비선형 동작점에서는 이득과 IMD가 반대의 특성을 갖게 된다. 이러한 특성을 적용하여 최종 증폭단 소자의 출력전력 지점에서의 IMD 특성과 반대의 특성을 나타내는 구



<그림 5> 전력 증폭기의 왜곡 상쇄 개념

<Fig. 5> Principle of distortion cancellation in a power amplifier

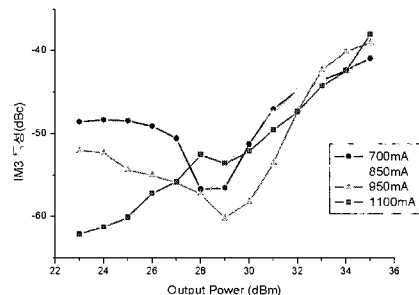
동단 소자의 출력전력지점을 찾아서, 초기 동작점으로 적용한다.

4. 측정

일반적인 전력 증폭기의 선형 특성과 역위상 (anti-phase) 기법을 적용한 전력 증폭기의 선형 특성을 비교하기 위하여 각각의 전력 증폭기를 제작 및 측정을 하였다.

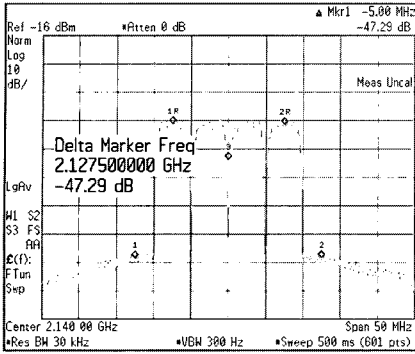
먼저 <그림 6>은 각 바이어스에 따른 구동단의 IMD 특성을 보여준다. 다음의 7과 8은 일반적인 설계 방법인 최대 전력 이득을 얻기 위한 최적 정합 설계의 경우의 측정값이다.

측정시 구동단의 DC 조건은 $V_D = 27V$, $I_D = 1.1A$ 였으며, ACLR 값은 하측파대는 $-47.29dBc@5MHz$ Offset, 상측파대는 $-47.24dBc@5MHz$ offset의 특성을

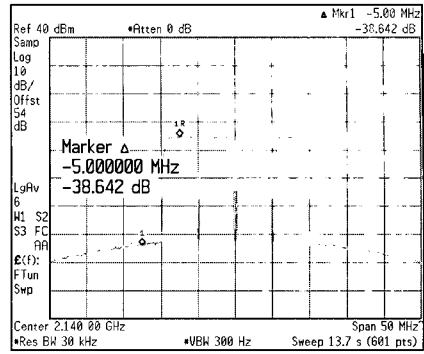


<그림 6>. 구동 증폭단 IM3 특성

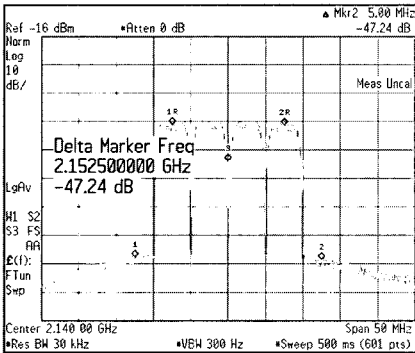
<Fig. 6> IM3 characteristic of a drive amplifier



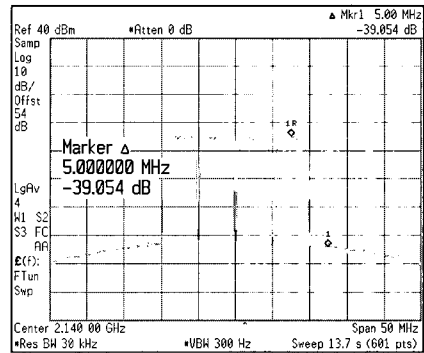
(a) 하측파대
(a) lower-side spectrum



(a) 하측파대
(a) lower-side spectrum



(b) 상측파대
(b) upper-side spectrum



(b) 상측파대
(b) upper-side spectrum

<그림 7> 최적 정합 시 구동단 파형
<Fig. 7> PA spectra in drive stage with optimum matching

<그림 8> 최적 정합 시 최종 출력단 파형
<Fig. 8> PA spectra in output stage with optimum matching

얻을 수가 있었다.

최종 증폭단은 $VD = 27V$, $ID = 8.5A$ 였으며, ACLR 값은 하측파대는 $-38.642dBc@5MHz$ offset, 상측파대는 $-39.054dBc@5MHz$ offset의 특성을 얻을 수가 있었다.

요시하기 때문에 결과적으로 최종 증폭단의 파형만을 원하게 된다. 본 논문에서 제시한 역위상 IMD 기법을 사용하였을 때의 선형 특성은 $-48.12dBc@5MHz$ offset과 $-48.42dBc@5MHz$ offset을 얻게 되었다.

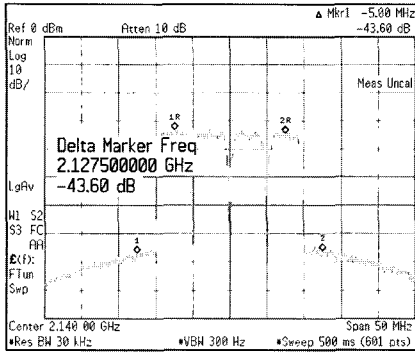
이 경우 구동단과 최종 증폭단의 입출력 정합회로는 최대 전력 전달 특성을 갖도록 설계하였다.

일반적으로 사용하는 최대전력 전달을 위한 최적 정합 시와 본 논문에서 제시한 역위상 기법을 적용하였을 때의 측정 결과와 현재 시장에 상용화되어 있는 feedforward 전력 증폭기의 성능을 정리하여 다음 <표 3>에 나타내었다.

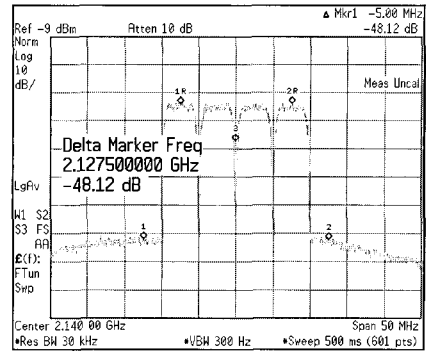
본 논문에서 제안한 역위상 기법을 사용하였을 때 구동단 측정 시 구동단의 DC 조건은 $VD = 27V$, $ID = 940mA$ 이었으며, ACLR 값은 하측파대는 $-43.60dBc@5MHz$ offset, 상측파대는 $-43.38dBc@5MHz$ offset의 특성을 얻을 수가 있었다. 하지만 각각이 갖는 개별적인 선형 특성은 의미가 없으며, 최종 선형화 특성만을 중

III. 결 론

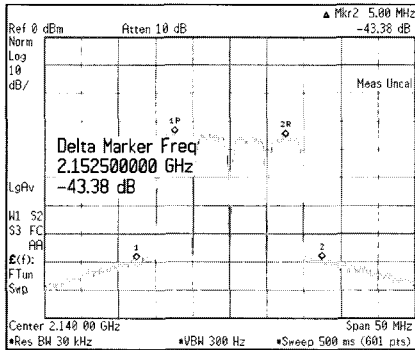
본 논문에서는 역위상 정합 기법을 이용하여 대



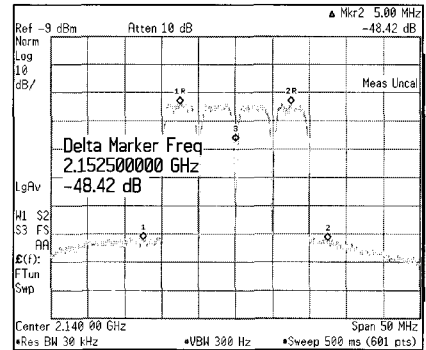
(a) 하측파대
(a) lower-side spectrum



(a) 하측파대
(a) lower-side spectrum



(b) 상측파대
(b) upper-side spectrum



(b) 상측파대
(b) upper-side spectrum

<그림 9> 역위상 기법 적용 시 구동단 파형
<Fig. 9> HP spectra in drive stage with anti phase IMD matching

<그림 10> anti phase 정합 시 최종 출력단 파형
<Fig. 10> PA spectrum in output stage with anti phase IMD matching

전력 증폭기의 선형성을 개선하였다. 제시한 기법을 사용하여 WCDMA 용 50W급 대전력 증폭기를 설계 및 제작하였다.

제작된 50 W급 대전력 증폭기는 WCDMA 4FA를 입력신호로 사용하였을 때 선형 특성인 ACLR이 상측파대에서는 약 -48.42dBc@+5MHz, 하측파대에서는 약 -48.12dBc@-5MHz를 보였다. 이는 기존의 전력증폭기 설계 및 제작 방식과 비교하였을 때, 10dB 이상의 개선효과를 보였다. 또한 추가적인 선형 회로 없이도 feedforward 방식의 대전력 증폭기와 비교를 하였을 때 그 성능이 전혀 떨어지지 않음을 보였다.

추가적인 회로가 필요한 다른 선형화 방법과는 다르게 본 논문에서 제시한 역위상기법은 추가적인

<표 3> 출력 파형의 ACLR 특성 비교
<Table. 3> Comparison table of output spectrum ACLR

구분	ACLR 특성	
	Lower side	Upper side
최적 정합시	-38.642dBc	-39.054dBc
Feedforward	-50dBc	
Anti phase IMD 정합시	-48.12dBc	-48.42dBc

회로 없이 구동단을 이용한 predistortion 효과를 얻을 수 있었다. 이러한 점은 기존 analog predistortion 방식과 feedforward 방식의 단점을 보완하였음에 큰 의미가 있다고 할 수 있다.

참고문헌

- [1] S. C. Cripps, *RF Power Amplifier for Wireless Communications*, Artech House, 1999.
- [2] N. Potheary, *Feedforward Linear Power Amplifiers*, Artech House, 1999.
- [3] Y. Aoki, K. Kunihiro, T. Miyazaki, T. Hirayama, and H. Hida, "A 20-mA quiescent current two-stage W-CDMA power amplifier using anti-phase intermodulation distortion," *Proc. IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symp.*, pp. 357-360, June 2004.
- [4] T. Iwai, K. Kobayashi, Y. Nakasha, T. Miyashita, S. Ohara, and K. Joshin, "42% high-efficiency two-stage HBT power-amplifier MMIC for W-CDMA cellular phone systems," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 48, no. 12, pp. 2567-2572, Dec. 2000.
- [5] S. Shinjo, K. Mori, H. Ueda, A. Ohta, H. Seki, N. Suematu, and T. Takagi, "A 20 mA quiescent current CV/CC parallel operation HBT power amplifier for W-CDMA terminals," *IEEE RFIC Symp. Dig.*, pp. 249-252, June 2002.
- [6] 하성재, *전력증폭기의 선형성 개선을 위한 왜곡 해석과 응용에 관한 연구*, 광운대학교 박사학위 논문, pp. 21-26, 2005. 2월.

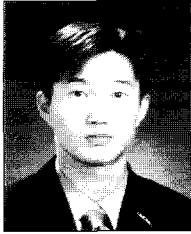
저자소개



장 정 석 (Jang, Jeong-Seok)

2008년 : 광운대학교 박사과정 (전파공학과)

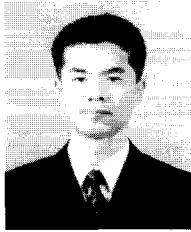
2006년 3월 ~ 2008년 2월 : 광운대학교 전파공학과 공학 석사



도 지 훈 (Do, Ji-Hoon)

2008년 2월 : 광운대학교 박사과정 수료 (전파공학과)

2004년 3월 ~ 2006년 2월 : 광운대학교 전파공학과 공학 석사



강 동 진 (Kang, Dong-Jin)

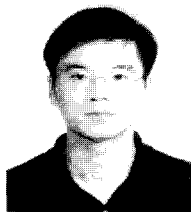
2006년 2월 : 광운대학교 박사과정 수료 (전파공학과)

2001년 3월 ~ 2003년 2월 : 광운대학교 전파공학과 공학 석사

2000년 8월 ~ 현재 : 한국 정보통신기능대학 교수

1996년 5월 ~ 2000년 7월 : 강원이동통신

1993년 4월 ~ 1995년 6월 : 정보통신부 전파연구소



김 대 응 (Kim, Dae-Woong)

2007년 8월 : 광운대학교 박사과정 수료 (전파공학과)

1990년 3월 ~ 1992년 2월 : 광운대학교 전파공학과 공학 석사

2006년 3월 ~ 현재 : (주) 에이스안테나 책임연구원

1999년 2월 ~ 2006년 2월 : (주) 에이스테크놀로지 책임연구원



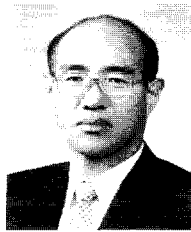
김 대 회 (Kim, Dae-Huo)

2004년 8월 ~ 현재 : 광운대학교 석·박사통합 과정 (전파공학과)

1996년 3월 ~ 현재 : 전자부품 연구원 기술정책실 실장

1994년 3월 ~ 1996년 2월 : (주) 아남전자 TV 개발부 선임 연구원

1993년 8월 ~ 1994년 2월 : (주) 인켈정보기기 사업부 개발팀



홍 의 석 (Hong, Ui-SeoK)

1982년 11월 : 독일 Aachen 공대 전자 공학과 공학박사

1973년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 전자공학부 교수

2002년 5월 ~ 2003년 12월 : 한국ITS학회 초대회장

2001년 1월 ~ 2001년 12월 : 한국통신학회 회장