

주파수 상향 변환을 이용한 전치왜곡 전력 증폭기 설계

A Design of Predistortion HPA using Frequency Up-Conversion Mixing Operation

정용채 · 김영* · 김철동**

Yong-Chae Jeong · Young Kim* · Chul-Dong Kim**

요약

본 논문에서는 혼합기의 주파수 상향 변환 동작을 이용한 새로운 전치왜곡 선형화 기법을 제안하였다. 이 선형화 기법은 주파수 상향 혼합 동작을 이용함에도 불구하고 추가적인 신호원을 필요로 하지 않는다. 대신 입력 신호로부터 2차 저주파 혼변조 왜곡 신호를 추출하여 주파수 상향 변환에 필요한 신호원으로 사용하였다. 제안한 전치왜곡 선형화 기법의 타당성을 보이기 위해 주파수가 1.8544 GHz와 1.8556 GHz인 2-톤 신호를 개인 휴대 통신용 전력 증폭기에 인가하여 22 dBm/tone 출력시에 (C/I) 비를 26 dB 개선하였으며, 출력 신호레벨을 17 dB 변화시키는 동작 영역에서 (C/I) 비를 20 dB 이상 개선시켰다. 또한 IS-95A 1FA 신호를 인가하여 출력이 26.5 dBm일 때 885 kHz 및 1.25 MHz 이격 지점에서 인접 채널 전력비를 각각 10.8 dB, 6.4 dB 개선시켰다.

Abstract

In this paper, a new predistortion linearizing method using frequency up-conversion operation of mixer is proposed. This linearizing method doesn't require any additional signal sources in spite of frequency up-conversion mixing operation. This method extracts the 2nd low frequency intermodulation distortion signal from input signals and uses the extracted 2nd low frequency intermodulation distortion signal as mixing signal source. To show validation of the proposed predistortion method, we made K-PCS power amplifier. On 2-tone signals amplification process, the (C/I) ratio of amplifier is improved 26 dB (@Po=22 dBm/tone), where two tones are 1.8544 GHz and 1.8556 GHz, respectively. And (C/I) ratio is improved more than 20 dB for 17 dB output signal dynamic range. On IS-95A CDMA 1FA amplification process, the improvements of adjacent channel power ratio(ACPR) are 10.8 dB and 6.4 dB at ±885 kHz and ±1.25 MHz offset points, respectively.

Key words : Amplifier, Frequency Up-Conversion, Predistortion

I. 서론

최근 사용되고 있는 이동 통신 시스템은 주파수 자원의 효율적 사용을 위해 QPSK, QAM과 같은 선형 변조 방식 등을 사용한다. 그러나 이런 변조 방식들은 RF 신호의 최대 전력 대 평균 전력비가 크고,

포락선 변동이 심하게 변하는 특성을 가지고 있으며 선형성이 좋은 전력 증폭기를 필요로 한다. 또한 전력증폭기를 설계할 때에는 높은 효율과 높은 출력 전력을 얻기 위해 트랜지스터의 바이어스를 비선형 특성이 강한 포화 영역 근처에서 동작시키는 것이 일반적인데, 이때 선형성의 저하를 동반하게 된다.

전북대학교 공과대학 전자정보공학부 및 반도체설계교육센터(Division of Electronic & Information Engineering, IDEC WG, Chonbuk National University)

*금오공과대학교 전자공학부(School of Electronics Engineering, Kumoh National Institute of Technology)

**세원텔레텍(주)(Sewon Teletech, Inc.)

· 논문 번호 : 20040224-021

· 수정완료일자 : 2004년 4월 6일

이는 매우 좋은 선형성을 요구하는 통신 규격의 진화와 배치되는 것으로 매우 좋은 전력 효율과 선형성을 갖는 전력 증폭기 설계 기술을 요구하게 된다. 전력 증폭기의 비선형성을 제거하기 위해서는 선형화 기법이 그 해결책이 될 것이다. 현재 여러 가지의 선형화 방법이 소개되고 있지만 실제로 개선 효과나 동작 대역폭 등의 관점에서 볼 때에 실제로 적용 가능한 선형화 기법은 피크 전력 감쇄, 전치 왜곡 기법, feedforward 기법, 부궤환 기법, 디지털 전치 왜곡, EER(Envelope Elimination and Restoration) 등과 같은 방법들이 있다^{[1]~[3]}.

전치 왜곡 기법은 RF 전력 증폭기의 선형화 방법 중 가장 광범위하게 쓰이는 형태 중에 하나로 비선형성 개선 효과는 feedforward 기법에 미치지 못하지만 소형 및 경량으로 구현 가능하며 광대역 동작 특성 때문에 많이 쓰이고 있다. 전치 왜곡 선형화 기법은 전력 증폭기에서 신호 증폭 중에 생기는 AM/AM과 AM/PM 왜곡을 설명하는 비선형 전달 특성에 대하여 역 비선형 전달 특성을 갖도록 구현하는 것이 일반적이며, 주파수 측면에서 보면 전력 증폭기에서 생기는 혼변조 왜곡 성분들이나 인접 채널 잡음들을 전치왜곡 선형화기에서 효과적으로 만들어주어 그것들을 제어하는 것이 핵심이라고 할 수 있다^[4].

본 논문에서 주파수 상향 변환 혼합기를 이용하여 전치왜곡 신호들을 발생시키고, 그 신호들을 제어함으로써 전력 증폭기에서 생기는 혼변조 왜곡 신호들을 효과적으로 억압할 수 있는 선형화 기법을 제안했다. 비록 2차 및 4차 저주파 신호의 주입에 의한 논문이 있지만 혼합기의 비정상적인 동작과 저주파 신호 경로간의 다른 군속도 지연과 위상 정합의 어려움을 간과하고 있다^[5]. 제안된 전치 왜곡 선형화 기법은 주파수 상향 변환 혼합 동작을 이용하지만 추가적인 신호원을 필요하지 않는다는 점과 전치 왜곡 신호를 손쉽게 만들 수 있고 전치 왜곡 혼변조 신호의 안정적인 획득 측면에서 매우 유용하다.

II. 설계 이론

2-1 주파수 상향 변환 혼합 동작

주파수 혼합기는 초고주파 다이오드나 트랜지스

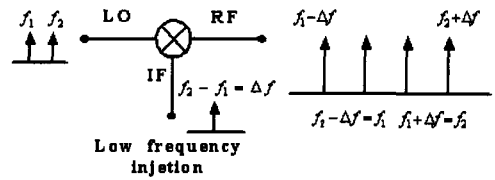


그림 1. 주파수 상향 변환 혼합 동작의 스펙트럼
Fig. 1. Spectrum of frequency up-conversion mixing operation.

터를 이용하여 구현하는데, 국부 발진기(Local Oscillator: LO) 신호 전력으로 소자의 비선형성을 발생시키고 이때 입력되는 중간 주파수(IF) 신호나 RF 신호가 LO 신호와 혼합되어 주파수 상향 또는 하향 변환 동작을 일으키게 된다^[6]. 주파수 상향 변환의 경우, RF 단자의 주파수 성분들은 LO와 IF 신호의 주파수 성분들 사이의 합과 차이이다. 만약 LO 신호는 주파수가 f_1, f_2 ($f_1 < f_2$)이면서 크기가 같은 두 신호로 구성되고, IF 신호의 주파수가 $\Delta f = f_2 - f_1$ 라면, RF 단자에서 얻어지는 신호의 주파수 성분들은 $f_1 - \Delta f, f_2 - \Delta f (=f_1), f_1 + \Delta f (=f_2), f_2 + \Delta f$ 이다. 이 $f_1 - \Delta f$ 과 $f_2 + \Delta f$ 인 주파수 성분들은 증폭기가 증폭 과정에서 만들어지는 3차 혼변조 왜곡 성분들의 주파수와 같다. 그림 1은 주파수 상향 변환 혼합기의 주파수 스펙트럼을 보여준다^[7].

2-2 2차 저주파 혼변조 왜곡 신호 발생기

비선형성이 비교적 작은 증폭기의 전달함수는 다음의 Taylor series로 표현될 수 있다.

$$V_{out} = G_1 \cdot V_{in} + G_2 \cdot V_{in}^2 + G_3 \cdot V_{in}^3 + \dots \quad (1)$$

여기서 계수 G_i ($i=1, \dots, n$)는 입력과 출력 전달 특성에 의해 결정된다. 만약 입력 신호가 다음과 같이 크기가 같은 두 개의 신호로 구성되어 있다고 가정하자.

$$V_{in} = A [\cos(\omega_1 t) + \cos(\omega_2 t)] \quad (2)$$

이때 증폭기의 출력 단에는 증폭된 입력 신호 외에 혼변조 왜곡 성분들($\omega_1 \pm \omega_2, 2\omega_1 - \omega_2, 2\omega_2 - \omega_1$)과 하모닉 성분들($2\omega_1, 2\omega_2, 3\omega_1, 3\omega_2, \dots$)이 나타난다. 그림 2는 비선형 증폭기의 출력신호의 스펙트럼을 보여준다. 주파수 상향 변환 혼합 동작을 위해서는 입력 신호로부터 2차 저주파 혼변조 왜곡 신호

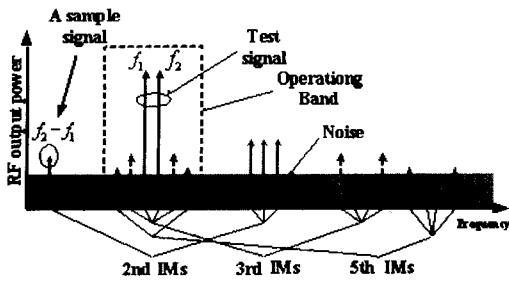


그림 2. 증폭기의 출력신호의 스펙트럼
Fig. 2. Spectrum at amplifier output port.

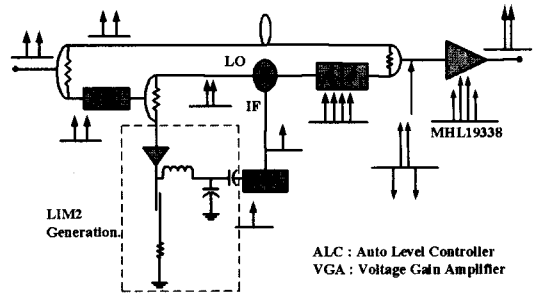


그림 4. 전치 왜곡 대전력 증폭기 구성도
Fig. 4. Block diagram of the predistortive HPA.

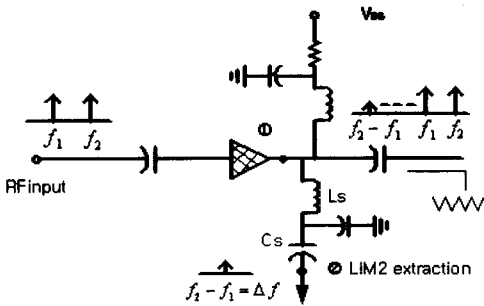


그림 3. 2차 저주파 혼변조 왜곡 신호발생기의 구성도
Fig. 3. Block diagram of the 2nd low frequency intermodulation distortion signal generator.

$(\omega_2 - \omega_1)$ 의 추출이 요구된다.

본 논문에서는 그림 3과 같은 2차 저주파 혼변조 왜곡 신호(LIM2) 발생기를 이용하여 2차 저주파 혼변조 왜곡 신호를 추출하였다. 이 회로는 소신호 증폭기, 결합기, 인덕터(Ls) 그리고 캐패시터(Cs)로 구성된다. 입력된 신호는 소신호 증폭기를 거치면서 신호 증폭과 더불어 여러 비선형 주파수 성분들을 발생시킨다. $\lambda/4$ 평행 결합선로를 이용한 결합기의 결합 및 통과 단자를 개방하고, 입력 및 격리 단자에 입출력 단을 연결하면 결합기는 대역 통과 여파 기능을 수행할 수 있다. 이때 동작 대역의 신호들은 결합기를 통과하여 중단 저항에서 소모되며, 2차 저주파 혼변조 왜곡 신호는 결합기에서 반사되어 인덕터 단자로 진행하게 된다. 이때 캐패시터의 값은 DC 전원 차단 및 저주파 신호 통과를 위해 적절히 선택하여야 한다.

2.3 주파수 상향 혼합 동작을 이용한 전치 왜곡 대전력 증폭기 설계

주파수 상향 혼합 동작을 이용한 전치 왜곡 대전력 증폭기의 구성은 그림 4와 같다. 전체 구성은 전력 분배기, 자동 레벨 조정기(Automatic Level Controller: ALC), 2차 저주파 혼변조 신호 발생기, 혼합기, 가변 감쇄기(A_1), 가변 위상 변환기(ϕ)로 되어 있다. 입력된 2-톤 신호는 전력 분배기를 통해 지연선로 경로와 ALC 경로로 분기된다. ALC는 입력 신호 레벨의 동작 대역에서 일정한 신호 출력 레벨을 유지시킨다. 이러한 신호들은 다시 전력 분배기에서 혼합기의 LO 단에 들어가는 신호와 2차 저주파 신호 추출을 위한 경로로 분기된다.

전압 이득 증폭기(Voltage gain amplifier: VGA)는 2차 저주파 신호 발생기에서 추출된 신호의 크기를 조절할 수 있다. 결국 LO단에 들어간 입력 신호는 증폭된 2차 저주파 혼변조 신호와 혼합되어 전치 왜곡 신호들을 발생시키게 된다. 이러한 전치왜곡 신호의 이득과 위상은 대전력 증폭기에서 발생하는 혼변조 왜곡 신호들과 정합 시키기 위해 가변 감쇄기와 가변 위상 변환기를 이용하여 조절된다.

III. 실험 및 결과

본문에서 제안한 선형화기의 실제 개선 정도를 보이기 위해, 전치왜곡기와 대전력 증폭기를 제작하였다. 증폭기의 동작 주파수 대역은 한국 개인 휴대통신(K-PCS) 기지국 송신대역으로 하였으며, 실험에서 사용된 대전력 증폭기는 Motorola사의 MHL-19338이고, 측정된 이득과 P_{1dB} 는 각각 30 dB와 35 dBm이었다. 2차 저주파 혼변조 왜곡 신호를 검출하기 위해 사용된 소신호 증폭기는 Mini-Circuits사의 ERA-4SM이고, VGA와 혼합기는 Analog Device사의

AD602와 Mini-Circuits사의 LRMS-30J를 사용하였다. 가변 감쇄기와 가변 위상 변환기는 좋은 반사 계수를 얻기 위하여 반사 구조(reflection type)를 채택하였으며 가변 위상 변환기에는 Sony사의 바랙터 다이오드 1T362를 사용하였고, 가변 감쇄기에는 HP사의 PIN 다이오드 HSMP-4810을 사용하였다.

그림 5는 2차 저주파 신호 발생기에서 소신호 증폭기의 출력 단과 2차 저주파 신호 발생기 출력단 사이(그림 3의 단자 ①과 ② 사이)의 전달 및 반사 특성을 보여주고 있다. 저주파 대역에서는 양호한 전달 특성을 보이나 입력 신호의 주파수 대역인 1.855 GHz 대역에서는 양호한 차단 특성을 보이고 있다. 따라서 소신호 증폭기에서 발생된 2차 저주파 혼변조 왜곡 신호들이 적절하게 추출될 수 있음을 알 수 있다. 그림 6은 입력 주파수가 1.8544 GHz와

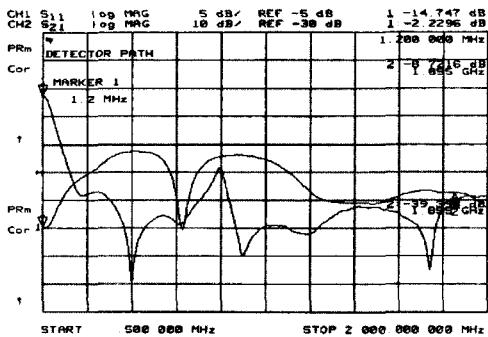


그림 5. 2차 저주파 신호 검출기의 전달 및 반사 특성
Fig. 5. S_{21} and S_{11} of the 2nd low frequency intermodulation distortion signal generator.

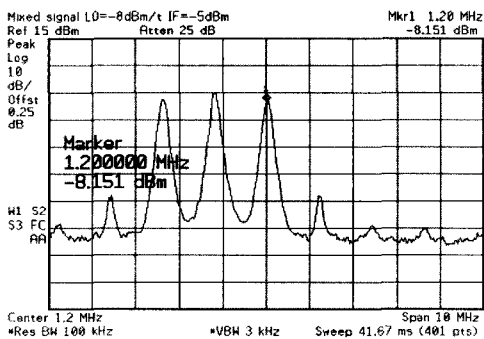


그림 6. 2차 저주파 혼변조 신호 검출기의 출력스펙트럼
Fig. 6. Output spectrum of the 2nd low frequency intermodulation distortion signal generator.

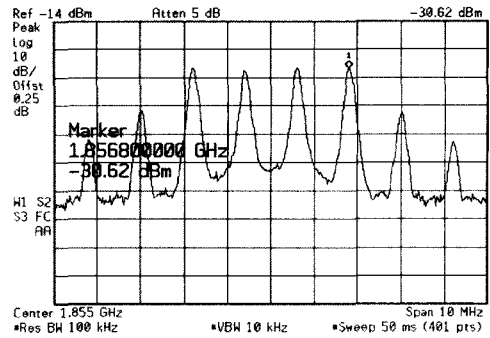


그림 7. 주파수 상향 혼합기의 출력 신호
Fig. 7. Output spectrum of frequency up-conversion mixer.

1.8556 GHz일 때, 2차 저주파 혼변조 왜곡 신호 발생기의 출력 스펙트럼 그림이다. 그림 7은 추출된 2차 저주파 혼변조 왜곡 신호와 최초 입력 신호를 주파수 상향 혼합하여 얻어진 출력 신호를 보이고 있다. VGA 출력 신호의 진폭을 미약하게 제어함으로 3차 전치 왜곡 혼변조 신호들만을 추출할 수도 있으나, 신호 동작영역에서 선형화 대상 전력 증폭기의 비선형 특성 정합을 위해 VGA 출력 신호의 진폭을 제어하여 3차 혼변조 신호 이외에 5차 혼변조 왜곡 신호들을 추가적으로 발생시켜 효과적으로 선형화 시킬 수도 있다.

그림 8은 주파수 상향 혼합 동작을 이용한 전치왜곡기가 있을 때와 없을 때의 대전력 증폭기의 비선형 특성을 비교한 것이다. 동일한 출력 레벨(P_o =

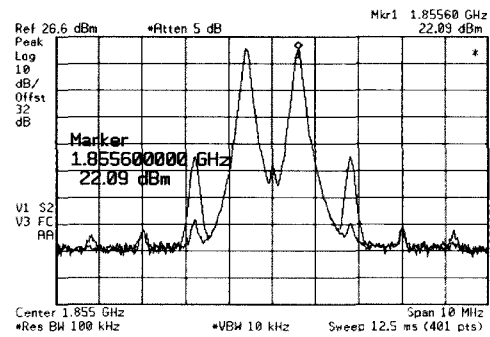


그림 8. 전치 왜곡기가 없을 때와 왜곡기가 있을 때의 전력 증폭기의 비선형 특성 비교($P_o=22.09$ dBm/tone)
Fig. 8. The nonlinear characteristics comparison of HPA with/without the proposed predistorter ($P_o=22.09$ dBm/tone).

22.09 dBm/tonne)에서, 전치 왜곡기가 없을 때의 $(C/I)_{3rd}$ 는 39.97 dBc이고, 전치 왜곡기가 있을 때의 $(C/I)_{3rd}$ 는 65.97 dBc이다. 따라서 (C/I) 는 대략 26 dB 개선되었다. 그리고 그림 9는 출력레벨이 11~28 dBm/tonne 일 때, (C/I) 의 개선 전후 특성을 나타낸 것으로 전체 대역에서 20 dBc 이상의 개선 특성을 얻을 수 있었다.

그림 10은 IS-95A CDMA 1FA 신호를 입력 신호로 사용하였을 때 전력 증폭기의 선형화 전후 특성을 보인 것이다. 출력 전력이 26.5 dBm일 때 885 kHz와 1.25 MHz 이격 지점에서 인접 채널 전력 비 (Adjacent Channel Power Ratio: ACPR)를 살펴보면, 선형화 이전에는 33.78 dBc, 38.33 dBc이었으나 선형

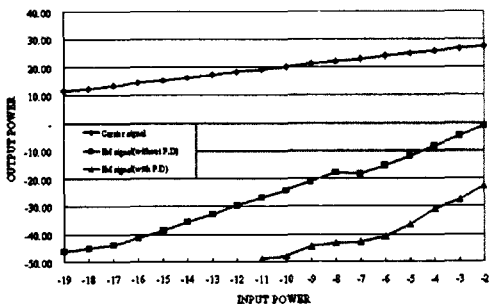


그림 9. 전력 변화에 따른 전력증폭기의 비선형 특성 비교

Fig. 9. The nonlinear characteristics comparison of HPA according to power variation.

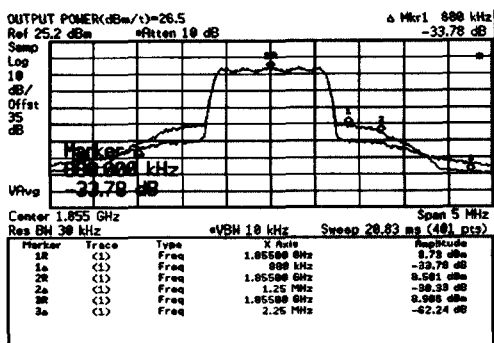


그림 10. CDMA 신호 입력 시 전치 왜곡기가 없을 때와 왜곡기가 있을 때의 전력 증폭기의 비선형 특성 비교(@Po=26.5 dBm)

Fig. 10. The nonlinear characteristics comparison of HPA with/without the proposed predistorter in case of CDMA 1FA signal(@Po=26.5 dBm).

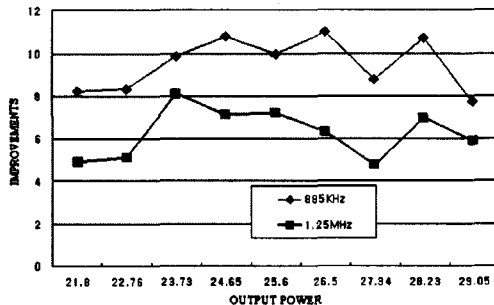


그림 11. CDMA 신호 입력 시 출력 변화에 따른 전력증폭기의 ACPR 개선량

Fig. 11. The ACPR improvements of HPA according to output power variation in case of CDMA signal.

화 이후에는 44.63 dBc, 44.77 dBc로 각각 10.8 dB와 6.4 dB의 개선 특성을 보이고 있다. 또 그림 11은 IS-95A CDMA 1FA 신호를 입력 신호로 사용하면서 출력 레벨을 21.08~29.05 dBm로 변화시키면서 선형화 개선량을 보인 것이다.

IV. 결론

본 논문은 혼합기의 주파수 상향 변환 동작을 이용한 전치 왜곡 선형화기를 제안하였으며, 이 선형화 기법을 전력 증폭기에 적용하여 선형화 효과를 나타냈다. 제안한 전치 왜곡 선형화 기법은 혼합기의 주파수 혼합 동작을 이용했지만 추가적인 어떤 신호원도 필요치 않으므로 비교적 간단하게 구현할 수 있다. 또한 본 논문에서는 새로운 2차 저주파 혼합 조 왜곡 신호를 추출하는 방법을 제시하였다. 일반적으로 전력 증폭기는 사용하는 디바이스에 따라, 동작 전압에 따라, 환경 조건에 따라 비선형성이 달라지는데 혼합기의 동작 조건을 달리하여 전력 증폭기에 적합한 전치 왜곡 신호를 만들 수 있어서 매우 유용한 전치 왜곡 선형화 기법이라고 판단된다.

참고 문헌

[1] Steve C. Cripps, *RF Power Amplifiers for Wireless Communication*, Artech House, 1999.
 [2] 정용채, "이동통신기국용 대전력 증폭기 설계 기술", 한국전자파학회 학회지 전자파기술, 14(4), pp. 39-49, 2003년 10월.

[3] Fredric H Raab, Peter Asbeck, Steve Cripps, Peter B Kennington, Zoya B. Popovic, Nick Pothecary, John F. Sevic and Nathan O. Sokal, "Power amplifiers and transmitter for RF and microwave", *IEEE Trans. on MTT*, vol. 50, no. 3, pp. 814-826, Mar. 2002.

[4] Yong-Chae Jeong, Sang-Young Yun, "Design of a predistortive high power amplifier using carrier complex power series analysis", *Microwave Journal*, vol. 45, no. 4, pp. 92-102, Jan. 2000.

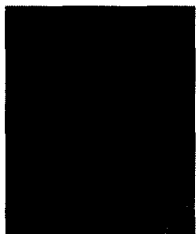
[5] Youn-Goo Yang, Young-Yun Woo and Bumman

Kim, "New predistorion linearizer using low-frequency even-order intermodulation components", *IEEE Trans on MTT*, vol. 50, no. 2, Feb. 2002.

[6] Stephen A. Maas, *Microwave Mixer*, Artech House, 1993.

[7] Yong-Chae Jeong, Sang-Young Yun, Dal Ahn, Kyo-Ho Park and Chul-Dong Kim, "A design of predistortive linearizing HPA using frequency up-conversion mixing operation", *European Microwave Conference Proceeding*, pp. 18-21, 2000.

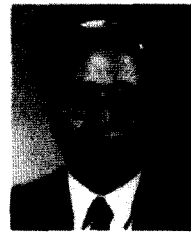
정 용 채



1989년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학사)
 1991년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학석사)
 1996년 8월: 서강대학교 전자공학과 (공학박사)
 1991년 2월~1998년 2월: 삼성전자

정보통신사업본부 선임연구원
 1998년 3월~2000년 3월: 전북대학교 전자정보공학부 전임강사
 2000년 4월~2004년 3월: 전북대학교 전자정보공학부 조교수
 2004년 4월~현재: 전북대학교 전자정보공학부 부교수 및 IDEC WG 책임교수, 전북실리곤밸리교육센터 센터장
 [주 관심분야] 초고주파 회로 설계 및 해석, 전력 증폭기 및 선형화기 설계, RFIC 설계, 전송선로 주기구조 해석

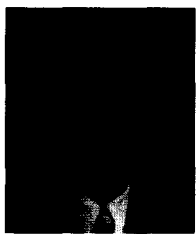
김 철 동



1971년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
 1985년 5월: 미국 Wisconsin-Madison 전기공학과 (공학박사)
 1985년~1990년: 미국 AT&T Bell Labs. MTS
 1990년 2월~1997년 11월: 삼성전

자 정보통신사업본부 상무이사
 1997년~현재: 세원텔레텍(주) 대표이사
 [주 관심분야] 선형증폭기 설계, 초고주파 회로설계, 이동통신 시스템 기술

김 영



1986년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학사)
 1988년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학석사)
 2002년 8월: 서강대학교 전자공학과 (공학박사)
 1988년 1월~1993년 5월: 성미전자

정보통신사업본부 선임연구원
 1993년 6월~1998년 2월: 삼성전자 정보통신사업본부 선임연구원
 1998년 3월~2003년 2월: 두원공과대학 정보통신과 조교수
 2003년 3월~현재: 금오공과대학교 전자공학부 전임강사
 [주 관심분야] RF 및 Microwave 회로해석 및 설계, 전력 증폭기 및 선형화기 설계