

# 에러 피드백 기술을 이용한 피드 포워드 선형 전력 증폭기

## A Feedforward Linear Power Amplifier using Error Feedback Technique

김완중\* · 조경준\* · 김종현\* · 김남영\*\* · 이종철\*\* · 이병제\*\*

W. J. Kim\* · K. J. Cho\* · J. H. Kim\* · N. Y. Kim\*\* · J. C. Lee\*\* · B. Lee\*\*

### 요 약

본 논문에서는 기지국용 전력 증폭기의 혼 변조 성분들을 극도로 억압하기 위해서 Error feedback 방식을 사용한 Feedforward 선형 전력 증폭기를 설계하였다. 특히, 제안된 선형 전력 증폭기는 기존의 피드백 기술의 단점인 증폭 이득의 손실을 없앤 Error feedback 기술과 Feedforward 기술을 혼합하여 적용하였다. 제안된 선형 전력 증폭기는 HP사의 EEs of ADS ver.1.3 을 사용해서 설계·제작하였다. 측정결과, 이득 28 dB, P1dB 31 dBm인 주 전력 증폭기에 -7 dBm/tone을 갖는 1850 MHz와 1851.25 MHz의 2-tone 신호를 인가한 결과 전체 IMD가 약 35 dB 개선되었다.

### Abstract

This paper presents a feedforward linear power amplifier (LPA) using error feedback technique to achieve low intermodulation distortions(IMD) of power amplifiers for base stations. Especially, the proposed linear power amplifier is applied to feedforward technique combined with error feedback technique which has no loss of amplifier gain unlike typical feedback technique. The proposed LPA is designed by using HP ADS ver. 1.3, fabricated. When two-tone signals at 1850 MHz and 1851.25 MHz with -7 dBm/tone from synthesizers are injected into the main power amplifier with gain of 28 dB and P1dB of 1W, the proposed LPA could reduce more than 35 dB.

### I. 서 론

현재 디지털 이동통신시스템에서는 다중 채널을 이용하고 있기 때문에 전력 증폭기에 여러 채널의 반송파가 입력되어 공동 증폭될 때 전력 증폭기의 비 선형 특성으로 인하여 혼 변조 신호들이 발생하게 된다. 이들 혼 변조 신호들은 인접채널에 상호 영향을 주게 되고 혼신 (Cross-talk) 또는 잡음 (Noi-

se)으로 작용하여 전송 품질을 저하시키는 요인이 된다<sup>[1],[2]</sup>.

따라서, 이런 혼 변조 신호들을 일정치 이하로 억압시키기 위해서는 전력 증폭기의 비 선형 특성을 보상해야 하며 이를 위하여 여러 가지 선형화 기술들이 개발되어 왔다. 예를 들면, 입력 전력의 Back-off 방식, Feedback 방식, Predistortion 방식, Feedforward 방식이 있다<sup>[3]</sup>.

「이 논문은 2000년도 광운대학교 교내학술 연구비 지원에 의해 연구되었음.」

\* 광운대학교 전파공학과(Dept. of Radio Science and Engineering, Kwangwoon University)

\*\* RFIC 교육 및 연구센터/ 미션 테크놀로지 연구센터(RFIC Research and Education Center/ Mission Technology Center)

· 논문 번호 : 20000720-083

· 수정완료일자 : 2000년 9월 20일

이중에서 Feedforward 방법은 비 선형 증폭기의 입력신호와 출력신호를 비교하여 혼 변조 잡음 성분만의 차 (error) 신호를 추출한 후, 비 선형 증폭기의 출력 단에 결합하여 비 선형 증폭기에서 출력되는 혼 변조 잡음 성분을 상쇄시켜 최종적으로 선형 출력 신호를 얻는 방식으로 비 선형 개선이 가장 뛰어나다.

그러나 전송해야 할 정보가 많아짐에 따라 혼변조 개선량을 더 많이 요구하고 있어서 Feedforward 방식만으로는 -70 dBc 이하의 낮은 IMD 특성을 얻기가 어렵다. 따라서 Dual-loop feedforward 방식, Predistorter를 적용한 Feedforward 방식과 같이 두 가지 이상의 선형화 기술을 적용시키는 방법들이 사용되고 있다.

Dual-loop feedforward 방식은 주 증폭기에 Feedforward 방식을 적용시킨 후, 그 자체를 다시 한번 Feedforward 방식을 적용시키는 방법을 말한다. 이 방식은 크기가 커지게 되고 효율도 나빠지나 개선량은 매우 크다<sup>[3]</sup>. 또 Predistorter를 적용한 Feedforward 방식은 주 증폭기의 앞단에 Predistorter를 적용시켜 약 10 dB 정도 주 증폭기의 IMD를 개선시킨 후, Feedforward 방식을 적용시키는 방법이다. 이 방식은 개선량은 앞에 설명된 방식보다 작으나 크기가 크지 않고 효율도 나빠지 않다<sup>[4]</sup>. 다만, Predistorter 안에 혼변조 발생기를 구성해야 하는 단점이 있다.

본 논문에서는 Feedforward 방식의 효율을 유지하고, 별도의 혼변조 발생기가 필요 없는 Feedback 방식의 단점을 개선한 Error feedback과 Feedforward 방식을 동시에 적용시켜 IMD 개선을 극대화시킨 선형화기를 제안하였다<sup>[5],[6]</sup>.

## II. 일반적인 선형화 및 에러 피드백 이론

일반적으로 전력 증폭기에 단일 주파수의 입력신호를 인가하면 출력 이득의 저하와 위상의 지연이 일어난다. 이것은 입력 신호의 크기가 증폭기의 포화 영역에 가까워짐에 따라 AM-to-AM과 AM-to-PM 효과가 나타나기 때문이다. 또한 여러 주파수의 신호를 입력하면 입력 신호와 동일한 주파수를 갖는 출력 신호 외에 각각 다른 비 선형 전달 특성을

갖는 혼 변조 왜곡 신호 성분들이 생긴다.

그림 1은 두 개의 반송파를 인가한 증폭기의 출력 주파수 파형을 나타낸 것이다. 기존 주파수 외에 발생한 혼 변조 성분들은 증폭기가 낼 수 있는 에너지를 소모하므로 기본 주파수의 출력을 저하시킨다. 특히 대역 내에 위치하는 3차 혼 변조 신호 성분들 ( $2f_1-f_2$ ,  $2f_2-f_1$ )의 영향이 가장 크다. 따라서, 이러한 혼 변조 신호 성분들을 줄이기 위해 가장 많이 이용하는 방법이 Feedforward 선형 전력 증폭기이다.

그림 2는 일반적인 Feedforward 선형 전력 증폭기의 구성도를 나타낸다.

Feedforward 선형화기는 전력 증폭기의 출력에서 얻어진 반송파와 혼 변조 신호로부터 혼 변조 성분만을 추출하여 다시 증폭기의 출력에 역 위상으로 결합하여 혼 변조 신호를 상쇄시키므로 해서 반송파 대 혼 변조 비 (Carrier to Intermodulation Ratio; C/I)를 개선시키는 것을 목적으로 한다.

그림 3은 Error feedback 선형화방식의 구성도를 나타낸다. 간단한 수식을 사용하여 분석해 보면, 주 증폭기의 출력(Mout)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

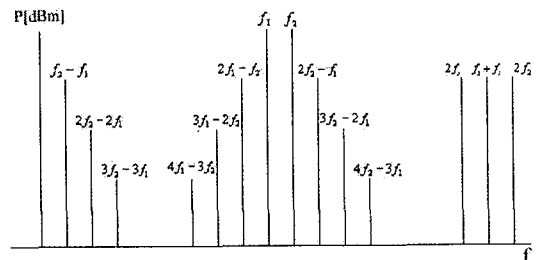


그림 1. 2 개의 반송파에 대한 IMD 스펙트럼  
Fig. 1. IMD spectrum for two-tone signal.

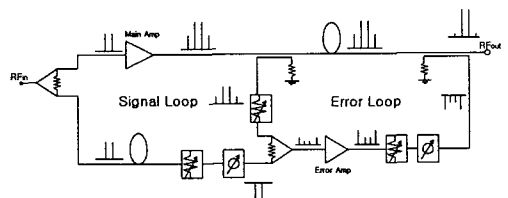


그림 2. 일반적인 Feedforward 선형화기  
Fig. 2. Typical feedforward linearizer.

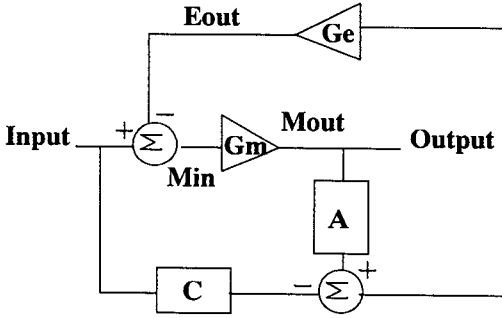


그림 3. Error feedback 방식의 구성도  
Fig. 3. Block diagram of error feedback method.

$$Mout = Input \cdot Gm + Dm \quad (1)$$

식 (1)에서  $Dm$ 은 전력 증폭기의 비선형 특성으로 인해 생기는 왜곡성분을 나타낸다. 또  $Gm$ 은 주 증폭기의 이득이다. 따라서 에러 증폭기의 출력은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Eout = Ge \cdot [A \cdot (Min \cdot Gm + Dm) - Input \cdot C] + De \quad (2)$$

여기서  $A$ 는 감쇄량,  $C$ 는 벡터 변조기의 감쇄,  $Ge$ 는 에러 증폭기의 이득,  $De$ 는 에러 증폭기의 왜곡 성분,  $Min$ 은 주 증폭기의 입력이다. 식 (1)과 식 (2)를 정리하여 최종 출력을 나타내면,

$$Output = Gm \cdot Input + \frac{Dm - Gm \cdot De}{1 + Gm \cdot Ge \cdot A} \quad (3)$$

가 된다( $Gm \cdot A = C$ ). 따라서 Error feedback 방식은 기존의 Feedback 방식의 단점인 증폭이득의 감소를 개선할 수 있으며 왜곡성분을 나타내는 식 (3)의 오른쪽 두 번째 항을 없애므로 선형화를 시킬 수 있다.

또한,  $Gm \cdot A = C$ 인 조건(즉, 주 증폭기의 이득과 결합기의 결합도의 합은 지연되면서 생기는 감쇄량과 같음)을 이용하면 입력 레벨이 변하여도 별도의 조정이 필요 없게 된다. 예를 들면, 지연 감쇄량이  $-1$  dB, 증폭기의 이득이 30 dB, 결합기의 결합도가  $-29$  dB 이면 입력레벨이 변해도 위 경로와 아래 경로가 만날 때의 신호레벨이 같아지게 된다.

본 논문에서는 Error feedback 방식과 Feedforward 방식을 동시에 적용시킨 선형화기를 그림 4와

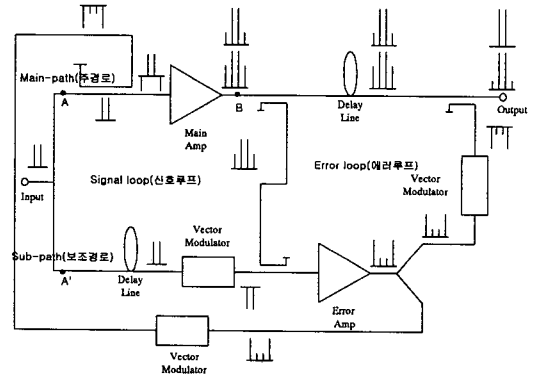


그림 4. 제안된 선형화기의 Schematic  
Fig. 4. Schematic of the proposed linearizer.

같이 설계하였다.

본 논문에서 제시한 선형화기의 동작 원리는 다음과 같다. 그림 4에서 2개의 반송파가 선형화기의 입력 ( $RFin$ )으로 인가되면 Wilkinson 전력 분배기에 의해 반송파가 신호루프의 주경로 ( $A$ )와 보조경로 ( $A'$ )로 같은 크기로 나누어진다. 주경로의 반송파는 전력 증폭기를 통과( $B$ )하면서 전력 증폭기의 비선형 특성으로 인하여 반송파의 증폭과 함께 혼변조 성분들이 함께 발생하게 된다. 신호루프의 보조 경로에서는 가변 감쇄기와 가변 위상 변환기에 의하여  $180^\circ$  위상 차를 갖게 된다. 신호루프의 주경로에서 주 증폭기의 출력 신호는 방향성 결합기를 통해 감쇄 없이 전달되고 일부는 결합기의 결합도를 가지고 신호루프 보조경로의 방향성 결합기에 입력된다. 보조 경로에서 가변 감쇄기와 위상 변환기를 통과한 신호는 지연선로를 사용하여 주 증폭기의 동작시간을 보상하여 방향성 결합기에 인가된다. 신호루프의 주경로와 보조경로로부터 방향성 결합기에 입력된 신호들을 결합하면 반송파 신호는 제거되고 혼변조 신호만 남게되고 에러 증폭기에 의해 증폭된다. 에러루프의 주경로에서는 방향성 결합기를 통과한 신호가 지연선로를 통과하면서 에러 증폭기의 동작시간을 보상한다. 에러루프의 보조경로에서는 증폭된 혼변조 신호를 Wilkinson 전력 결합기에 의해 나누게 된다. 보조경로에서 Error 증폭기를 통과한 신호는 가변 감쇄기와 위상 변환기를 이용하여 에러루프의 주경로에서 방향성 결합기로 인

가되는 신호의 혼변조 성분과 크기는 같고 위상은 180° 차이가 나도록 결합하여 증폭된 반송파 성분만 남게 된다. 에러루프 보조경로의 증폭된 혼변조 성분만을 가진 신호는 가변 감쇄기와 가변 위상변환기를 통해 180° 위상 차를 가지면서 Feedback 되어 주 증폭기의 입력에 인가된다. 신호가 주 증폭기에 인가되면 전치왜곡기와 같은 원리로 주 증폭기의 출력에서 혼 변조 성분은 제거되고 반송파만 증폭되어 나오게 되고 다시 이 혼 변조 성분이 제거된 신호는 출력에서의 방향성 결합기에서 역 위상의 혼 변조 성분과 합쳐져 혼 변조 성분을 완벽히 제거하게 된다.

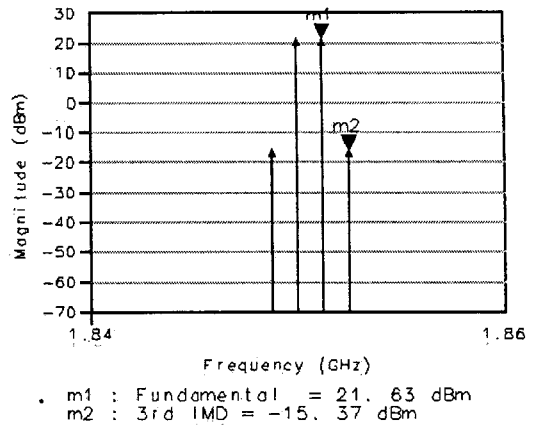
본 논문에서 제시한 선형화기는 기존의 Feedback 방식의 단점을 개선한 Error feedback 방식을 Feedforward 방식과 동시에 적용시켜 별도의 혼 변조 발생기 없이 에러 신호를 주 증폭기 입력 단과 출력 단에 동시에 인가하여 IMD 개선을 극대화하였다.

### III. 선형화기의 제작 및 측정

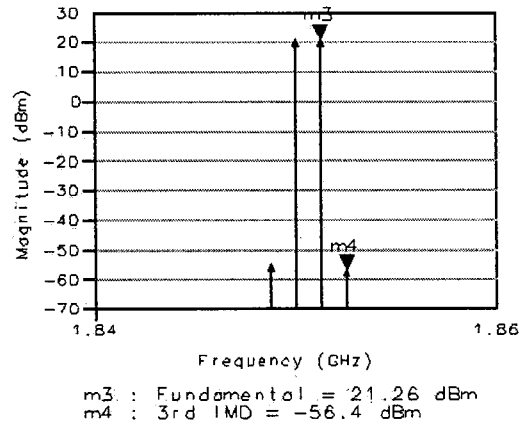
본 논문에서 제시된 선형화기의 구성 부품으로 Wilkinson 전력 분배기, 방향성 결합기, 90° Hybrid 결합기, 가변 감쇄기, 위상 변환기 등을 HP ADS ver.1.3을 이용하여 각각 설계, 직접 제작하였으며 이들 각 부품들을 조합한 전체 회로를 Simulation 하였다.

그림 5 (a)는 본 논문에서 제시한 선형화기의 선형화 이전의 출력 스펙트럼이고, 그림 5 (b)는 선형화기를 이용하여 선형화 이후의 출력 스펙트럼을 나타낸다. 1850 MHz와 1851.25 MHz의 2-tone 신호를 입력하였을 때 선형화하기 전에는 주 증폭기의 출력이 21.63 dBm, 3차 혼 변조 성분의 출력이 -15.37 dBm이었으나, 선형화 후에는 주 증폭기의 출력이 21.26 dBm, 3차 혼 변조 성분의 출력이 -56.4 dBm으로 40.66 dB의 IMD 개선 효과를 얻었다. 따라서 설계결과에 따라 본 논문에서 제시한 선형화기의 가능성을 보였다.

설계한 선형화기를 유전율 3.2, 두께 0.8 mm인 GML 1000 기판에 제작하여 측정하였다. 본 논문에서는 1 W급 증폭기를 주 증폭기로 사용하였으며 입



(a)



(b)

그림 5. 설계된 선형화기의 출력 스펙트럼

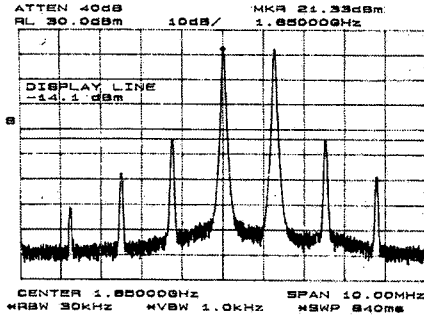
- (a) 설계된 주 증폭기 출력 스펙트럼
- (b) 설계된 선형화기의 출력 스펙트럼

Fig. 5. Simulated output spectrum of linearizer.

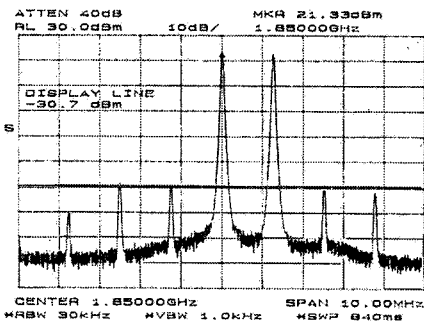
- (a) Output spectrum of the main amplifier
- (b) Output spectrum of the simulated linearizer

력신호가 -7 dBm인 1850 MHz와 1851.25 MHz 2-Tone 신호를 인가하였다. 측정 장비로는 HP Network Analyzer 8510C, HP Spectrum Analyzer 8563E, HP Sweep Generator 83623B, Wiltron Sweep Generator 6647B-40을 사용하였다.

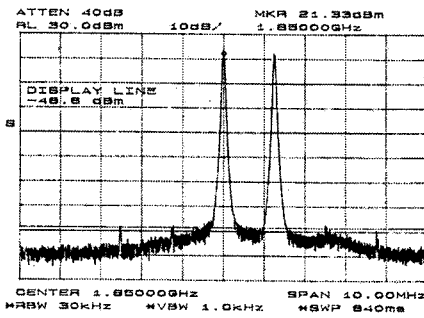
그림 6 (a)는 선형화 이전의 주 증폭기의 출력 스펙트럼으로 출력신호가 1850 MHz와 1851.25 MHz에서 21.33 dBm이고 3차 혼 변조 신호는 -14.1



(a)



(b)



(c)

그림 6. 1W급 주 증폭기에 대한 선형화기의 측정 결과  
 (a) 선형화 이전에 측정한 주 증폭기의 출력 스펙트럼  
 (b) 에러 피드백 선형화기의 출력 스펙트럼  
 (c) 제안된 선형화기의 출력 스펙트럼

Fig. 6. Measurement results of the linearizer for 1W Main amplifier.

- (a) Output spectrum of main amplifier
- (b) Output spectrum of error feedback linearizer
- (c) Output spectrum of the proposed linearizer

표 1. 선형화기의 측정 결과

Table 1. Measurement result of linearizer.

	주 증폭기 출력	Error feedback 선형화기	제안된 선형화기
Fundamental	21.33 dBm	21.33 dBm	21.33 dBm
3rd order IMD	-14.1 dBm	-30.7 dBm	-48.6 dBm
5th order IMD	약 -28 dBm	약 -31 dBm	약 -49 dBm
전체 IMD	-35.43 dBc	약 -52 dBc	약 -70 dBc

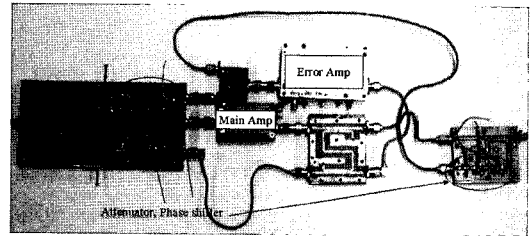


그림 7. Error feedback 기술을 이용한 Feedforward 선형전력 증폭기의 실물도

Fig. 7. Photograph of the Feedforward LPA using error feedback technique.

dBm으로 IMD가  $-35.43$  dBc인 것을 볼 수 있다. 그림 6 (b)는 Error feedback 선형화 이후의 출력 스펙트럼으로 출력신호가 1850 MHz와 1851.25 MHz에서 21.33 dBm이고 3차 혼 변조 신호는  $-30.7$  dBm으로 선형화 이전  $-35.43$  dBc이던 IMD 특성이 약  $-54$  dBc로 약 18 dB 개선됨을 보였다. 그림 6 (c)는 Error feedback 방식과 Feedforward 방식을 동시에 적용시켰을 때의 출력 스펙트럼으로 출력신호가 1850 MHz와 1851.25 MHz에서 21.33 dBm이고 혼 변조 신호는  $-48.6$  dBm으로 IMD가 약  $-70$  dBc로 약 35 dB가 개선됨을 보였다. 표 1은 본 논문에서 제시한 선형화기의 측정 결과를 나타낸다. 그림 7은 제작되어진 Error feedback 방식을 이용한 Feedforward 선형 전력 증폭기의 실물을 사진으로 찍은 것이다.

#### IV. 결 론

#### 참 고 문 헌

본 논문에서는 기존의 Feedback 방식의 단점을 개선한 Error feedback 방식을 이용한 Feedforward 선형화기를 설계 및 제작하였다.

본 논문에서 제시한 선형화기는 다음과 같은 특징을 갖는다.

첫째, 회로에서 주 경로와 보조경로를 결합할 때 방향성 결합기만을 사용하여 입력신호의 크기가 변하여도 별도의 조정이 필요 없게 하였다.

둘째, 기존의 Feedback 방식의 단점을 개선한 Error feedback 방식을 적용하였다.

셋째, 기존의 IMD 개선을 극대화시키는 방법들과는 달리 별도의 혼 변조 발생기 없이 개선량을 극대화시켰다.

1850 MHz와 1.25 MHz 떨어진 1851.25 MHz의 2-Tone 신호를 인가하여 측정한 결과, 1W급 주 증폭기를 선형화기에 적용시켰을 때 -7 dBm의 입력 신호에 대하여 약 -70 dBc의 IMD 특성을 보였으며, 약 35 dB의 IMD 개선량을 얻었다.

앞으로 과제는 더 큰 전력의 증폭기에 본 논문에서 제안한 방식을 적용하는 것과, 회로의 보다 효과적인 제어를 위하여 Adaptive control circuit을 이용한 제어 부분을 추가하는 것이다. 또 Feedback 방식의 단점인 좁은 대역폭을 개선하는 것이다.

#### 감사의 글

저자들은 에질런트 테크놀로지사(전 휴렛 팩커드사)에 HP EEs of Design Software인 Libra와 ADS의 기증에 대해 감사드립니다.

- [1] S. C. Cripps, *RF Power Amplifiers for Wireless Communications*, Artech House, 1999.
- [2] D. Myer, "Ultra Linear / Feedforward Amplifier Design," *IEEE MTT-S Digest*, pp. 1125-1127, 1998.
- [3] N. Potheary, *Feedforward Linear Power Amplifiers*, Artech House, 1999.
- [4] Powerwave Technologies, Inc., *Improved Performance of MCPAs using Adaptive Linearization Technology*, July, 1999.
- [5] I. Meier and J. B. De Swardt, Error-Feedback for Amplifier Linearization pp. *Communications and Signal Processing, COMSIC'98 Proceedings of the 1998 South African Symposium*, pp. 381-386, 1998.
- [6] Y. Kim, Y. Yang, S. Kang and B. Kim, "Linearization of 1.85 GHz Amplifier Using Feedback Predistortion Loop," *IEEE MTT-S Digest*, pp. 1675-1677, 1998
- [7] R. S. Turker, "Third-Order Intermodulation Distortion and Gain Compression in GaAs FET's," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-27, no. 5, pp. 400-407, 1979.
- [8] Y. Hu, J. C. Mollier, and J. Obregon, "A New Method of Third-Order Inter modulation Reduction in Nonlinear Microwave Systems," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-34, no. 2. pp. 245-250, 1986.

김 완 중



1999년 2월: 광운대학교 전파공학과(공학사)  
 1999년 3월~현재: 광운대학교 전파공학과(석사과정)  
 [주 관심분야] 선형 전력 증폭기, 고출력 증폭기, RF 회로 설계

김 남 영



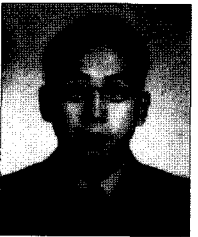
1987년 2월: 광운대학교 전자공학과(공학사)  
 1991년 2월: NewYork 주립대. 전자공학과(공학석사)  
 1994년 2월: NewYork 주립대 전자공학과(공학박사)  
 1994년 9월: 광운대학교 전자공학과

과 조교수

2000년 2월: 광운대학교 전자공학과 부교수

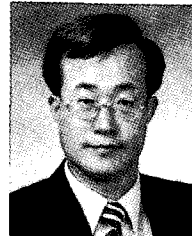
[주 관심분야] 초고주파 집적회로, MMIC, ASIC

조 경 준



1998년 2월: 안양대학교 정보통신공학과(공학사)  
 2000년 2월: 광운대학교 전파공학과(공학석사)  
 2000년 3월~현재: 광운대학교 전파공학과(박사과정)  
 [주 관심분야] 선형 전력 증폭기, 고출력 증폭기, RF 회로 설계

이 중 철



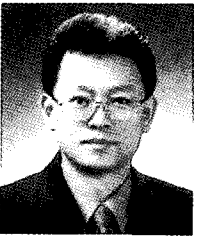
1983년 2월: 한양대학교 전자공학과(공학사)  
 1985년 2월: 한양대학교 대학원 전자공학(공학석사)  
 1989년 12월: 미국 Arizona State University 전자공학(공학석사)  
 1994년 5월: 미국 Texas A&M University 전자공학(공학박사)

University 전자공학(공학박사)

1998년 4월~현재: 광운대학교 전파공학과 조교수

[주 관심분야] 초고주파 및 광전자 공학, RF MEMS, 밀리미터파 능동 및 수동 소자

김 중 헌



1984년 2월: 광운대학교 전자통신공학과(공학사)  
 1990년 6월: 독일 Ruhr Univ. Bochum 전자공학과(공학석사)  
 1994년 8월: 독일 Dortmund Univ. 전자공학과(공학박사)  
 1995년 4월: 광운대학교 전파공학과

조교수

1999년 4월~현재: 광운대학교 전파공학과 부교수

[주 관심분야] 초고주파 측정 및 센서, EMI/EMC, 초고주파 및 광 집적 회로

이 병 제



1988년 2월: 경북대학교 전자공학과(공학사)  
 1993년 12월: 미국 Southern Illinois University 전자공학과(공학석사)  
 1997년 5월: 미국 Southern Illinois University 전자공학과(공학박사)

2000년 4월~현재: 광운대학교 전파공학과 조교수

[주 관심분야] 마이크로스트립 안테나