

# 지연 선로가 없는 Feedforward Loop를 이용한 선형화기의 설계 및 제작

## Design and Implementation of a Linearizer Using the Feedforward Loop without Delay Lines

정승환\* · 조경준\* · 김완중\* · 안창엽\*\* · 김종현\*

Seung-Hwan Jeong\* · Kyung-Joon Cho\* · Wan-Jong Kim\* · Chang-Yeub Ahn\*\* · Jong-Heon Kim\*

### 요 약

본 논문에서는 Delay line이 없는 Feedforward loop를 이용한 PCS 중계기용 선형화기를 설계 및 제작하였다. 기존의 Feedforward 방식을 이용한 Predistortor에서 사용되는 지연 선로(Delay line)를 제거하기 위하여 기존의 신호 루프(Signal loop)의 주 경로에 보조 증폭기를 사용하고 보조 경로에 보조 증폭기와 비슷한 동작시간을 갖는 혼 변조 증폭기(Inter-modulation amplifier)를 사용하였다. 또한, 주 증폭기를 에러 루프(Error loop)로 옮기고 그와 비슷한 동작시간을 갖고 에러 신호를 증폭하기 위해서 에러 증폭기(Error amplifier)를 사용하여 지연 선로를 제거하였고 에러 신호를 주 증폭기 출력 단에 인가시켰다. 본 논문의 선형화기는 HP사의 EEsos ADS ver.1.1을 사용해서 설계하였으며 유전율 3.2, 두께 0.8 mm인 GML 1000 기판에 제작하였다. 측정 결과, 이득 27 dB이고  $P_{1dB}$  29 dBm인 주 전력 증폭기에 -7 dBm/tone을 갖는 1.85 GHz와 1.851 GHz의 2-tone 신호를 인가한 결과 전체 IMD가 약 17 dB 개선되었다.

### Abstract

This paper presents a linearizer using the feedforward loop which can be applied to PCS base-station applications. This linearizer used a IM amplifier and an auxiliary amplifier in order to remove delay lines used in the predistortor using the feedforward technique. The delay line in error loop is changed by the main power amplifier(PA) and the error amplifier is utilized to amplify the error signal which fed to the output of main amplifier. The linearizer was simulated by HP ADS ver 1.1 and fabricated on GML 1000 with thickness of 0.8 mm and dielectric constant of 3.2. Two-tone signals at 1.85 GHz and 1.851 GHz with -7 dBm/tone from synthesizers are injected into the main PA. The main PA with a 27 dB gain and a  $P_{1dB}$  of 29 dBm(two-tone) was utilized. The reduction of intermodulation distortion (IMD) is around 17 dB.

### I. 서 론

일반적으로 RF 및 마이크로파 회로는 사용된 능동 소자의 비 선형성 때문에 비 선형 회로 특성을

갖는 것이 보통이다. 특히 전력 증폭기는 최대 전력을 얻기 위해 주 능동 소자인 트랜지스터를 비 선형 특성이 강한 포화영역에서 동작시키며, 포화영역에서 동작되는 전력 증폭기의 경우 이득과 위상이 왜

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

\*\* (주)창원전자(ChangWon Electronics Co., LTD)

· 논문 번호 : 991208-15S

· 수정완료일자 : 2000년 1월 24일

곡되는 것이 보통이다. 또한 다중 채널을 이용하는 디지털 이동통신 및 위성통신의 경우 전력 증폭기에 2개 이상의 반송파가 입력되어 공동 증폭될 때 포화 영역 부근의 비 선형 특성으로 인하여 혼 변조 신호들이 발생하게 된다. 이들 혼 변조 신호들은 혼신 (Cross-talk) 또는 잡음 (Noise)으로 작용하여 전송 품질을 저하시키는 요인이 된다<sup>[1],[2]</sup>.

이 경우, 전력 증폭기의 포화영역에서의 동작에 따른 비 선형 특성을 보상하기 위하여 선형화기 (Linearizer)를 전력 증폭기와 함께 사용하게 되면 포화영역에서도 다수 반송파의 공동 증폭으로 발생하는 혼 변조 신호들을 대폭 감소시키면서 원하는 출력 전력을 얻을 수 있게 된다. 이런 전력증폭기의 비 선형 특성을 선형화하기 위해 지금까지 개발된 방식으로는 입력 전력의 Back-off 방식, Feedback 방식, Predistortion 방식, Feedforward 방식이 있다<sup>[3]</sup>.

입력 전력의 Back-off 방법은 전력 증폭기에 입력 레벨을 낮추어서 왜곡의 정도를 허용할 수 있도록 하여 전력 증폭기가 비교적 선형적인 영역에서 동작하도록 하는 방법이다. 그러나, 포화 영역의 출력 전력을 증대하기 위해서는 여러 전력 증폭기를 병렬 접속 구동해야 하며 이 경우에는 전체 전력 증폭기의 부피가 증가하고 전력 효율의 감소에 따른 방열 문제와 더 큰 용량의 전원 공급기가 필요해지는 단점이 발생한다<sup>[4]</sup>.

Predistortion 방법은 입력 RF 신호가 주 증폭기에서 만들 왜곡 성분을 고려하여 이것과 역의 왜곡 특성을 갖는 Predistortion 회로를 미리 전력 증폭기의 입력 측에 부가하여 전력 증폭기의 왜곡 성분을 상쇄시키는 방법이다. 광 대역폭과 넓은 동작 범위를 갖는 특성이 있으며, 회로의 구성이 간단하여 경량, 소형으로 구현할 수 있으나 개선효과가 Feedforward 방식보다 좋지 않고, 제작후 장시간 동작점 조정이 요구되는 단점이 있다. 또한, 비 선형 특성의 개선량도 비교적 적다<sup>[5]</sup>.

Negative Feedback 방법은 증폭기를 통과하면서 발생한 혼 변조 왜곡 신호들을 뽑아내어 가변 감쇄기와 가변 위상 변환기를 이용하여 Forward path에 역으로 합쳐져 결국 출력에 나오는 신호들 중에 혼 변조 왜곡 신호들을 감소시키는 방법이다. 이 방법

은 전송 대역폭에 따른 시간 지연을 보상하기 위한 장치가 요구되며 전송 대역폭이 협대역인 경우에 국한하여 사용할 수 있는 방식이며 어느 정도의 용적과 용량이 요구되어진다<sup>[6]</sup>.

Feedforward 방법은 비 선형 증폭기의 입력신호와 출력신호를 비교하여 혼 변조 잡음 성분만의 차 (error) 신호를 추출한 후, 비 선형 증폭기의 출력단에 결합하여 비 선형 증폭기에서 출력되는 혼 변조 잡음 성분을 상쇄시켜 최종적으로 선형 출력 신호를 얻는 방식으로 비 선형 개선이 가장 뛰어나다. 그러나 회로의 부피가 크다는 단점이 있다.

본 논문에서는 기존의 Feedforward 방식을 이용한 Predistortor를 변형하여 지연 선로를 제거하고 크기와 위상 조절이 용이한 선형화기를 제안하였다. 논문에서 제시한 선형화기는 HP ADS ver.1.1을 이용하여 설계하였으며 유전율 3.2, 두께 0.8 mm인 GML 1000 기판에 제작, 측정하였다.

## II. 선형화기 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

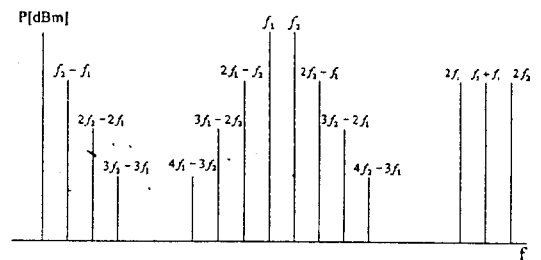


그림 1. 2 개의 반송파에 대한 IMD 스펙트럼  
Fig. 1. IMD spectrum for two-tone signal.

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.

일반적으로 Feedforward 선형화기의 IMD 특성 개선효과는 타 방식에 비해 좋지만 신호 루프에서 주경로의 전력 증폭기 동작 시간을 보상하기 위하여 보조경로에 지연선으로 Coaxial 케이블이나 Microstrip line을 사용하게 되는데 지연선로가 회로에서 차지하는 부피가 상당히 크고, 위상과 크기 조절에도 많은 어려움과 신호의 손실 등의 단점이 있다.

이런 Feedforward 방식을 응용하여 구동 증폭기에서 추출한 IM (Intermodulation) 성분을 가지고 왜곡 특성만 더 크게 만들어 주 증폭기에 입력함으로써 주 증폭기의 IM 성분을 제거하고자 하는 것이 Feedforward 방식을 이용한 Predistorter이다<sup>[7]</sup>. 그림 3은 Feedforward 방식을 이용한 Predistorter의 구성도를 나타낸다.

그림 3에서처럼 구동 증폭기의 출력에서 혼 변조

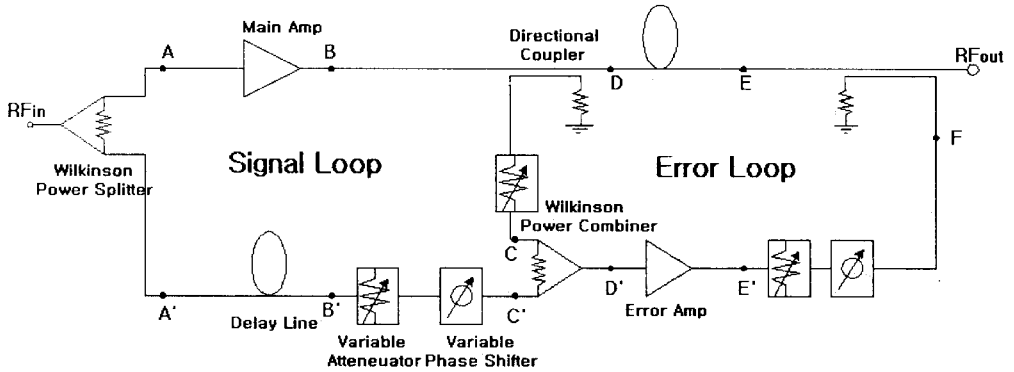


그림 2. 일반적인 Feedforward 선형화기  
Fig. 2. Typical feedforward linearizer.

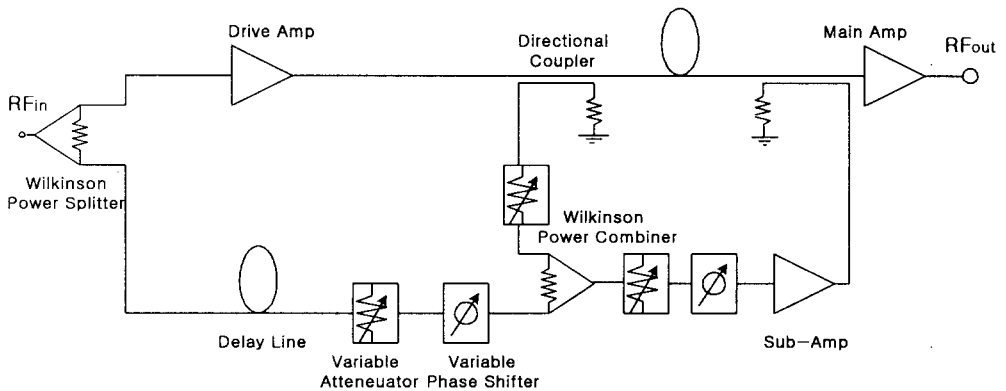


그림 3. Feedforward 방식을 이용한 Predistorter의 구성도  
Fig. 3. Block diagram of predistorter using the feedforward technique.

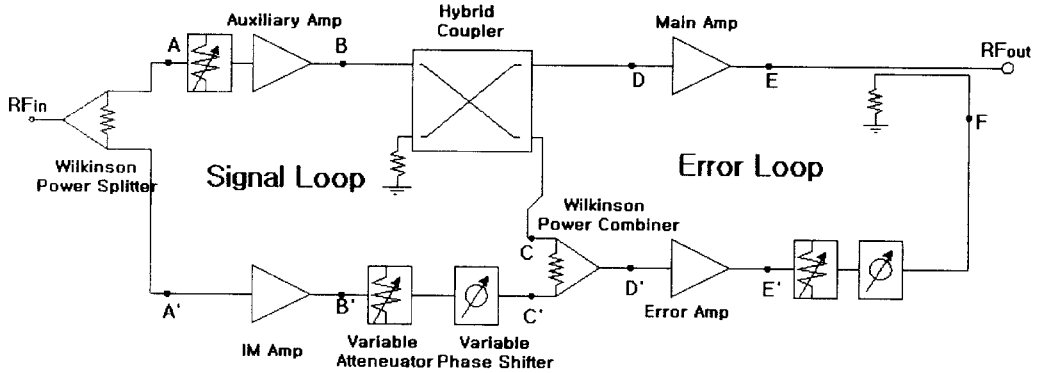


그림 4. 지연 선로가 없는 Feedforward Loop를 이용한 선형화기의 구성도

Fig. 4. Block diagram of a linearizer using the feedforward loop without delay lines.

성분만을 추출하여 그 신호들을 증폭하고 다시 구동 증폭기의 출력과 합치게 되면 결국 동 위상의 반송파와 역 위상의 혼 변조 신호들이 주 증폭기의 입력에 인가된다. 결과적으로 주 증폭기의 출력의 혼 변조 성분들을 상쇄하게 된다.

본 논문에서는 기존의 Feedforward 방식을 이용한 Predistortor에서 신호 루프와 에러 루프의 지연 선로를 제거하고 에러 신호를 주 증폭기의 출력에 인가한 Delay line이 없는 Feedforward loop를 이용한 선형화기를 그림 4와 같이 설계하였다.

본 논문에서 제시한 선형화기의 동작 원리는 다음과 같다. 그림 4에서 2개의 반송파가 선형화기의 입력(RF<sub>in</sub>)으로 인가되면 Wilkinson 전력 분배기에 의해 반송파가 주경로(A)와 보조경로(A')로 같은 크기로 나누어진다.

주 경로의 반송파는 가변 감쇄기에 의하여 보조 증폭기가 선형 영역에서 동작하도록 하여 보조 증폭기를 통과(B)하면서 혼 변조 성분은 발생하지 않고 반송파 성분만 증폭된다.

보조경로에서는 혼 변조 증폭기를 사용하여 반송파가 주경로 A-B에서 보조 증폭기를 통과하면서 발생된 지연시간을 혼 변조 증폭기의 동작으로 보상한다. 이때, 혼 변조 증폭기를 통과(B')한 신호는 증폭된 반송파 성분과 혼 변조 성분을 갖는다.

주경로에서 보조 증폭기의 출력 신호는 90° hybrid 결합기를 통해 일부는 3dB 감쇄를 가지고 고출력 증폭기의 입력 (D)으로 전달되고 일부는 3dB 감쇄와 90°의 위상 차를 갖고 Wilkinson 전력 결합

기에 입력된다.

보조경로에서 혼 변조 증폭기를 통과한 신호는 가변 감쇄기와 위상 변환기에 의해 주경로에서 Wilkinson 전력 결합기로 입력되는 반송파 성분에 대하여 크기는 같고 위상이 180° 차이가 나도록 하여 두 신호를 결합하면 반송파 신호는 제거되고 혼 변조 신호만 남게 된다.

주경로에서 90° hybrid 결합기를 통과한 신호는 전력 증폭기를 통과하면서 증폭된 반송파와 함께 발생한 혼 변조 성분들을 발생시키고 방향성 결합기에 입력된다.

보조경로에서는 주경로 D-E의 전력 증폭기의 동작 시간을 에러 증폭기로 보상한다. 이때 Wilkinson 전력 결합기에서 나온 혼 변조 성분만을 가진 신호는 주경로의 전력 증폭기의 혼 변조 신호에 비해 상대적으로 작기 때문에 에러 증폭기를 사용하여 증폭시킨다.

보조경로에서 에러 증폭기를 통과한 신호는 가변 감쇄기와 위상 변환기를 이용하여 주경로에서 방향성 결합기로 인가되는 신호의 혼 변조 성분과 크기는 같고 위상은 180° 차이가 나도록 결합하면 혼 변조 성분은 제거되고 입력된 반송파만 증폭되어 나온다.

본 논문에서 제시한 선형화기는 신호 루프에서 주경로의 보조 증폭기와 보조경로의 혼 변조 증폭기를 사용하여 신호 루프의 지연 선로를 제거하고, 에러 루프에서 전력 증폭기와 에러 증폭기를 사용하여 에러 루프의 지연 선로를 제거함으로써 회로의 부피를 줄이고 기존의 방식에서 지연 시간이 맞지 않아

서 크기와 위상의 조정이 어려웠었던 단점을 개선하였다. 또 Predistortion 방식에서 주 신호 성분과 IMD 성분을 동시에 조절하여 주 증폭기에 입력시켜야 하는 어려움을 여러 신호를 주 증폭기 출력 단에 인가하여 개선하였다.

### III. 선형화기의 제작 및 측정

자연 선로가 없는 Feedforward loop를 이용한 선형화기의 구성 부품으로 Wilkinson 전력 분배기, 방향성 결합기, 90° Hybrid 결합기, 가변 감쇄기, 위상 변환기 등을 HP ADS ver.1.1을 이용하여 각각 설계하였으며 이들 각 부품들을 조합한 전체 회로를 Simulation 하였다.

그림 5는 본 논문에서 제시한 선형화기에서 사용한 주 증폭기의 출력 스펙트럼이고, 그림 6은 선형화기를 이용하여 선형화 된 주 증폭기의 출력 스펙트럼을 나타낸다. 1.8495 GHz와 1.8505 GHz의 2-tone 신호를 입력하였을 때 선형화하기 전에는 주 증폭기의 출력이 28.03 dBm, 3차 혼 변조 성분의 출력이 5.93 dBm이었으나, 선형화 후에는 주 증폭기의 출력이 27.97 dBm, 3차 혼 변조 성분의 출력이 -32.84 dBm으로 38.7 dBc의 3차 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 입력신호가 -7 dBm인 1.85 GHz와 1.851 GHz 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 7(a)는 신호 루프의 주 경로 출력 스펙트럼으로 혼 변조 성분 없이 1.85 GHz와 1.851 GHz에서 -3 dBm의 반송파 성분만이 존재함을 볼 수 있으며, 그림 7(b)는 신호 루프의 보조경로 출력 스펙트럼으로 반송파를 -40.27 dBm으로 감쇄시키고 혼 변조 성분만을 추출한 것을 볼 수 있다. 그림 7(c)는 선형화 이전의 주 증폭기의 출력 스펙트럼으로 출력신호가 1.85 GHz와 1.851 GHz에서 22.6 dBm이고 3차 혼 변조 신호는 -15 dBm으로 IMD가 37.6 dBc인 것을 볼 수 있다. 그림 7(d)는 선형화 이후의 출력 스펙트럼으로 출력신호가 1.85 GHz와 1.851 GHz에서 22.4 dBm이고 3차 혼 변조 신호는 -31.83 dBm으로 선형화 이전 37.6 dBc이던 IMD 특성이 54.23 dBc로 약 17 dB 개선됨을 보였다. 표 1은 본 논문에서 제시한 선형화기의 측정 결과를 나타낸다.

### IV. 결 론

본 논문에서는 기존의 Feedforward 방식을 이용

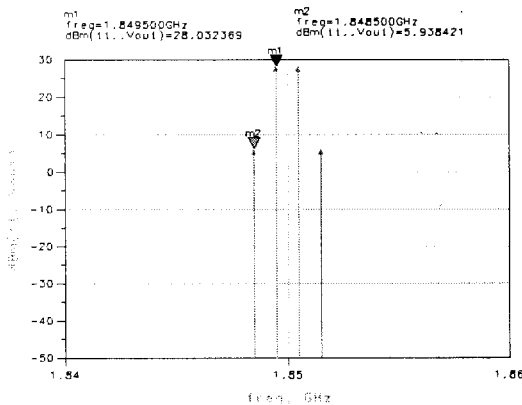


그림 5. 주 증폭기의 출력 스펙트럼  
Fig. 5. Simulated output spectrum of main amplifier without linearizer.

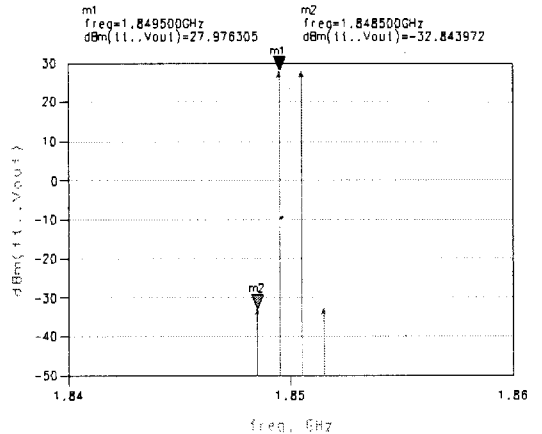


그림 6. 선형화기의 출력 스펙트럼  
Fig. 6. Simulated output spectrum of linearizer.

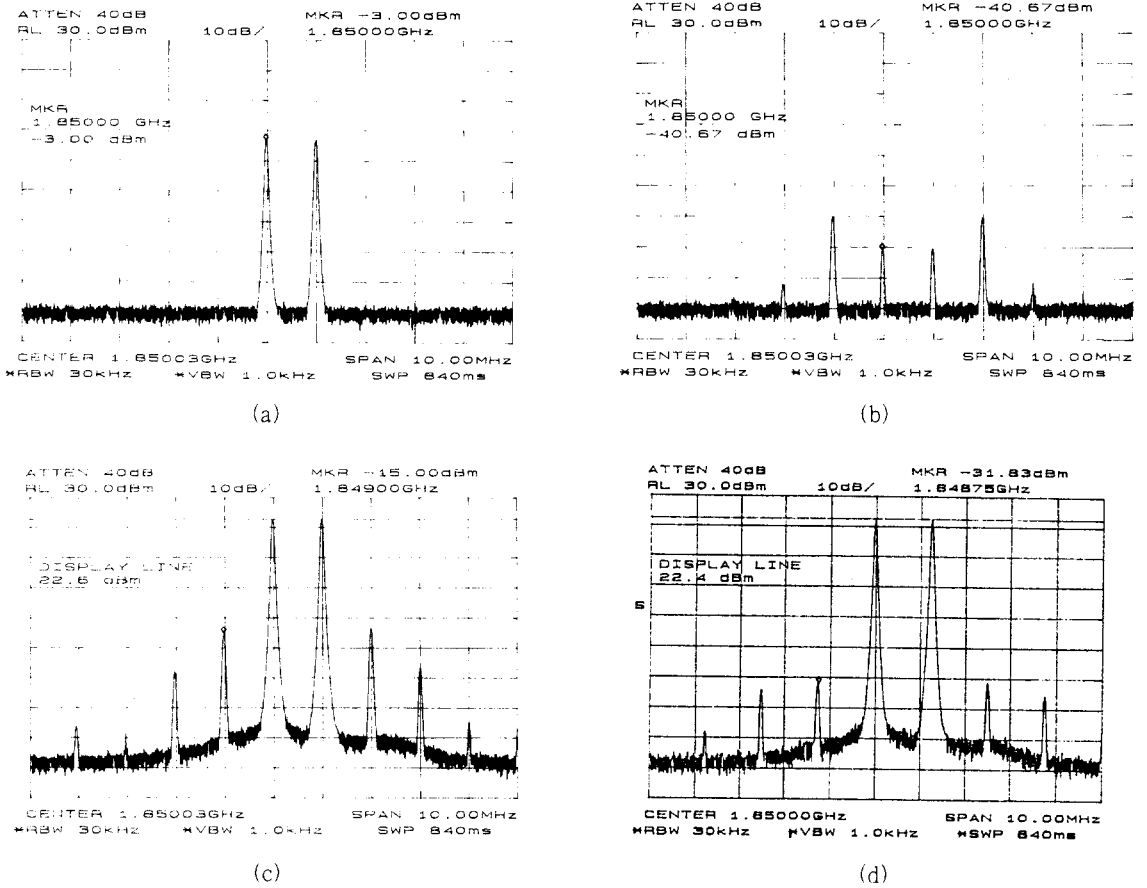


그림 7. 1 W급 주 증폭기에 대한 선형화기의 측정 결과. (a) 신호 루프 주경로에서 측정된 출력 스펙트럼, (b) 신호 루프 보조경로에서 측정된 출력 스펙트럼, (c) 선형화 이전에 측정된 주 증폭기의 출력 스펙트럼, (d) 선형화 이후에 측정된 출력 스펙트럼

Fig. 7. Measurement results of the linearizer for 1 W Main amplifier. (a) Output spectrum at main path of signal loop, (b) Output spectrum at auxiliary path of signal loop, (c) Output spectrum of main amplifier without linearizer, (d) Output spectrum with linearizer.

표 1. 선형화기의 측정 결과

Table 1. Measurement result of linearizer.

	선형화 이전	선형화 이후
Fundamental	22.6 dBm	22.4 dBm
3rd order IMD	-15.0 dBm	-31.83 dBm
5th order IMD	약 -28 dBm	약 -34 dBm
전체 IMD	37.6 dBc	54.23 dBc

호를 주 증폭기의 출력에 인가한 선형화기를 설계 및 제작하였다.

본 논문에서 제시한 선형화기는 다음과 같은 특징을 갖는다.

첫째, 회로에서 부피를 차지하던 신호 루프와 에러 루프의 지연 선로를 증폭기로 대체하여 회로의 부피를 줄였다.

둘째, 회로에서 지연 선로를 제거함으로써 기존에 지연 시간이 맞지 않아 신호의 제어가 어려웠었던 점을 향상시켰다.

셋째, 기존의 Predistortion 방식에서 주 신호 성

한 Predistortor에서 지연 선로를 제거하고 에러 신

분과 혼 변조 성분을 동시에 조절하여 입력시켜야 한다는 어려움을 개선하여 여러 신호를 주 증폭기 출력단에 인가하도록 하였다.

선형화기는 HP사의 EEsos ADS ver.1.1을 이용하여 설계하였으며, 유전율 3.2, 두께 0.8 mm인 GML 1000 기판에 제작하였다.

측정은 1.85 GHz와 1 MHz 떨어진 1.851 GHz의 2-Tone 신호를 인가하여 시행하였다. 1 W급 주 증폭기를 선형화기에 적용시켰을 때, -7 dBm의 입력 신호에 대하여 54.23 dBc의 IMD 특성을 보였으며, 약 17 dB의 IMD 개선을 얻었다.

앞으로 과제는 더 큰 전력의 증폭기에 본 논문에서 제안한 방식을 적용하는 것과, 회로의 보다 효과적인 제어를 위하여 Micro-Controller를 이용한 제어 부분을 추가하는 것이다.

본 논문에서 제시한 방식들은 현재 상용중인 PCS나 차기 이동통신인 IMT-2000, WLL등의 지지국의 선형화기로도 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

[1] S. C. Cripps, *RF Power Amplifiers for Wire-*

*less 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] 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.

[5] 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.

[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] 이원우, 박광량, 정용채, 윤상원, 장익수, "Feed-forward 방식을 이용한 Predistortor에 관한 연구", 전자공학회 논문지, 제 31권 5호, pp. 68-74, 1994. 5.

정 승 환



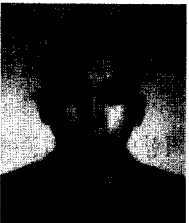
1998년 2월: 광운대학교 전파공학과(공학사)  
1998년 3월~현재: 광운대학교 전파공학과 석사과정  
[주 관심분야] 선형 전력 증폭기, 유전체 공진 발진기

김 완 중



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

조 경 준

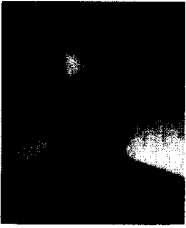


1998년 2월: 안양대학교 정보통신공학과(공학사)  
1998년 3월~현재: 광운대학교 전파공학과 석사과정  
[주 관심분야] 선형 전력 증폭기, RF 회로 설계

안 창 업

1985년 2월: 광운대학교 전자공학과(공학사)  
1993년 8월: 광운대학교 전자통신공학과(공학석사)  
1993년 2월~현재: 창원전자(주) 사장

김 종 헌



1984년 2월: 광운대학교 전자통신  
공학과(공학사)

1990년 6월: 독일 Ruhr Univ. Bo-  
chum 전자공학과(공학석사)

1994년 8월: 독일 Dortmund Univ.  
전자공학과(공학박사)

1995년 4월~현재: 광운대학교 전

파공학과 부교수

[주 관심분야] 초고주파 측정 및 센서, EMI/EMC, 초고  
주파 및 광집적회로