

2차 고조파 신호를 이용한 극 함수 발생기를 갖는 셀룰라 밴드용 전치 왜곡 선형화기 설계

The Design of Predistortion Linearizer with Polar Function Generator for Cellular Band Using Even Order Harmonic Signals

김일규 · 전기경 · 김 영 · 권상근 · 윤영철*

Ell-Kou Kim · Ki-Kyoung Jeon · Young Kim · Sang-Keun Kwon · Young-Chul Yoon*

요 약

본 논문은 주 신호에서 추출한 2차 고조파 신호를 극 함수 형태로 만들어 주 신호와 진폭 변조를 시키는 새로운 방식의 전치 왜곡 선형화기를 제안하였다. 이 선형화기는 2차 고조파 신호의 동 위상과 직각 위상 신호 결합으로 만들어진 극 함수 발생기와 주 경로의 진폭 변조기로 구성되어 있다. 극 함수 발생기 신호와 주 신호가 진폭 변조되어 만들어진 전치 왜곡 3차 혼변조 신호는 전력 증폭기의 비선형 특성을 개선시킬 수 있으며, 셀룰라 기지국 송신 대역(869~894 MHz)의 증폭기를 제작하여 증폭기 비선형 특성을 확인하였다. 반송파 2톤 신호를 인가하였을 때, 주파수 간격이 1 MHz에서 전력 증폭기의 3차 혼변조는 22.5 dB 이상 개선되었고, CDMA-IS95 1FA의 경우에는 이격 지점 885 kHz에서의 인접 채널 전력비(ACPR)는 8.4 dB 이상 개선됨을 확인하였다.

Abstract

This paper proposes a new predistortion linearizer with amplitude modulator and PFG(Polar Function Generator) using second order harmonic signals. This linearizer consists of PFG that combine with in-phase and quadrature-phase of second harmonic signals and amplitude modulator in main path. The predistorted third order intermodulation distortion(IMD3) signals that are generated by amplitude modulator with fundamental and PFG signals, improve a amplifier nonlinear characteristics. The proposed linearizer and amplifier have been manufactured and tested to operate in cellular base-station transmitting band(869~894 MHz). The test results show that IMD3 can be removed by more than 22.5 dB in case of CW 2-tone signals $\Delta f=1$ MHz, and the adjacent channel power ratio(ACPR) also can be improved by more than 8.4 dB for CDMA IS-95 1FA signals.

Key words : Polar Function Generator, Predistortion, Power Amplifier, Second Harmonic Signal

I. 서 론

우리나라는 셀룰라 대역 무선 통신 시스템 환경에서 기지국(base station)과 사용자(mobile unit)의 무선접속은 CDMA(Code Division Multiple Access) 기술로 표준화 되었다. 이러한 무선 접속 기술은 음성 신

호를 부호화하고 QPSK, QAM 등의 선형 변조 기법으로 변조하여 송수신하는 시스템으로 전력 증폭기의 선형성과 효율성이 시스템 성능에 가장 중요한 지표가 된다. 또한, 사용하고자 하는 전력 증폭기를 효율적으로 사용하기 위해 포화 영역 부근에서 동작하게 되는데, 이때의 만들어지는 증폭기 비선형 특

「본 연구는 금오공과대학교 학술연구비에 의하여 연구된 논문입니다.」

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

*관동대학교 전자정보통신공학부(Electronics and Information Communication Engineering, Kwandong University)

· 논문 번호 : 20060809-092

· 수정완료일자 : 2006년 10월 18일

성을 보상해 주기 위해서 선형화기가 필요하게 된다.

선형화기의 대표적인 방법으로 입력 전력 백 오프, 피드포워드, 피드백, 그리고 전치 왜곡 방법 등이 있다^{[1],[2]}. 이러한 선형화 방법은 각각의 안정성, 회로의 복잡성 그리고 개선 정도를 고려하여 사용해야 한다^{[3]-[7]}.

이러한 선형화 방법 중에서 가장 널리 이용되는 것은 전치 왜곡 방법으로 피드포워드 방법보다는 선형성은 좋지 않지만, 소형으로 구현이 가능하고 광대역으로 동작이 가능하므로 많이 이용되고 있다.

본 논문에서는 선형화 방법에서 전치 왜곡 방법을 이용하였으며, 주 신호에서 추출한 2차 고조파 신호는 동위상과 직각 위상 신호로 분리한 후 각각의 크기를 조절하는 회로를 두어 결합하여 극 함수(polar function) 신호로 만들었다. 이 신호는 주 신호와 진폭 변조되어 전치 왜곡된 3차 혼변조 신호를 만들었다.

여기서 사용한 방법은 기존의 방법^[8]보다 주 경로의 손실을 적게 만들어 증폭기의 이득을 줄일 수 있으며, 비선형 특성 개선은 기존 것보다 동등 이상의 결과를 갖고 있다. 또한, 초고주파 IC 기술을 이용하면 선형화기를 소형으로 만들 수 있어 증폭기의 크기를 작게 할 수 있는 장점을 가지고 있다.

II. 설계 이론

그림 1은 제안한 전치 왜곡 선형 증폭기의 기본 구조이다. 제안한 전치 왜곡 선형화기는 방향성 결합기와 지연 선로, 약이슬레이터와 진폭 변조기, 그리고

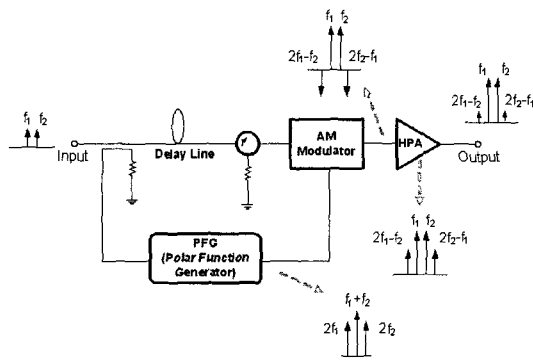


그림 1. 제안한 전치 왜곡 선형 증폭기의 구조
Fig. 1. Structure of proposed predistortion linearizer amplifier.

극 함수 발생기로 구성되어 있다.

이것의 동작 원리는 입력에 인가된 주 신호가 방향성 결합기에 의해 주 경로와 보조 경로로 분리되고, 보조 경로에서 극 함수 발생기에 의해 2차 고조파 신호를 추출하였다. 극 함수 발생기 출력 신호는 추출한 2차 고조파 신호를 동위상과 직각 위상 신호로 분리하여 각각의 신호를 가변 이득 증폭기로 증폭한 후에 다시 결합시킨 결과이다. 이 신호는 주 신호와 함께 변조기에 의해 진폭 변조되며, 이렇게 변조된 신호는 전력 증폭기의 혼변조 신호와 역 특성을 가지는 전치 왜곡 혼변조 신호가 되며, 가변 이득 조절기를 제어함으로써 전치 왜곡 신호의 크기와 위상을 변화시켜 전력 증폭기의 비선형성을 개선시킨다.

그림 2는 2차 고조파 신호 추출과 극 함수를 만들어주는 극 함수 발생기의 블럭 다이어그램을 나타내고 있다.

극 함수 발생기는 자동 레벨 조절기(Automatic Level Controller: ALC)와 고조파 발생기(harmonic generator), 하이브리드 결합기와 가변 이득 증폭기(Variable Gain Amplifier: VGA), 그리고 전력 결합기로 구성되어 있다.

먼저, 입력 레벨 변화에 관계없이 일정한 신호의 크기를 만들어 일정한 모양의 고조파 신호를 만들기 위해 자동 레벨 조절기를 두었으며, 고조파 발생기는 그림 3(a)와 같이 트랜지스터의 바이어스 전압을 변화시키면서 2차 고조파 신호를 추출하였다.

앞서 만들어진 2차 고조파 신호의 발생을 다음과 같은 2단자망의 비선형 전달 특성의 파워 시리즈(power series)로 3차 항까지 고려하여 표현하면 다음과 같다.

$$v_o = a_1 v_i + a_2 v_i^2 + a_3 v_i^3 \quad (1)$$

여기서 입력 신호를 식 (2)의 반송파 2톤 신호로

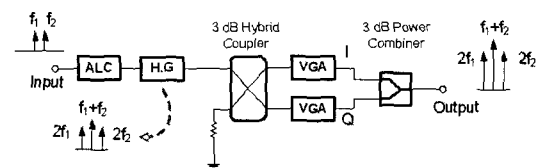


그림 2. 극 함수 발생기의 블럭 다이어그램
Fig. 2. Block diagram of polar function generator.

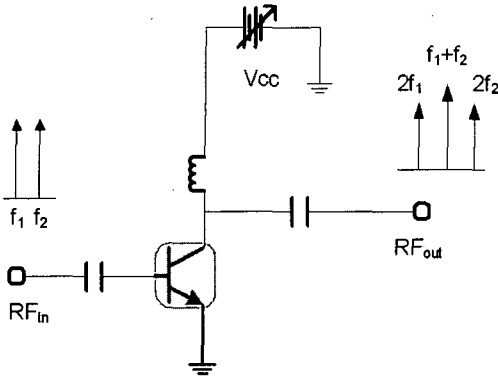


그림 3. 고조파 발생기 회로도
Fig. 3. Schematic of harmonic generator.

가정한다.

$$v_i(t) = A \{ \cos(\omega_1 t) + \cos(\omega_2 t) \} \quad (2)$$

반송파 2톤 신호 식 (2)를 비선형 특성 식 (1)에 대입하면 2차 고조파 신호 ($2\omega_1, \omega_1 + \omega_2, 2\omega_2$)를 추출할 수 있음을 식 (3)에서 보여준다.

$$v_o(t) = a_2 A^2 + a_2 A^2 \cos(\omega_1 - \omega_2)t + (a_1 A + \frac{9}{4} a_3 A^3) (\cos \omega_1 t + \cos \omega_2 t) + \frac{3}{4} a_3 A^3 [\cos(2\omega_1 - \omega_2)t + \cos(2\omega_2 - \omega_1)t + \cos(2\omega_1 + \omega_2)t + \cos(2\omega_2 + \omega_1)t] + a_2 A^2 \cos(\omega_1 + \omega_2)t + \frac{1}{2} a_2 A^2 (\cos 2\omega_1 t + \cos 2\omega_2 t) + \frac{1}{4} a_3 A^3 (\cos 3\omega_1 t + \cos 3\omega_2 t) \quad (3)$$

위에서 추출된 2차 혼변조 신호는 동위상과 직각 위상으로 나누어져서 증폭기와 가변 감쇄기로 구성된 가변 이득 증폭기로 증폭된다. 여기서 구현된 가변 감쇄기⁹⁾는 그림 4와 같이 설계하였다.

이 때 증폭된 동 위상 (V_I)과 직각위상 (V_Q) 신호가 결합된 극 함수 발생기 출력 신호는 아래와 같이 표현된다.

$$V_I = a \cos(2\omega_1 t) + a' \cos(2\omega_2 t) + a'' \cos(\omega_1 + \omega_2)t \quad (4)$$

$$V_Q = \beta \sin(2\omega_1 t) + \beta' \sin(2\omega_2 t) + \beta'' \sin(\omega_1 + \omega_2)t \quad (5)$$

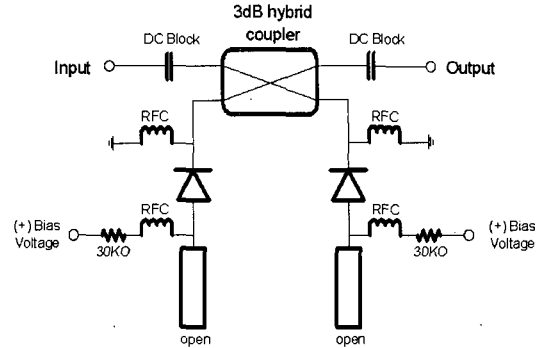


그림 4. 저 위상 변화 가변 감쇄기
Fig. 4. Low phase shift attenuator.

$$V_I + V_Q = B \cos(2\omega_1 t + \phi) + B' \cos(2\omega_2 t + \phi) + B'' \cos\{(\omega_1 + \omega_2)t + \phi\} \quad (6)$$

여기서 계수는 다음과 같다.

$$B = \sqrt{a^2 + \beta^2}, B' = \sqrt{a'^2 + \beta'^2}, B'' = \sqrt{a''^2 + \beta''^2}$$

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{\beta}{a}\right), \phi' = \tan^{-1}\left(\frac{\beta'}{a'}\right), \phi'' = \tan^{-1}\left(\frac{\beta''}{a''}\right)$$

극 함수 발생기 출력 신호는 주 경로에서의 주 신호와 함께 그림 5와 같이 구성된 진폭 변조기 (amplitude modulator)에 인가되어 진폭 변조되어진다. 이때 진폭 변조 결과를 수식으로 표현하면 식 (7)로 나타낼 수 있으며, 이 성분 중에서 혼변조 신호 ($2\omega_1 - \omega_2, 2\omega_2 - \omega_1$)은 전치 왜곡된 신호를 나타낸 것이다.

$$A[1 + B \cos(2\omega_1 t + \phi) + B' \cos(2\omega_2 t + \phi) + B'' \cos\{(\omega_1 + \omega_2)t + \phi\}] \times (\cos \omega_1 t + \cos \omega_2 t)$$

$$= \frac{AB}{2} \cos\{(2\omega_1 - \omega_2)t + \phi\} + \frac{AB''}{2} \cos\{(2\omega_2 - \omega_1)t + \phi''\} + \text{other terms} \quad (7)$$

진폭 변조 결과 식을 비선형 특성을 나타내는 식 (1)의 입력으로 넣어서 계산을 해보면, 2차 혼변조 신호의 크기 ($a, a', a'', \beta, \beta', \beta''$)를 적절히 조절하면 전치 왜곡 3차 혼변조 신호 식 (7)의 크기와 위상을 조절할 수 있어, 증폭기에서 나타나는 3차 혼변조 신호 ($2\omega_1 - \omega_2, 2\omega_2 - \omega_1$)와 크기는 같고 위상은 180° 로 만들어 줄 수 있음 알 수 있다. 이것은 전치 왜곡 신호를 증폭기의 혼변조 신호와 벡터적으로 역

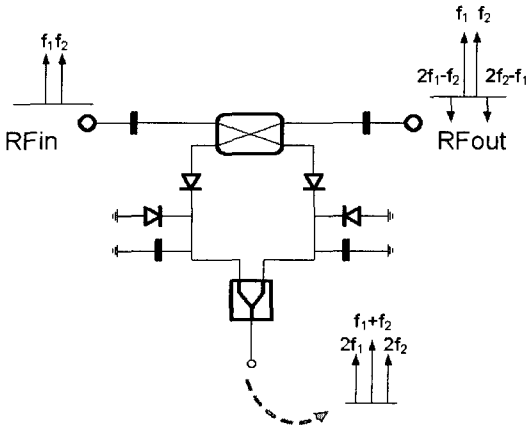


그림 5. 진폭 변조기
Fig. 5. Amplitude modulator.

위상을 만들면 완벽하게 신호를 제거할 수 있음을 보여준다.

그림 6은 진폭 변조된 신호는 동위상과 직각 위상 신호의 크기가 변화하면 신호의 크기와 위상이 변화함을 보여주고 있으며, 이 때 주 신호의 지연 선로 조정에 의해 어느 한 사분면에 국한되지 않고 전체 사분면을 나타낼 수 있음을 보여준다.

III. 시뮬레이션 및 실험 결과

본 논문에서 제안한 전치 왜곡 선형화기의 타당성을 보이기 위해서 엔질런트사의 ADS 시뮬레이션을

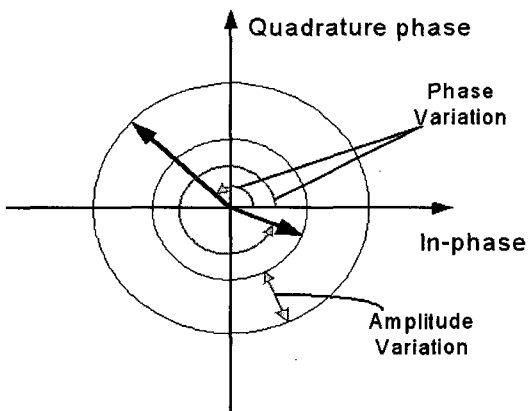
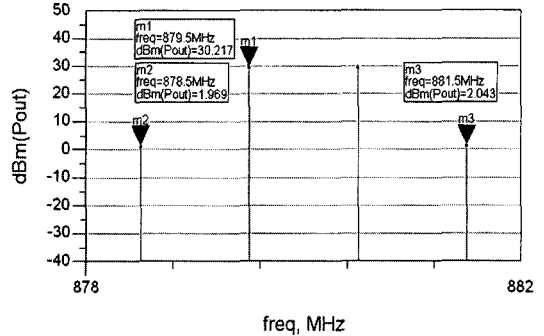
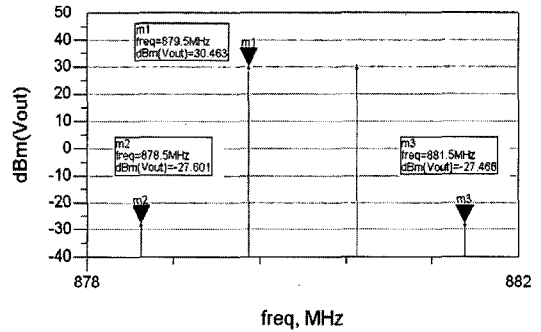


그림 6. 진폭 변조 신호의 크기와 위상 변화
Fig. 6. Variation of amplitude and phase of amplitude modulation signals.



(a) 개선 전
(a) Without linearizer



(b) 개선 후
(b) With linearizer

그림 7. ADS 시뮬레이션을 통한 전력 증폭기의 선형화 결과

Fig. 7. Linearization results of power amplifier by ADS simulation.

이용하여 선형성 개선 여부를 확인하였다. 그림 7은 선형 전력 증폭기 회로를 시뮬레이션한 것으로, (a)와 (b)는 879.5 MHz와 880.5 MHz의 반송파 2톤을 인가하여 30.2 dBm/톤의 출력 전력에서 증폭기의 비선형성 개선을 나타낸 것이다.

실험에 사용한 전력 증폭기는 셀룰라 주파수 범위에서 45 dB의 이득과 1 dB 압축점이 39 dBm인 특성을 갖고 있으며, 이 증폭기의 2톤 혼변조 특성은 그림 8에 나타내었다.

전력 증폭기의 비선형성을 개선시키기 위하여 고조파 발생기에서 그림 9와 같은 2차 고조파 신호를 추출하였으며, (a)는 주파수가 879.5 MHz와 880.5 MHz의 2톤 입력 시, (b)는 중심 주파수가 880 MHz인 CDMA IS-95 IFA 신호 입력 시 출력 파형이다.

그림 1의 주 경로에 사용된 지연 선로는 보조 경로의 극 함수 발생기 시간 지연을 맞추기 위한 것

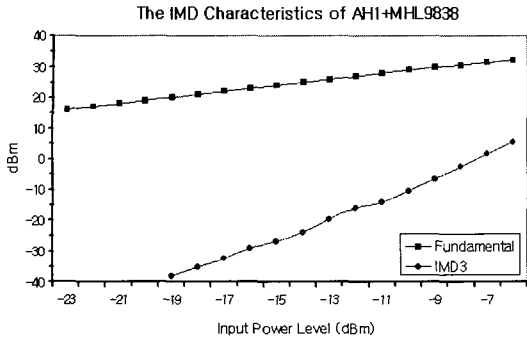
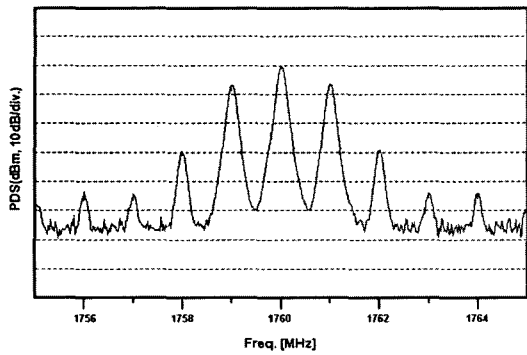
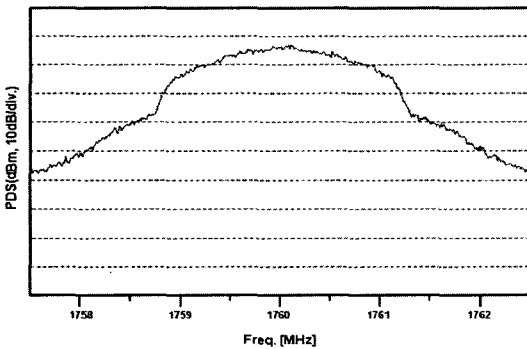


그림 8. 전력 증폭기의 혼변조 특성
Fig. 8. Intermodulation distortion characteristics of power amplifier.



(a) 1 MHz 간격을 갖는 반송파 2톤 신호일 때의 2차 고조파 신호
(a) Second order harmonic signals in case of 2-tone with 1 MHz spacing



(b) CDMA IS-95 1 FA일 때의 2차 고조파 신호
(b) Second order harmonic signals in case of CDMA IS-95 1 FA

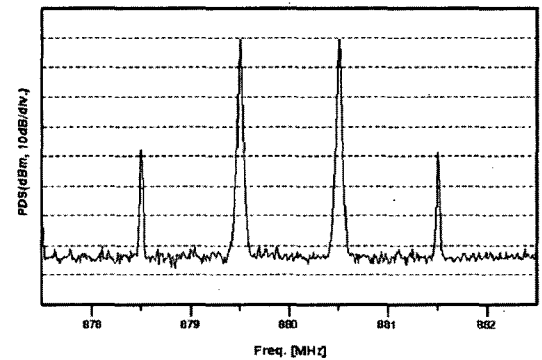
그림 9. 중심 주파수 880 MHz에서의 고조파 발생기 출력 신호 파형
Fig. 9. Output signals of harmonic generator at center frequency 880 MHz.

로 13.4 nsec 시간 지연을 동축 케이블로 구현하였다.

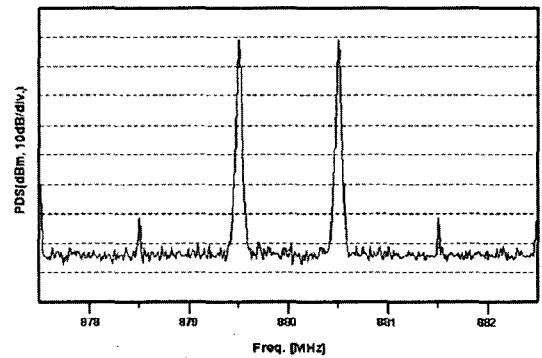
그림 10에서는 반송파 2톤 신호 879.5 MHz, 880.5 MHz를 인가하였을 때, 증폭기 출력 전력 29.1 dBm/tone에서 3차 혼변조 신호의 개선이 22.5 dB 되는 것을 확인하였다.

또, 그림 11은 2톤 신호 조건에서 출력 전력 레벨에 따라 3차 혼변조 신호의 개선 정도를 나타낸 그래프이다.

그리고 그림 12에서는 CDMA IS-95 1FA 신호 입력 시, 880 MHz의 중심 주파수에서 출력 전력이 11.9 dBm/FA일 때, 중심 주파수에서 885 kHz 떨어진 지점에서 8.4 dB 개선되는 것을 나타내었다. 또한, 그림 13은 실제 제작된 전치 왜곡 선형화기 및 전력 증폭기의 사진이다.



(a) 개선 전
(a) Without linearizer



(b) 개선 후
(b) With linearizer

그림 10. 반송파 2-톤 입력 시 전력 증폭기의 특성 (Po=29.1 dBm/tone)
Fig. 10. Characteristics of power amplifier in case of CW 2-tone (Po=29.1 dBm/tone).

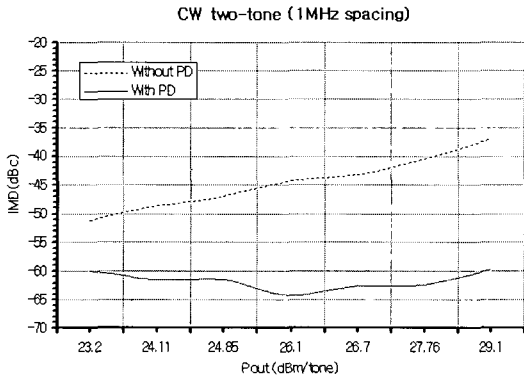
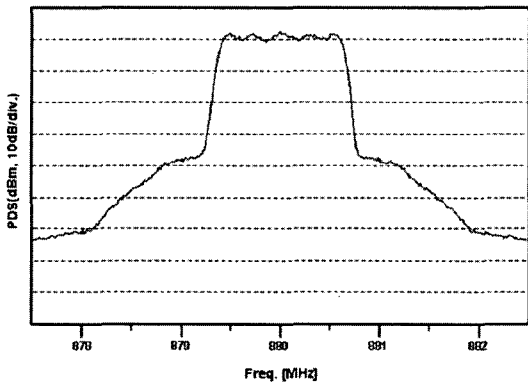
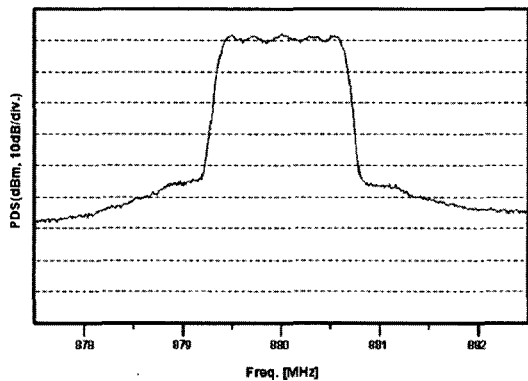


그림 11. 출력 변화에 따른 3차 혼변조 신호의 개선 그래프

Fig. 11. Improvement of IMD3 with output variations.



(a) 개선 전
(a) Without linearizer



(b) 개선 후
(b) With linearizer

그림 12. CDMA IS-95 1 FA 신호 입력 시 전력 증폭기의 선형화 특성 ($P_o=11.9$ dBm/FA)

Fig. 12. Characteristics of power amplifier in case of CDMA IS-95 1 FA ($P_o=11.9$ dBm/FA).

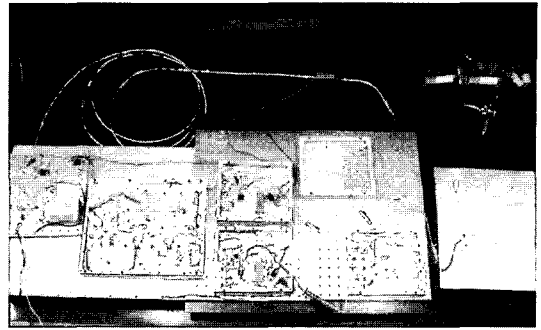


그림 13. 전치 왜곡 선형화기의 사진

Fig. 13. Photograph of the predistortion linearizer.

IV. 결론

본 논문에서 제안한 전치 왜곡 선형화기는 극 합수 발생기에서 고조파 발생기를 이용하여 2차 고조파 성분을 추출하여, 이 신호를 주 신호와 진폭 변조 시킴으로써 전치 왜곡 3차 혼변조 신호를 발생시켰다. 이렇게 발생된 전치 왜곡 신호의 제어는 동위상과 적각 위상의 크기를 각각 가변할 수 있는 가변 이득 조절기를 두어 고조파 신호의 크기를 변화시킴으로써 진폭 변조된 전치 왜곡 혼변조 신호의 크기와 위상을 변화시키게 하였고, 전력 증폭기에서 발생하는 3차 혼변조 신호를 선형화할 수 있었다.

제안한 선형화기는 반송파 2-톤 신호 입력 시 3차 혼변조 신호가 22.5 dB 개선된 것을 확인하였고, CDMA(IS-95) 1FA 신호 입력 시 중심 주파수에서 885 kHz 이격 지점에서 인접 채널 전력비가 8.4 dB 개선되는 것을 확인하였다.

이와 같은 선형화기는 2차 고조파 신호 크기를 제어함으로써 전력 증폭기의 혼변조 신호를 선형화시키는 제어의 간편함과 주 경로에 진폭 변조기를 넣어서 주 경로의 손실을 최소화 하여 증폭기의 이득을 줄일 수 있었다. 또한, 극 합수 발생기를 MMIC 기술로 구현한다면 최소의 공간으로 제작이 가능하며 소형의 선형화기가 구현되어 작은 크기의 선형 증폭기 제작이 가능할 것이다.

참고 문헌

[1] Steve C. Cripps, *RF Power Amplifiers for Wireless Communications*, Artech House, pp. 179-218, 1999.

- [2] Peter B. Kenington, *High-linearity RF Amplifier Design*, Artech House, pp. 21-85, 2000.
- [3] 김일규, 전기경, 김 영, 윤영철, "동 위상 변조기를 이용한 전치왜곡 선형화기 설계", 한국항행학회논문지, 10(1), pp. 41-47, 2006년 3월.
- [4] Y. Kim, H.-S. Jang, S.-U. Kim, I.-S. Chang, and Y.-C. Jeong, "A new predistorter using low frequency intermodulation signals injection of a harmonic generator", *IEICE Trans. Electron.*, vol. E86-C, no. 8, Aug. 2003.
- [5] Dong Jin, Wing Shing Chan, Shi Man Li, and Chung Wai Li, "New linearization method using interatage second harmonic enhancement", *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 8, issue 11, pp. 402-404, Nov. 1988.
- [6] Y. Kim, I.-S. Chang, and Y.-C. Jeong, "An analog predistortion linearizer design", *Microwave Journal*, vol. 48, no. 2, pp. 118-126, Feb. 2005.
- [7] 김일규, 전기경, 김영, 윤영철, "원함수 발생기를 이용한 전력 증폭기의 전치 왜곡 선형화기 설계", 춘계 마이크로파 학술대회, 29(1), pp. 185-188, 2006년 5월.
- [8] S.-Y. Kim, M.-A. Jang, K.-K. Jeon, Y. Kim, and Y.-C. Jeong, "An analog linearizer using second harmonic signals feedforwarding", *35th EUMC Conference*, pp. 1599-1602, Oct. 2005.
- [9] 강민수, 강원태, 장익수, "반사형 저위상 변화 감쇠기의 설계", 전자공학회논문지, 34-D(9), pp. 697-702, 1997년 9월.

김 일 규



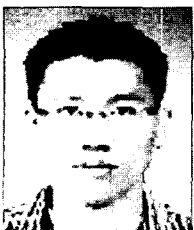
2006년 2월: 금오공과대학교 전자공학부 전자공학전공 (공학사)
 2006년 2월~현재: 금오공과대학교 전파통신공학과 석사과정
 [주 관심분야] RF 및 Microwave 회로 설계, 전력 증폭기 및 선형화기 설계

김 영



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

전 기 경



2005년 2월: 금오공과대학교 전자공학부 전파통신공학전공 (공학사)
 2005년 2월~현재: 금오공과대학교 전파통신공학과 석사과정
 [주 관심분야] RF 및 Microwave 회로 설계, 전력증폭기 및 선형화기 설계

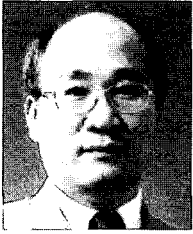
설계

권 상 근



1987년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
 1993년 8월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
 1990년 9월~현재: 금오공과대학교 전자공학부 교수
 [주 관심분야] 영상통신, 디지털 통신 시스템, 신호 처리

윤 영 철



1978년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학사)

1982년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학석사)

1989년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학박사)

1987년 9월~현재: 관동대학교 전

자정보통신공학부 교수

[주 관심분야] RF 및 Microwave 회로설계