

2차 저주파 혼변조 신호 주입을 이용한 전치 왜곡 선형화기 설계

A Design of Predistortion Linearizer using 2nd Low Frequency Intermodulation Signal Injection

이효아 · 이철환 · 정용채 · 김 영* · 김철동**

Hyo-A Lee · Chul-Whan Lee · Yong-Chae Jeong · Young Kim* · Chul-Dong Kim**

요 약

본 논문은 RF신호의 2차 저주파 혼변조 신호를 증폭기 입력 바이어스 단자로 인가하는 새로운 전치 왜곡 선형화 방법을 제시하였다. 또한 RF 신호의 2차 저주파 혼변조 신호를 추출하는 회로를 제시하였다. 새로운 전치 왜곡 선형화 방법으로 3차 및 5차 혼변조 신호의 억압 특성을 얻을 수 있었으며, 수식적인 분석과 시뮬레이션을 통하여 이 선형화 방법을 입증할 수 있었다. 입력 신호로 CDMA IS-95 1FA가 인가되었을 때, 중심주파수로부터 0.855 MHz에서 25 dB, 1.25 MHz에서 22.5 dB 그리고 2.25 MHz에서 6 dB 개선되었다. 마찬가지로 CDMA IS-95 3FA 신호를 인가하였을 때도 중심 주파수에서부터 0.855 MHz 떨어진 지점까지의 인접채널전력비가 20 dB개선되었다.

Abstract

This paper presents a new predistortion method which injects the 2nd low-frequency intermodulation signal of RF signals into the input bias line of the amplifier. New 2nd intermodulation signal extraction circuit is also proposed. We have shown that this method can suppress the 3rd IM apparently and sometimes do the 5th IM, through mathematical analysis, then confirmed it with simulation and verified it on the desk test. When the input signal CDMA IS-95 1FA is applied, measured ACPR improvements are 25 dBc, 22.5 dBc, and 6 dBc at 0.885 MHz, 1.25 MHz and 2.25 MHz offset respectively. Also, when applying the CDMA IS-95 3FA, the measured ACPR improvement is 20 dBc at 0.885 MHz offset.

Key words : Predistortion, Signal-injection, IMD, ACPR

I. 서 론

최근 사용되고 있는 이동 통신 시스템은 주파수 자원의 효율적 사용을 위해 CDMA, QAM, QPSK 같은 변조 기법 등을 사용한다. 그러나 이 방법은 RF 신호의 최대 전력 대 평균 전력의 비가 크고, 포락선

변동이 심하여 전력 증폭기의 선형성이 요구된다. 그러나 전력 증폭기는 최대 출력의 추출과 효율의 극대화를 위해 트랜지스터를 비선형 특성이 강한 포화 영역에서 동작시키기 때문에 증폭기의 이득과 위상의 왜곡을 초래한다. 이러한 트랜지스터의 동작에 기인하는 비선형 특성을 보상하는 선형화기가 일반

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

*금오공과대학교(Kumoh National Institute of Technology)

**세원텔레텍(주)(Sewon Teletech, Inc.)

· 논문 번호 : 20030524-12S

· 수정완료일자 : 2003년 7월 31일

적으로 필요하게 된다. 전치 왜곡 선형화 방법은 입력 RF 신호에 의해 증폭기에서 만들어질 왜곡 성분의 역 왜곡 특성을 갖는 회로를 미리 전력 증폭기의 앞단에 부가하여 전력 증폭기의 왜곡 성분을 상쇄시키는 방식이다. 광 대역폭과 넓은 동작 범위, 소형 경량으로 구현할 수 있는 것이 일반적인 장점이다^[1].

본 논문에서는 증폭기에 입력될 RF 신호의 2차 저주파 혼변조 신호를 새로운 방법으로 검출한 후, 입력 바이어스 선로에 다시 주입시킴으로 증폭기에서 만들어질 주파수 혼변조 왜곡 성분들을 상쇄시키는 전치 왜곡 선형화기를 설계하였다^{[2],[3]}.

II. 본 론

그림 1은 제안된 전치왜곡 증폭기의 기본 구조도이다. 제안된 전치왜곡 증폭기는 전력 분배기, 2차 저주파 혼변조 신호 검출기, 가변 이득 조정기, 변환기, 입력 바이어스 선로, 위상 변화기, 지연 선로 및 증폭기로 이루어진다. 입력된 2-tone 신호는 전력 분배기를 통해서 전력 증폭기 경로와 2차 저주파 혼변조 신호 검출기 경로로 나누어진다. 전력 증폭기 경로로 인가된 주 신호는 가변 위상 변화기를 거쳐 증폭기에서 주 신호 증폭뿐만 아니라 비선형성에 의해서 혼변조 왜곡성분들도 생성이 된다.

신호검출기는 다이오드를 이용한 포락선 검출기나 증폭기의 출력 단 바이어스 쇼크를 통해 검출하는 것이 일반적이나 다이오드를 이용한 포락선 검출기는 동작영역의 선형영역에 제한을 받고, 증폭기의 출력 단 바이어스 쇼크를 통한 방법은 바이어스 잡음에 노출되어 있는 단점이 있다^[4]. 제안된 검출기는

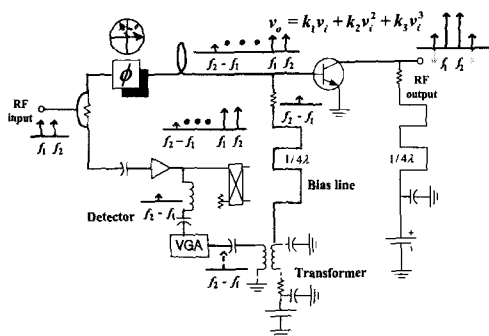


그림 1. 제안된 전치왜곡 증폭기의 기본 구조
Fig. 1. Proposed predistortion amplifier block diagram.

증폭기의 비선형성을 이용하되 동작대역의 신호는 종단 저항에서 소모되고 저주파 2차 혼변조 신호는 바이어스 단자와 별개로 추출하는 방법을 이용하고 있다. 2차 저주파 혼변조 신호가 검출된 후, 가변 이득 증폭기(VGA)를 통해 그 진폭을 바꾸어 줄 수가 있게 된다. 이렇게 만들어진 2차 저주파 혼변조 신호는 바이어스 선로에 변환기를 통하여 주입되면, 주 신호에 의해 생긴 혼변조 왜곡 성분과는 다른 혼변조 성분을 생성한다. 이들 신호들의 진폭과 위상을 제어함으로써 증폭기를 선형화 할 수 있게 된다^{[5]-[8]}.

3차 혼변조 왜곡 신호들은 동작 주파수 대역 내에 존재하게 되어 일반적으로 여파기를 사용하여 제거하기가 어렵기 때문에 선형화기를 반드시 사용해서 통신 시스템의 성능을 향상시켜야 한다. 그림 2는 비선형 2단자 망에 2-tone 신호를 인가 시 출력 주파수 특성을 나타내고 있다^[9]. 식 (1)은 일반적인 증폭기의 비선형 입출력 전달 특성에 대한 다항식을 나타낸 것이다.

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

일반적으로 3차 항까지만 고려하여도 비선형 증폭기의 비선형성을 충분히 표현 가능하므로 3차 항까지만 생각한다면 식 (2)와 같이 표현될 수 있다.

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

본 논문에서는 검출된 2차 저주파 혼변조 신호를 입력 바이어스 선로에 주입을 제한하였는데, 이러한 2차 저주파 혼변조 신호 주입은 입력 바이어스에 영

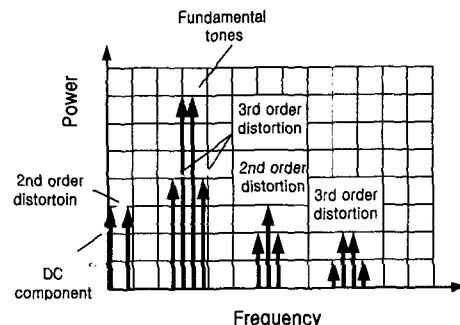


그림 2. 2-tone 신호 입력 시 비선형 시스템의 주파수 응답 특성

Fig. 2. Nonlinear frequency response of nonlinear system in case of 2-tone input signals.

향을 주게 되어 출력의 레벨을 변화시켜 주는 일종의 진폭 변조(AM: Amplitude Modulation)의 역할을 하므로 입력 신호를 식 (3)과 같이 진폭 변조 신호의 형태로 볼 수 있다^[10].

$$V_m(t) = (1 + b \cos \Delta \omega) \{ a \cos(\omega_1 t - \theta_{21}) + a \cos(\omega_2 t - \theta_{21}) \}$$

$$\Delta \omega = (\omega_2 - \omega_1) t \quad (3)$$

여기서 우리가 조절 가능한 요소는 검출된 주파수 성분의 크기(b)와 위상(θ_{21})이다. 그러므로 이들 요소를 조절해서 비선형 증폭기에 의해서 생길 수 있는 비선형 요소들을 제거 가능하다는 것을 수식적으로 증명하겠다.

3차 항 이후는 무시하고 3차 항부터 고려할 경우 출력은 식 (3)을 식 (2)에 대입, 정리하고 전체 혼변조 왜곡 성분들을 모아 하측 주파수대 혼변조 왜곡 성분들을 계산하여 정리하면 다음과 같다.

$$\left(\frac{1}{2} G_1 a b + \frac{27}{8} G_3 a^3 b + \frac{27}{32} a^3 b^3 \right) \cos(\omega_1 t - \Delta \omega),$$

$$\left(\frac{3}{4} G_3 a^3 + \frac{9}{8} G_3 a^3 b^2 \right) \cos(2\omega_1 t - \omega_2 t),$$

$$\frac{27}{16} G_3 a^3 b^2 \cos(\omega_2 t - 2\Delta \omega),$$

$$9 a^3 b G_3 \frac{1}{8} \cos(2\omega_1 t - \omega_2 t - \Delta \omega),$$

$$\frac{27}{16} G_3 a^3 b^2 \cos(\omega_1 t - 2\Delta \omega),$$

$$\frac{9}{32} G_3 a^3 b^3 \cos(3\Delta \omega - \omega_2 t),$$

$$3 G_3 a^3 b^3 \frac{1}{32} \cos(3\Delta \omega - 2\omega_2 t + \omega_1 t)$$

이들 중 3차 혼변조 왜곡 성분들은 다음과 같다.

$$\left(\frac{1}{2} G_1 a b + \frac{27}{8} G_3 a^3 b + \frac{27}{32} a^3 b^3 \right) \cos(\omega_1 t - \Delta \omega),$$

$$\left(\frac{3}{4} G_3 a^3 + \frac{9}{8} G_3 a^3 b^2 \right) \cos(2\omega_1 t - \omega_2 t + \theta_{21}),$$

$$\frac{27}{16} G_3 a^3 b^2 \cos(\omega_2 t - 2\Delta \omega)$$

위 수식에서 $G_1 \gg G_3$ 과 $a \gg b$ 를 가정하면 최종적으로 남는 항들은 다음과 같다.

$$\frac{3}{4} G_3 a^3 \cos(2\omega_1 t - \omega_2 t + \theta_{21}),$$

$$\frac{2}{1} G_1 a b \cos(\omega_1 t - \Delta \omega)$$

여기서 $b = 1.5(G_3 a^2 / G_1)$, $\theta_{21} = 180^\circ$ 혹은 -180° 이면 서로 상쇄될 수가 있다. 2차 저주파 혼변조 신호 주입으로 인하여 5차 혼변조 왜곡 신호들도 생성되는데, 여기서 $a \gg b$ 라면 가장 큰 성분은 $(9/8) G_3 a^3 b \cos(2\omega_1 t - \omega_2 t - \Delta \omega)$ 이 된다. 증폭기의 비선형성에 의해서 생길 수 있는 5차 혼변조 왜곡 신호 성분은 $G_5 \cdot C \cos(3\omega_2 t - 2\omega_1 t - \theta_{21})$, $G_5 - C \cos(3\omega_1 t - 2\omega_2 t - \theta_{21})$ (C 는 상수)임을 고려하면 저주파 주입으로 인하여 5차 혼변조 왜곡 신호들도 영향을 받게 된다.

그림 3은 Agilent사의 시뮬레이터인 ADS를 이용하여 설계된 회로도이다. 그림 4는 선형화 전과 후의 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 3차 혼변조 왜곡은 약 35 dBc 그리고 5차 혼변조 왜곡은 약 25 dB 정도의 개선 효과를 보이고 있다.

III. 실험 결과

제안된 선형화 방법의 타당성을 입증하기 위해 그림 1과 같이 입력 바이어스를 갖는 모토로라사의 MRF581를 증폭기로 하여 구현하였다. 측정 결과 이득은 12 dB이고, P_{1dB} 는 18 dBm이었다. 검출기 회로에 사용된 증폭기는 Mini-circuits사의 ERA-5SM이다.

실제 제작된 선형화기의 위상 변환기와 가변 이득 조정기를 조정하여 이득 억압 지점에서부터 최적의 출력 특성을 갖는 위상과 가변 이득의 크기 자료를 추출하였다. 측정 결과, 위상은 상수이고, 저주파 입력 특성 기울기는 7 dBm 입력 신호 시 2차 저주파

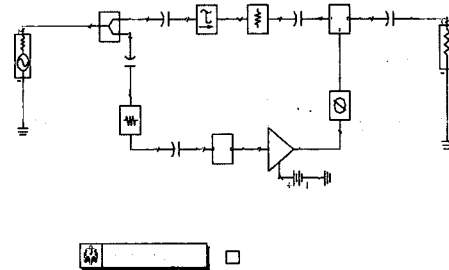
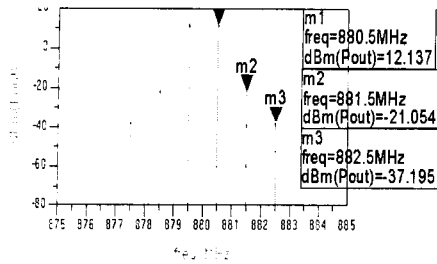
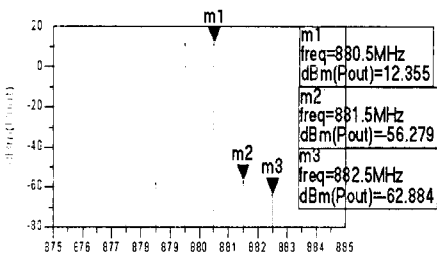


그림 3. ADS를 이용한 2-톤 선형화 효과 시뮬레이션
Fig. 3. 2-tone linearization effect simulation setup using Agilent ADS.



(a) 선형화 전
(a) before linearization



(b) 선형화 후
(b) after linearization

그림 4. 주파수 특성
Fig. 4. Frequency response.

혼변조 왜곡신호의 크기 변화량은 15 dB였다. 이를 제시된 2차 저주파 혼변조 신호 검출기에서 추출되는 신호의 변화량과 맞추어 선형화기를 동작하게 하여 다른 부가 회로 없이도 최적의 특성을 나타내는 선형화기를 설계하였다.

신호 검출기는 2차 혼변조 왜곡 신호를 추출하기 위한 회로로 본 논문에서는 증폭기의 비선형성을 이용하여 RF 신호의 2차 저주파 혼변조 신호를 검출할 수 있는 검출기를 구성하였다. 그림 5는 본 논문에서 제시된 2차 저주파 혼변조 신호검출기의 회로도이다.

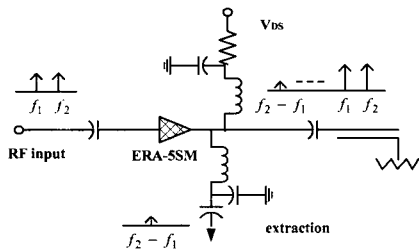


그림 5. 제안된 2차 혼변조 왜곡 신호 검출기 회로도
Fig. 5. The proposed 2nd low frequency intermodulation signal extraction circuit.

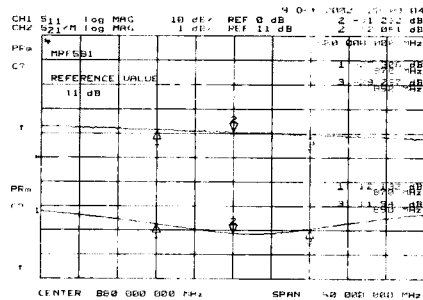
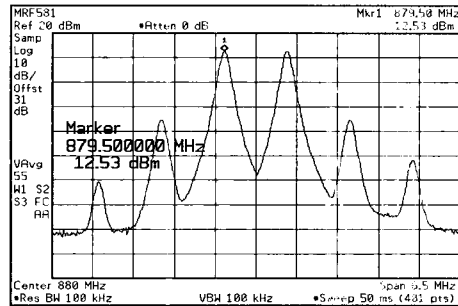


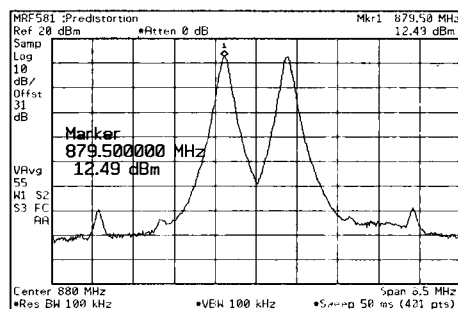
그림 6. 제작된 MRF581의 이득과 반사계수 특성
Fig. 6. Gain and reflection coefficient characteristics of the fabricated MRF581.

그림 6은 회로망 분석기(Network Analyzer)를 이용하여 측정된 이득과 반사계수 특성이다. 동작 주파수 880±10 MHz 범위에서 이득은 12±0.1 dB이고, 반사계수는 25 dB 이하의 특성을 보이고 있다.

그림 7은 중심 주파수 880 MHz에서 1 MHz 간격



(a) 선형화 전
(a) before linearization



(b) 선형화 후
(b) after linearization

그림 7. 제작된 MRF581의 주파수 특성(@Po=12.5 dBm /tone)

Fig. 7. Frequency response of the fabricated MRF581 (@Po=12.5 dBm/tone).

2차 저주파 혼변조 신호 주입을 이용한 전치 왜곡 선형화기 설계

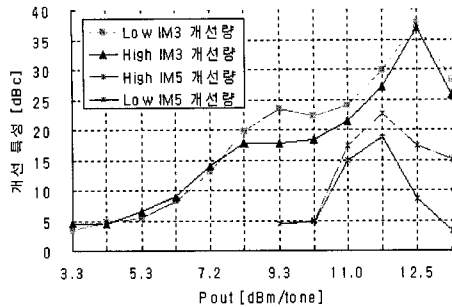


그림 8. 출력 레벨 변화에 따른 혼변조 왜곡 신호의 개선 특성

Fig. 8. The improvement of intermodulation distortion characteristics according to the output power variation.

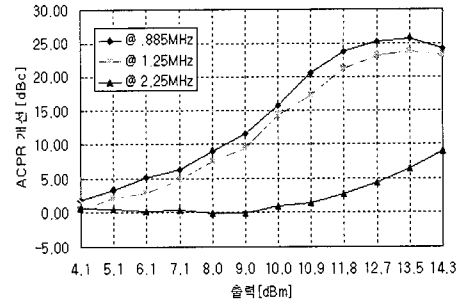


그림 10. 출력 레벨 변화에 따른 인접 채널 전력비 개선 특성

Fig. 10. The improvement of ACPR characteristics according to the output power variation.

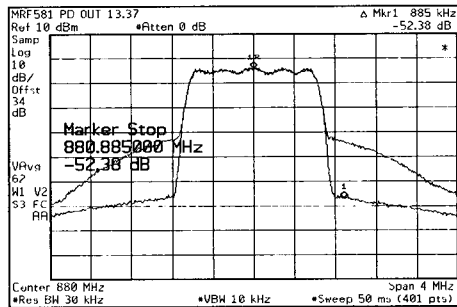


그림 9. 제작된 증폭기의 인접 채널 전력 개선 특성 (@Po=13.5 dBm, 1FA)

Fig. 9. ACPR improvement characteristics of the fabricated amplifier (@Po=13.5 dBm).

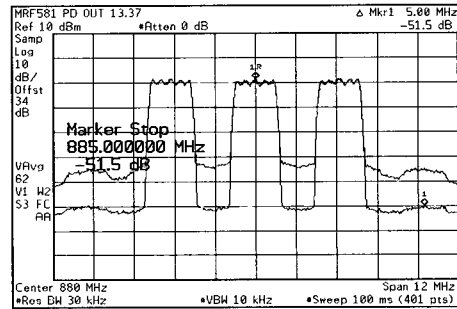


그림 11. 제작된 증폭기의 인접 채널 전력 개선 특성 (@Po=13.5 dBm, 3FA)

Fig. 11. ACPR improvement characteristics of the fabricated amplifier (@Po=13.5 dBm, 3FA).

의 2-tone 신호를 입력하고, 출력이 12.5 dBm/tone일 때의 개선 특성을 보여주고 있다. 3차 혼변조 왜곡 특성은 36 dB, 5차 혼변조 왜곡 특성은 18 dB의 개선 효과를 보이고 있다.

그림 8은 10 dB의 출력 변화에 따른 3차 및 5차 혼변조 왜곡 신호의 개선 특성을 보여주고 있다. 3차 혼변조 왜곡 신호는 출력이 12.5 dBm/tone일 때 36 dB, 5차 혼변조 왜곡 신호는 출력이 11.7 dBm /tone일 때 18 dB의 개선 특성을 보여주고 있다.

그림 9는 중심 주파수 880 MHz의 IS-95 1FA 신호를 제작된 증폭기에 인가했을 때, 평균 출력 13.5 dBm에서 선형화 전후의 인접채널 전력 특성을 보여주고 있다. ACPR 개선 특성은 0.855 MHz, 1.25 MHz, 2.25 MHz에서 각각 25.1 dB, 22 dB, 5 dB를 보여 주고 있다. 또한 그림 10은 출력 신호 레벨 변화

에 따른 ACPR 개선 특성을 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 전체 출력 레벨에서 넓은 대역에 걸쳐 개선 효과가 나타남을 볼 수 있다. 그림 11은 IS-95 규격의 1.25 MHz 간격 3FA 신호를 입력했을 때, 선형화 전후의 인접채널 전력 특성들을 보여 주고 있다.

또한 고출력 트랜지스터를 이용한 증폭기에서도 적용 가능 여부를 시험하여 보았다. 그림 12는 Fujitsu사 FLL357ME를 이용하여 제작한 증폭기로 중심 주파수 880 MHz에서 이득은 21.8 dB이고 반사계수는 24.8 dB 이하의 특성을 보이고 있다. 제작된 증폭기의 P1dB는 35 dBm이다. 또한 그림 13은 중심 주파수 880 MHz에서 1 MHz 간격의 2-tone을 입력 시 출력이 24.6 dBm/tone일 때의 개선 특성을 보여 주고 있는데, 3차 혼변조 왜곡 특성이 31.37 dB 개선됨을 알 수 있다.

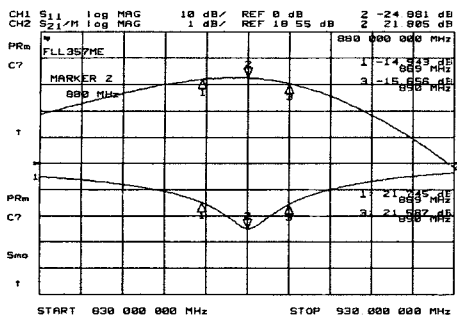
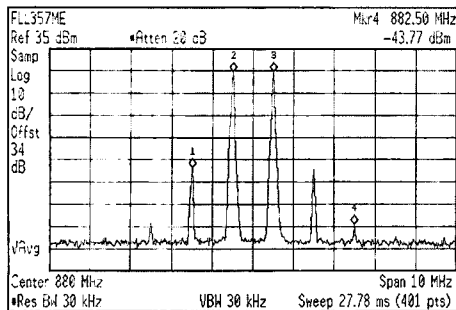
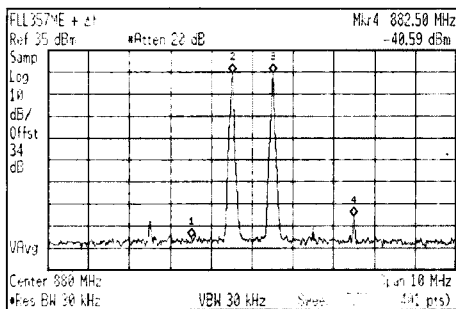


그림 12. 제작된 FLL357ME의 이득과 반사계수 특성
Fig. 12. Gain and reflection coefficient characteristics of the fabricated FLL 357ME.



(a) 선형화 전
(a) before linearization



(b) 선형화 후
(b) after linearization

그림 13. Fujitsu 사의 FLL357ME 2-tone 입력(중심 주파수 880 MHz)

Fig. 13. Frequency response of the fabricated MRF581 (@ $P_o=24.6$ dBm/tone).

IV. 결 론

본 논문에서는 2차 저주파 혼변조 신호를 트랜지스터의 입력 바이어스 단자로 주입하므로 선형화 효과를 얻을 수 있는 전치 왜곡 선형화 방식을 제안하

였다. 수식적 해석을 통해 3차 및 5차 혼변조 왜곡 신호들이 억압될 수 있음을 보였고, 마이크로웨이브 회로 시뮬레이터를 통하여 검증하였다. 또한 효과적으로 2차 저주파 혼변조 신호를 추출하기 위해 새로운 회로를 제시하였다. 실제적인 검증을 위해 MRF 581을 이용한 저전력 증폭기를 제작하였고, 신호원으로 CW 2-톤, CDMA IS-95 1FA, 3FA 신호를 각각 입력하여 선형화 효과를 시험하였는데 모든 경우에 효과적으로 개선될 수 있음을 보였다. 또한 신호레벨의 변화에 대해서도 효과적으로 선형화 개선 효과를 얻을 수 있음을 보였다. 또한 대전력 증폭기에서도 선형화 효과가 있음을 보이기 위해 FLL357ME를 이용하여 대전력 증폭기를 제작하여 선형화 효과를 시험하였는데 역시 탁월한 선형화 효과를 보였다.

본 논문에서 제작된 선형화 방법은 실제적으로 적용 가능한 선형화 방법이라고 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] Yong-Chae Jeong, "A Design of Predistortion Linearizer by Individual Order Control of Intermodulation Distortion Signals", Doctor Dissertation, Sogang-Univ., 1996.
- [2] Colin S. Aitchison, Modeste Mbabele, M. Reza moazzam, Djuradi Fudimir and Fazal Ali, "Improvement of Third-Order Intermodulation Product of RF and Microwave Amplifiers by injection", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech*, vol. 49, no. 6, Jun. 2001.
- [3] Chun-Wah Ran, Kwok-Keung M. Cheng, "Theoretical and Experimental Study of Amplifier Linearization Based on Harmonic and Baseband Signal injection Technique", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech*, vol. 50, no. 7, Jul. 2002.
- [4] R. V. Garver, "360° Varactor diode linear phase modulator", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-17, pp. 137-147, Mar. 1969.
- [5] R. H. Hardin, E. J. Downey and J. Munushian, "Electronically variable phase shifters utilizing variable capacitance diodes", *Proc. IRE(Letter)*, vol.

48, pp. 944-945, May 1960.
 [6] Stewart Walker, "A Low Phase Shift Attenuator", *IEEE Trans.*, vol. MTT-42, no. 2, pp. 182-185, Feb. 1994.
 [7] Won-tae Kang, "Reflection Type Low Phase Shift Attenuator", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, vol. 46, no. 7, pp. 1019-1221, Jul. 1988.
 [8] Youngoo Yang, Young Yun Woo and Bumnam

Kim, "New Predistortion Linearizer Using Low-Frequency Even-Order Intermodulation Components", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, vol. 50, no. 2, Feb. 2002.
 [9] Nick Potheary, *Feedforward Linear Power Amplifiers*, Artech House, pp. 124, 1999.
 [10] Steve C. Cripps, *RF power Amplifiers for Wireless Communications*, Artech house.

이 호 아



2002년 2월: 전북대학교 컴퓨터·정보통신공학부 (공학사)
 2002년 3월~현재: 전북대학교 정보통신공학과 석사과정
 [주 관심분야] RFIC, 초고주파회로 및 전력 증폭기 선형화기 설계

김 영



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

1993년 6월~1998년 2월: 삼성전자 정보통신사업본부 선임 연구원

1998년 3월~2003년 2월: 두원공과대학 정보통신과 조교수

2003년 3월~현재: 금오공과대학교 전자공학부 전임강사
 [주 관심분야] RF 및 Microwave 회로해석 및 설계, 전력증폭기 및 선형화기 설계

이 철 환



2003년 2월: 전북대학교 전자·정보공학부 (공학사)
 2003년 3월~현재: 전북대학교 정보통신공학과 석사과정
 [주 관심분야] RFIC, 초고주파 회로설계, 전력 증폭기 선형화기 설계

김 철 등



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

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

정 용 채



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

1998년 3월~2000년 3월: 전북대학교 전자정보공학부 전임강사

2000년 4월~현재: 전북대학교 전자정보공학부 조교수, 정보통신 연구센터 참여교수 및 IDEC WG 책임교수
 [주 관심분야] 초고주파 회로 설계 및 해석, 전력 증폭기 선형화기 설계, 전송선로 주기구조 해석