

論文2002-39TC-9-4

Harmonic Generator의 저주파 혼변조 신호 성분을 이용한 전치왜곡 선형화기 설계

(The Design of Predistortion Linearizer using the Low
Frequency Intermodulation Terms of Harmonic Generator)

金 英 * , 張 益 洙 * , 張 亨 淳 *

(Young Kim, Ik Soo Chang, and Hyung Soon Jang)

요 약

본 논문에서 제시한 새로운 형태의 전치왜곡 회로는 Harmonic Generator에서 발생하는 저주파 혼변조 신호 성분만을 추출하여, 이것을 Vector Modulator에서 원 신호와 진폭 변조시키는 것이다. 이러한 회로를 이용하여 3차, 5차 혼변조 신호를 발생시켜 전력 증폭기의 혼변조 신호를 감쇠시키는 선형화기를 구현하였다. 구현된 전치왜곡 선형화기는 국내 개인 휴대 통신(PCS) 기지국 송신 대역인 1840MHz ~ 1870MHz 주파수에서 동작하도록 제작, 측정을 하였다. 그 결과 반송파 2-tone 신호를 인가할 때 3차 혼변조 왜곡 특성은 20dB 이상, 5차 혼변조 왜곡 특성은 10dB 이상의 개선효과를 얻었고, IS-95 CDMA 신호를 인가하였을 때 인접채널 전력 비를 10dB 이상 개선시켰다.

Abstract

In this paper, a new type predistorter using a low frequency intermodulation signals terms of harmonic generator is proposed. A vector modulator, in which fundamental signal is modulated with low frequency intermodulation signals derived from harmonic generator, generates predistorted third and fifth IM components. Using predistorted signals, intermodulation distortion signals of power amplifier suppressed. The suggested predistorter has been manufactured to operate in Korean PCS base-station transmitting band (1840~1870MHz). The test results show that the third IMD signal level is reduced more than 20dB and the fifth IMD signal is reduced about 10dB for CW two-tone signals. The predistorter improves the Adjacent Channel Power Ratio (ACPR) more than 10dB for CDMA (IS-95) signals.

Keywords : Predistorter, Linearizer, Vector Modulator, Power Amplifier, Harmonic Generator

I. 서 론

통신 시스템에서 전력 증폭기가 선형적으로 동작한다면 증폭된 출력 신호는 어떠한 신호의 왜곡이나 다른

신호로부터 간섭을 받지 않으면서 전달되지만, 실제로는 비선형 특성을 갖고 있어 많은 문제점을 유발시킨다. 일반적으로 통신 시스템을 구성할 때 대전력 증폭기(HPA: High Power Amplifier)는 가능한 최대의 효율로 동작시키기 위해 비선형성이 큰 포화영역에 가까운 지점에서 동작시킨다. 그 결과 CDMA 신호 또는 여러 채널의 신

* 正會員, 西江大學校 電子工學科

(Dept. of Electronics Engineering, Sogang University)

接受日字:2002年5月22日, 수정완료일:2002年8月14日

호가 동시에 입력되면 증폭기 출력에서는 증폭된 입력 신호와 함께 하모닉 신호 성분들과 혼변조 왜곡 신호들이 발생된다. 이들 하모닉 신호 성분들과 혼변조 왜곡 신호들은 혼신(cross-talk) 및 잡음(noise)으로 작용하여 전송품질 저하의 주요한 원인이 된다. 이런 전력 증폭기의 비선형 특성을 보상해주는 여러 가지 선형화 방법들 중에서 전력 증폭기 전단에 전력 증폭기의 비선형성과 역이되는 비선형 성분을 갖는 소자를 위치시켜 전력 증폭기에서 발생하는 혼변조 신호양을 감소시키는 방법이 존재하는데, 이러한 선형화기는 보통 소신호 회로로 구현이 가능하며 크기가 작은 회로들로 구현되는 전치왜곡 선형화기^[1-2]이다. 이들 선형화기를 구현하는 방법은 원 신호를 이용하여 이 신호가 비선형 소자를 통과하면서 생기는 혼변조 신호를 처리하여 전력 증폭기의 혼변조 왜곡 신호를 제거하는 것이다. 이러한 방법은 신호를 고주파에서 처리하기 때문에 신호간의 간섭이나 제작상의 어려움을 갖고있다. 또 다른 형태로 저주파 신호를 이용한 방법^[3-5]을 살펴보면, 입력의 포락선을 다이오드를 이용하여 검출하는 방법과 트랜지스터 바이어스 회로에서 저주파 혼변조 신호를 얻는 방법을 이용하여 추출한 신호를 원 신호와 벡터 모듈레이터^[6]에서 변조시켜 전력 증폭기의 혼변조 신호를 감소시키고 있다. 이러한 방법들은 모두 저주파 신호를 처리하기 때문에 신호 처리가 쉬운 장점을 갖고 있으며, RF 입력 신호가 멀티톤 또는 CDMA 멀티 신호에서도 입력 포락선 또는 저주파 혼변조 신호를 얻어내기가 쉬운 장점을 갖고있다. 본 논문에서는 저주파 혼변조 신호를 얻는 방법으로 하모닉 발생기를 이용하였으며, 여기서 발생된 저주파 혼변조 신호를 원 신호와 벡터 모듈레이터에서 변조시켜, 저주파 신호의 크기만을 조절하여 전력 증폭기에서 발생하는 혼변조 왜곡 신호들을 억제하는 기법을 제시하였다.

II. 회로의 동작 원리

일반적으로 능동 회로의 비선형 전달 특성을 표시하기 위해서는 입력 신호가 v_i 이고 출력 신호가 v_o 일 때 다음과 같은 Power 시리즈로 나타낼 수 있다.

$$v_o = k_1 v_i + k_2 v_i^2 + k_3 v_i^3 + k_4 v_i^4 + \dots \quad (1)$$

위의 (1)식에서 계수 k_1, k_2, k_3 등은 비선형 상수 이고 이 Power 시리즈의 차수를 무한개의 항으로 표시할 수 있으나 보통 5차 항까지만 고려하여도 전력 증폭기의 비선형 전달 특성을 충분히 표현할 수 있다.

$$v_o = k_1 v_i + k_2 v_i^2 + k_3 v_i^3 + k_4 v_i^4 + k_5 v_i^5 \quad (2)$$

이때 입력 신호가 서로 다른 두 주파수 신호들로 구성된다면 ($v_i = A[\cos(\omega_1 t) + \cos(\omega_2 t)]$), 출력 측에서는 기본 주파수 신호(ω_1, ω_2) 이외에 dc, 2차 하모닉 주파수 성분($2\omega_1, 2\omega_2$), 3차 하모닉 주파수 성분($3\omega_1, 3\omega_2$) 2차와 4차 혼변조 왜곡 주파수 성분($\omega_1 \pm \omega_2, 2(\omega_1 \pm \omega_2)$), 3차 혼변조 왜곡 주파수 성분($2\omega_1 \pm \omega_2, 2\omega_2 \pm \omega_1$)와 5차 혼변조 왜곡 주파수 성분($3\omega_1 \pm 2\omega_2, 3\omega_2 \pm 2\omega_1$)인 출력 신호들을 얻을 수 있다. 보통 동작 주파수 대역에서 발생하지 않는 신호 성분들은 여파기로 제거할 수 있으나 동작 대역에서 발생하는 혼변조 왜곡 주파수 신호들은 여파기로 제거할 수 없다. 동작대역 혼변조 왜곡 신호 중에서도 3차와 5차 혼변조 왜곡 신호는 다른 혼변조 신호에 비해 큰 신호이며 사용 채널에 인접해서 발생하므로 가장 중요한 혼신 잡음 신호가 된다. 따라서, 본 논문에서는 이 3차 및 5차 혼변조 왜곡 신호를 효과적으로 억압하는 방법을 제시하고자 한다.

앞에서 언급하였듯이 전력 증폭기의 혼변조 신호들이 다른 채널에 영향을 주어 혼신 잡음 신호로서 작용하므로 이러한 비선형 특성을 선형적으로 보상하기 위하여

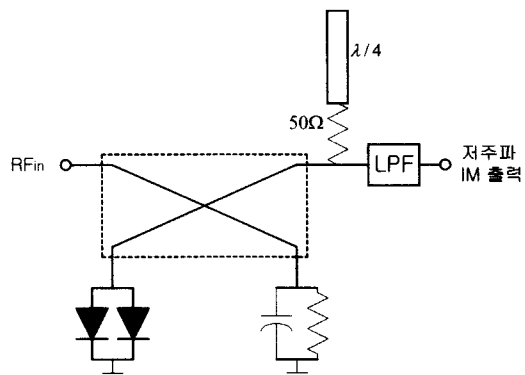


그림 1. Harmonic Generator 회로도
Fig. 1. Harmonic Generator Schematic.

그림1 과 같은 Harmonic Generator^[7]를 설계하였다. 이 회로에서 다이오드의 비선형 특성을 이용하여 하모닉 신호 및 혼변조 신호들을 발생시켰으며, 혼변조 신호에는 2차 와 4차 혼변조 주파수 성분들($\omega_1 \pm \omega_2$, $2(\omega_1 \pm \omega_2)$) 이 만들어 진다. 여기에 저역 통과 여파기를 사용하여 저주파 혼변조 신호 만을 추출하였다. 이때 하이브리드 결합기 출력 단으로 나오는 동작 주파수 대역 신호들은 50Ω 저항과 ($\lambda/4$ 개방 전송선로로 종단 시킴으로 저주파에 영향을 주지 않도록 하였다.

여기서 사용한 Harmonic Generator를 이용하여 전치 왜곡 선형화기를 구성한 전체 블록 다이어그램은 그림 2와 같다.

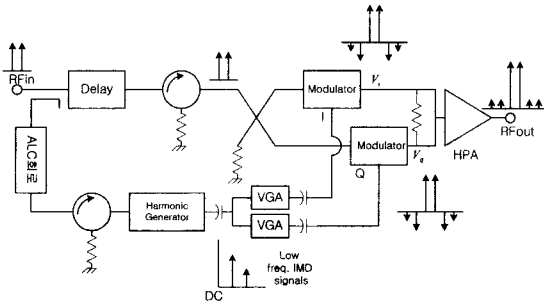


그림 2. 전체 블록 다이어그램
Fig. 2. Block Diagram.

그림 2에서 Harmonic Generator에 사용된 다이오드의 비선형 특성은 입력 레벨에 따라 다른 특성을 가지므로, 입력측으로 들어가는 신호의 크기를 고정시켜 일정한 혼변조 신호가 발생되도록 입력측에 자동 레벨 제어 (Automatic Level Control : ALC) 회로를 사용하였다. 이러한 회로들에 의해 만들어진 저주파 혼변조 신호는 Vector Modulator회로에서 원 신호와 진폭(AM) 변조 되어 동작 주파수 대역에서 혼변조 신호를 만들게 된다. 여기서 2차 혼변조 신호와 동작 주파수 대역이 진폭 변조 되는 관계를 수식으로 보면 다음과 같이 표시된다.

동위상(In-phase) 단자 출력 신호 ;

$$\begin{aligned}
 V_i &= A(1 + B \cos \omega_m t) \cdot (\cos \omega_{c1} t + \cos \omega_{c2} t) \\
 &= A \cos \omega_{c1} t + \frac{AB}{2} \cos(\omega_{c1} + \omega_m) t + \frac{AB}{2} \cos(\omega_{c1} - \omega_m) t \\
 &\quad + A \cos \omega_{c2} t + \frac{AB}{2} \cos(\omega_{c2} + \omega_m) t + \frac{AB}{2} \cos(\omega_{c2} - \omega_m) t \quad (3)
 \end{aligned}$$

직각위상(Quadrature-phase) 단자 출력 신호 ;

$$\begin{aligned}
 V_q &= A(1 + B \cos \omega_m t) \cdot (\sin \omega_{c1} t + \sin \omega_{c2} t) \\
 &= A \sin \omega_{c1} t + \frac{AB}{2} \sin(\omega_{c1} + \omega_m) t + \frac{AB}{2} \sin(\omega_{c1} - \omega_m) t \\
 &\quad + A \sin \omega_{c2} t + \frac{AB}{2} \sin(\omega_{c2} + \omega_m) t + \frac{AB}{2} \sin(\omega_{c2} - \omega_m) t \quad (4)
 \end{aligned}$$

여기서 ω_{c1}, ω_{c2} 은 입력 반송파 신호 주파수이고 $\omega_m = \omega_{c2} - \omega_{c1}$ 인 저주파 혼변조 신호이다. 동위상 및 직각위상 단자 출력 신호들을 보면 입력된 반송파 신호 이외에도 입력 되는 반송파 신호와 저주파 신호가 진폭 변조되어 3차 혼변조 신호들이 나타나며, 이 신호들은 벡터 합성되어 출력된다. 따라서, 저주파 혼변조 신호들이 Vector Modulator에서 변조된 신호 즉, 3차 혼변조 신호를 만들 수 있다. 이 동위상 및 직각위상 측의 저주파 혼변조 신호의 크기만을 조절 함으로서 3차 혼변조 신호의 크기와 위상을 조절 할 수 있는 전치왜곡 선형화기가 구현된다. 또한, 혼변조 발생기에서 저주파 혼변조 신호 $2\omega_m$ 신호를 추출하면, 입력 반송파 신호들과의 진폭 변조 과정을 통해 5차 혼변조 신호들도 만들어 낼 수 있다. 주 경로의 지연선로는 혼변조 신호가 저주파 신호에 의해서 변조 될 때 원 신호가 시간적으로 같은 시간만큼 지연을 시켜 변조될 수 있도록 하기 위한 것이다.

III. 저주파 혼변조 성분을 이용한 전치 왜곡 선형화기 실험 결과

앞에서 설명한 것 처럼 저주파 혼변조 성분을 이용한 전치왜곡 선형화기는 하모닉 발생기에서 만들어진 저주파 신호를 동위상과 직각위상의 원 신호와 변조시켜주는 변조기가 존재한다. 이렇게 변조된 신호는 전력 증폭기에서 만들어진 혼변조 신호와 동일한 신호가 되는데, 이 때 혼변조 신호를 제거하기 위해서는 변조된 신호가 크기는 같고 역 위상을 갖어야 한다. 저주파 신호의 크기를 조절하면 변조된 신호의 동위상과 직각위상의 크기가 변화하여 그림 3과 같이 크기와 위상이 함께 변화하여 전력 증폭기의 혼변조 성분과 크기는 같고 역위상을 갖는 임의의 신호를 만들어 낼수있다.

본 논문에서 결과는 국내 PCS기지국 송신 주파수 대역인 1840MHz~1870MHz에서 동작 하는 전치왜곡 선형화기를 제작하여, 5Watts 출력의 전력 증폭기와 함께

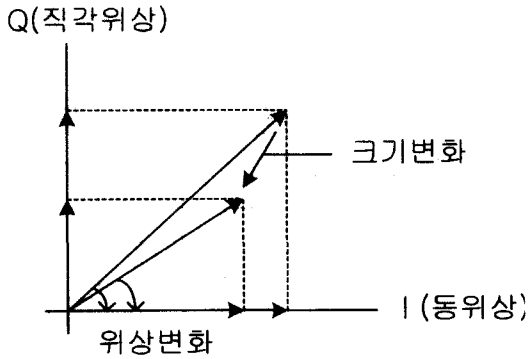
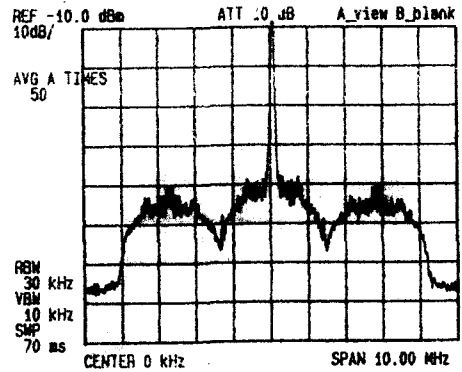


그림 3. 변조 신호의 크기와 위상변화
Fig. 3. Amplitude and phase variation of modulated signal.



(b) CDMA 2FA 입력 시 저주파 혼변조 신호
(b) The low frequency IM signal in case of CDMA 2FA condition

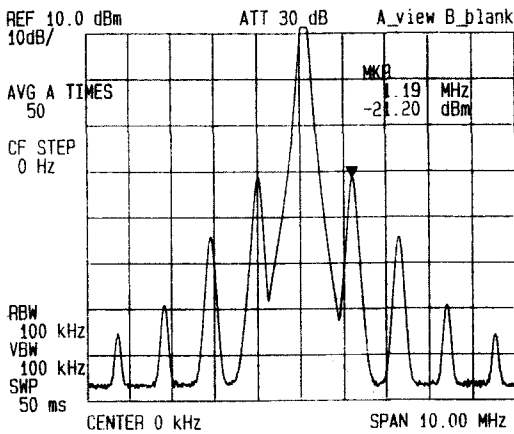
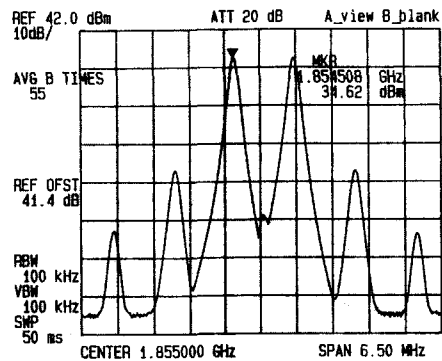
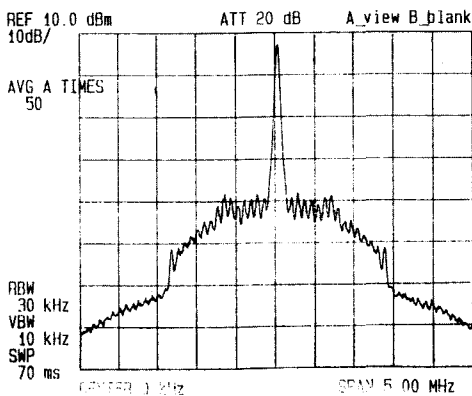


그림 4. 2-tone 입력시 저주파 혼변조 신호
Fig. 4. The low frequency IM signal at 2-tone.

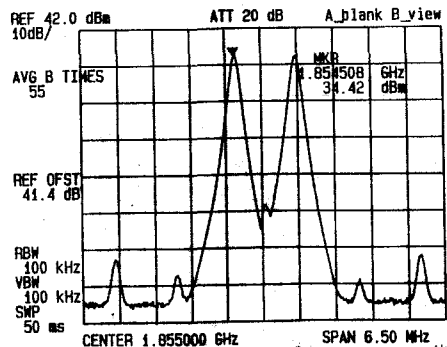
그림 5. CDMA 신호 입력시 저주파 혼변조 신호
Fig. 5. The low frequency IM signal at CDMA.



(a)개선 전
(a)Before linearization



(a) CDMA 1FA 입력 시 저주파 혼변조 신호
(a) The low frequency IM signal in case of CDMA 1FA condition

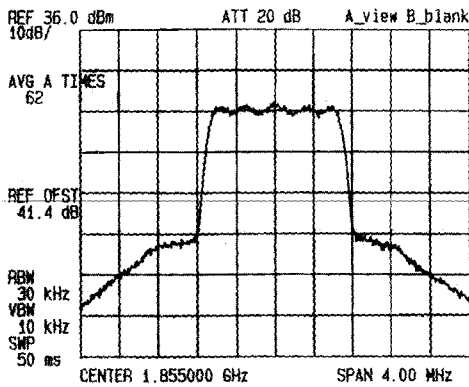


(a)개선후
(a)After linearization

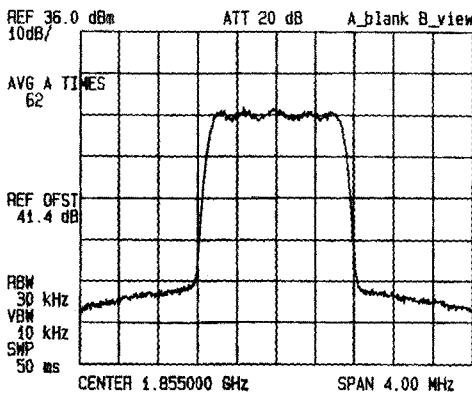
그림 6. 반송파 2-tone 입력 시 전력증폭기의 비선형 특성 비교($P_0 = 37 \text{ dBm}$)
Fig. 6. HPA nonlinear characteristics comparison in case of carrier 2-tone($P_0 = 37 \text{ dBm}$).

연결하여 측정하였다.

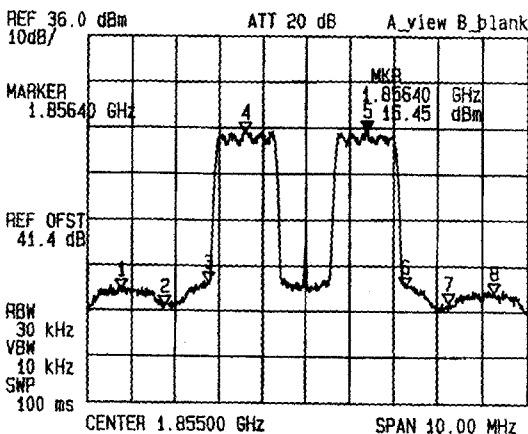
전치왜곡 선형화기의 특성을 측정하기 위해서 사용된



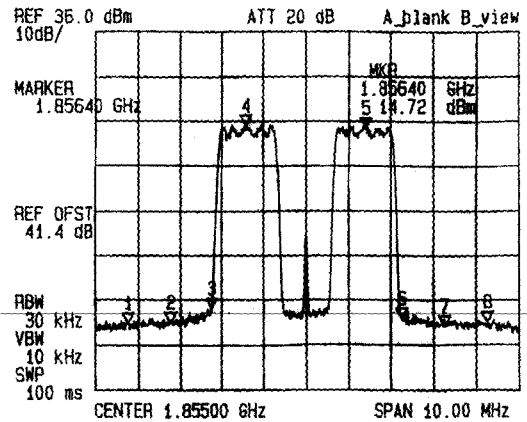
(a) 개선 전 (1FA)
(a) Before linearization (1FA)



(b) 개선 후 (1FA)
(b) After linearization (1FA)



(c) 개선 전 (2FA)
(c) Before linearization (2FA)



(d) 개선 후 (2FA)
(d) After linearization (2FA)

그림 7. CDMA 신호 입력 시 전력증폭기의 비선형 특성 비교($P_0 = 37\text{ dBm}$)

Fig. 7. HPA nonlinear characteristics compares -ion in case of CDMA signals($P_0 = 37\text{ dBm}$).

CDMA 1FA 개선정도

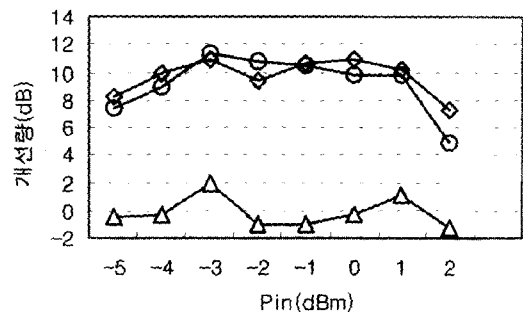


그림 8. 입력 변화에 따른 ACPR 개선량

Fig. 8. ACPR improvement when input varying.

두 반송파 신호의 주파수는 1854.5MHz 와 1855.5MHz 으로 실험하였으며 제작된 하모닉 발생기 출력에서 측정된 2-tone과 CDMA 신호에 대한 저주파 혼변조 신호는 그림 4, 5에 나타났다.

그림 4 또는 그림 5에 나타난 저주파 혼변조 신호를 Vector Modulator에서 진폭 변조 시켜 전력 증폭기를 선형화 시키면, 반송파 2-tone 신호의 경우 출력이 $P_0 = 37\text{ dBm}$ 일 때 3차 혼변조 왜곡 신호들은 20dB 이상, 5차 혼변조 왜곡 신호는 10dB 이상 개선되는 것을

그림 6에서 볼 수 있다. 또, IS-95 CDMA 신호에서도 출력이 $P_0 = 37\text{dBm}$ 일 때 10dB이상의 ACPR이 개선됨을 그림7에서 보였다.

그림 8는 CDMA 1FA입력 레벨이 $35\text{dBm} \sim 2\text{dBm}$ 로 변화 할 때 본 논문에서 제시한 전치 왜곡 선형화기로 얻어진 인접 채널 전력비(Adjacent Channel Power Ratio : ACPR) 개선량을 보여주는 그래프이다.

IV. 결 론

본 논문에서는 입력 신호의 일부를 Harmonic Generator에 인가하여 저주파 혼변조 성분을 추출하고, 그것을 Vector Modulator에서 원 신호와 진폭 변조시켜 전력 증폭기에서 발생하는 혼변조 신호와 크기는 같고 역위상을 갖는 신호를 만들어 혼변조 신호를 억제하는 전치왜곡 선형화기 설계 방법을 제시하였다. 여기서 저주파 혼변조 신호의 크기를 변화시켜주는 것은 Vector Modulator에서 원 신호와 변조시 혼변조 신호의 크기와 위상을 함께 변화되는 것을 의미하는 것이다. 또한, 추출된 저주파 혼변조 신호의 크기를 조절하여 입력 전력 변화에 따라 변하는 전력증폭기의 비선형 특성을 억압할 수 있음을 아울러 보였다. 본 논문에서 제시한 저주파 혼변조 신호 성분을 이용한 전치왜곡 선형화기의 특성은 반송파 2-tone입력 신호의 경우 3차 혼변조 왜곡 신호들은 20dB 이상, 5차 혼변조 왜곡 신호는 10dB 이상 개선하였고, IS-95 CDMA 신호에서도 10dB이상의 ACPR을 개선시켰다.

이와 같이 하모닉 발생기에서 만들어진 저주파 신호를 처리하여 혼변조 신호를 억제시키는 방법은 고주파에서 혼변조 신호를 만들 때 보다 신호 사이의 간섭을 줄일수 있고 제작이 간편하다. 또한, 다중 입력 신호로

부터도 쉽게 저주파 혼변조 신호를 얻음으로 인하여 다중 신호에 대한 선형화기 제작을 쉽게 하였고, 이러한 선형화기를 집적회로 등으로 제작 한다면 손쉽게 선형화된 전력 증폭기를 만들수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] Petter B. Kenington, High-linearity RF Amplifier Design , Artech House, pp. 351~420, 2000.
- [2] 정용채, 혼변조 신호의 개별차수 조정 Predistorter 선형화기 설계, 서강대학교 박사학위 논문, 1995
- [3] Shawn P. Stapleton, "Amplifier Linearization Using Adaptive RF Predistortion," Applied Microwave & Wireless, pp. 40-46, Feb. 2001.
- [4] Claudio G. Rey, "Adaptive polar work-Function Predistortion", IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, Vol. 47, No 6, June 1999.
- [5] Youngoo Yang, Yang Yun Woo, and Bumman Kim, "A New Predistortion Linearizer Using Low Frequency Even Order IM Components", 2000 2nd International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology Proc. pp. 416~419, 2000.
- [6] 정용채, 장익수, "벡터 감쇄기의 설계", 전자공학회 논문집, 제35권, 11월, 1998
- [7] Toshio Nojima, and Tohru Konno, "Cuber Predistortion Linearizer for Relay Equipment in 800MHz Band Land Mobile Telephone System," IEEE Trans. on Vehicular Technology, VT-34, No.4, Nov. pp. 169~177, 1985.

저 자 소 개

金 英(正會員)

1986년 2월 : 서강대학교 전자공학과(공학사). 1988년 2월 : 서강대학교 전자공학과(공학석사). 2002년 4월~현재 : 서강대학교 박사 과정 수료. 1988년 1월~1993년 5월 : 성미전자(주) 선임연구원. 1993년 6월~

1998년 2월 : 삼성전자(주) 정보통신본부 선임연구원. 1998

년 3월~현재 : 두원 공과 대학 정보 통신과 조교수. <주관심분야 : RF 및 Microwave 회로 해석 및 회로 설계>



張 益 洙(正會員)

1967년 2월 : 서울대학교 전자공학과 졸업(학사). 1970년2월 : 동대학원 마이크로파 전공졸업(석사). 1979년 2월 : 동대학원 마이크로파 전공졸업(박사). 1982년 9월 : Univ. of Wisconsin at Madison 방문교

수. 1997년 3월~1998년 2월 : 서강대학교 공과대학장. 1999년 3월~2001년 1월 : 서강대학교 대학원장. <주관심분야 : 초고주파 부품설계 및 회로 설계>



張 亨 淳(正會員)

2001년 2월 : 광운대학교 전자공학부(학사). 2001년 3월~현재 : 서강대학교 전자공학과(석사). <주관심분야 : RF 회로 해석 및 설계>