

Carrier Complex Power Series 해석을 통한 대전력 증폭기용 전치 왜곡기 설계

A Design of High Power Amplifier Predistortor using Carrier Complex Power Series Analysis

윤상영* · 정용채**

Sang Young Yun* · Yong Chae Jeong**

요 약

본 논문에서는 대전력 증폭기의 비선형 전달 특성을 나타내는 Carrier Complex Power Series를 유도하였고, 이 전달함수를 이용하여 대전력 증폭기를 선형화하기 위한 전치 왜곡기의 비선형 전달 특성을 유도하고 구현하였다. 측정 시료로 제작된 IMT-2000 기지국 송신 대역 대전력 증폭기의 이득은 34.6 dB이고 P_{1dB} 가 35.4 dBm이다. Inverse Carrier Complex Power Series를 이용한 전치 왜곡기를 제작하고, 대전력 증폭기에 부착하여 주파수가 각각 2.1375 GHz와 2.1425 GHz($\Delta f = 5$ MHz)인 2-tone 신호의 출력이 25.43 dBm/tone일 때 17 dB의 개선 특성을 얻었다.

Abstract

In this paper, a new carrier complex power series which represents nonlinear transfer function of high power amplifier is derived. Using this transfer function, the nonlinear transfer function of predistortive circuit for linearizing the distortion effect of a HPA(High Power Amplifier) is derived and fabricated. A measured gain and P_{1dB} of the fabricated HPA in IMT-2000 basestation transmitting band are 34.06 dB and 35.4 dBm. The predistortive circuit using inverse carrier complex power series is fabricated and operated with HPA. The predistortive HPA improves C/I(Carrier to Intermodulation) ratio of HPA by 17.01 dB(@ $P_{out} = 25.43$ dBm/tone) with 2-tone at 2.1375 GHz and 2.1425 GHz.

I. 서 론

통신 수요 용량의 증가와 사용 주파수 대역의 증가로 많은 기지국이 필요하게 되었고 이러한 기지국에는 Modulating signal를 안테나를 이용해서 대기중에 방사를 하기 위해서 필요한 만큼의 전력을

공급해 주는 대전력 증폭기를 사용하고 이러한 대전력 증폭기는 능동소자의 비선형 특성에 의해 비선형 출력 특성을 가지고 있다. 비선형 대전력 증폭기에 사용된 능동 소자가 가지는 특성을 최대한 사용하면 대전력 증폭기가 최대 출력 전력 특성을 가질 수는 있으나 능동 소자에 비선형 특성에 의해서

「본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(2000-1-30200-007-3)지원으로 수행되었음.」

*세원텔레텍(주) 부설연구소(R & D Center, Sewon Teletech Inc.)

**전북대학교 공과대학 전자정보공학부 및 정보통신연구소(Division of Electronic & Information Engineering, Institute of Information & Communication, Chonbuk National University)

· 논문 번호 : 20001220-149

· 수정완료일자 : 2001년 5월 4일

대전력 증폭기의 이득과 위상에 왜곡을 유발을 하고 이러한 왜곡은 다중채널 입력 시 대전력 증폭기의 비선형 특성에 의해서 혼변조 신호들이 발생하게 된다. 이들 혼변조 신호들은 혼신(cross-talk) 또는 잡음(noise)으로 작용하여 통화 품질의 저하와 시스템 성능의 저하로 발생하게 된다. 이러한 혼변조 왜곡을 제거하기 위해서는 선형화기의 장치가 반드시 필요하게 되고 선형화 방식으로는 입력 전력 Back-off, Feedback, Predistortion, Feedforward 방식 등이 있다.^{[1]~[3]}

보통 전치 왜곡(Predistortion) 방식은 성능개선은 작지만 소형, 경량의 소자로 구현이 가능하고 입력 전력 변화에 따른 전력증폭기의 신호 레벨 이득 및 위상 전달 특성과 반대의 특성들을 정확하게 추출하고 구현하는 것이 문제점이다. 본 논문에서는 대전력 증폭기의 입출력 신호 레벨과 위상에 대한 비선형 전달 특성을 동시에 만족하는 Carrier Complex Power Series를 제시하고, 대전력 증폭기를 선형화하기 위한 전치 왜곡기의 비선형 전달 특성 즉, Inverse Carrier Complex Power Series를 유도하고 이를 구현하여 대전력 증폭기의 선형화 하는 방법과 측정 결과를 제시하였다.

II. Carrier Complex Power Series 및 Inverse Carrier Complex Power Series 유도 분석

비선형 특성을 갖는 2단자망이 기억성이 없다면 출력 특성은 입력에 대해서 동시성을 갖는다고 가정할 수가 있고, 이것은 입력 전압 $v_i(t)$ 에 따른 출력 전압 $v_o(t)$ 관계식을 다음과 같은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_o = K_1 v_i + K_2 v_i^2 + K_3 v_i^3 + A \quad (1)$$

where K_i : 실수

식 (1)은 비선형 특성 중에 AM-to-AM 즉 이득에 대한 비선형 특성만을 나타내는 파워시리즈이다. 실제 대전력 증폭기의 비선형 특성은 AM-to-AM과 AM-to-PM 특성을 동시에 나타내고 있다. 이러한 비선형 특성의 동시성을 갖는 파워시리즈를 유도한다면 대전력 증폭기의 선형화에 용이하리라 생각된다.

다. 본 논문에서는 AM-to-AM과 AM-to-PM에 비선형 특성을 만족하는 새로운 형태에 파워시리즈를 Carrier Complex Power Series라고 명칭하겠다.

Carrier Complex Power Series의 유도는 먼저 제작된 대전력 증폭기의 단일 입력 신호 전압에 대한 출력 신호 전압의 비선형 특성을 측정을 하고 이 특성을 바탕으로 입력 신호 대 출력 신호에 비선형 관계를 구하는 과정으로 이루어진다. 신호레벨과 위상 정보를 가진 입력 신호가 대전력 증폭기에 인가되면 증폭기의 전달 특성에 의하여 출력 특성은 이득과 위상에 변화를 가지는 출력 특성이 나오게 된다. 이때 신호레벨이 다른 입력 신호가 대전력 증폭기에 인가되면 이전에 구한 이득 및 위상 값과 다른 값을 출력시키는 비선형 특성이 나타나게 된다. 입력 신호가 $v_i(t) = A \cos(\omega_1 t + \theta)$ 라면 이 입력 신호는 $v_{is} = A e^{j\theta} = A \angle \theta$ 와 같은 페이저(Phasor)나 지수함수(Exponential function) 형태로 표현할 수 있다. 마찬가지로 출력 신호도 $v_o(t) = A^* \cos(\omega_1 t + \theta^*)$ 라면 $v_{os} = A^* e^{j\theta^*} = A^* \angle \theta^*$ 와 같이 표현할 수 있다.

대전력 증폭기의 이득 및 위상 전달 특성을 동시에 표현하려면 전달 함수의 계수가 복소수로 표현되어야 하며, 이를 Carrier Complex Power Series라 하고 일반적인 표현식은 식 (2)와 같고, 일반적으로 비선형 전달 특성 분석을 할 때 강한 비선형 특성을

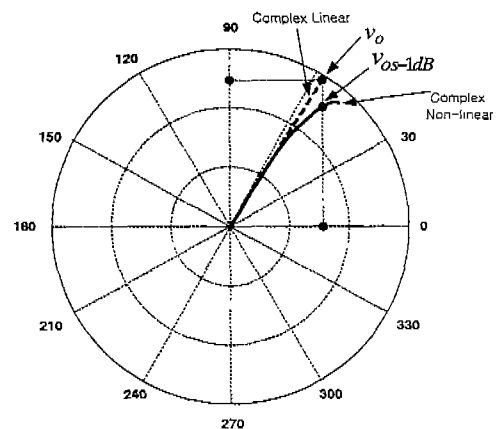


그림 1. 대전력 증폭기의 복소 입출력 비선형 특성
Fig. 1. The complex in/output nonlinear characteristics of HPA.

갖는 2단자 망이 아닌 경우에는 세 번째 항까지 만으로도 충분히 비선형 전달 특성을 표현할 수가 있다. 입력 대 출력 신호가 각주파수 ω_1 에 대해서 페이저나 지수함수로 표현이 되므로 짝수 차수의 계수는 무시할 수 있다. 입출력 신호 전달 함수 특성을 그림 1과 같이 표현을 할 수가 있다.

$$v_{os} = f_1 v_{is} + f_2 v_{is}^2 + f_3 v_{is}^3 + \dots \quad (2)$$

where f_i : 복소수

입력 신호레벨이 작을 때는 대전력 증폭기가 비교적 일정 이득과 위상 변화를 갖는 선형영역에서 동작을 하므로, 비교적 선형영역을 나타내는 복합 선형 이득 (Complex linear gain) f_1 은 작은 입력 레벨에서 페이저 형태의 입력과 출력 신호의 관계식으로 얻어질 수 있다..

$$f_1 = \frac{v_{os}}{v_{is}} = \frac{A \angle \theta}{A \angle \theta} \quad (3)$$

1 dB 압축점 P_{1dB} 에서의 입력 신호(v_{is-1dB})를 $A_{1dB} e^{j\theta_{1dB}}$ 로 표현한다면, 복합 선형 이득 f_1 은 이미 구했으므로, v_{is-1dB} 에 의한 이상적인 복합 선형 출력 v_{os} 는 다음과 같이 구할 수가 있다.

$$v_{os} = f_1 \times A_{1dB} e^{j\theta_{1dB}} \quad (4)$$

실제 나타나는 복합 비선형 출력 신호(v_{os-1dB})를 $A \angle \theta_{1dB} e^{j\theta_{1dB}}$ 로 표현한다면, 이상적인 복합 선형 출력 v_{os} 와 복합 비선형 출력 신호 v_{os-1dB} 의 상호 관계는 식 (5)와 같이 표현할 수가 있다. 여기서 Q 는 선형 이득보다 1 dB 떨어지는 지점에서의 신호의 크기와 위상 값을 동시에 나타내는 복합 상수 (complex constant)이다.

$$Q = \frac{v_{os-1dB}}{v_{os}} = \frac{A \angle \theta_{1dB} e^{j\theta_{1dB}}}{f_1 A_{1dB} \angle \theta_{1dB}} \quad (5)$$

복합 선형 이득 v_{os} 보다 이득이 1 dB(linear scale : 0.891배) 떨어지고 위상이 지연되는 1 dB 압축레벨(1-dB gain compression)에서의 관계는 식 (6)으로 표현을 할 수 있어 비선형 전달함수를 좌우하는 f_3 를 구할 수 있게 된다.

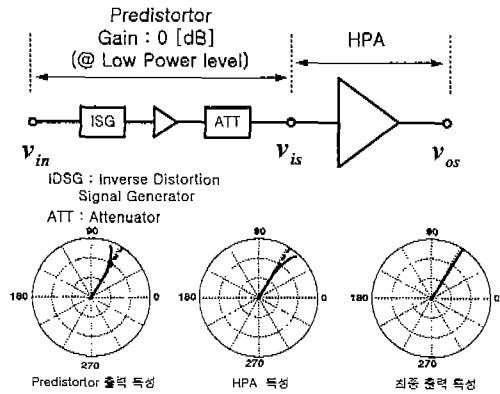


그림 2. 본 논문에서 제시하는 전치 왜곡기 및 대전력 증폭기

Fig. 2. The proposed predistortion circuit and high power amplifier in this paper.

$$f_1 + \frac{3}{4} f_3 v_{is-1dB}^2 = Q \times f_1 X$$

$$f_3 = \frac{4}{3} \frac{(Q-1)f_1}{v_{is-1dB}^2} \quad (6)$$

앞에서 구한 f_1, f_3 를 이용하여, 본 논문에서 제시하는 Carrier Complex Power Series를 식 (7)과 같이 구할 수 있고, 식 (2)와 비교했을 때 2차 항 (even-term)에 대한 부분은 고려하지 않고 1차 항과 3차 항으로 이루어져 있다. 이는 대전력 증폭기의 혼변조 왜곡 성분들 중에 신호 대역에 간섭을 주는 왜곡 신호들은 홀수 차수에 의해서 발생을 하고 짝수 차수에 의해 발생된 성분들은 여파기로 제거가 가능하기 때문에 본 논문에서는 홀수차수에 대한 항만을 고려하였다.[4]~[7]

$$v_{os} = f_1 v_{is} + f_3 v_{is}^3 \quad (7)$$

본 논문에서 제시하는 대전력 증폭기용 전치 왜곡기의 구성은 그림 2와 같고 전치 왜곡기는 역왜곡 신호발생기 (Inverse Distortion Signal Generator : IDSG), 가변 감쇠기, 소신호 증폭기 등으로 구성되어 있다.

전치왜곡 회로의 입출력 전달 함수를 간략화 된 Carrier Complex Power Series로 표현하면 식 (8)과 같고, 이 식을 식 (7)에 대입해서 정리하면 식(9)와 같이 유도할 수 있다. 이때 식 (9)는 전치 왜곡기의 입력 신호에 대한 대전력 증폭기의 출력 신호의

전달 특성을 보이는 것이다.

$$v_{is} = a_1 v_{in} + a_3 v_{in}^3 \quad (8)$$

where a_j : 복소수

$$v_{os} = f_1 a_1 v_{in} + (f_1 a_3 + f_3 a_1^3) v_{in}^3 + 3f_3 a_1^2 a_3 v_{in}^5 + 3f_3 a_1 a_3^3 v_{in}^7 + f_3 a_4^4 v_{in}^9 \quad (9)$$

여기서 전치왜곡기도 비교적 낮은 신호 레벨에서는 선형적인 동작을 하며 이득이 0 dB이고 위상의 변화가 없다면, 계수 a_1 는 1이 되어 전치 왜곡기의 입력 신호에 대한 대전력 증폭기의 출력 신호의 전달 특성은 식 (10)과 같이 구할 수 있다.

$$v_{os} = f_1 v_{in} + (f_1 a_3 + f_3 a_1^3) v_{in}^3 + 3f_3 a_1^2 a_3 v_{in}^5 + 3f_3 a_1 a_3^3 v_{in}^7 + f_3 a_4^4 v_{in}^9 \quad (10)$$

대전력 증폭기에 역왜곡 신호가 인가된 후 출력 특성이 선형성을 갖는다고 가정하면 식 (9)의 3차 항 이후 항들이 제거가 가능하므로 식 (10)의 3차 항 계수는 식 (11)과 같이 구할 수가 있다.

$$f_1 a_3 + f_3 a_1^3 = 0 \Rightarrow a_3 = -\frac{f_3 a_1^3}{f_1} = \frac{f_3}{f_1} \quad (11)$$

이때 식 (10)에서 5차 항 이상 계수의 특성 효과가 미미하다고 가정하면, 대전력 증폭기를 선형화 하기 위한 전치 왜곡기의 비선형 전달 특성 즉, Carrier Complex Power Series를 이용한 Inverse Carrier Power Series는 식 (12)와 같이 유도할 수 있다. 여기서 3차 항 계수는 대전력 증폭기의 Carrier Complex Power Series의 계수로 구할 수 있으므로, 대전력 증폭기의 Carrier Complex Power Series를 구할 수 있다면 전치 왜곡기의 역왜곡 신호에 대한 정보를 얻을 수가 있게 된다.

$$v_{is} = v_{in} - \left(\frac{f_3}{f_1}\right) v_{in}^3 \quad (12)$$

III. 시뮬레이션 및 제작 측정결과

본 논문에서 시료로 사용된 대전력 증폭기는 자

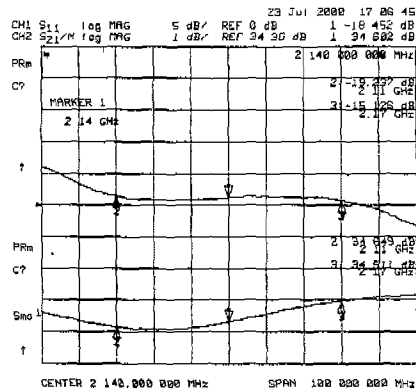


그림 3. 대전력 증폭기의 S_{11} 과 S_{21} 특성
Fig. 3. S_{11} and S_{21} of the fabricated HPA.

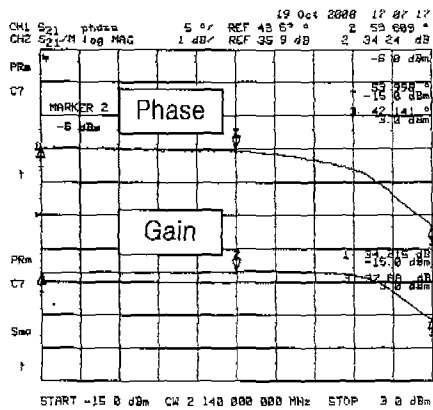


그림 4. 대전력 증폭기의 CW Power Sweep 특성
Fig. 4. CW power sweep characteristics of the fabricated HPA.

체 제작하여 사용하였고 트랜지스터 Line-up은 Watkin-Jonson사에 AH1과 Fujitsu사에 FLL171ME와 FLL105 MK 순으로 연결하였다. 동작 주파수 대역은 IMT-2000 기지국 송신 주파수 대역이다. 그림 3은 측정된 대전력 증폭기의 이득 특성을 나타내고 동작주파수 대역폭 60 MHz에서 34.6 ± 0.1 dB을 얻었다. 그림 4는 Power sweep을 통한 대전력 증폭기의 이득/위상 비선형 특성이고, P_{1dB} 는 35.4 dBm이다. 그림 5는 유도된 Carrier Complex Power Series에 입력 신호로 2-tone을 인가한 후 FFT(Fast Fourier Transform)를 취한 비선형 주파수 응답 특성을 나타내고 있다.

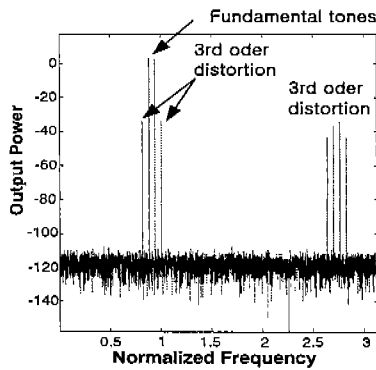


그림 5. 비선형 주파수 응답 특성
Fig. 5. Simulation result of the modeled HPA using FFT.

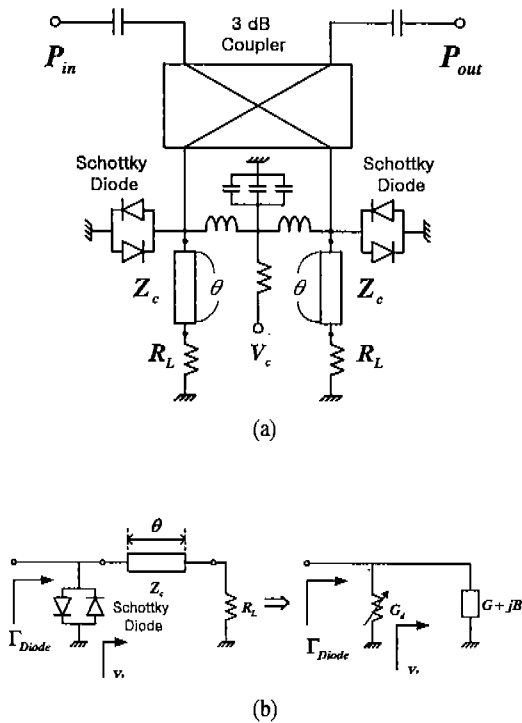


그림 6. (a) 역 왜곡 신호발생기의 세부회로, (b) 역 왜곡 신호 발생기에 등가회로
Fig. 6. (a) The detail circuit of IDSG, (b) The equivalent circuit of IDSG.

본 논문에서 제안하는 역왜곡 신호 발생기는 그림 6(a)와 같다. 역왜곡 신호발생기에 사용된 다이오드는 HP사에 HSMS-2852이고, 3 dB 하이브리드

결합기는 Anaren사의 JX503을 사용하였다. 동작원리는 입력 전력 레벨이 적을 때는 다이오드의 동적 저항이 커져서 Γ_{diode} 가 적은 값을 가지고 신호들이 종단 저항 R_L 에서 반사가 되나, 입력 전력 레벨이 높을 때는 다이오드의 동적 저항이 작아져서 Γ_{diode} 값이 커지게 되면서 종단 저항 R_L 뿐만 아니라 다이오드에서도 신호 반사가 일어나게 되어 신호들이 입력이 될 때 상대적으로 이득이 증가하고 위상은 앞서게 되는 역왜곡 신호가 발생하게 된다. 이 역 왜곡 신호 발생기의 등가회로로 나타내어 분석한 것이 그림 6(b) 이다. 다이오드에서 바라본 입력 어드미턴스 및 반사 계수를 구하면 식 (13), (14), (15)와 같다.

$$Y_{in} = G_d + G_L + jB \quad (13)$$

$$MAG(\Gamma_{Diode}) = \sqrt{\frac{(G_o - G_d - G_L)^2 + B^2}{(G_o + G_d + G_L)^2 + B^2}} \quad (14)$$

$$ANG(\Gamma_{Diode}) = \tan^{-1}\left(\frac{G_o - G_d - G_L}{-B}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{G_o + G_d + G_L}{B}\right) \quad (15)$$

이때 Inverse Carrier Complex Power Series 조건을 충족하는 역왜곡 신호를 발생하기 위해서는 종단 저항 R_L , 전송선로의 특성 임피던스 Z_c , 전송선로의 전기각 θ 에 의해서 조합으로 계산으로 추출된 Inverse Carrier Power Series 특성이 나오도록 조정하였다. 역왜곡 신호 발생기의 절대적 이득이 1보다

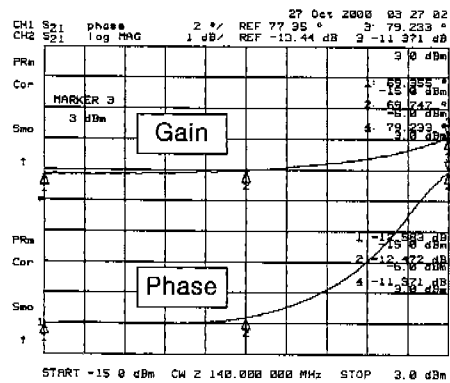
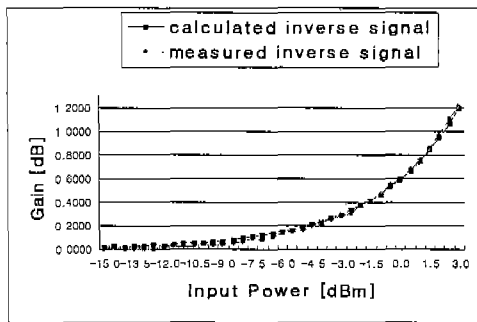


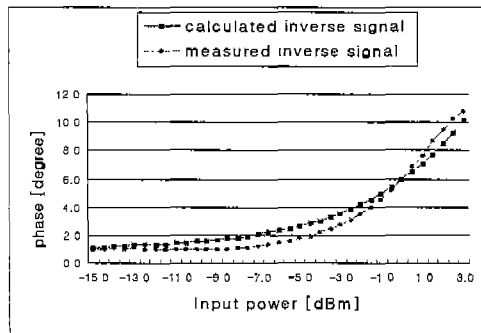
그림 7. 제작된 IDSG의 특성
Fig. 7. The characteristics of the fabricated IDSG.

작으므로 여기에 가변 감쇠기와 소신호 증폭기를 부착하여 작은 신호 레벨에서 이득이 1이 되게끔 조정하였다. 그림 7은 역왜곡 신호발생기의 측정결과를 보여주고 있다. 그림 8은 계산된 역왜곡 신호와 측정된 역왜곡 신호 특성을 비교해서 나타내고 있다.

개선정도 확인은 CW Power Sweep을 통한 방법과 2-tone 테스트 방법이 있는데, CW Power Sweep을 통한 개선 후 특성은 그림 9에 나타내었고, 그림



- (a) 계산된 역왜곡 신호와 제작된 역왜곡 신호 발생기의 이득 특성
- (a) The gain characteristics of the calculated inverse distortion signal and the fabricated IDSG.



- (b) 계산된 역왜곡 신호와 제작된 역왜곡 신호 발생기의 위상 특성
- (b) The phase characteristics of the calculated inverse distortion signal and the fabricated IDSG.

그림 8. 계산된 역왜곡 신호와 제작된 역왜곡 신호 발생기 특성
 Fig. 8. The characteristics of the calculated inverse distortion signal and the fabricated IDSG.

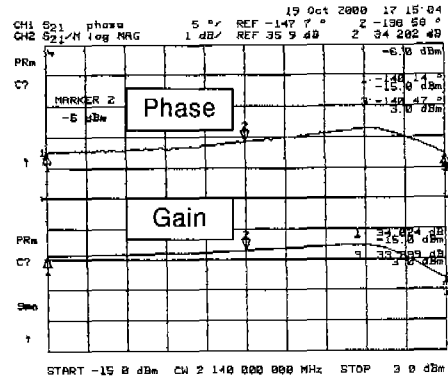


그림 9. 전치왜곡기가 부착된 대전력 증폭기의 CW Power Sweep 특성

Fig. 9. The CW power sweep characteristics of HPA with predistortor.

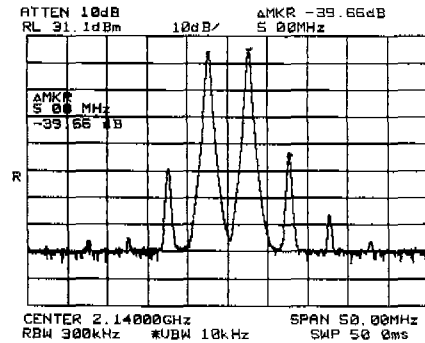


그림 10. 전치왜곡기가 부착되지 않은 대전력 증폭기 특성(@ $P_{out} = 25.43$ dBm/tone)

Fig. 10. The output characteristics of HPA without predistortor(@ $P_{out} = 25.43$ dBm/tone).

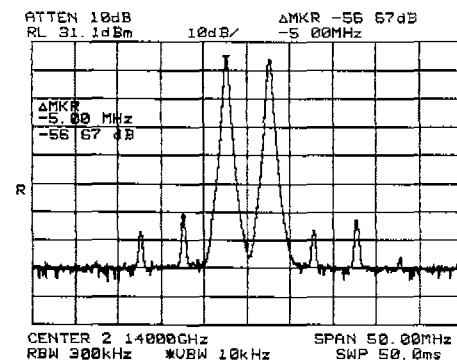


그림 11. 전치왜곡기가 부착된 대전력 증폭기 특성 (@ $P_{out} = 25.43$ dBm/tone)

Fig. 11. The output characteristics of HPA with predistortor(@ $P_{out} = 25.43$ dBm/tone).

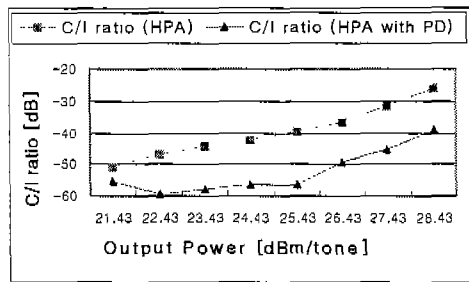


그림 12. 본 논문에서 제시하는 전치왜곡기에 의한 대전력 증폭기의 C/I 개선효과
 Fig. 12. The improvement characteristics of the proposed predistortor.

4와 비교했을 때 18 dB의 전력 범위에서 1.33 dB Gain compression이 0.74 dB Gain compression로 개선되고 위상 변화량은 11.85°에서 4° 미만으로 개선됨을 보이고 있다. 대표적인 2-tone 테스트 측정 결과는 그림 10과 11에 나타내었는데 2-tone 신호 주파수는 각각 2.1375 GHz와 2.1425 GHz로 주파수 간격이 5 MHz이고 출력 전력이 25.43 dBm/tonel일 때 17 dB의 개선효과를 보이고 있다. 그림 12는 출력 전력이 28.43~21.43 dBm/tonel 일 때 13.34~5 dB의 개선효과를 보이고 있다. 이때 전치 왜곡기의 모든 세부 회로는 제어 (전압)신호가 없이 고정된 인가 전압에서 구현됨으로써 입력 전력 변화에 자동적으로 선형화 동작이 이루어지고 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 대전력 증폭기의 비선형 전달 특성을 크기와 위상에 대해 동시성을 갖는 새로운 형태의 carrier complex power series로 표현하고, 그 계수를 구하는 방법을 제시하였으며, 전력 증폭기를 선형화 하기 위한 전치 왜곡기의 비선형 전달 특성인 inverse carrier complex power series를 제시하고 그 계수를 구하는 방법을 제시하였다. 본 논문의 타당성을 보이기 위해 IMT-2000 기지국 송신대역 주

파수에서 대전력 증폭기를 제작하였는데 제작된 증폭기의 이득은 34.6 dB이고 P_{1dB} 가 35.4 dBm이다. Inverse Carrier Complex Power Series를 이용한 전치 왜곡기를 제작하고 대전력 증폭기에 부착하여 2-tone 출력($\Delta f = 5$ MHz)이 25.43 dBm/tonel일 때 17 dB의 개선 특성을 얻었다. 본 논문에서는 Carrier Complex Power Series와 Inverse Carrier Complex Power Series 모두 간략화 된 형태로 제시하였으나 더 높은 차수의 계수에 대한 식을 유도한다면 정확한 전력 증폭기의 비선형 특성 모델링과 선형화 개선 특성이 기대할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] Yong Chae Jeong, "A design of predistortion linearizer by individual order control of intermodulation distortion signals", *Dissertation*, Sogang- Univ., 1996.
- [2] Nick Pothecary, *Feedforward Linear Power Amplifiers*, Artech House, 1999
- [3] Seng-Woon Chen, "Effects of Nonlinear Distortion on CDMA Communication Systems", *IEEE Trans on Microwave Theory and Tech.*, vol. 44, no. 12, Dec. 1996.
- [4] W. W. Lee, "Design of Predistortion Linearizer using diodes", *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 23, no. 1, Dec. 1992.
- [5] Tri T. Ha, *Solid-State Microwave Amplifier Design*, John Wiley & Sons, 1981, pp.202-246.
- [6] Seung-June Yi, "Baseband simulatin of RF power amplifiers using carrier vector transfer characteristics", *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 21, no.1 May 1998.
- [7] Noriharu Suematsu, "Transfer Characteristic of IM3 Relative Phase for a GaAs FET Amplifier", *IEEE Trans on Microwave Theory and Tech.*, vol. 45, no. 12, Dec. 1997.

윤 상 영



1996년 2월: 전북산업대학교 전자
공학과(공학사)

2001년 2월: 전북대학교 정보통신
공학과(공학석사)

2001년 1월~현재: 세원텔레텍(주)
부설연구소 연구원

[주 관심분야] 초고주파 증폭기 설
계 및 선형화, 초고주파 회로 설계

정 용 채



1989년 2월: 서강대학교 전자공학
과(공학사)

1991년 2월: 서강대학교 전자공학
과(공학석사)

1996년 8월: 서강대학교 전자공학
과(공학박사)

1991년 2월~1998년 2월: 삼성전
자 정보통신본부 선임연구원
1998년 3월~현재: 전북대학교 전자정보공학부 조교수,
전북대학교 정보통신연구소 연구원

[주 관심분야] RF 및 Microwave 회로 해석 및 설계