

Carrier Complex Power Series를 이용한 K-대역 위성 TWTA용 반사형 다이오드 구조의 전치왜곡 선형화기

K-band Predistortive Linearizer of Reflective Diode Structure for Satellite TWTA Using Carrier Complex Power Series

정 희 영 · 정 용 채 · 염 인 복*

Hee-Young Jeong · Yong-Chae Jeong · In-Bok Yom*

요 약

본 논문은 진행파관 증폭기의 비선형성을 줄이기 위해 새로운 전치 왜곡 방법을 제안하였다. 진행파관 증폭기의 비선형 전달 특성은 carrier complex power series를 이용하여 해석하였고, 이를 선형화하기 위한 전치 왜곡 선형화기의 전달 특성을 inverse complex power series로 해석하였다. Schottky 다이오드와 전송 선로 종단에 부착된 부하 저항을 반사형 구조로 만듦으로 전치 왜곡기의 비선형 왜곡 특성을 얻을 수 있었다. 제안된 선형화기를 적용하여 K-대역용 진행파관 증폭기의 AM-to-AM 및 AM-to-PM 특성을 각각 -5.825 dB과 -37.321°에서 0.786 dB과 6.742°로 개선시켰다.

Abstract

In this paper, a new predistortion method to reduce nonlinearity of a traveling wave tube amplifiers(TWTAs) is proposed. Nonlinear transfer characteristics of TWTA are analyzed using carrier complex power series. Inverse carrier complex power series of a predistortion linearizer to linearize TWTA are also proposed. The inverse nonlinear distortion characteristics of predistorter can be realized with reflective structure that is composed of Schottky diode and resistive-terminated transmission line. The AM-to-AM and the AM-to-PM characteristics for TWTA by proposed predistortive linearizer on K-band were improved from -5.825 dB and -37.321° to 0.786 dB and 6.742°, respectively.

Key words : Predistorter, Schottky Diode, AM-to-AM, AM-to-PM, Satellite, TWTA

I. 서 론

위성 통신 시스템에서 양질의 통신을 위해 고출력 마이크로파 전력 증폭기(HPA)가 요구된다. 특히, 위성 통신 시스템에서는 높은 출력 레벨을 얻기 위해 주로 진행파관 증폭기(Traveling Wave Tube Amplifier: TWTA)를 사용하고 있다^[1]. 고출력 전력 증폭 소자는 최대 전력 레벨을 얻기 위해 포화 영역 부근에서 동작하게 되어 입력 신호 진폭 대비 출력의 진

폭(AM-to-AM)과 위상(AM-to-PM)의 비선형 특성이 현저하게 나타나게 된다. 뿐만 아니라, 고출력 전력 증폭기에 2개 이상의 반송파가 입력되어 공동 증폭될 경우 비선형적인 특성으로 인해 혼변조 성분들이 나타나게 되며, 이는 높은 효율과 선형 증폭이 요구되는 위성 통신 시스템의 성능을 저하시키는 주요 요인이 된다. 이러한 고출력 전력 증폭기의 비선형 전달 특성을 개선하는 방법으로 여러 가지 방법들이 이미 연구되어 왔으며, 그 대표적인 방법으로는 입

전북대학교 정보통신공학과(Department of Information & Communication Engineering, Chonbuk National University)

*한국전자통신연구원 통신위성 RF기술연구팀(Communications Satellite RF Technology Team, ETRI)

· 논문 번호 : 20050428-050

· 수정완료일자 : 2005년 6월 18일

력 전력 back-off, 부كه환(feedback) 기법, feedforward, 전치 왜곡(predistortion) 기법 등이 있다¹¹⁻¹⁴⁾. 여기서 고출력 전력 증폭기에 대해 수 dB back-off 하여 선형 영역에서 동작하도록 하면 혼변조 잡음은 줄일 수 있으나, 출력 전력 레벨이 낮아지며, 선형성을 유지하면서 높은 출력을 얻기 위해서는 여러 개의 전력 증폭기를 병렬로 접속해야 하므로 용적이 커지고 효율이 낮아지며 큰 용량의 전원 공급기가 요구됨으로써 소형, 경량한 구조의 특성이 요구되는 위성 증계기에 적합하지 않다. 따라서 본 논문에서 제시하는 선형화 방법은 소형, 경량의 구조를 충족시키며, TWTA의 비선형 전달 특성(AM-to-AM, AM-to-PM)을 효과적으로 선형화하는 기법인 전치 왜곡 선형화 방법을 제시하고자 한다²⁾.

마이크로웨이브 대역에서의 전치 왜곡 방법에는 전치 왜곡 혼변조 신호 발생기를 이용하는 기법, 반사형 구조의 다이오드를 이용한 기법, MESFET의 비선형성을 이용한 기법 등이 이미 알려져 있다. 여기서 전치 왜곡 혼변조 신호 발생기, 위상 변환기, 전력 분배기 및 합성기 그리고 제어 회로로 구성되어진 전치 왜곡 신호 발생 방법은 적응형 제어 및 회로의 규모가 커지는 단점을 가지고 있다. 또한 기존에 다이오드나 MESFET를 이용하는 기법은 신호의 동적 영역(dynamic range)에서 고른 임피던스 정합 및 선형화 효과를 얻는 것이 어렵다는 단점이 있다.

본 논문에서는 carrier complex power series(CCPS) 해석법을 이용하여 일반적인 고출력 전력 증폭기의 AM-to-AM 및 AM-to-PM의 비선형 특성을 분석하였다. 이를 토대로 전치 왜곡 선형화기의 비선형 전달 특성을 inverse carrier complex power series(ICCPS)를 통해 분석하였다. 선형화 대상 고출력 증폭기인 TWTA는 일반적으로 고체 반도체 소자 증폭기(Solid State Power Amplifiers: SSPA)보다 높은 포화 영역을 가지기 때문에 1 dB 압축점까지의 비선형 전달 특성을 분석하는 CCPS를 5.8 dB 압축점까지 확장 해석(extrapolation) 하였다. 이렇게 분석된 CCPS를 통해 입력 신호의 동적 레벨에 따른 TWTA의 전치 왜곡 비선형 전달 특성(AM-to-AM, AM-to-PM)들을 추출해 낼 수 있었다. 이를 토대로 분석된 전치 왜곡기의 특성은 anti-parallel Schottky 다이오드와 전송 선로 종단에 부착된 부하 저항의 반사 특성을 이용하여 구

현할 수 있다. 입력 신호의 동적 영역에 따른 Schottky 다이오드의 동적 임피던스 변화 특성을 이용하였고, 이를 전송 선로 종단에 부착된 부하 저항과 결합시킴으로 ICCPS 전달 특성을 만족하도록 하였다.

제안된 전치 왜곡기는 좋은 입출력 정합 특성을 얻기 위해 3 dB 하이브리드를 이용한 반사형 구조를 채택함으로써 별도의 아이소레이터(isolator)를 장착하지 않기 때문에 회로 구성이 간단하고 신뢰도를 높일 수 있다. 또한 환경 조건 변화에 따른 선형화 대상 TWTA의 비선형 전달 특성 변화를 Schottky 다이오드의 바이어스 조절로 보완할 수 있다. 따라서 추가적인 제어 회로가 없이 자동으로 TWTA를 선형화할 수 있어 위성 증계기용 전치 왜곡 선형화기에 적합하다는 장점을 지니고 있다.

II. Carrier Complex Power Series 해석

비선형 특성을 갖는 2단자 망이 기억성이 없고, 신호가 제한적인 협대역 신호라면 출력 신호는 입력 신호의 power series로 표현할 수 있다. 그러나 전통적인 power series는 비선형 회로의 AM-to-AM 특성만 표현할 수 있다. 크기 및 위상을 갖는 입력 신호와 복소 이득 계수(complex gain coefficient)로 식 (1)과 같이 고출력 증폭기의 출력 신호를 표현할 수 있다. 따라서 전통적인 power series에 비해 본 논문에서 제안하는 power series는 AM-to-AM 특성과 AM-to-PM 특성을 동시에 포함하고 있다. 이러한 power series를 본 논문에서는 CCPS라고 일컫는다.

$$v_{os} = f_1 v_{is} + f_3 v_{is}^3 + f_5 v_{is}^5 + \dots \quad (1)$$

여기서 $f_1 = M_1 e^{j\theta_1}$, $v_{is} = A_1 e^{j\omega t}$ 이고 f_1 은 선형 복소 이득을 의미하며, 첨자 s 는 전압 신호의 페이저 형태를 표현한 것이다. 비선형성이 비교적 약한 경우, 출력 전압 관계식은 첫 번째와 두 번째 항으로 간략화하여 표현할 수 있다. 그리고 입력 신호 전압의 위상은 입력 신호의 동적 범위에 대해 $\theta_1 = 0$ 으로 영점 조정(calibration)되어 있다고 가정하면, 식 (1)은 다음과 같이 간략화 되어질 수 있다.

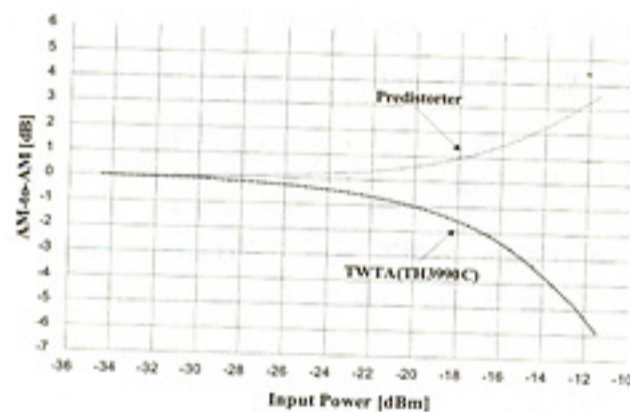
$$\begin{aligned} v_{os} &= f_1 v_{is} + f_3 v_{is}^3 \\ &= f_1 A_1 + f_3 A_1^3 \end{aligned} \quad (2)$$

전치 왜곡된 TWTA가 선형 복소 이득을 가진다면, 전치 왜곡기의 선형 복소 이득 계수는 1차 계수만으로 나타낼 수 있으며, 식 (10)의 2차 항은 영의 값을 가질 것이다. 따라서 전치왜곡 신호의 3차 복소 이득 계수는 식 (11)과 같이 구할 수 있으며, 전치 왜곡기의 복소 전달 함수는 식 (12)와 같이 표현할 수 있다.

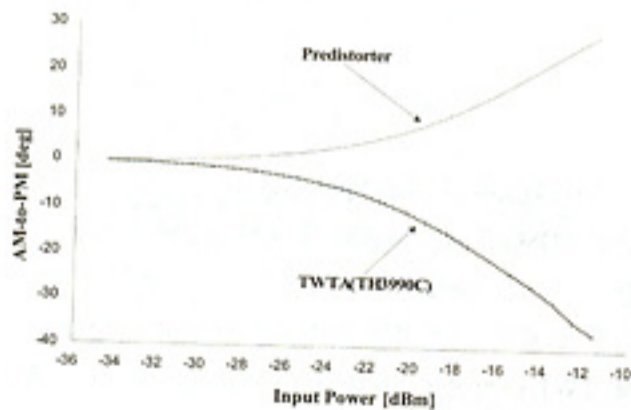
$$g_3 = -\frac{f_3}{f_1} g_1^3 = -\frac{f_3}{f_1} e^{j3\theta_1} \quad (11)$$

$$v_{in} = v_{in} - \left(\frac{f_3}{f_1}\right) v_{in}^3 e^{j3\theta_1} \quad (12)$$

식 (11)은 TWTA의 CCPS로부터 전치 왜곡 선형화기의 ICCPS를 얻을 수 있음을 보인다. 원칙적으로 TWTA의 비선형 전달함수의 획득이 전치왜곡기 설계의 선결 과제임을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 측정된 TWTA의 비선형 전달 함수를 적용하여



(a)



(b)

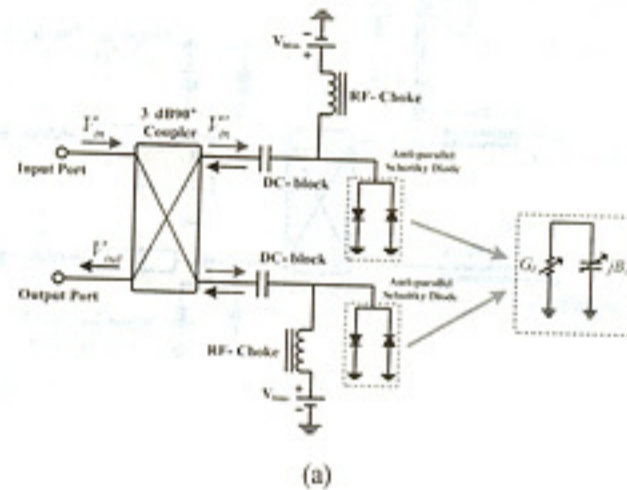
그림 3. MATLAB을 이용한 전치 왜곡기의 계산된 (a) AM-to-AM 및 (b) AM-to-PM 전달 특성
Fig. 3. The calculated (a) AM-to-AM and (b) AM-to-PM transfer characteristic of the proposed predistorter using MATLAB.

식 (11)과 (12)를 통해 얻고자 하는 전치 왜곡기의 출력 신호를 MATLAB을 이용하여 그림 3에서와 같이 얻었다. 이렇게 얻어진 결과를 통해 제안된 전치 왜곡기 설계 및 제작에 응용하였다.

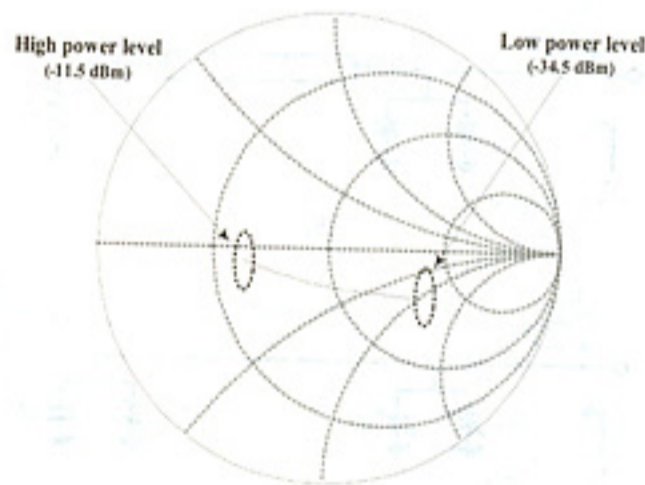
III. Schottky 다이오드의 동적 콘덕턴스를 이용한 반사형 구조의 전치 왜곡기

Schottky 다이오드는 입력 신호의 레벨에 따라 변화하는 동적 콘덕턴스로 표현할 수 있는데, 정상적으로 Schottky 다이오드는 입력 신호의 레벨이 낮을 때는 개방 상태가 되고, 클 경우에는 단락 상태로 표현할 수 있다.

그림 4는 Schottky 다이오드의 동적 어드미턴스



(a)



Input power versus reflection coefficient

(b)

그림 4. Schottky 다이오드의 동적 어드미턴스를 추출하기 위한 (a) 블럭도, (b) 시뮬레이션 결과
Fig. 4. (a) Schematic diagram to extract Schottky diode dynamic admittance, (b) the simulation result.

추출을 위한 블럭도와 그 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. Schottky 다이오드의 Spice 모델을 적용하고, 입력 신호 레벨에 따른 전달계수를 구함으로 Schottky 다이오드의 등가 어드미턴스를 얻을 수 있다. 사용된 Schottky 다이오드는 Agilent사의 HSCH-9251이다. 그림 5는 제안된 전치왜곡 신호발생기(Predistortion Signal Generator: PDSG)의 블럭도와 결합단 또는 전달단의 회로와 그 등가회로를 보여주고 있다. 종단 저항 값이 50 Ω보다 작다고 가정하면, 정상적으로 입력 전압 신호(V_{in})의 레벨이 낮을 때 다이오드의 동적 임피던스는 거의 개방 상태가 되어,

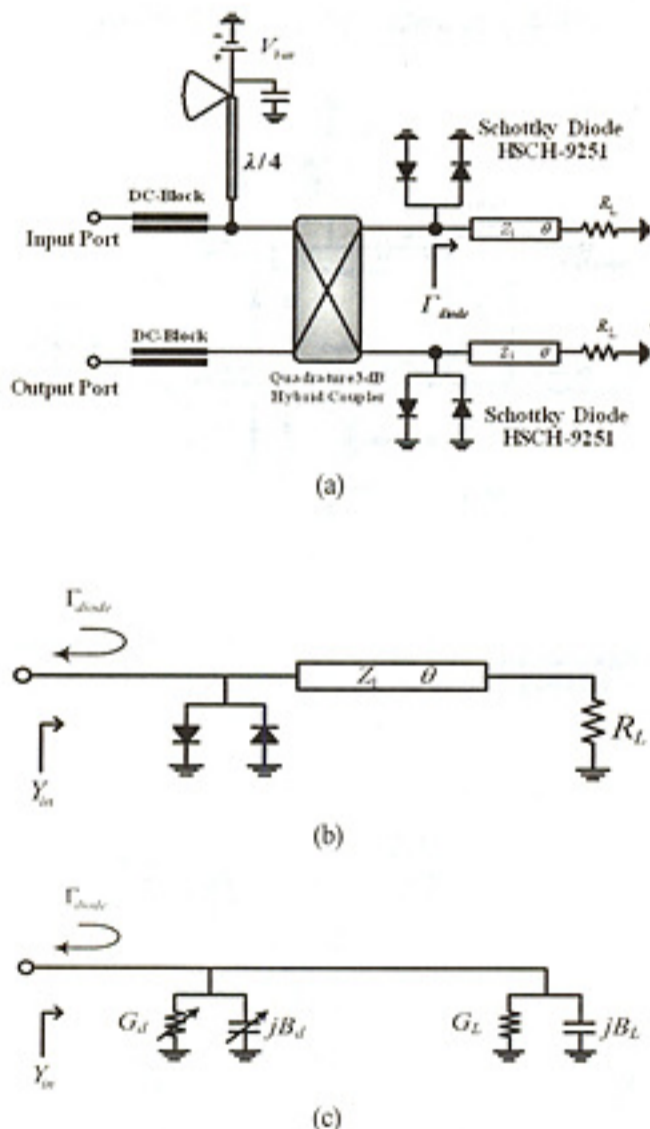


그림 5. 제안된 PDSG의 (a) 회로도, (b) 결합단 및 전달단 회로, (c) 결합단 및 전달단 등가회로
 Fig. 5. (a) The schematic diagram, (b) the coupling and the transfer port circuit, (c) the coupling and the transfer port equivalent circuit of the proposed PDSG.

종단 저항에서 반사된 신호는 출력 단자로 합성되어 진다. 반면 입력 전압 신호(V_{in})의 레벨이 높으면 다이오드의 동적 임피던스가 작아져 거의 단락 상태가 되며, 낮은 레벨의 입력 전압 신호보다 높은 반사비를 얻을 수 있다. 이러한 PDSG의 전달 특성은 작은 신호 레벨인 경우보다 큰 신호 레벨인 경우에 더 큰 전달 이득을 가지며, 상대적으로 위상이 선행되는 특성을 얻을 수 있다. 따라서 입력 전압 레벨의 변화에 따라 TWTA의 비선형 특성과 역이 되는 AM-to-AM과 AM-to-PM 특성을 각각 얻을 수 있다. 본 논문에서 제안된 PDSG는 반사형 구조를 이루고 있으며, 별도의 정합 회로가 없이 좋은 반사 특성을 얻을 수 있는 장점을 가지고 있다. 그림 5에서와 같이 Schottky 다이오드의 등가 회로는 등가 컨덕턴스(G_d)와 등가 서셉턴스(B_d)로 구성되어진다. 그리고 다이오드와 병렬로 접속된 전송 선로와 종단 부하 저항은 등가 컨덕턴스(G_L)와 등가 서셉턴스(B_L)로 바꾸어 생각할 수 있다. 3 dB 결합기의 결합단 및 전달단에서의 반사 계수(Γ_{diode})는 다음과 같이 주어진다.

$$\Gamma_{diode} = \frac{(G_0 - G_d - G_L) - j(B_d + B_L)}{(G_0 + G_d + G_L) + j(B_d + B_L)} \quad (13)$$

식 (13)에서 얻어진 반사 계수(Γ_{diode}) 식 (14)와 같이 크기와 위상의 관계식을 유도할 수 있다.

$$|\Gamma_{diode}| = \sqrt{\frac{(G_0 - G_d - G_L)^2 + (B_d + B_L)^2}{(G_0 + G_d + G_L)^2 + (B_d + B_L)^2}}$$

$$\angle \Gamma_{diode} = \tan^{-1} \left[\frac{-(B_d + B_L)}{G_0 - G_d - G_L} \right] - \tan^{-1} \left[\frac{(B_d + B_L)}{G_0 + G_d + G_L} \right] \quad (14)$$

식 (14)로부터 파라미터 G_d , G_L , B_d , B_L 를 통해 제안된 PDSG의 AM-to-AM 및 AM-to-PM 특성을 제어할 수 있다. 따라서 다이오드의 동적 어드미턴스와 전송 선로의 전기적인 특성, 종단 부하 저항값을 통해 TWTA 비선형 특성을 선형화 할 수 있는 AM-to-AM 및 AM-to-PM 특성을 얻을 수 있다.

IV. 시뮬레이션 및 실험 결과

본 논문에서 제안된 PDSG 회로의 타당성을 보여주기 위해 설계된 PDSG와 측정된 MMIC 구동 증폭

기 및 TWTA의 비선형 특성을 시뮬레이션한 결과는 Thomson의 모델과 비교하여 1 GHz까지의 성능을 가지고 있다. 이는 anti-pa 모델을 이용하여 ($\epsilon_r=9.9$, h 의 공정을 MMIC 구조를 이용하여 18 dB의 이득

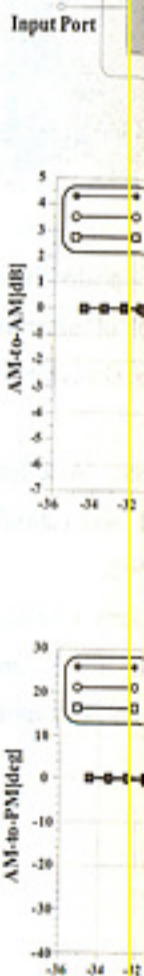


그림 6. 제안된 PDSG의 (a) AM-to-AM 특성, (b) AM-to-PM 특성
 Fig. 6. (a) Schematic diagram, (b) characteristics of the proposed PDSG.

기 및 TWTA의 전기적인 특성으로부터 시스템 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에 사용된 TWTA는 Thomson사의 TH3990C이고, 19.8 GHz에서 20.2 GHz까지의 동작 주파수 대역에서 67.7 dB의 이득 특성을 가지고 있다. PDSG에 사용된 Schottky 다이오드는 anti-parallel 구조로 Agilent사의 HSCH-9251 모델을 이용하였다. 제작에 사용된 기판은 Alumina ($\epsilon_r=9.9$, $h=15$ mil)를 사용하였고, 국내 CERANICS사의 공정을 이용하여 실제 제작하였다.

MMIC 구동 증폭기는 한국전자통신연구원 공정을 이용하여 제작되었으며, 동작 주파수 대역에서 18 dB의 이득 특성을 가지고 P_{1dB} 은 12 dBm의 특성

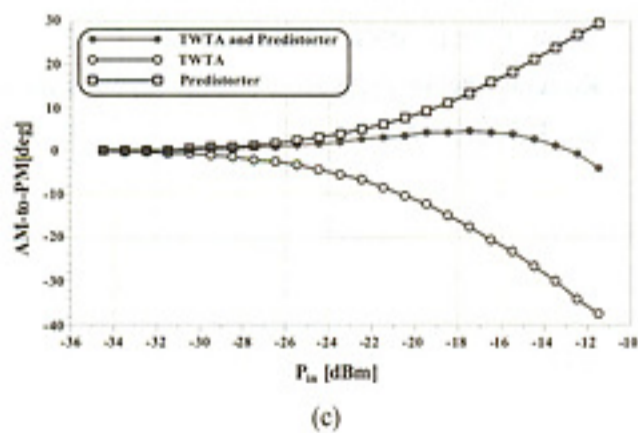
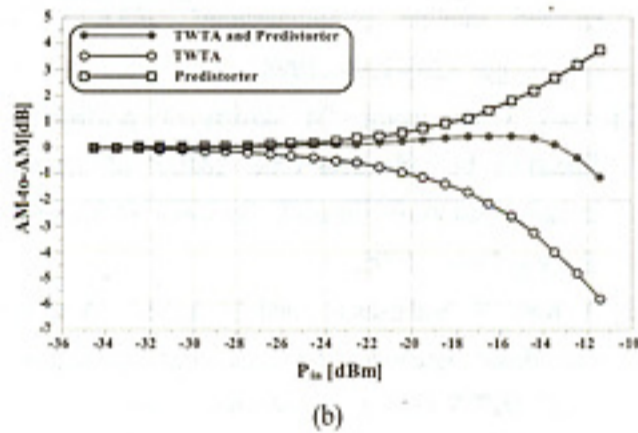
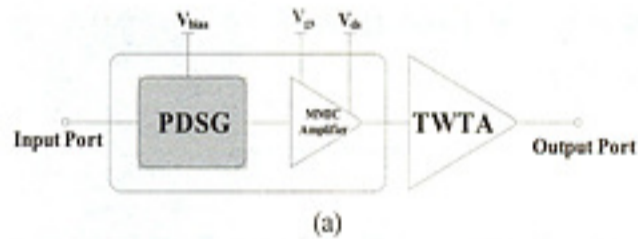


그림 6. 제안된 선형화기의 (a) 시뮬레이션 라인업, (b) AM-to-AM 특성, (c) AM-to-PM 특성
Fig. 6. (a) Simulation line-up, (b) AM-to-AM characteristics, (c) AM-to-PM characteristics.

을 가지고 있다. 특히, V_p 의 조절을 통해 이득을 제어함으로써 전치 왜곡 선형화기의 삽입 손실을 보상할 수 있다. 그림 6은 제안된 전치 왜곡 선형화기의 시뮬레이션 라인업 및 그 결과를 보여주고 있다. 24 dB의 동적 입력 전력 범위에서 TWTA의 측정된 AM-to-AM 및 AM-to-PM 비선형 특성이 각각 -5.825 dB과 -37.321° 이며, 이러한 TWTA의 비선형 특성을 선형화하기 위해 전치 왜곡 선형화기를 적용하여 역의 AM-to-AM 및 AM-to-PM 특성이 각각 3.784 dB과 29.312° 이다. 그리고 TWTA의 최대 출력 레벨에 선형화 동작 특성을 얻기 때문에 전치 왜곡 선형화기의 삽입 손실은 -4.76 dB을 갖는다. 따라서 그림 6(a)와 같이 전치 왜곡 선형화기와 TWTA의 연동 시뮬레이션을 통해 -5.825 dB과 -37.321° 의 AM-to-AM 및 AM-to-PM 특성을 각각 0.74 dB과 3.686°의 개선된 결과를 얻을 수 있었다.

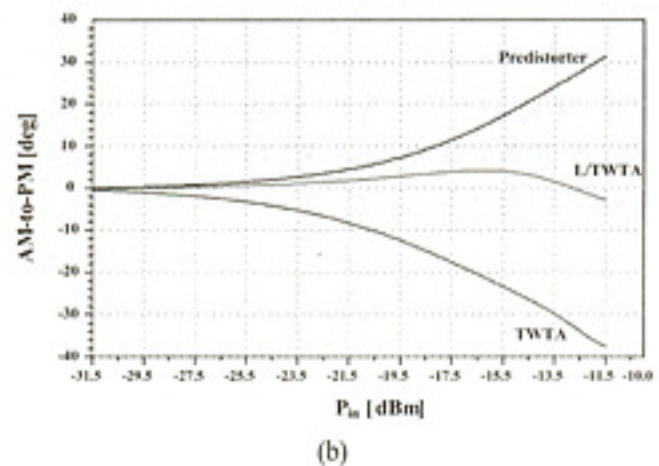
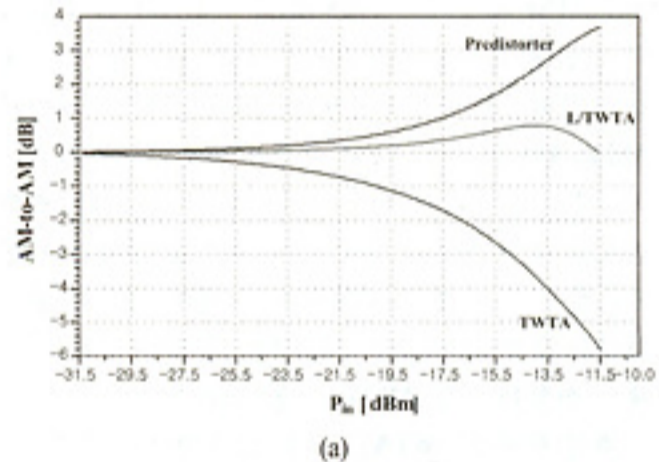


그림 7. 선형화된 TWTA의 측정된 (a) AM-to-AM 특성, (b) AM-to-PM 특성
Fig. 7. The measured (a) AM-to-AM, (b) AM-to-PM characteristics of linearizing TWTA.

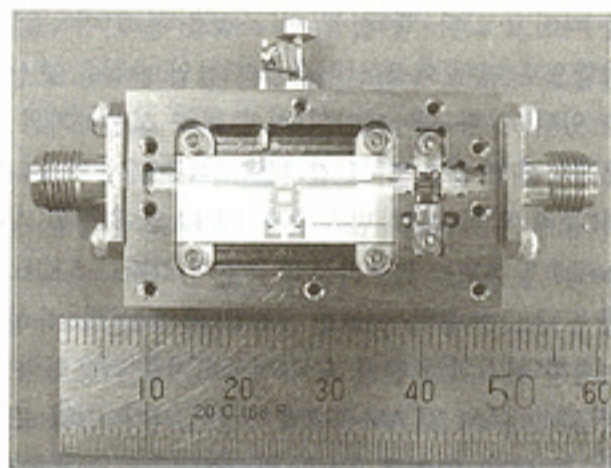


그림 8. 제작된 전치 왜곡기의 사진
Fig. 8. Photograph of the fabricated predistorter.

그림 7은 시뮬레이션 결과를 토대로 제작된 전치 왜곡 선형화기와 TWTA의 연동 실험을 통해 얻어진 AM-to-AM 및 AM-to-PM의 측정 결과를 보여주고 있다. 이 결과를 통해 알 수 있듯이, AM-to-AM 및 AM-to-PM 특성이 -5.825 dB과 -37.321° 인 TWTA의 비선형 특성을 선형화하기 위해 제안된 전치 왜곡 선형화기를 적용하여 0.786 dB과 6.742° 의 개선된 AM-to-AM 및 AM-to-PM 특성을 얻었다. 이 결과는 시뮬레이션 결과와 거의 유사함을 알 수 있다. 또한 신호의 동적 영역에 대한 전달 특성을 선형화 하였으므로 신호 레벨의 변화에 따른 제어 장치가 필요 없다는 장점을 가진다. 그림 8은 실제 제작된 전치 왜곡 선형화기 및 MMIC 구동 증폭기이다.

위성 탑재용 TWTA는 매우 넓은 동작 온도에 노출되어 있어 동작 특성의 변화를 일으킬 개연성이 있다. 본 논문에서 제안한 전치 왜곡 선형화기는 PDSG의 V_{bias} 조절을 통해 AM-to-AM 및 AM-to-PM 특성을 변화시킬 수 있어 TWTA의 특성 변화에 적응하여 선형성을 유지할 수 있다.

V. 결 론

제안된 확장 CCPS 분석법을 통해 TWTA의 비선형 전달 특성을 분석하였고, 이를 토대로 전치 왜곡 선형화기의 전달 함수 ICCPS를 추출하는데 이용되었다. 이렇게 추출된 전치 왜곡 선형화기의 역 AM-to-AM 및 AM-to-PM 전달 특성을 새로운 반사형 anti-parallel 구조의 Schottky 다이오드와 부하 저항으로 종단된 전송 선로를 이용한 PDSG를 설계했으며, 제작된 전치 왜곡 선형화기의 역 AM-to-AM 및 AM-to-PM 특성을 통해 TWTA의 비선형 전달 특성을 효과적으로 보상하였음을 실험 결과로부터 확인할 수 있다. 동시에 소형, 경량한 구조가 요구되는 위성 통신 중계기의 적용에 적합하다는 장점을 가지고 있다.

참 고 문 헌

- [1] W. -M. Zhang, C. Yuen, "A broadband linearizer for ka-band satellite communication", *IEEE MTT-S Digest*, pp. 1203-1206, 1998.
- [2] Yong Chae Jeong, "A design of predistortion linearizer by individual order control of intermodulation distortion signals", *Doctorial Dissertation*, Sogang Univ., 1996.
- [3] A. Katz, R. Sudarsanam, and D. Aubert, "A reflective diode linearizer for spacecraft application", *IEEE MTT-S Digest*, pp. 661-664, 1985.
- [4] Allen Katz, Shabbir Mochalla, and Jerry Klatskin, "Passive FET MMIC linearizers for C, X and Ku-band satellite application", *IEEE MTT-S Digest*, pp. 353-356, 1993.

정 회



정 용



정보통신
1998년 3월
전북대학교
[주 관심분야

Carrier Complex Power Series를 이용한 K-대역 위성 TWTA용 반사형 다이오드 구조의 전치왜곡 선형화기

정 회 영



2004년 2월: 금오공과대학교 전자통신공학과 (공학사)
2004년 8월~현재: 전북대학교 정보통신공학과 석사과정
[주 관심분야] Linearizer, HPA, RFIC High Efficiency Amplifier, 위성통신 시스템

염 인 복



1990년 2월: 한양대학교 전자공학과 (공학사)
2004년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학석사)
1992년 9월~1995년 5월: 무궁화 위성 현장교육 참여(영국 Matra Marconi사 등)
1990년 2월~현재: 한국전자통신연구원 통신위성 RF 기술 연구팀 선임연구원
[주 관심분야] 위성중계기, 위성 안테나, 위성 중계기 부품

정 용 채



1989년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학사)
1991년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학석사)
1996년 8월: 서강대학교 전자공학과 (공학박사)
1991년 2월~1998년 2월: 삼성전자 정보통신본부 선임연구원
1998년 3월~현재: 전북대학교 전자정보공학부 부교수 및 전북대학교 IDEC WG 책임교수
[주 관심분야] RF 및 Microwave 회로 해석 및 설계