

Carrier Complex Power Series를 이용한 K-대역 위성 TWTA용 Analog 전치왜곡 선형화기

정희영^o, 박상근, 김수태, 정용채, *염인복

전북대학교 정보통신공학과 및 IDEC WG, *한국전자통신연구원 통신위성RF기술연구팀

전화: (063) 270-2458 / 팩스: (063) 270-2461

K-Band Analog Predistortive Linearizer using Carrier Complex Power Series for the Satellite TWTAs

Hee-Young Jeong^o, Sang-Keun Park, Su-Tae Kim, Yong-Chae Jeong, *In-Bok Yom

Dept. of Information & Communication Engineering, IDEC WG, Chonbuk National Univ.,

*Electronics and Telecommunication Research Institute

E-mail: hyjeong@chonbuk.ac.kr

Abstract

We propose the new predistortion technique which can reduce nonlinearity of the traveling wave tube amplifiers (TWTAs) are proposed. Nonlinear transfer characteristics of high power amplifier (HPA) are analyzed using carrier complex power series. Inverse complex power series of a predistortion linearizer are also proposed. The inverse nonlinear distortion characteristics can be obtained with reflective schottky diode and resistive terminated transmission line. The measured improvements of AM-to-AM and AM-to-PM characteristics for TWTA using the proposed linearizer on K-band are 0.77dB and 4.09°, respectively.

I. 서론

위성 통신 시스템에서 양질의 통신을 위해 고출력 마이크로파 전력증폭기가 요구된다. 특히, 위성 통신 시스템에서는 높은 출력 레벨을 얻기 위해 주로 진행파관 증폭기(Traveling Wave Tube Amplifiers: TWTA)를 사용하고 있다. 이러한 고출력 전력 증폭소자는 최대 전력 레벨을 얻기 위해 포화영역 부근에서 동작하게 되어 출력의 크기(AM-to-AM)와 위상(AM-to-PM)의 비선형 왜곡 특성이 현저하게 나타나게 된다. 이는 높은 효율과 선형 증폭이 요구되는 위성통신 시스템의 성능을 저하시키는 주요 요인이 된다. 이러한 고출력 전력 증폭기의 비선형 전달 특성을 개선하는 방법으로 여

러 가지 방법들이 다루어졌다.^[1] 특히 위성체 TWTA의 선형화 기술은 그 선형화 효과 못지않게 그 부피와 중량의 제약 사항을 극복해야 하는 어려움이 있다. 본 논문에서 제시하는 전치왜곡 선형화기는 별도의 부가적인 회로가 없이 소형 경량한 구조로 동작대역에서 선형화 동작할 수 있는 장점을 지니고 있다.^{[3][4]}

또한, 제안된 Carrier Complex Power Series를 통해 기존의 Power Series의 AM-to-AM 특성만을 해석이 가능한 단점을 보완하였으며, 이를 토대로 전치왜곡 선형화기의 Inverse Carrier Complex Power Series를 유도하여 측정된 대전력 증폭기의 비선형 전달 특성을 이용하여 전치 왜곡 선형화기의 전달 함수를 추출할 수 있었다. 일반적인 SSPA 보다는 높은 포화 영역을 가지는 TWTA 특성으로 인해 이전에 제시된 것보다 확장된 Carrier Complex Power Series를 해석하였다.^{[1][2][4]}

II. Carrier Complex Power Series 해석

비선형 특성을 갖는 2 단자 망이 기억성이 없고, 신호가 제한적인 협대역이라면 출력 신호는 입력 신호의 Power Series로 표현할 수 있다. 크기 및 위상을 갖는 입력 신호와 복합 이득 계수로 식 (1)과 같이 대전력 증폭기의 출력 신호를 표현할 수 있다. 본 논문에서 제안하는 Power Series는 AM-to-AM 특성과 AM-to-PM 특성을 동시에 포함하고 있다. 본 논문에서는

이러한 Power Series 를 Carrier Complex Power Series 라고 일컫는다.

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

$$f_i = M_i e^{j\theta_i}, \quad v_{is} = A e^{j\theta_i}$$

(f_i : linear complex gain, v_{is} : applied input voltage)

약한 비선형성인 경우, 출력전압 관계식은 첫 번째와 두 번째 항으로 간략하게 표현할 수 있다. 그리고 입력 신호 전압의 위상은 입력신호의 동적 범위에 대해 $\theta_i = 0$ 으로 보정되어 있다고 가정하면, 식 (1)을 다음과 같이 간략하게 표현할 수 있다.

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

대전력 증폭기가 충분히 선형영역에서 동작한다고 가정하면 선형 복합 이득 상수(f_1)는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_1 = \frac{v_{os}}{v_{is}} = \frac{v_{os}}{A_i} \quad (3)$$

그림 1 은 대전력 증폭기의 복합 비선형 전달 특성을 보여주고 있다. 출력전력 레벨이 1dB 압축점 (P_{1dB}) 근처일 때, 입력 신호는 $v_{is-1dB} = A_{1dB}$ 으로 가정할 수 있고, 이상적인 선형 복합 출력 신호는 $v_{os} = f_1 v_{is-1dB}$ 로 정의할 수 있다. 따라서 v_{os} 와 실제 출력 신호 v_{os-1dB} 의 관계는 식 (4)와 같이 정의할 수 있다.

$$Q = \frac{v_{os-1dB}}{v_{os}} = \frac{A_{1dB}^0 e^{j\theta_{1dB}}}{f_1 A_{1dB}} = \frac{A_{1dB}^0}{M_1 A_{1dB}} e^{j(\theta_{1dB} - \theta_{f1})} \quad (4)$$

$$= 0.891 e^{j(\theta_{1dB} - \theta_{f1})}$$

여기서 $v_{os-1dB} = A_{1dB}^0 e^{j\theta_{1dB}}$ 이고, Q 는 P_{1dB} 점에서의 신호의 크기와 위상 값을 동시에 표현할 수 있는 복합 상수이다. 식 (4)로부터 대전력 증폭기의 비선형 특성을 좌우하는 3 차 복합 이득 계수를 식 (5)와 같이 유도할 수 있다.

$$f_3 = \frac{f_1(Q-1)}{A_{1dB}^2} \quad (5)$$

그림 2 는 전치 왜곡 선형화기의 동작 개요를 나타내고 있다. 대전력 증폭기에 인가되는 입력 전압 신호는 Inverse Carrier Complex Power Series 를 통해 $v_{is} = g_1 A_{in} + g_3 A_{in}^3$ 로 유도할 수 있다.

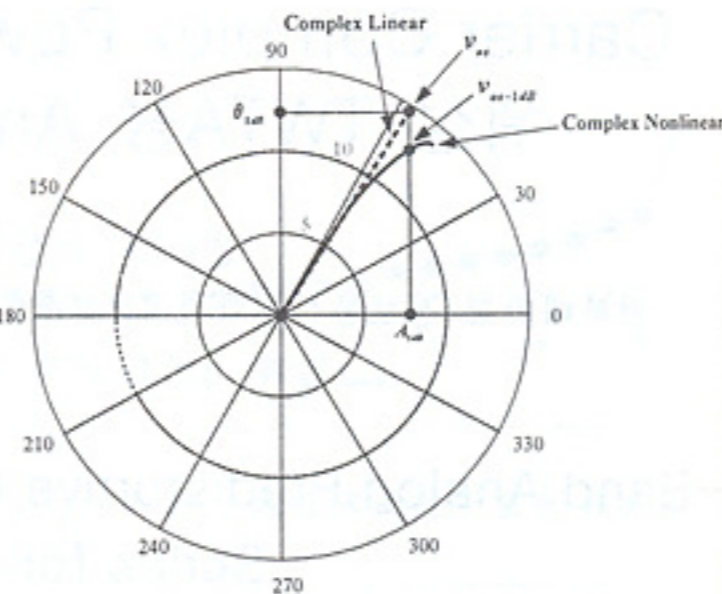


그림 1. 대전력 증폭기의 복합 비선형 전달 특성

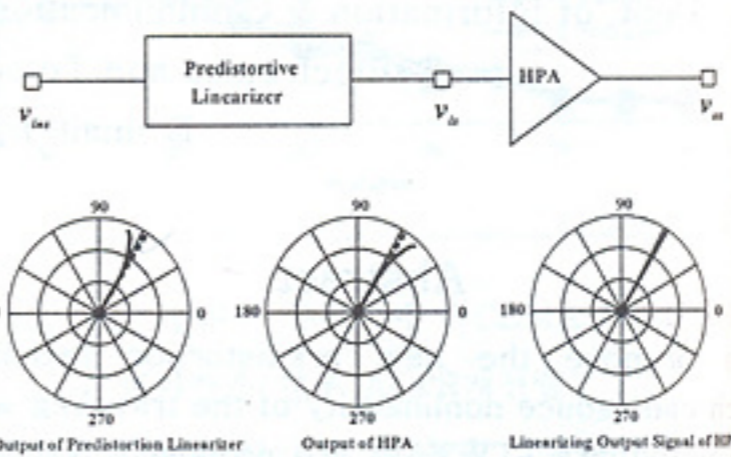


그림 2. 제안된 전치왜곡 선형화기 및 대전력 증폭기의 Line-up

그림 2 의 전체 블록 다이어그램의 전달 함수는 식 (6)과 같이 나타내어질 수 있다.

$$v_{os} = f_1 g_1 A_{in} + (f_1 g_3 + f_3 g_1^3) A_{in}^3 + 3f_3 g_1^2 g_3 A_{in}^5 + 3f_3 g_1 g_3^2 A_{in}^7 + f_3 g_3^3 A_{in}^9 \quad (6)$$

전치 왜곡된 대전력 증폭기가 선형 복합 이득을 가진다면, 전치 왜곡기의 선형 복합 이득 계수는 1 차 계수만으로 나타낼 수 있으며, 식 (6)의 2 차 항은 영의 값을 가질 것이다. 따라서 전치 왜곡기의 역 왜곡 신호의 3 차 복합 이득 계수를 식 (7)과 같이 구할 수 있다.

$$g_3 = -\frac{f_3}{f_1} g_1^3 = -\frac{f_3}{f_1} e^{j3\theta_{g1}} \quad (7)$$

$$v_{is} = v_{in} - \left(\frac{f_3}{f_1}\right) v_{in}^3 e^{j3\theta_{g1}} \quad (8)$$

그림 3은 MATLAB을 이용하여 식 (7)과 (8)에 측정된 TWTA의 비선형 전달 함수를 적용하여 추출된 전치왜곡 선형화기의 전달함수를 보여주고 있다. 이렇게 얻어진 결과를 통해 전치 왜곡 선형화기의 전달 특성을 시뮬레이션 및 제작을 하였다.

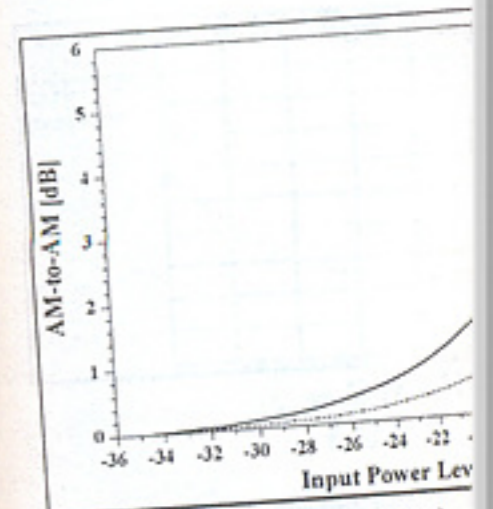


그림 3. MATLAB을 이용한 AM-to-AM 및 AM-to-PM 특성

III. Schottky 다이오드 이용한 반사형 구조의

일반적으로 Schottky 다이오드는 개방 상태가 될 때 낮은 동적 컨덕턴스를 나타내며, 이는 제안된 IDSG(Inverse Generator)의 Schematic, 즉 전력 레벨에 따라 변화하고 있다. 입력전압 신호(v_{in})의 동적 임피던스는 높아 반대로 입력전압 신호(v_{in})의 동적 임피던스는 적어 거의 벨의 입력전압 신호보다 높고 Schottky 다이오드 작은 값의 부하저항을 갖는 것을 조절할 수 있다. 따라서 TWTA 와 역이 되는 구조를 구성할 수 있다. 그림 4 에서와 같이 등가 회로는 등가 컨덕턴스(G_d)와 등가 서셉턴스(B_d)를 포함한다. 따라서 동적 입력 전력 어드미턴스 변화를 야기하여 이 반사계수를 얻을 수 있다.

$$\text{Mag}[\Gamma_{diode}] = \sqrt{\frac{G_0 - G_d}{G_0 + G_d}}$$

$$\text{Ang}[\Gamma_{diode}] = \tan^{-1} \left[\frac{-B_d}{G_0 - G_d} \right]$$

식 (9)로부터 TWTA의 AM-to-PM 특성을 얻을 수 있다.

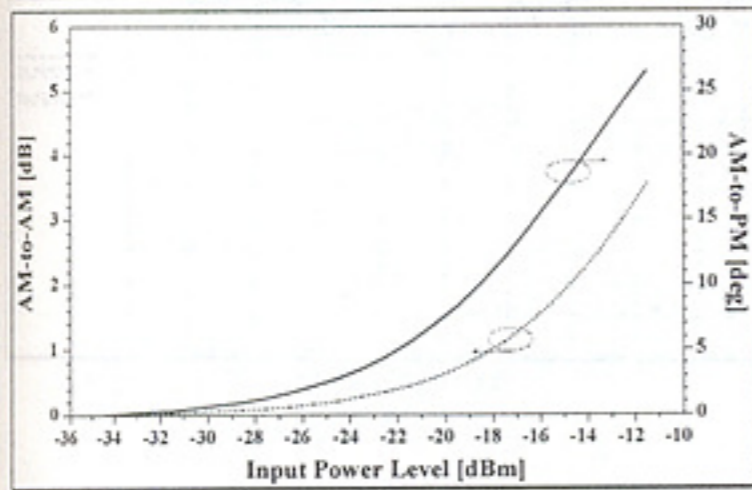


그림 3. MATLAB을 이용한 전치 왜곡 선형화기의 AM-to-AM 및 AM-to-PM 계산치

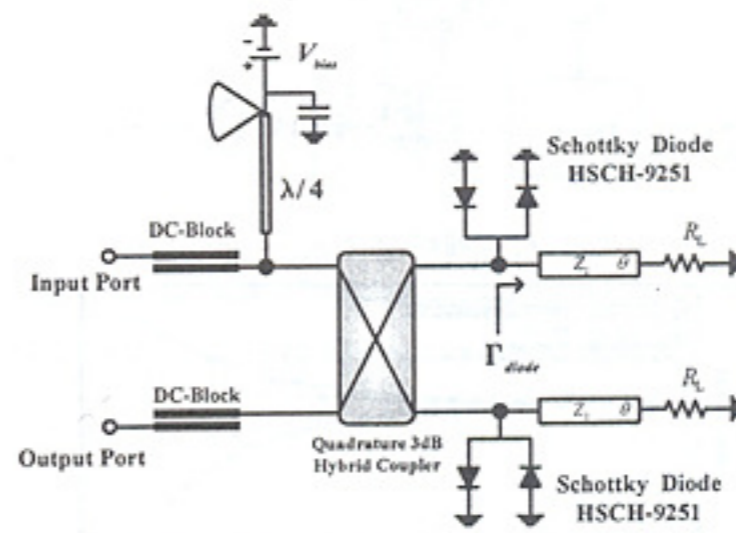
III. Schottky 다이오드의 동적 컨덕턴스를 이용한 반사형 구조의 전치 왜곡기 해석

일반적으로 Schottky 다이오드는 입력 신호의 레벨이 낮을 때는 개방 상태가 되고, 낮은 경우에는 단락 상태가 되는 동적 컨덕턴스로 설명할 수 있다. 그림 4는 제안된 IDSG(Inverse Distortion Signal Generator)의 Schematic, 등가회로 그리고 동적 입력 전력 레벨에 따라 변화하는 반사계수의 특성을 나타내고 있다. 입력전압 신호(v_m)의 레벨이 낮으면 다이오드의 동적 임피던스는 높아져 거의 개방 상태가 되고, 반대로 입력전압 신호(v_m)의 레벨이 높으면 다이오드의 동적 임피던스는 적어 거의 단락 상태가 되며, 낮은 레벨의 입력전압 신호보다 높은 반사비를 얻을 수 있다. 그리고 Schottky 다이오드의 종단 특성 임피던스 보다 작은 값의 부하저항을 갖는다면 반사되는 신호의 크기를 조절할 수 있다. 따라서 입력전압 레벨의 변화에 따라 TWTA와 역이 되는 비선형 전달 특성을 각각 얻을 수 있다. 그림 4에서와 같이 Schottky 다이오드의 등가 회로는 등가 컨덕턴스(G_d)와 등가 서셉턴스(B_d)로 구성된다. 그리고 다이오드와 병렬로 접속된 전송선로와 종단 부하저항의 등가 어드미턴스는 등가 컨덕턴스(G_L)와 등가 서셉턴스(B_L)로 바꾸어 고려할 수 있다. 따라서 동적 입력 전력 레벨에 따른 다이오드의 등가 어드미턴스 변화를 야기하고, 이를 토대로 식 (9)와 같이 반사계수를 얻을 수 있다.

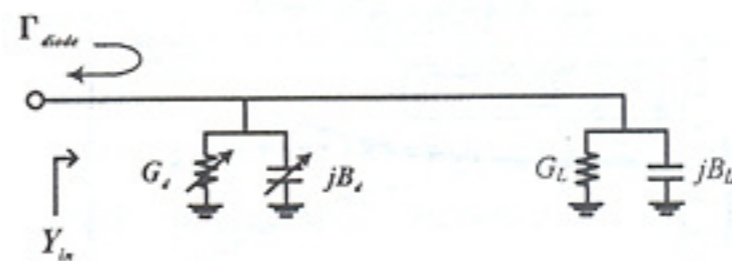
$$\text{Mag}[\Gamma_{diode}] = \sqrt{\frac{(G_0 - G_d - G_L)^2 + (B_d + B_L)^2}{(G_0 + G_d + G_L)^2 + (B_d + B_L)^2}} \quad (9)$$

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

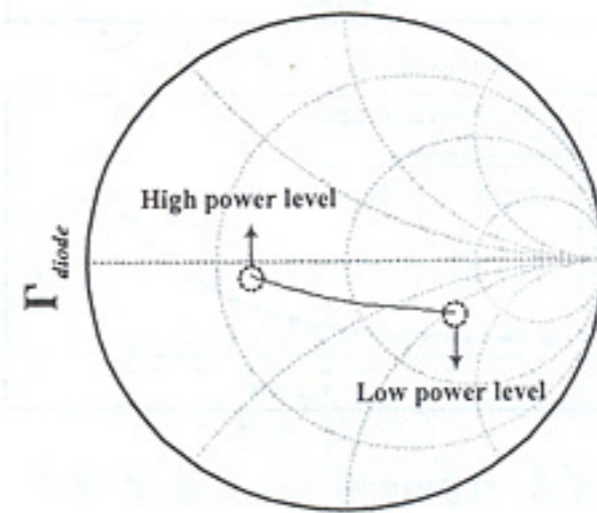
식 (9)로부터 TWTA의 역이 되는 AM-to-AM 및 AM-to-PM 특성을 얻을 수 있다.



(a)



(b)



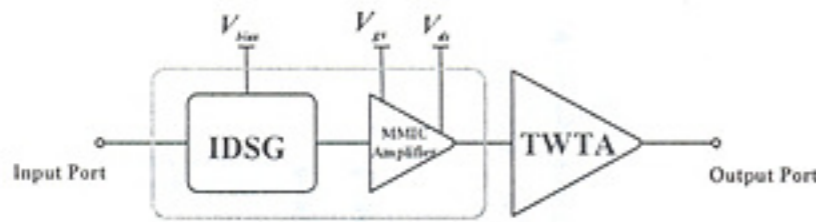
Dynamic input power level

(c)

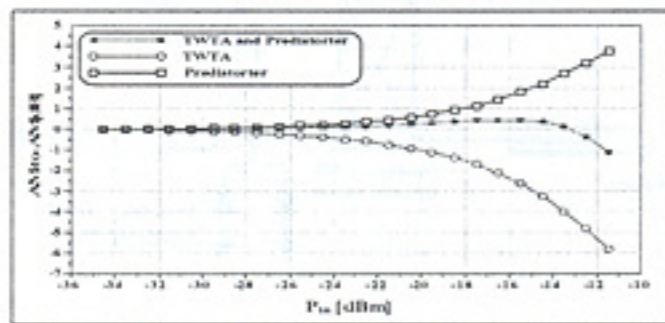
그림 4. 제안된 IDSG의 schematic 다이어그램과 등가회로

IV. 시뮬레이션 및 실험 결과

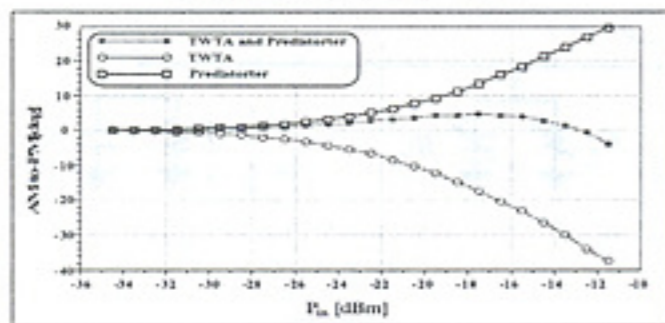
본 논문에서 시료로 사용된 TWTA는 Thomson사의 TH3990C 모델을 이용하였고, 19.8GHz~20.2GHz까지의 동작 주파수 대역에서 67.7dB의 이득 특성을 가지고 있다. Schottky 다이오드는 Agilent사의 HSCH-9251를 이용하였고, 기판은 Alumina($\epsilon_r=9.9$, $h=15\text{mil}$)을 사용하였다. 그림 5는 제안된 전치 왜곡 선형화기의 시뮬레이션 Line-up 및 결과를 보여주고 있으며, 제안된 전치왜곡 선형화기를 적용하여 14dB의 동적 전력 범위에서 제안된 전치왜곡기의 AM-to-AM 및 AM-to-PM 특성이 3.8dB와 30° 일 때 각각 0.74dB와 4.1° 의 개선된 결과를 얻었다.



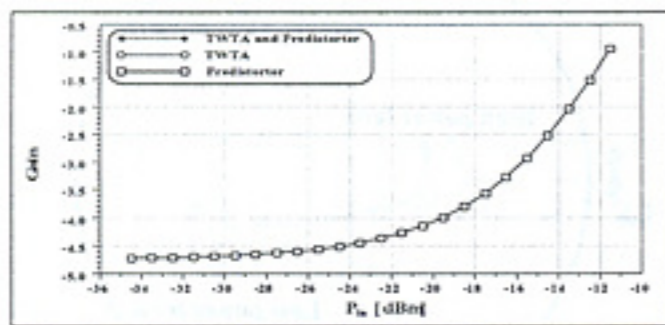
(a) 시뮬레이션 Line-up



(a) AM-to-AM 특성



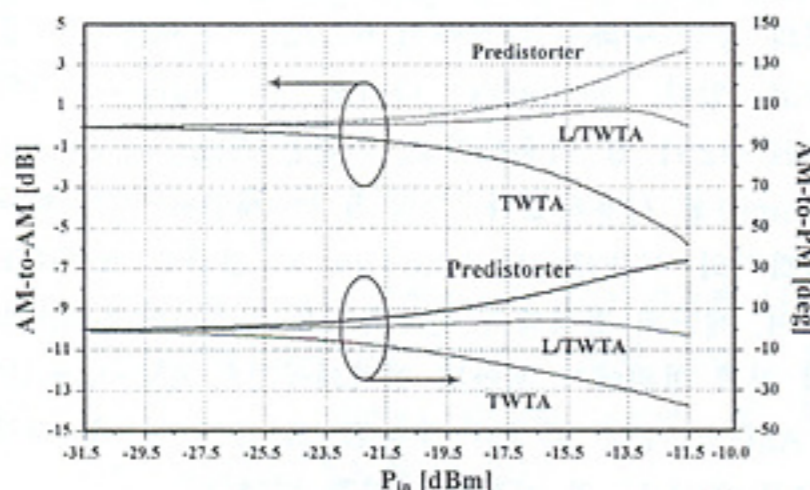
(b) AM-to-PM 특성



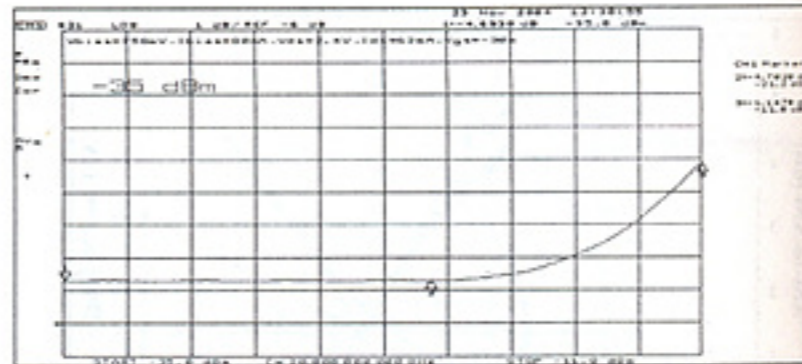
(c) 이득 특성

그림 6. 시뮬레이션 Line-up 및 결과

시뮬레이션 결과를 토대로 제안된 선형화기를 적용하여 TWTA의 AM-to-AM 및 AM-to-PM 특성은 각각 0.77dB와 4.09°의 개선된 특성을 얻었다. 여기서 제작된 IDSG의 V_{bias} 의 조절을 통해 AM-to-AM과 AM-to-PM 특성을 간단하게 제어할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그림 8은 제작된 전치왜곡 선형화기를 보여주고 있고, MMIC 구동 증폭기는 한국전자통신연구원(ETRI) 공정을 이용하였다.



(a) AM-to-AM 및 AM-to-PM 특성



(b) 이득 특성
그림 7. 측정결과

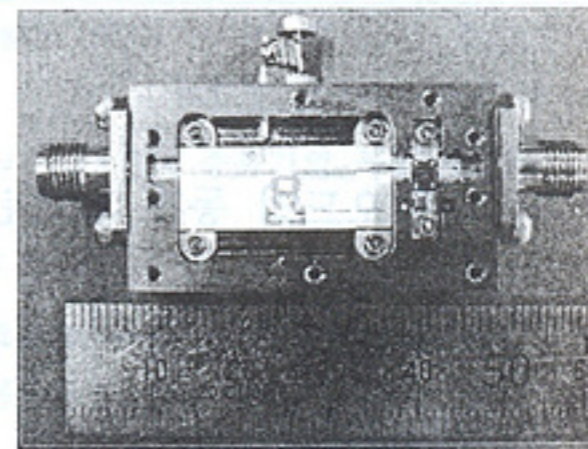


그림 8. 제작된 전치왜곡 선형화기

V. 결론

제안된 Carrier Complex Power Series를 이용하여 비선형 TWTA의 전달 함수를 추출했고, 이를 토대로 전치왜곡 선형화기의 비선형 전달 함수를 유도하였다. 이 전치왜곡 선형화기의 비선형 전달 함수를 Schottky 다이오드를 이용한 반사형 구조의 전치왜곡기로 구현하였으며, TWTA의 비선형 전달 특성을 효과적으로 보상할 수 있었다. 동시에 소형, 경량한 구조가 요구되는 위성 통신 중계기에 적합한 장점 또한 가지고 있다.

참고문헌

- [1] Yong Chae Jeong, "A design of Predistortion Linearizer by Individual Order Control of Intermodulation Distortion Signals," *Doctorial Dissertation*, Sogang Univ., 1996.
- [2] W-M. Zhang, C. Yuen, "A Broadband Linearizer for Ka-Band Satellite Communication," *IEEE MTT-S Digest*, pp.1203-1206, 1998.
- [3] A. Katz, R. Sudarsanam, D. Aubert, "A Reflective Diode Linearizer for Spacecraft Application," *IEEE MTT-S Digest*, pp.661-664, 1985.
- [4] Allen Katz, Shabbir Mochalla, Jerry Klatskin, "Passive FET MMIC Linearizers for C, X and Ku-Band Satellite Application," *IEEE MTT-S Digest*, pp.353-356, 1993.

동일
광대

*전북대학교 공과대

A Design
using

Yong-Chae Jeong
*School of Electronics Engineering
**Soonchunhyang University

Abstr

In this paper, a new linearizer matches the out-of-phase delay between two paths is proposed. The simultaneous out-of-phase and the delay between two paths can be cancelled possible. For power amplifier that add cancellers is fabricated. The main signal can be fabricated feedforward proposed signal cancellation more than 26.3dB and distortion signal cancellation more than 15.2dB for 200MHz.

I. 서

언제, 어디서나, 누구든지 원하는 통신의 진화는 이전