선형화기를 이용한 위성통신용 X-밴드 TWT 증폭기 선형특성 개선

Linear Characteristics Improvement of X-band TWT Amplifier for Satellite Communication with Linearizer

최원*, 양홍선**, 구경헌*

Won Choi*, Hong-Sun Yang** and Kyung-Heon Koo*

요 약

본 논문에서는 7.9 GHz~8.4 GHz 에서 동작하는 위성통신용 X-밴드 TWT의 AM-AM과 AM-PM 변환특성을 분석하고 선형화기를 이용하여 선형성과 IMD 특성을 개선하였다. 선형화기를 포함하는 TWT는 개선된 AM-AM과 AM-PM 변환특성을 나타내며, 1 dB 압축점은 12.3 dB, 2.0°/dB 위상왜곡점은 10 dB 개선되었다. 또한 동작출력에서 3차 상호변조 특성인 IMD3는 16.2 dB 개선되어 37.0 dBc로 측정되었다. 또한, 고출력 증폭기의 IMD 측정 방안을 제시하고, TWT의 AM-PM 왜곡 특성을 보상하여 출력전력과 선형 특성을 개선할 수 있음을 나타내었다.

Abstract

This paper has analyzed the AM-AM and AM-PM characteristics of 7.9 GHz~8.4 GHz X-band TWT used for satellite communication and improved its linearity and IMD performance by using linearizer. The TWT amplifier with the linearizer shows better AM-AM and AM-PM conversion, and has increased 1 dB compression point by 12.3 dB and 2.0 °/dB phase distortion point by 10 dB. The 3rd order intermodulation distortion, IMD3 is measured to be 37.0 dBc that is 16.2 dB improvement at the operating output. This paper also proposed the measurement method of IMD for high power amplifier, and that TWT amplifier can have better linearity and output power by compensating for the AM-PM characteristics.

Key words : TWT, Predistorter, SSPA, AM-AM, AM-PM, Intermodulation

Ⅰ. 서 론

본 연구에 사용된 고출력 증폭기는 7.9~8.4 GHz 에서 동작하는 위성통신용 X-밴드 600 W급 진행파관 증폭기인 TWTA(Traveling Wave Tube Amplifier)이다. 위성용 고출력 증폭기에 사용되는 TWT는 오랜 기간 사용되어 신뢰성을 확보하였으나, 진공관으로 구성되어 SSPA(Solid State Power Amplifier)에 비해 매우 높은 동작 전압이 요구되며, MTTF (Mean Time To Failure) 특성이 낮다[1]. 특히, TWT는 일반적인 전력증폭기의 선형성을 나타내는 P1dB가 최대 출력에서 10~12 dB 이전에서 나타나며, IMD3 상호

* 인천대학교 전자공학과(Department of Electronics Engineering, University of Incheon)
** (주)빅텍(Victek. Co., Ltd.)
· 제1저자 (First Author) : 최 원 · 교신저자 : 구경헌
· 투고일자 : 2011년 10월 5일
· 심사(수정)일자 : 2011년 10월 5일 (수정일자 : 2011년 10월 21일)
· 게재일자 : 2011년 10월 30일

변조 특성을 최대출력에서 15 dBc 이상 개선하기 위해서는 4 dB OPBO(Output Power Back -off)가 필요하다[2]. TWT의 비선형 특성을 개선하기 위해 선형화기(Linearizer)가 사용된다. 선형화기는 전치왜곡기(Predistorter)라고도 부른다. 그림 1은 실험에 사용된 TWT 증폭기의 구조를 나타내며, 소신호 증폭 및 선형화기를 포함한 RF 모듈부, 대신호 증폭용 TWT 및 전원 공급을 위한 고전압전원부인 HVPS (High Voltage Power Supplier)로 구성된다. 본 논문에서는 TWT 비선형성을 개선하기 위해 AM-AM 및 AM-PM 특성을 분석하고 전치 왜곡하여 선형성을 확보하고 상호변조 특성을 개선하였다. 최근 발표된 논문은 수십 와트에서 300 와트 이내의 전력을 선형화하고 분석하고 있다[4~6]. 본 논문은 600 와트 급 전력증폭기를 선형화하고 분석하고 있으며, 이와 같은 고출력 전력을 측정하는 구성을 제안한다. Ⅱ장에서 TWT와 선형화기의 AM-AM 및 AM-PM 을 분석하고 측정결과를 제시하였다. 또한, 측정된 상호변조 특성 개선과 고출력 증폭기의 IMD 시험방안을 제시한다. 마지막으로 Ⅲ장에서 본 논문의 결론을 정리하였다.

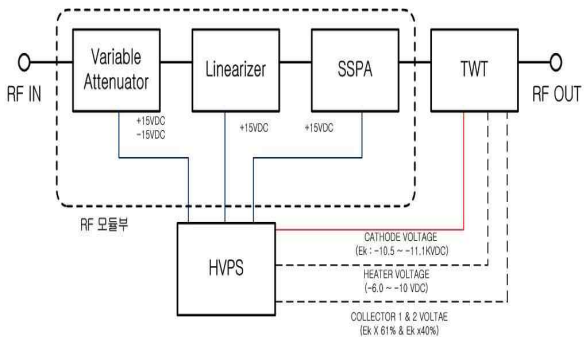


그림 1. TWT 증폭기 구성도
Fig. 1. Block diagram of TWT amplifier

Ⅱ. 본 론

전력증폭기는 일반적으로 작은 입력에서는 선형 특성을 갖으며 전력이 증가하면 이득 감소가 시작되어 P1dB 또는 포화 영역에서는 큰 비선형 특성을 갖는다. 증폭기 특성은 입력전력에 대한 증폭기 출력 진폭을 나타내는 AM-AM 특성과 입력전력에 대한 출력 위상을 나타내는 AM-PM 변환 특성으로 제시한다. 증폭기 비선형 특성은 두 개 주파수 성분을 인가하여 측정하며 3차 상호변조 특성인 IMD3 특성은 통신 시스템 성능을 결정하는 중요 특성이다. 두 개 주파수 입력을 식 (1)과 같이 표시할 때 출력 스펙트럼은 식 (2)와 같이 2차, 3차 항 등을 포함하여 입력 주파수의 다양한 합과 차의 성분을 생성한다.

$$v_i(t) = v\cos(\omega_1 t) + v\cos(\omega_2 t) \tag{1}$$

$$\begin{aligned} v_o(t) = {} & a_1 \cdot v \cdot (\cos(\omega_1 t) + \cos(\omega_2 t)) \\ & + a_2 \cdot v^2 \cdot (\cos(\omega_1 t) + \cos(\omega_2 t))^2 \\ & + a_3 \cdot v^3 \cdot (\cos(\omega_1 t) + \cos(\omega_2 t))^3 \\ & + a_4 \cdot v^4 \cdot (\cos(\omega_1 t) + \cos(\omega_2 t))^4 \\ & + a_5 \cdot v^5 \cdot (\cos(\omega_1 t) + \cos(\omega_2 t))^5 \\ & + \ldots etc. \end{aligned} \tag{2}$$

다양한 주파수 성분 중 특히 3차 상호변조 성분인 $2\omega_2 - \omega_1$과 $2\omega_1 - \omega_2$ 주파수는 기본파와 인접하여 필터로 제거가 용이하지 않다. 이러한 IMD3 특성 개선을 위해서는 비선형 특성 개선이 필요하다. SSPA는 보통 비선형 특성 지표인 1 dB 압축점이 포화전력보다 2~4 dB 작은 전력에서 발생하나, TWT는 P1dB 특성이 최대 출력보다 매우 작은 지점에서 나타나 본 연구에 사용된 TWT는 15 dB 작은 전력에서 나타나며, 2.0°/dB AM-PM 특성은 13 dB 작은 점에서 나타난다.

2-1 TWT와 선형화기 AM-AM 및 AM-PM 분석

전치왜곡 특성을 갖는 선형화기의 기본구조는 그림 2와 같다. 비선형성을 갖는 능동소자로 원하는 비선형 특성을 생성하여 전치왜곡 할 수 있도록 위상 지연선, 가변 감쇄기 및 위상 천이기를 포함한다. 상세한 선형화기 구성도는 그림 3과 같다. 입력 신호는 전력분배기를 통해 지연된 원 신호와 능동소자로 왜곡된 신호로 나누어진다. 왜곡된 신호는 원 신호와 180°위상차를 갖게 하여 다시 원래신호와 결합기를 통해 합쳐지면 왜곡신호만 생성 된다. 이런 특성으로 선형화기는 왜곡성분을 생성하여 TWT를 선형화시킨다.

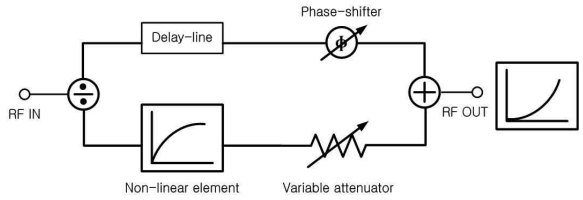


그림 2. 전치왜곡 특성을 이용한 선형화기 구성도
Fig. 2. Structure of typical linearizer using predistorter

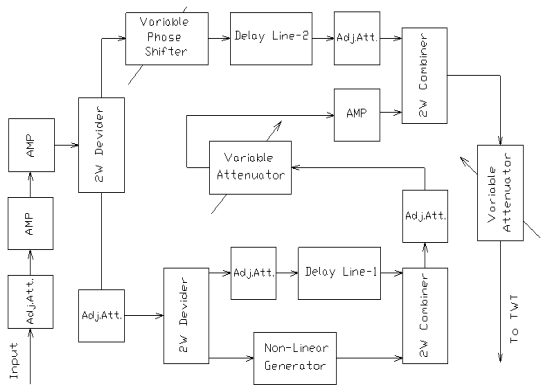


그림 3. 제안된 선형화기 블록도
Fig. 3. Block diagram of Proposed linearizer

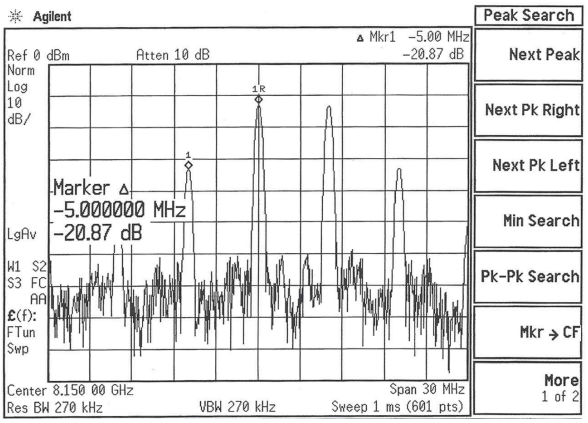


그림 4. TWT의 상호변조 특성
Fig. 4. Intermodulation characteristics of TWT

본 논문에서 제안된 선형화기는 분배기를 통해 전달되는 원래 신호에 위상천위기와 가변감쇄를 포함한다. 이는 선형화기가 TWT가 좀 더 좋은 선형특성을 확보할 수 있도록 조정하는 기능을 한다. TWT 증폭기를 설계하기 위하여 TWT 자체의 상호변조 특성을 측정하여 그 결과를 그림 4에 제시하였다. RF입력은 5 MHz 간격의 two-tone을 인가하였다. 상호변조 특성은 8.15 GHz에서 -20.87 dBc 특성을 나타내며, 이런 특성은 대부분의 무선통신 시스템의 요구 사양을 만족하지 못하는 IMD3 레벨이다[3]. 본 논문에서는 TWT의 이런 비선형 특성을 분석하고 이를 보상하기 위한 전치왜곡 선형화기를 설계하여 선형성 확보 및 IMD 특성 개선을 얻었다. 8.15 GHz에서 측정한 TWT 자체의 AM-AM 특성은 그림 5와 같다.

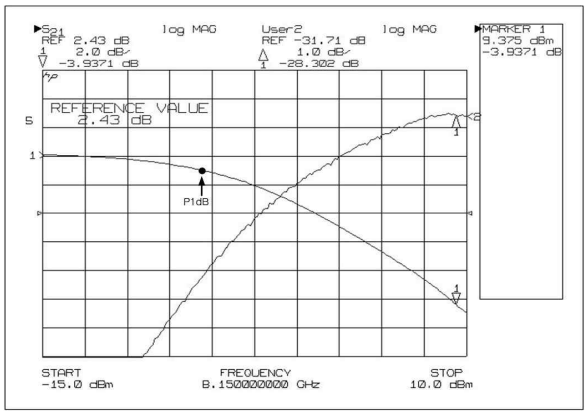


그림 5. 8.15 GHz에서 TWT의 AM-AM 특성
Fig. 5. AM-AM characteristics of TWT at 8.15 GHz

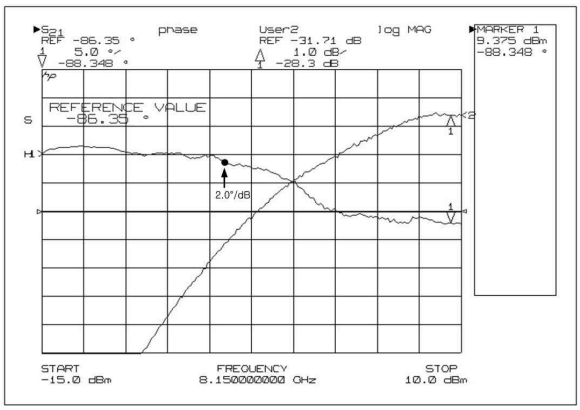


그림 6. TWT의 AM-PM 특성
Fig. 6. AM-PM characteristics of TWT

좌측 그래프에서는 TWT 인가 RF 입력을 -15 dBm에서 10 dBm 까지 변화시키며, 입력에 대한 출력의 이득 특성인 AM-AM 특성을 측정하였다. P1dB 특성은 입력전력레벨 -6 dBm에서 나타난다. 입력이 -15 dBm에서 -6 dBm 범위에서는 1 dB 이내의 이득 차이를 갖다가 점차 이득 감소가 커져 최대출력에서는 10 dB 이상 감소한다. 우측에 나타나는 User2는 측정하는 TWT의 최대출력이 나타나도록 가로축에서 인가된 입력전력에 대해 세로축에서 출력전력을 나타낸다. Marker 1은 시험에 사용된 TWT 증폭기의 최대출

력이다. 일반적으로 전력증폭기의 선형 지표를 나타내는 것은 P1dB이고, 포화영역의 1 dB 이하까지 선형 특성이라 가정하면, TWT는 선형 영역이 SSPA와 비교하여 최대출력보다 매우 작은 값이다. 본 논문에 사용된 TWT는 최대출력에서 15 dB 백-오프된 출력에서 1 dB 이득 압축 특성을 나타낸다. 그림 6은 8.15 GHz에서 측정된 TWT의 AM-PM 특성을 나타낸다. 좌측 그래프는 인가된 입력전력에 대해 TWT의 AM-PM 특성을 나타낸다. -4 dBm에서 2.0 °/dB의 특성을 나타낸다. 2.0 °/dB 위상특성은 증폭기의 선형특성을 나타내는 지표이며, 논문에 사용된 TWTA의 설계목표는 4 dB OPBO에서 2.0 °/dB 이하이다. 우측 그래프의 User 2는 TWT의 최대출력을 나타내기 위해 입력에 대한 출력전력 특성을 나타낸다. TWT에 인가된 입력전력이 -5 dBm 까지 증가해도 위상은 일정한 값을 갖지만, 최대 출력에서는 최대 15°의 위상변화가 나타낸다. 이러한 TWT의 AM-AM을 진폭분석하고 적절한 특성을 갖는 선형화기를 설계하여 전치왜곡 시키고자 한다. 표 1은 선형화기의 주요 특성을 나타낸다. 그림 7은 설계된 선형화기의 AM-PM 특성을 나타내며, 좌측 S21은 인가된 입력전력 레벨이 -25 dBm 에서 -5 dBm 일 때의 측정된 위상특성인 AM-PM 변환특성을 나타낸다. 우측에 있는 특성은 입력전력에 대한 출력전력 특성을 나타낸다. 입력범위에서 위상은 28 °의 변화를 나타내며, 1.67 °/dB 전치왜곡 시키는 특성이 있다. 이 특성은 TWT의 위상특성과 역의 특성을 나타낸다. 진폭특성은 1.38의 기울기 특성을 나타내며, 선형적인 전력증폭기 이득 기울기가 1인 것을 고려하면 이러한 특성은 TWT의 왜곡영역에서 전치왜곡 시킨다. 제안된 선형화기는 진폭조정기와 가변 위상변화기를 제어하는 제어회로를 포함하며, 측정은 이러한 전압이 일정하게 유지된 상태에서 측정하였다.

2-2 TWT 증폭기의 개선된 상호변조 특성

2.1절에서 분석된 AM-AM과 AM-PM 특성을 바탕으로 TWT에 전치왜곡된 선형화기 특성을 적용하면 TWT의 선형성이 개선된다. 이렇게 개선된 결과는 그림8과 그림9에 나타내었다. 그림 8은 TWT 증폭기의 개선된 AM-AM 특성을 나타낸다. P1dB는 입력전력 레벨 6.3 dBm에서 2.5 dB OPBO를 나타나고, 이는 12.3 dB의 P1dB 개선 효과를 나타낸다. 그림 9는 TWT 증폭기의 개선된 AM-PM 특성을 나타낸다. 좌측의 그래프는 개선된 TWT의 위상은 2.5 dB OPBO에서 2.0 °/dB 변화를 나타낸다. 이때 인가된 입력전력 레벨은 6 dBm 이므로, 이는 입력전력이 +4 dBm에서 +6 dBm으로 10 dB 개선된 특성이다.

표 1. 선형화기의 주요 특성
Table 1. Linearizer characteristics.

Frequency Range	7.9~8.4 GHz
Output Power Level	-26 to -16 dBm
Input Power Level	-18 ± 3 dBm
Gain Flatness	< ± 0.5 dB
Gain Slope	< 0.02 dB/MHz
Gain Stability	±1.0 dB
AM/PM Conversion with TWTA	< 2 deg/dB
Input / Output VSWR	< 1.35 : 1

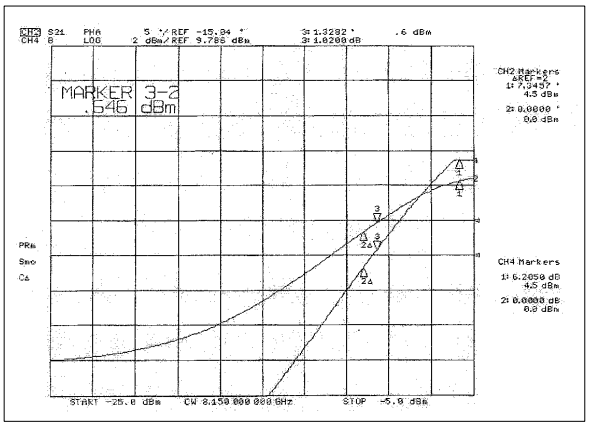


그림 7. 선형화기의 AM-PM 특성 및 출력특성
Fig. 7. AM-PM and output power of linearizer

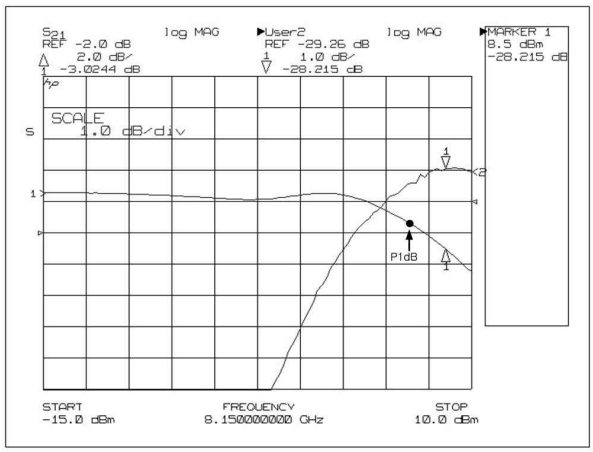


그림 8. TWTA의 개선된 AM-AM 특성
Fig. 8. Improved AM-AM characteristics of TWT

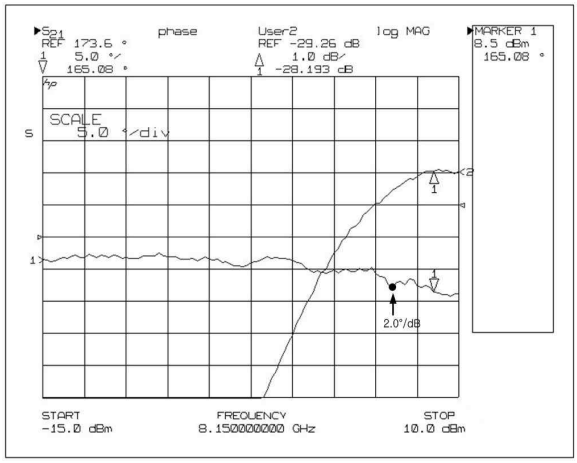


그림 9. TWT의 개선된 AM-PM 특성
Fig. 9. Improved AM-PM characteristics of TWT

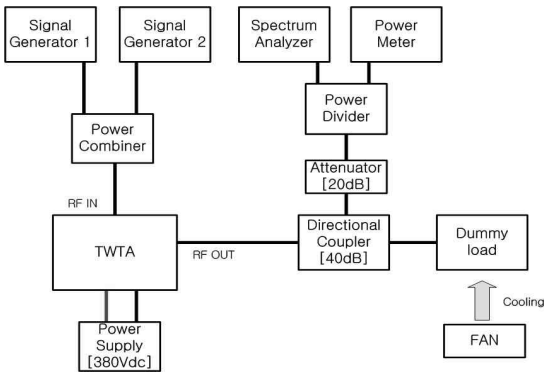


그림 10. TWTA IMD 측정을 위한 시험 구성도
Fig. 10. Measurement setup for TWTA IMD

그림 9의 우측 곡선은 인가 입력전력에 대한 TWT 출력전력을 나타내며, 마커 1에서 최대출력을 나타낸다. 이와 같은 AM-PM 변화 특성 개선으로 전력증폭기의 상호변조 특성이 개선되는데 그 개선도를 보기위하여 IMD 특성을 측정하여 그림 11에 제시하였다. 8.15 GHz에서 측정된 상호변조 특성은 최대 출력에서 4 dB 백-오프된 경우로 -37.0 dBc 이다. 본 연구의 TWTA 요구사항은 25 dBc 이상이며 선형화기를 사용한 TWTA 상호변조 측정은 사용전보다 11 dB가 개선된 값이다. 600 W급 TWTA의 큰 출력 측정을 위해서는 특별한 시험환경이 구성되어야 하는데 그 기본 블록을 그림 10에 제시하였다. 최종 출력단은 RF 대출력을 종단시킬 수 있어야 하므로 냉각장치가 부착된 부하저항을 이용하였다.

또한, 측정 장비 보호를 위하여 출력 중 일부만을 결합하여 측정하기 위한 방향성결합기와 감쇄기가 필요하다. IMD 측정은 스펙트럼 분석기를 이용하며, 파워미터로 최대출력을 확인하였다. 측정 결과 TWTA는 선형화기 사용으로 약 16.2 dB IMD가 개선되는 것을 알 수 있다. 그림 12에는 선형화기로 전치왜곡하기 전후의 측정한 상호변조 특성을 제시하였다. 실선 데이터는 TWT 단독으로 측정한 상호변조 특성이며, 점선 데이터는 선형화기를 추가하여 개선된 상호변조의 특성이다. 측정된 각각의 입력 주파수는 5MHz 의 입력 주파수 차이를 갖는다. 최대 출력에서 각각 1 dB, 3 dB, 4 dB 백-오프에서 측정되었으며, 각각 3.4 dB, 13.1 dB, 16.2 dB의 상호변조 개선 특성을 나타낸다.

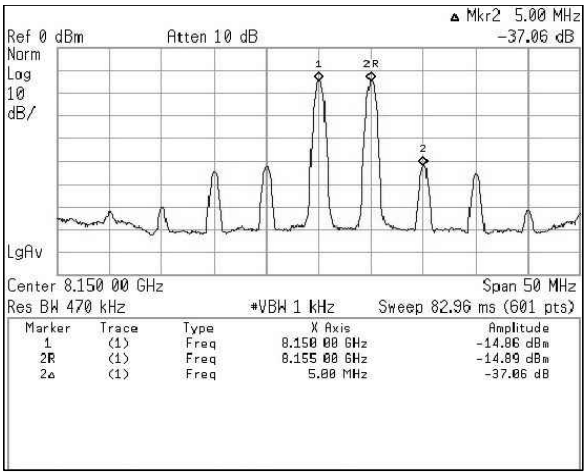


그림 11. 선형화기를 사용한 TWT의 IMD 특성
(@ 8.15 GHz, @ 4 dB OPBO)
Fig. 11. IMD characteristics of the TWTA with linearizer predistortion at 8.15 GHz and 4 dB OPBO

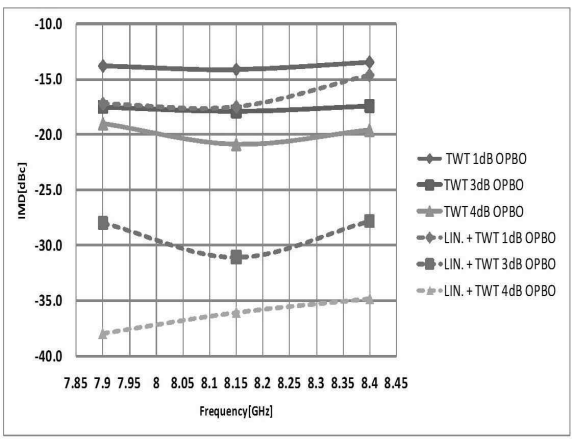


그림 12. 선형화기 사용 전후 TWT의 IMD 특성
Fig. 12. IMD characeristics of TWT with and without linearizer

Ⅲ. 결 론

본 논문에서는 위성통신용 X-밴드 600 W급 TWT의 비선형 특성을 측정하여 AM-AM 및 AM-PM 특성을 분석하고, 제작한 선형화기의 전치왜곡 특성을 적용하여 TWT 증폭기를 설계하였다. 설계된 TWT 증폭기는 1 dB 압축점이 12.3 dB 증가하였으며, AM-PM 왜곡 특성인 2.0 °/dB 점도 10 dB 개선되었다. 결과적으로, 3차 상호변조 특성인 IMD3는 4 dB 백-오프 점에서 16.2 dB 개선하였다. 최근 발표된 연구의 SSPA 출력특성은 증가하고 있으나 200 W에서 250 W 정도인 점을 고려할 때, 본 연구에서 제안한 600 W급 고출력 TWT 증폭기 특성에 대한 측정방법 및 전치왜곡 선형화기 사용전후의 특성 개선은 지속적인 활용이 기대된다고 할 수 있다.

참 고 문 헌

[1] Jan M. Weekley, Bill J. Mangus, “TWTA versus SSPA: A comparison of on-orbit reliability data,” *IEEE Trans. on Electron Devices*, vol.52, no.5, pp.650-652, May 2005.

[2] Allen Katz, “TWTA linearization,” *The Microwave Journal*, vol. 39, no.4, pp.78-90, April 1996.

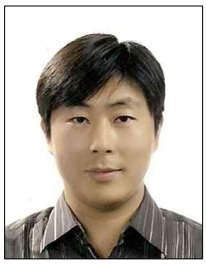
[3] Steve C. Cripps, *RF power amplifier for wireless communication*, Artech House, 2006.

[4] Xin Hu, Gang Wang, Zi-Chen Wang, and Ji-Run Luo, “Predistortion linearization of an X-band TWTA for communications applications,” *IEEE Trans. on Electron Devices*, vol. 58, no.6, pp. 1768-1774, June 2011.

[5] K. Kanto, A Satomi, Y. Asahi, Y. Kashiwabra, Y. Matsushita, K. Takagi, “An X-band 250W solid-state power amplifier using GaN power HEMTs,” *IEEE Radio and Wireless Symposium*, pp.77-80 Jan. 2008.

[6] Ji Han Joo, Min Ho Son, Yong Dug Lee, Jin Joo Choi, “Feedfoward and predistortion linearizers on an X-band helix TWT,” *IEEE International Vacuum Electronics Conference*, pp. 174-175, April 2004.

최 원 (崔源)



2001년 2월 : 인천대학교 전자공학과 (공학사)
2004년 2월 : 인천대학교 전자공학과 (공학석사)
2004년~현재 : (주)빅텍 기술연구소 책임연구원
2011년 3월~현재 : 인천대학교 전자공학과 박사과정
관심분야 : 마이크로파 회로 및 모듈 설계, 무선통신 시스템, RFID 시스템 등

양 홍 선 (梁洪瑄)

2007년 : 한경대학교 전자공학과 (공학사)
1984년~1991년: 금성전기
1991년~2007년 : (주)빅텍 기술연구소 수석연구원
2007년~현재 : (주) 빅텍 상무이사
관심분야 : 전자전 시스템, 마이크로파 회로 및 모듈 설계, 무선통신 시스템

구 경 헌 (具京憲)

1981년 : 서울대학교 전자공학과 (공학사)
1983년 : 서울대학교 전자공학과 (공학석사)
1991년 : 서울대학교 전자공학과 (공학박사)
1999년~2000년 : UC San Diego 방문학자
2003년~2011년 : 한국항행학회 학술이사, 국제이사, 부회장, 차세대 항행통신연구회 위원장
1987년~현재 : 인천대학교 전자공학과 교수
관심분야 : RF 회로설계, 무선통신 시스템, 차세대 항행시스템 등