

7-11 GHz, 광대역 MPM 설계 및 제작

Design and fabrication on 7-11 GHz, Broadband MPM

최길웅* 이유리** 김기호** 최진주** 소준호***
(GilWoong, Choi) (YuRi, Lee) (KiHo, Kim) (JinJoo, Choi) (JoonHo, So)

요약

본 논문에서는 7 - 11 GHz 대역에서 동작하는 광대역 Microwave Power Module (MPM)을 설계하고 제작하였다. MPM은 TWT (Traveling Wave Tube)와 SSA (Solid State Amplifier)로 구성되며, TWT와 SSA의 이득을 최적으로 배분하여 잡음 지수를 줄일 수 있도록 설계하였다. Agilent사의 ADS (Advanced Design System)을 이용하여 SSA의 컴퓨터 모델링과 시뮬레이션을 수행 하였으며, 직렬 분포형 증폭기 구조를 이용하여 설계 및 제작하였다. 제작된 광대역 MPM은 7 - 11 GHz 대역에서 8.3 - 10.02 dB의 잡음 지수, 9 GHz에서 38.12 dBm의 출력 전력이 측정되었다.

Abstract

In this paper, a broadband Microwave Power Module(MPM) operating at 7 - 11 GHz is designed and fabricated. The MPM consists of a SSA (Solid State Amplifier) and a conventional TWT (Traveling Wave Tube). This combined module takes advantage of a low noise and high gain of SSA. The computer modeling and simulation of the SSA are designed by the use of the ADS (Advanced Design System) software. The SSA is designed by configuring the CSSDA (Cascaded Single Stage Distributed Amplifier). The broadband MPM is measured to be noise figure 8.3 - 10.02 dB at 7 - 11 GHz bandwidth, output power of 38.12 dBm at 9 GHz.

Key Words : Traveling Wave Tube, Solid State Amplifier, Cascaded Single Stage Distributed Amplifier

I. 서론

진행과관 증폭기(Traveling Wave Tube: TWT)는 1945년 Bell Telephone 연구소에서 처음 개발되었다. 주로 무선 통신용으로 사용되면서 1962년 미국과 유럽을 연결하는 TV 중계용 위성에 처음 사용되면서 위성 중계기에 TWT가 널리 사용되었다. 하지

만 고출력, 고이득, 광대역 특성을 갖는 TWT는 그 쓰임이 다양해짐에 따라 잡음지수(noise figure) 문제가 부각되었는데, 이를 해결하기 위해 도입된 개념이 MPM (Microwave Power Module)기술이다. MPM은 vacuum tube 기술, SSA 기술, IEPC (Integrated Electronic Power Conditioner) 기술로 구성되어있다. MPM은 vacuum tube의 고출력, 고효

* 주저자 : 광운대학교 전자공학과
** 공저자 : 광운대학교 전자공학과
*** 공저자 : 국방과학연구소(ADD)
† 논문접수일 : 2006년 1월 10일

을, 광대역 특성을 살리고, SSA의 저잡음 신호처리 능력을 결합하여, TWT와 SSA 사이의 이득을 최적으로 배분함으로써 각각의 소자의 기술적 장점들을 융합한 모듈형 시스템이다. 이러한 고성능이 기존 TWTA (Traveling Wave Tube Amplifier)나 SSPA (Solid State Power Amplifier)의 약 십분의 일 크기로 부피가 줄어들게 됨으로써 통신위성의 전체 탑재 하중과 소모 전력의 상당한 부분을 차지하고 있는 TWTA에 비해 효율을 높이고 무게를 줄이면서 위성 시스템의 비용 절감으로 인해 경제적 효과가 상당히 크다. 또한 기존 기술의 한계를 뛰어넘어 RF 시스템 설계에 모듈 방식이 강조되고 있는 점을 감안할 때 MPM의 신개념은 레이다, 전자전, 무인기 통신 등의 고부가가치 산업에 다양하게 활용 될 수 있다.

본 논문에서는 광대역 MPM을 구현하기 위해 전력 증폭단인 TWT와 전력 구동단인 SSA를 연동하여 7-11 GHz에서 동작하는 광대역 MPM을 구현하였다. MPM이 넓은 동작 영역을 갖도록 설계하기 위해 TWT의 전력 구동단인 SSA를 광대역으로 설계해야 하는데, SSA의 대역폭을 확보하기 위해서 광대역 기술 중 높은 이득과 이득 평탄도, 광대역 특성이 우수한 직렬 분포형 증폭기(Cascaded Single Stage Distributed Amplifier) 구조를 이용하여 SSA를 설계 및 제작 하였다.[1]

II. 광대역 MPM의 설계 및 제작

1. 진행파관 증폭기 (TWT)

진공관소자의 하나인 진행파관 증폭기는 1940년 센티미터 파장의 마이크로파 대역의 주파수를 증폭하기 위한 장치로 개발되었으며, 증폭기의 증폭원리는 전위차에 의해 가속된 자유전자들이 전자파와 상호작용을 일으키면서 전자들의 운동에너지가 전자파에너지로 전환되어 증폭되는 것이다.

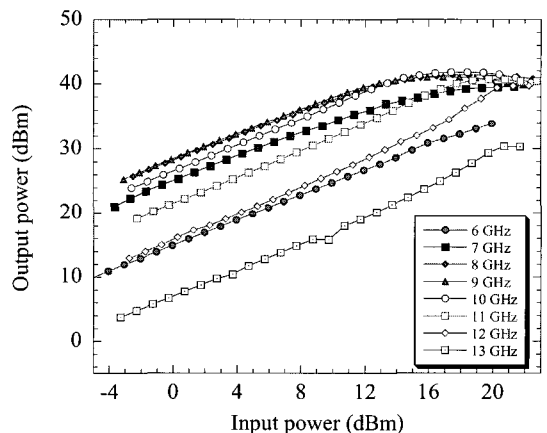
본 논문에서 사용된 진행파관 증폭기는 본 연구실에서 설계하였고 제작은 미국 Dynamic wave telecom사에서 제작되었다. 측정 결과는 표 1과 같다.

그림 1은 진행파관 증폭기의 구동곡선이며, 6 - 13 GHz에서 입력 전력을 16 dBm을 입사 하였을 때 포화되는 것을 알 수 있다. 포화점에서 최대 출력은 10 GHz에서 14 W가 측정되었다. 그림 4는 진행파관 증폭기의 잡음지수를 나타내며 9.5 GHz에서 26 dB가 측정되었다.[2]

<표 1> 진행파관 증폭기의 측정결과

<Table 1> Measurement result of TWT

No	Parameters	Measurement Results
1	Frequency range	7 ~ 13 GHz
2	RF output power	38.4 dBm (@ 7 GHz)
		41.2 dBm (@ 8 GHz)
		41.0 dBm (@ 9 GHz)
		41.6 dBm (@ 10 GHz)
		39.1 dBm (@ 11 GHz)
		33.2 dBm (@ 12 GHz)
25.1 dBm (@ 13 GHz)		
3	Gain (10 GHz)	25 dB
4	Noise figure	27 dB
5	Efficiency (with single-stage depressed collector)	21.6 %



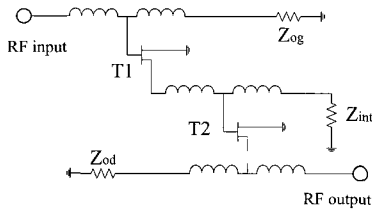
<그림 1> TWT의 구동 곡선

<Fig. 1> Drive curve of TWT

2. 광대역 SSA

1) 직렬 분포형 증폭기

그림 2는 직렬 분포형 증폭기의 구성도이다. 이상적으로 직렬 분포형 증폭기는 트랜지스터의 단수를 늘여 가면 갈수록 이득이 증가한다. 그러나 실제 직렬 분포형 증폭기는 트랜지스터의 단 수에 비해 증가 감쇠 효과가 더 커지는 단 수가 있기 때문에 설계자가 적절한 단 수를 결정해야 한다. 식 1은 직렬 분포형 증폭기의 이득을 나타낸다. g_m 은 트랜스컨덕턴스이고, Z_{og} , Z_{od} 는 입출력 종단 저항이며 Z_{int} 는 단간 임피던스, n 은 트랜지스터의 개수를 나타낸다. 식 1로부터 트랜지스터의 수가 증가 할수록 증폭기의 이득은 지수 함수적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 이득 평탄도와 입출력 격리도가 좋고, 입출력 반사 손실이 적다. 하지만 직렬 분포형 증폭기는 능동 소자와 수동 소자에 대해 매우 민감하기 때문에 저항 및 캐패시터의 측정 데이터를 이



<그림 2> 2단 직렬 분포형 증폭기의 구성도
<Fig. 2> Configuration of the 2-CSSDA

<표 2> 광대역 MPM용 SSA의 설계 사양
<Table 2> Design specification of the SSA for broadband MPM

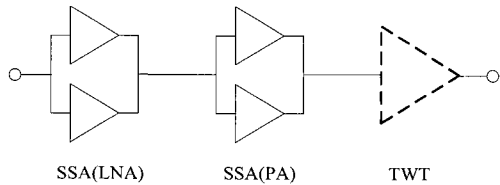
구분	설계 사양
주파수 대역	7-11 GHz
출력전력	22 dBm
이득	22 dB
이득 평탄도	± 1.5 dB
잡음 지수	< 10 dB

용하여 설계해야 하고 복잡한 바이어스 회로를 필요로 하며 이득이 크기 때문에 발진 가능성이 높다. 이것을 해결하기 위해서는 각 단 사이의 커플링을 최소화하기 위해 유전율이 높은 기판을 사용해야 한다. [3-5]

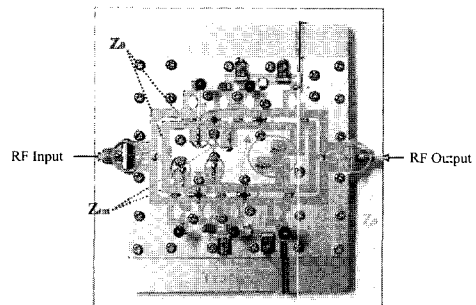
$$G_{cssda} = (g_m^{2n} Z_{int}^{2(n-1)} Z_{og} Z_{od}) / 4 \quad (1)$$

2) 광대역 SSA의 설계 및 제작

그림 3은 본 논문에서 제안한 광대역 SSA의 구성도이다. 광대역 SSA는 전력 증폭단과 이를 구동하기 위한 전력 구동단으로 구성되었다. 본 논문에서 설계하고자 하는 광대역 MPM용 SSA의 설계 사양을 표 2에 나타내었다. 표 2와 같이 MPM용 광대역 SSA 설계 사양을 결정한 후 설계용 툴을 이용하여 소자의 특성을 예측하였다. 분석된 소자를 이용하여 설계하였으며 이를 바탕으로 레이아웃 과정을 거쳐 제작하고, 소신호 및 대신호 해석, 발진 분석, 출력 특성 등 제작된 증폭기의 특성을 RF 측정



<그림 3> 광대역 SSA 구성도
<Fig. 3> Configuration of the broadband SSA



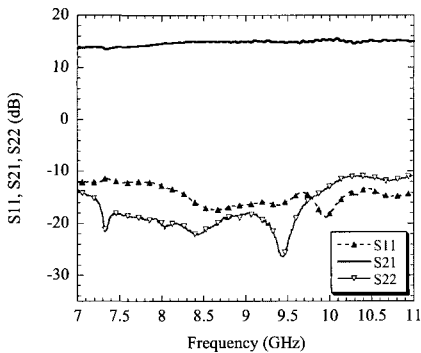
<그림 4> 제작된 전력 구동단
<Fig. 4> Fabricated power drive stage

장비를 통해 확인하였다.

광대역 SSA의 전력 구동단은 NEC 사의 HJFET(Hetero Junction FET) 계열의 NE3210S01을 이용하였다. 광대역 전력 구동단을 설계하기 위해 필요한 Z_{int} 을 구하기 위해서 식 1을 이용하였다. 14 dB의 이득을 갖도록 설계 할 때 Z_{int} 의 값을 24.7 Ω 으로 결정할 수 있다. 결정된 Z_{int} 값을 이용하여 NEC사에서 제공한 S2P파일을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 단일 구조로 설계 한 후입출력 정재파비를 개선하기 위하여 병렬 구조로 설계 하였다. 전력 구동단의 설계 결과, 병렬 구조에서 16.5 ± 1.1 dB, -14.6 dB 이하의 반사계수를 얻었다. 그림 4는 제작된 전력 구동단의 모습이며, 그림 5는 전력 구동단의 병렬 구조를 VNA를 이용하여 측정된 결

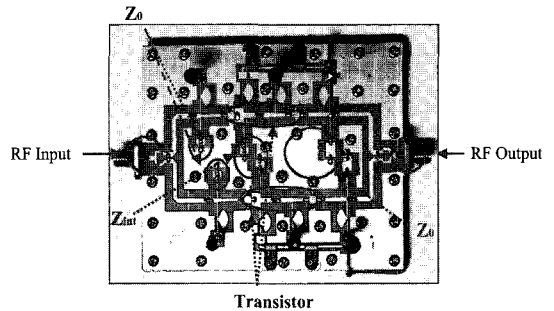
과이다. 15.5 ± 1 dB의 이득을 얻었으며, 반사계수는 -10 dB 이하로 측정되었다. 대역폭 내에서 잡음 지수는 3.8 - 4.5 dB가 측정되었다.

광대역 SSA의 전력 증폭단은 Mitsubishi사의 GaAsFET계열의 MGF1801B를 이용하였다. 전력 구동단의 설계와 마찬가지로 식 1을 이용하여 단간 임피던스 Z_{int} 를 구하였다. Z_{int} 값은 11.5 Ω 이며 ADS에서 제공하는 모델을 이용하여 시뮬레이션을 통하여 설계 하였다. 전력 증폭단 역시 전력 구동단과 마찬가지로 윌킨슨 전력 분배기를 이용하여 입력과 출력에 각각 $\lambda/4$ 전송선로를 삽입하여 입출력 정재파비를 개선하였다. 전력 증폭단의 설계 결과는 6.5 ± 1.8 dB의 이득과 -14 dB 이하의 반사계수를 얻었다. 그림 6은 전력 증폭단의 제작된 모습이며, 그림 7은 전력 증폭단을 VNA로 측정된 결과이다.



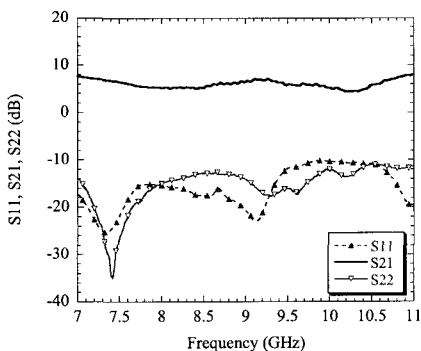
<그림 5> 전력 구동단 측정 결과

<Fig. 5> Measurement result of the power drive stage



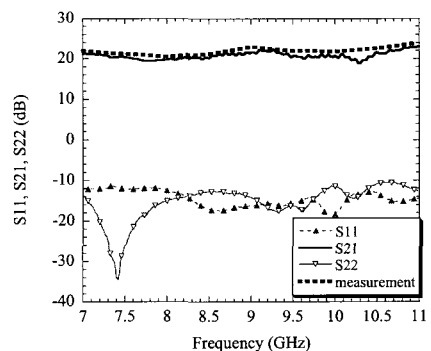
<그림 6> 제작된 전력 증폭단

<Fig. 6> Fabricated power amplification stage



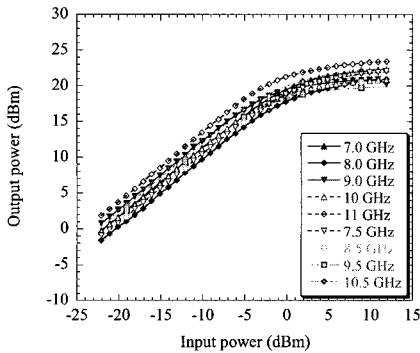
<그림 7> 전력 증폭단 측정 결과

<Fig. 7> Measurement result of the power amplification stage

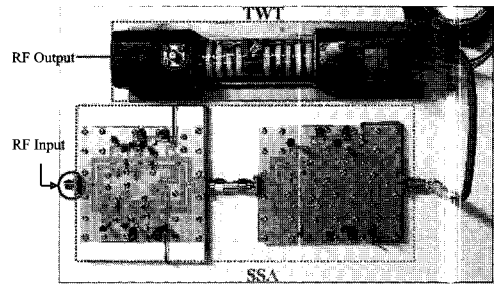


<그림 8> SSA의 이득 평탄도

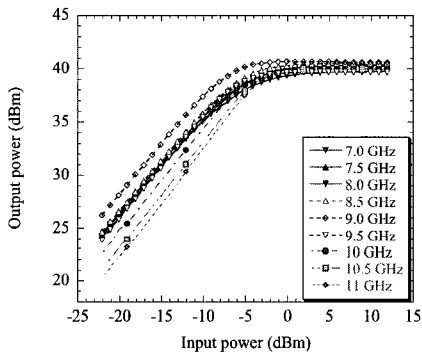
<Fig. 8> Gain Flatness of the SSA



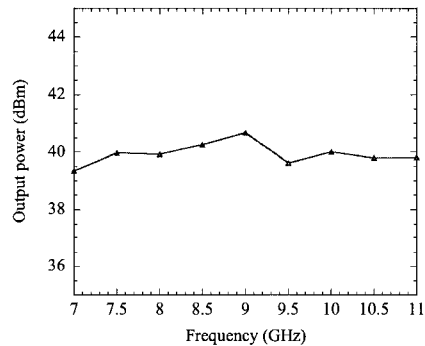
<그림 9> SSA 구동곡선
<Fig. 9> Drive curve of the SSA



<그림 10> 제작된 광대역 MPM
<Fig. 10> Fabricated broadband MPM



<그림 11> 광대역 MPM의 구동곡선
<Fig.11> Drive curve of the broadband MPM



<그림 12> 광대역 MPM 포화 대역폭
<Fig. 12> Saturated bandwidth of the broadband MPM

7.1 ± 1.4 dB의 이득을 얻었으며, 반사계수는 -10 dB 이하로 측정되었다. 대역폭 내에서 8.1 - 10.2 dB의 잡음 지수가 측정되었다.

그림 8에 전력 구동단과 전력 증폭단의 측정 결과를 ADS 시뮬레이션을 통해 SSA의 측정 결과를 예상하고, 실제 SSA의 측정 결과를 비교하였다. 22.5 ± 1.45 dB의 이득을 얻었으며, 그림 9는 SSA의 구동 곡선을 나타낸다. 1-dB 억압점에서 20.2 dBm이 측정되었다.

III. 광대역 MPM 특성 실험 및 분석

전력 구동단 증폭기와 전력 증폭단 증폭기는 각각 단별로 정제파비를 개선하고 이득 평탄도 특성을 좋게 하기 위해 병렬 구조로 설계, 제작하는 방법을

로 진행하였다. 제작된 분포형 증폭기를 이용하여 X-밴드 TWT와 연동하여 광대역 MPM을 구현하였다. 그림 10은 제작된 광대역 MPM 모습이다.

<표 3> 광대역 MPM 측정 결과

<Table 3> Measurement result of the broadband MPM

구분	잡음 지수 (Noise figure)	이득 평탄도 (Gain flatness)	≥1 dB (@ 9 GHz)	
SSA	LNA	3.8~4.5 dB	15.5 ± 1 dB	13.5 dBm
	PA	8.1~10.2 dB	7.1 ±1.4 dB	23.8 dBm
TWT	24.8~30.4 dB	23.6 ± 1.7 dB	38.7 dBm	
MPM	8.3~10.02 dB	39.95 ± 0.65 dB	38.1 dBm	

그림 11은 광대역 MPM의 구동 곡선을 보여준다. 중심 주파수 9 GHz, 1-dB 억압점에서 38.12 dBm의 출력 전력이 측정되었다. 그림 12는 포화 대역폭을 측정한 결과로 1 mW의 입력 전력이 인가될 때 39.95 ± 0.65 dB의 이득 평탄도가 측정되었다. 대역폭 내에서 8.3 - 10.02 dB의 광대역 MPM 잡음 지수가 측정되었다. 표 3은 광대역 MPM의 측정 결과를 나타내었다. 표에서 알 수 있듯이 광대역 MPM은 8.3 -10.2 dB의 잡음 지수와 39.95 ± 0.65 dB의 이득 평탄도, 1 dB 억압점에서 38.1 dBm의 출력 전력이 측정되었다.

IV. 결 론

7 - 11 GHz 대역에서 동작하는 TWT와 직렬 분포형 SSA 기법을 이용하여 광대역 MPM을 설계 및 제작 하였다. 각 단은 ADS를 이용하여 병렬 구조의 2단 직렬 분포형 증폭기를 전력 구동단과 전력 증폭단으로 구성하여 설계 하였다. 직렬 분포형 증폭기는 능동 소자와 수동 소자에 매우 민감하게 동작하므로 모든 수동 소자는 VNA로 측정한 후 ADS에 링크시켜 설계 했다. 제작된 SSA의 전력 구동단은 15.5 ± 1.0 dB의 이득 평탄도와 3.8 - 4.5 dB의 잡음 지수를 가지며 전력 증폭단은 7.1 ± 1.4 dB의 이득 평탄도와 8.1 - 10.2 dB의 잡음 지수가 측정되었다. 구성된 7 - 11 GHz, 광대역 MPM의 측정 결과 전체 45.35 ± 2.95 dB의 이득 평탄도를 얻었으

며 중심 주파수 9 GHz, 1-dB 억압점에서 38.12 dBm의 출력 전력과 포화 대역폭은 39.95 ± 0.65 dB의 이득 평탄도가 측정되었다.

IV. 감사의 글

본 연구는 한국과학기술원 전파탐지특화연구센터를 통한 국방과학연구소의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

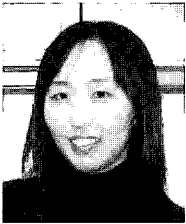
- [1] 최길웅, 광대역 Microwave Power Module에 관한 연구, 석사학위 논문, 광운대학교, p.17, 2005
- [2] 나영호, X-밴드 나선형 진행파관 증폭기 설계 및 제작, 석사학위 논문, 광운대학교, p77, 2002
- [3] Rowan Gilmore, Les Besser, *Practical RF circuit design for modern wireless systems*, Artech House, p.141, 2003
- [4] Bal S. Virdee, Ben Y Banyamin, *Broadband Microwave Amplifier*, p.177, Artech House, 2004
- [5] Ben Y Banyamin, michael Berwick, "Analysis of the performance of Four-Cascaded Single-Stage Distributed Amplifier", *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 48, No. 12, pp.2657 ~ 2663, 2000.

〈 저자 소개 〉



최길웅 (GilWoong, Choi)

2004년 2월 : 광운대학교 전파공학과 (공학사)
2006년 2월 : 광운대학교 전파공학과 (공학석사)
2006년 3월 ~ 현재 : (주) 씨원테크놀로지
roadbear@kw.ac.kr



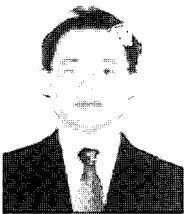
이유리 (YuRi, Lee)

2005년 2월 : 광운대학교 전파공학과 (공학사)
2005년 3월 ~ 현재: 광운대학교 전파공학과 석사과정
iameuri@kw.ac.kr



김기호 (KiHo, Kim)

2005년 2월 : 광운대학교 전파공학과 (공학사)
2005년 3월 ~ 현재: 광운대학교 전파공학과 석사과정
tomcat78@kw.ac.kr



최진주 (JinJoo, Choi)

1983년 8월 : 서울대학교 물리교육과 (이학사)
1985년 8월 : Georgia State University (이학석사)
1991년 월 : University of Michigan (공학박사)
1991년 ~ 1997년 : 미국 해군연구소 (Naval Research Laboratory)
1997년 ~ 현재 : 광운대학교 전파공학과 부교수
jinchoi@daisy.kw.ac.kr



소준호 (JoonHo, So)

1988년 2월 : 서울시립대학교 전자공학과 (공학사)
1990년 2월 : 서울시립대학교 전자공학과 (공학석사)
2006년 2월 : 서울시립대학교 전자공학과 (공학박사)
1990년 2월 ~ 현재 : 국방과학연구소 선임연구원
joonhoso@hanmail.net