

논문 2009-46TC-12-4

X-대역 펄스압축 Solid State Radar를 위한 200W SSPA 개발

(Implementation of the 200-Watts SSPA for X-band Pulse Compression Solid State Radar)

김민수*, 이춘성***, 이상록***, 이영철**

(Min Soo Kim, Chun Sung Lee, Sang Rock Lee, and Young Chul Rhee)

요 약

본 논문에서는 X-대역 펄스압축 반도체형 레이더를 위한 200W SSPA를 개발하였다. 개발한 X-대역 SSPA는 전치증폭단, 구동증폭단, 고출력을 위한 주전력 증폭단의 3단 연계구조형 증폭기로 구성되어있다. X-대역에서 200W 이상의 출력을 내기 위해 주전력 증폭단은 충분한 이득과 전력을 얻을 수 있는 GaN HEMT소자를 사용하여 병렬구조로 설계하였다. 개발한 SSPA는 주파수범위 9.2-9.6GHz, 펄스주기 1ms, 펄스폭 100us, 듀티사이클 10% 조건에서 전체이득 59dB 이상, 출력전력 200W이상의 성능을 가진다. 본 논문에서 개발한 SSPA는 펄스압축기술을 이용한 고품위 반도체 레이더시스템에 적용할 수 있다.

Abstract

In this paper, we developed the 200-Watts SSPA(Solid State Power Amplifier) for the X-band pulse compression solid state radar. The developed X-band SSPA is consists of 3-stage CSA(Corporate Structured Amplifier) modules in pre-amplifier stage, driver-amplifier stage and main-power amplifier stage. The main-power amplifier stage of SSPA designed by balanced type using GaN HEMT with enough power and gain to generate power more than 200-Watts in X-band. The developed SSPA has performance with more than total gain 59dB and output power 200-Watts in condition of frequency range 9.2-9.6GHz, pulse period 1msec, pulse width 100usec and duty cycle 10%. The developed SSPA in this paper can apply to high quality solid state radar system with pulse compression technique.

Keywords : X-band, SSPA, Pulse Compression, GaN, CSA(Corporate Structured Amplifier), Radar

I. 서 론

일반적으로 레이더시스템은 원거리 탐지를 위하여 KW급의 큰 출력을 요구하고 있으며 이러한 큰 출력을 나타내기 위하여 클라이스트론(klystron), 마그네트론(magnetron), 진행파관(TWT, Travelling Wave Tube) 등 각종 진공관이 사용되었다^[1-2]. 그러나 진공관 형태의 증폭기는 요구조건에 맞는 큰 출력을 낼 수 있으나 크기가 크고, 효율성과 신뢰성이 낮다는 단점이 있다.

이와 같이 레이더시스템에서 진공관을 능동소자로 대체시키기 위하여 1980년대까지는 VHF대역 및 그 이하의 주파수 대역에서 통신시스템의 송신전력용 진공관을 트랜지스터로 거의 대체가 가능했으나, 마이크로파 대역을 이용하는 레이더 송신기의 경우 반도체소자(Solid State Device)로 대체시키려는 연구노력이 활발하게 진행되어 왔다^[3]. 2000년대에 들어와서 GaAs 및 GaN과 같은 화합물 반도체소자를 CSA형(반도체 소자를 상호 직렬 및 병렬형태로 결합시킨 연계구조형(Corporate Structured Amplifier)) 증폭기^[4]로 형성하여 원하는 출력전력을 나타나도록 반도체 레이더의 송신기에 대한 연구가 진행되어 왔다. 이러한 마이크로파 전력소자의 기술개발에 따라 마그네트론과 같은 진공관 형태의 레이더 송신기를 반도체 형태로 변경시켰을 때의 장점은

* 학생회원, ** 정회원, 경남대학교 정보통신공학과 (Kyungnam University Dept. of Inform. and Comm. Engineering)
 *** 정회원, (주)한국통신부품 (KORTCOM Co., Ltd)
 접수일자: 2009년11월17일, 수정완료일: 2009년12월14일

평균 무고장시간(MTBF, Mean Time Between Failure)이 약 50,000시간으로 3,000시간의 마그네트론 보다 길고 주파수 가변성이 있으며, 주파수의 광대역화의 경우 진공관은 10~20%인 반면, 반도체송신기의 경우 50% 정도로 향상시킬 수 있는 점이 우수하다. 또한 레이더 신호처리 과정에서도 도플러(doppler) 특성을 향상시킬 수 있으며 DSP 및 FPGA 소자의 적용으로 디지털화가 가능함을 보여주고 있다^[3-4]. 반도체 전력증폭기(SSPA, Solid State Power Amplifier)는 크기가 작고 기존 진공관 증폭기보다 선형특성이 우수하여 상호변조(intermodulation) 및 고조파(harmonic) 왜곡효과가 적으므로 전력을 효율적으로 사용할 수 있는 우수성으로 S-대역에서는 고출력 반도체 레이더가 이용되고 있으나 X-대역 이상에서는 GaAs 및 GaN 소자를 CSA 형태로 구성하여 레이더 송신기에 적용하려는 연구가 진행되고 있는 실정이다.

특히 GaN 소자는 Si나 GaAs보다 물리적으로 에너지 대 간격이 넓고 전자이동도가 높으며, 매우 높은 포화 속도를 가지는 등의 우수한 물질특성을 지니고 있어 고속, 고출력, 고효율 동작이 가능하다^[5-7]. 단일 소자의 경우 GaN 소자의 출력은 진공관만큼 크지 않지만 CSA로 구성하면 간섭과 점유주파수 대역폭을 줄일 수 있는 장점이 있고, 레이더 수신방식을 펄스 방식에서 펄스압축기술(pulse compression technique)^[8-9]을 적용하면 수 백 W급의 출력으로 진공관 레이더시스템과 거의 동일한 성능을 보인다.

따라서 본 논문에서는 기존 상용 레이더시스템에 사용된 진공관 증폭기의 문제점 해결과 X-대역에서 펄스 압축 반도체 레이더 송신기에 적용하여 GaAs 및 GaN 소자를 직병렬 연계구조의 CSA형태로 최적화 시켜 200W SSPA를 개발하였다.

II. X-대역 200W SSPA 설계

1. X-대역 200W SSPA 구성

본 논문에서 개발한 X-대역 200W SSPA의 구성은 그림 1과 같이 크게 전치증폭단(pre-amplifier stage), 구동증폭단(driver-amplifier stage), 고출력을 위한 주전력증폭단(main-power amplifier stage)과 그리고 바이어스 회로로 구성되어 있다. 내부 구성 부품들을 기능별로 모듈화 하여 수리 및 확장이 용이하도록 설계하고, 부득이한 고장으로부터 신뢰성 확보 및 요구성능에

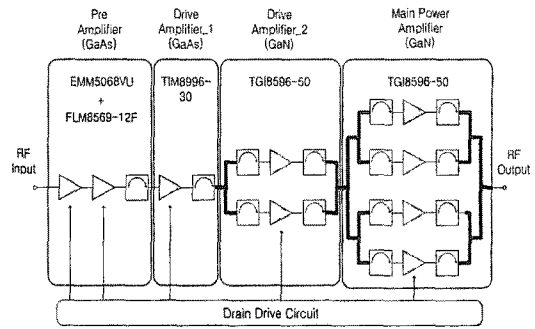


그림 1. 200W SSPA의 블록도
Fig. 1. The block diagram of 200W SSPA.

충족시키기 위해 증폭소자들을 병렬(Balanced)구조로 설계하였다^[4]. 그림 1과 같이 설계된 200W SSPA GaAs/GaN 소자의 직병렬 연계구조는 크게 3단 CSA로 구성되며 각 증폭단 바이어스는 순차적으로 이루어져야 한다.

2. X-대역 200W SSPA의 증폭단 설계

각 증폭단(전치/구동/주전력 증폭단) 설계 시 사용된 소자들은 50옴 입출력 내부정합된 소자^[10-11]이다. 설계된 3단 CSA형 SSPA의 증폭기의 동작영역은 AB급으로 하였고 각 증폭소자 사이에는 증폭소자의 보호와 동작 안정성을 위해 아이솔레이터(isolator)를 배치하였다. 설계시 주어진 능동소자의 최적 동작특성을 위해 이득의 튜닝과 P_{1dB} 튜닝을 함께하였다. 전치증폭단은 구동 증폭단을 구동하기 위한 증폭단으로 Eudyna社의 GaAs 소자로서 P_{out} 33dBm, 이득 26dB, PAE 21%인 2W급의 EMM5068VU와 P_{out} 40.5dBm, 이득 7.5dB, PAE 25%인 12W급의 FLM8596-12F를 이용하여 설계를 하였다. 진류특성은 무신호시, $I_{dQ} = 4A$ (EMM5068VU 1.3A, FLM8596-12F 2.7A)@ $V_d = +10Vdc$ 이고 P_{out} 41dBm, $I_t = 4.36A$ @ $V_d = +10Vdc$ 이다. 그림 2는 실제 제작한 전

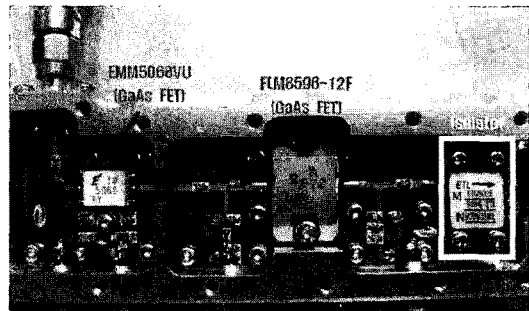


그림 2. 제작된 전치증폭단
Fig. 2. The fabricated pre-amplifier stage.

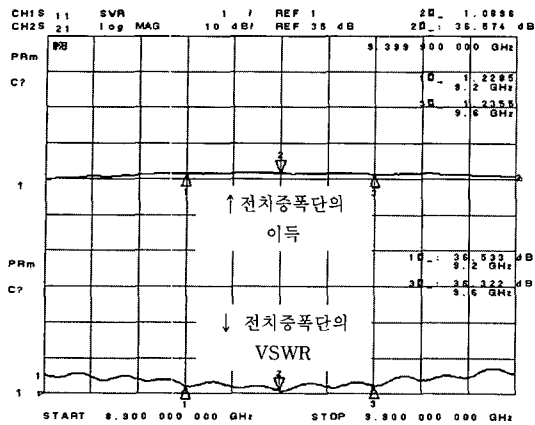


그림 3. 측정된 전치증폭단의 이득과 VSWR
Fig. 3. The measured gain and VSWR of pre-amplifier stage.

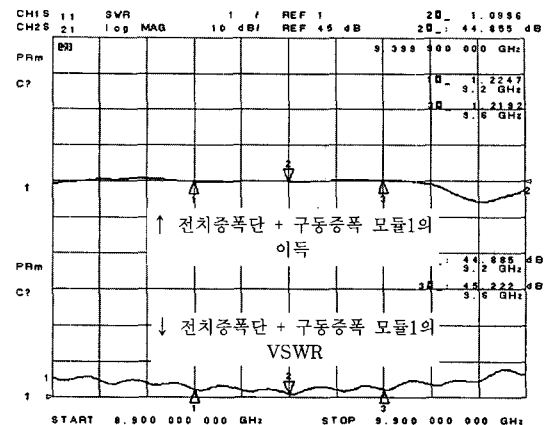
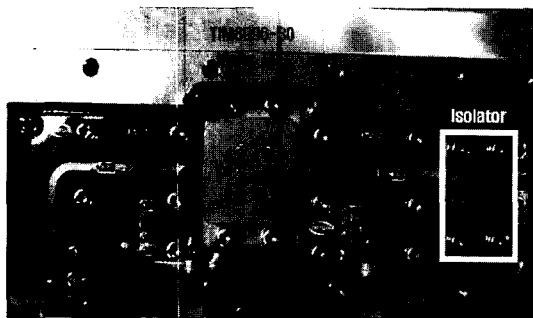
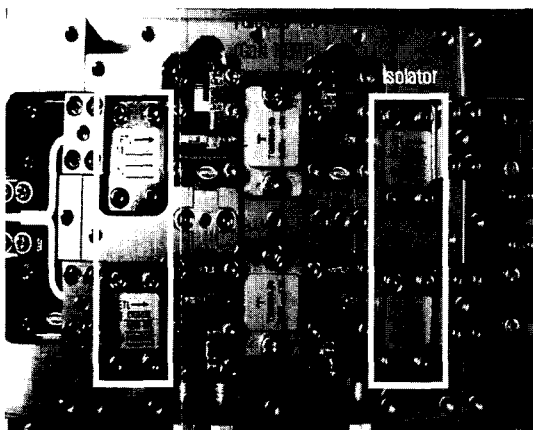


그림 5. 측정된 전치증폭단 + 구동증폭 모듈1의 이득과 VSWR
Fig. 5. The measured gain and VSWR of pre-amplifier stage + drive-amplifier module1.



(a) 구동증폭 모듈1
(a) The driver-amplifier module1



(b) 구동증폭 모듈2
(b) The driver-amplifier module2

그림 4. 제작된 구동증폭단
Fig. 4. The fabricated drive amplifier stage.

치증폭단을 보여주고 있으며 그림 3은 측정된 전치증폭기의 이득과 VSWR로 9.4GHz에서 이득은 36.5dB이다.

구동증폭단은 주전력증폭단을 구동하기 위한 증폭단으로 Toshiba社의 GaAs 소자로서 P_{out} 45dBm, 이득

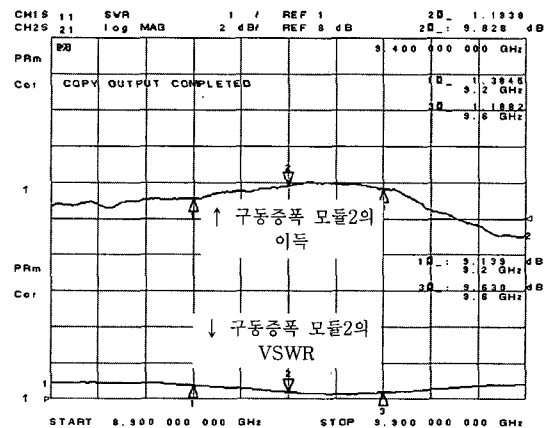


그림 6. 측정된 구동증폭 모듈2의 이득과 VSWR
Fig. 6. The measured gain and VSWR of driver amplifier module2.

7dB, PAE 25%인 30W급 TIM8996-30을 사용한 모듈1과 GaN 소자로서 P_{out} 47dBm, 이득 9dB, PAE 31%인 50W급 TGI8596-50을 사용한 2단 병렬구조로 된 모듈2로 구성되어 있다.

모듈1 자체의 특성은 무신호시, Id_q = 4.5A@V_d = +10Vdc이고 전치증폭단과 모듈1을 연결하면 무신호시, Id_q = 3.2A@V_d = +26V, 그리고 P_{out} 46.7dBm, I_t = 3.7A@V_d = +26Vdc이다. 또한 모듈2의 경우는 무신호시, Id_q = 2.8A@V_d = +26Vdc이고 P_{out} 51.3dBm, I_t = 1.2A@V_d = +26Vdc이다. 측정된 이득은 9.4GHz에서 모듈1이 9.04dB, 모듈2가 9.928dB, 그리고 전치증폭단과 모듈1을 연결했을 때는 44.855dB가 나왔다. 그림 4(a)와 그림 4(b)는 각각 실제 제작한 구동증폭단 모듈1과 모듈2이며 그림 5와 그림 6은 전치증폭단과 모듈1과 연결했을 때와 모듈2 자체의 측정된 이득과 VSWR을 나타

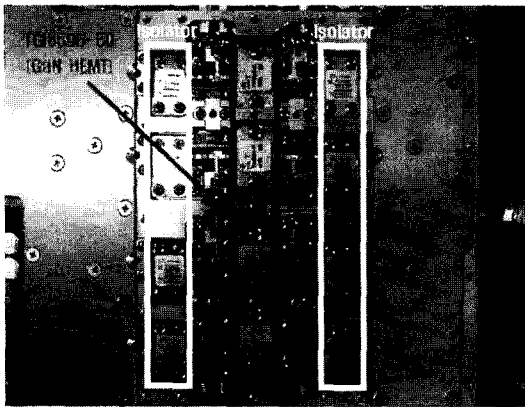


그림 7. 제작된 주전력 증폭단
Fig. 7. The fabricated main-power amplifier stage.

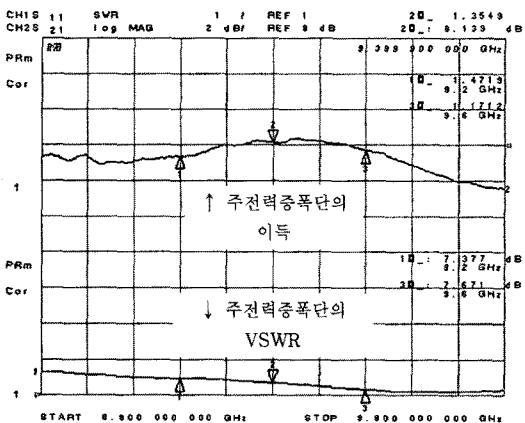


그림 8. 측정된 주전력증폭단의 이득
Fig. 8. The measured gain of main-power amplifier stage.

낸다.

주전력증폭단은 Toshiba社의 GaN 소자로서 P_{out} 47dBm, 이득 9dB, PAE 31%인 TGI8596-50를 4개를 사용하여 200W이상의 출력을 내고 부득이한 고장에 대한 신뢰성 확보를 위해 병렬구조로 구성하였다. 전류특성은 무신호시, $I_{dq} = 6A@V_d = +26V_{dc}$ 이며 9.4GHz에서 이득은 8.139dB이다. 그림 7은 실제 제작한 주전력증폭단이며 그림 8은 측정된 주전력증폭단의 이득과 VSW를 나타내고 있다.

3. 저손실 전력결합기/분배기 설계

GaAs/GaN 3단 CSA형 200W SSPA를 설계할 때 각 단에서 증폭된 신호를 균등하게 결합하거나 분배시켜 주는 전력결합기/분배기는 고출력 증폭을 위해 병렬구조를 사용하는 SSPA의 성능을 좌우하는 중요한 요소이다. 전력결합기/분배기에서 손실이 많이 발생하므로

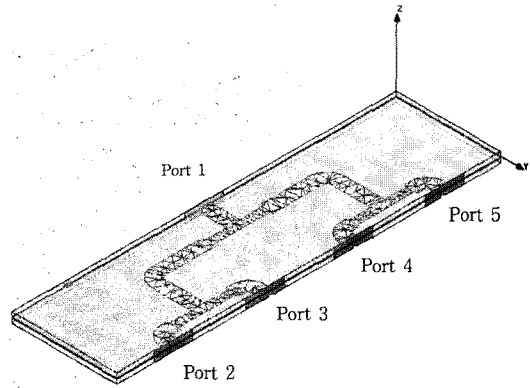


그림 9. 4단 전력분배기 레이아웃
Fig. 9. The layout of the 4-way power divider.

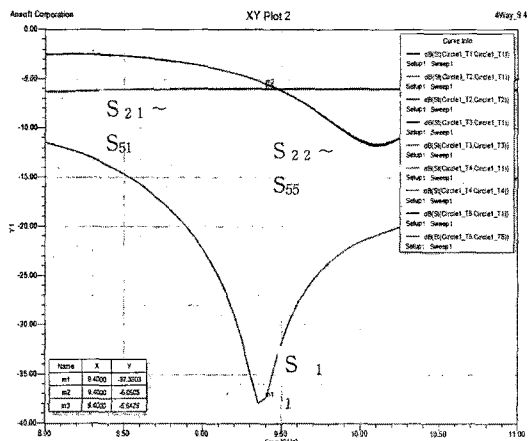


그림 10. 4단 전력분배기의 시뮬레이션 결과
Fig. 10. The simulated result of 4-way power divider.

고효율과 고출력을 위해 입출력 전력은 최소한의 삽입 손실(insertion loss)로 결합 및 분배되어야 한다. 따라서 본 논문에서는 격리도(isolation) 특성은 나빠지지만 최소한의 삽입손실을 위해 기존의 윌킨슨 분배기(wilkinson divider) 대신 저항을 제거시킨 T-접합(T-junction) 전력분배 형태를 선택하였다. 그림 9와 그림 10은 각각 설계한 저손실 전력분배기와 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 그림 9를 보면 9.4GHz대역에서 S_{11} 의 경우 약 -35dB이상으로 좋은 특성을 보였으며 $S_{21} \sim S_{51}$ 은 약 -6.1dB으로 손실을 줄일 수 있었다. 앞서 언급했듯이 $S_{22} \sim S_{55}$ 는 삽입손실을 최소화하기 위해 저항을 제거시켜 약 -5.5dB를 나타내어 격리도 특성이 우수하지 못했다.

4. 순차 바이어스 회로 및 RFC

각 단의 증폭소자에 신호의 손실 없이 안정적으로 증폭소자를 구동시키기 위한 바이어스 회로(bias circuit)

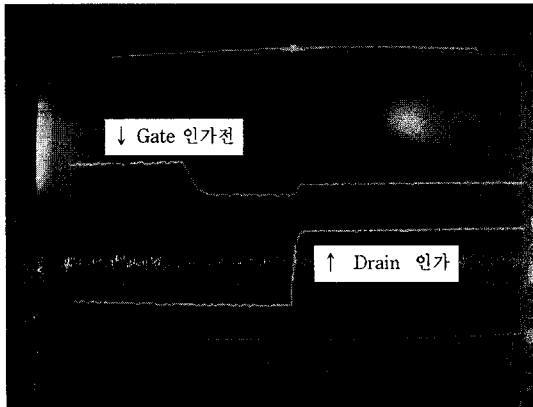


그림 11. 바이어스 회로 측정결과
Fig. 11. The measured result of bias circuit.

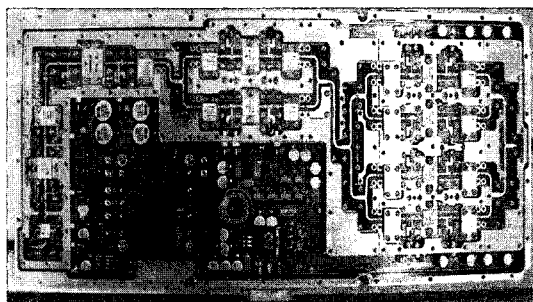


그림 12. 최종 설계된 3단 CSA 200W X-대역 SSPA 내부구조
Fig. 12. The finally designed internal structure of 3-stage CSA 200W X-band SSPA.

도 중요한 부분이다. 본 논문에서는 증폭소자를 안정적으로 구동시키기 위한 전원 및 전류를 공급할 수 있는 바이어스 회로 및 RFC 회로를 설계하였다. 설계한 바이어스 회로에서 지연시간을 결정하기 위한 RC 지연회로를 구성하였으며 단순히 RC 충/방전 회로를 이용하여 100ms 정도의 지연을 가지도록 하였다. 이때 커패시턴스 값이 커지므로 공간적인 제약을 받게 되고 임의로 지연시간을 결정하기가 쉽지 않기 때문에 비교기를 사용하였다.

그림 11은 설계한 바이어스회로의 측정결과를 나타낸다. 그림에서 상측이 게이트 인가전압이고 하측이 드레인 인가전압이다. 그림 11의 결과는 각 모듈의 증폭소자에 동시에 공급되므로 어느 모듈에서 측정하든 그림 11의 결과에 나타난 데이터에서 크게 벗어나지 않는다.

그림 12는 최종적으로 개발한 X-대역 펄스압축 200W SSPA의 구성을 보여준다. 전체 사이즈는 375mm X 163mm X 23mm이며 바이어스 회로와 3단 CSA를 보여주고 있다.

III. X-대역 200W SSPA 측정 및 분석

본 논문에서는 전체 모듈 특성을 분석하기 위해 X-대역 반도체 레이더송신기의 설계사양을 참조하여 주파수 범위 9.2GHz-9.6GHz, 펄스주기 1ms, 펄스폭 100us, 듀티사이클 10%, 증폭소자 바이어스 인가조건을 AB급으로 하여 측정 및 분석하였다.

전체모듈의 전류특성은 무신호시, $I_{dq} = 10A@V_d = +30Vdc$ 이고 $P_{out} = 54.2dBm$, $I_t = 6.8A@V_d = +30Vdc$ 이다. 그림 13은 $V_d = +27Vdc$ 일 때의 측정된 이득과 VSWR을 보여주고 있다. 이득을 보면 9.2GHz에서 전체 이득은 59.77dB, 9.6GHz에서 전체 이득은 58.37dB이다. 그림 14는 $V_d = +30Vdc$ 일 때의 전체 모듈의 출력특성을 나타내고 있다. 54.2dBm에서 출력특성이 포화

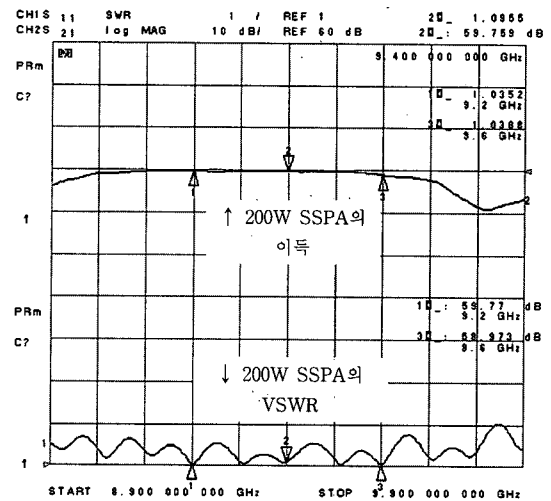


그림 13. 측정된 200W SSPA의 이득과 VSWR
Fig. 13. The measured gain and VSWR of 200W SSPA.

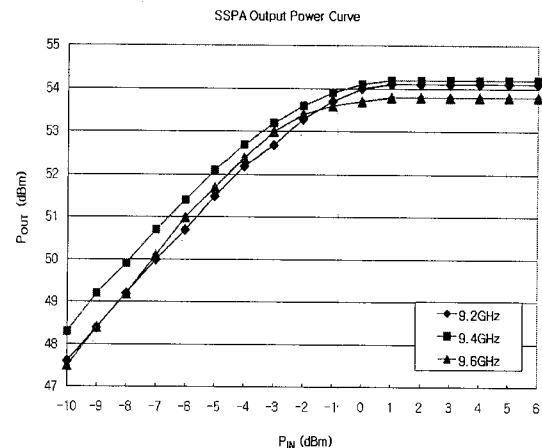


그림 14. 200W SSPA의 출력특성
Fig. 14. The output characteristic of 200W SSPA.

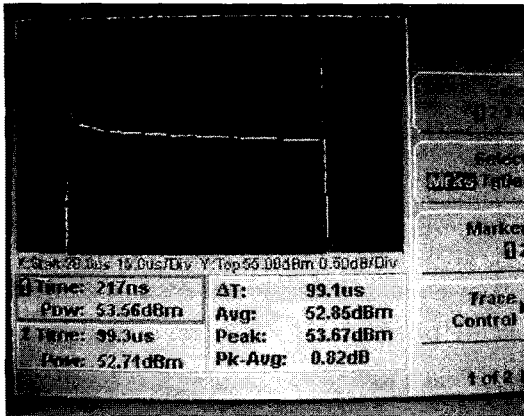


그림 15. 200W SSPA의 펄스특성
Fig. 15. The pulse characteristic of 200W SSPA.

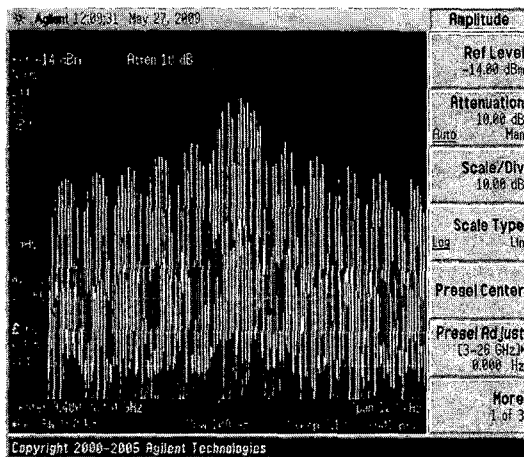


그림 16. 200W SSPA 스펙트럼
Fig. 16. The 200W SSPA spectrum.

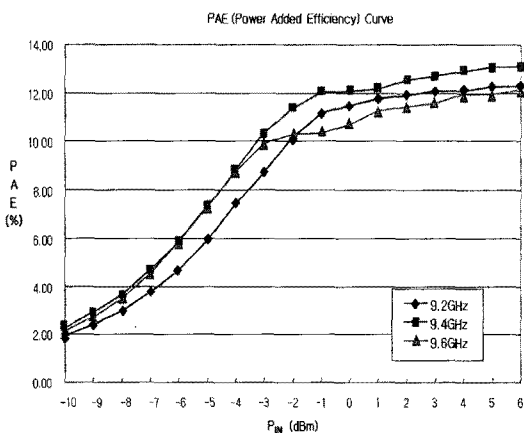


그림 17. 200W SSPA의 전력부가효율 특성
Fig. 17. The PAE characteristic of 200W SSPA.

(saturation)되는 것을 알 수 있다. 그림 15는 전체 모듈의 펄스특성을 보여주고 있다. 펄스폭 99.1us에서 최대 전력 53.67dBm, 평균전력 52.85dBm으로 P-A(Peak Power - Average Power)가 0.82dB인 것을 볼 수 있다.

그림 16은 측정된 스펙트럼을 보여준다.

그림 17은 전체 모듈의 입력에 따른 전력부가효율(PAE, Power Added Efficiency)를 나타낸다. PAE는 다음 식(1)과 같이 구할 수 있다.

$$PAE = \frac{P_{OUT} - P_{IN}}{P_{DC}} \times 100 \quad (\%) \quad (1)$$

여기서, P_{OUT} 은 RF 출력전력이고 P_{IN} 은 RF 구동전력, 그리고 P_{DC} 는 DC 입력전력이다. 전체 모듈이 이득이 충분히 커서 RF 입력전력을 무시하고 P_{DC} 계측기상에서 측정되는 평균값으로 하여 구하면 전체 모듈의 PAE는 약 12.9%가 나온다.

효율이 낮게 나타난 것은 전체 라인업의 전치증폭단 및 구동증폭단에서 GaAs를 사용하였기 때문이며 보통 GaAs를 사용할 경우 펄스증폭 시(Duty Cycle 10%, A or AB급 구동) 대략 포화되는 지점에서 4~5%의 효율밖에 얻을 수 없다. 전체라인업을 GaN HEMT로 사용한다면 25%의 효율(펄스증폭 시)을 얻을 수 있을 것으로 보인다. 전체 모듈에 대한 측정결과를 분석을 토대로 X-대역 200W SSPA의 성능을 표현하면 표 1과 같다.

표 1. X-대역 200W SSPA의 성능
Table 1. The performance of X-band 200W SSPA.

	단 위	성 능
동작 주파수	GHz	9.2 - 9.6
최대 출력전력	W	> 200
전체 이득	dB	> 59
펄스주기	ms	1
듀티사이클	%	10
펄스폭	us	100
동작전압(DC)	Vdc	30
전체 사이즈	mm	375 X 163 X 23

IV. 결 론

본 논문에서는 기존에 상용 레이더시스템에서 고효율 증폭을 위해 사용된 진공관의 문제점 및 민군겸용 기술(dual use) 항목 지정에 따른 문제점 개선, 그리고 X-대역 펄스압축 반도체형 레이더를 위한 200W SSPA를 개발하였다.

개발한 SSPA는 전치증폭단, 두 개의 모듈로 구성된 구동증폭단, 고효율 증폭을 위한 주전력증폭단으로 구성

되어있다. 두 번째 구동증폭단과 주전력증폭단의 경우 X-대역에서 충분한 이득과 요구하는 전력을 얻기 위해 GaN소자를 병렬구조로 구성하였으며 각 단의 바이어스를 순차적으로 인가시키기 위한 바이어스 회로를 설계하였다.

본 논문에서 개발한 SSPA는 주파수 범위 9.2GHz에서 9.6GHz, 펄스주기 1ms, 펄스폭 100us, 듀티사이클 10%, +30Vdc, AB급 바이어스의 조건에서 출력전력 200W이상, 전체이득 59dB이상의 성능을 보였다. 다만 펄스특성의 경우 P-A특성이 0.82dB로 개선이 요구된다. 또한 전력결합기/분배기, 아이솔레이터 뿐만 아니라 드레인 스위칭(Drain Switching)을 하여 효율을 높일 수 있는 방법들에 대한 연구가 필요하다.

본 논문에서 개발한 X-대역 200W SSPA는 펄스압축 기술을 이용하여 수신방식에 적용하면 수백 와트로 기존의 진공관 증폭기와 동일한 성능을 얻을 수 있으며 고품위 반도체 레이다시스템에 적용이 가능하다.

참 고 문 헌

- [1] A. Mizuhara, "Bandwidth and group delay extension for an X-band 250kW CW klystron for JPL/NASA deep space radar", *IEEE International Vacuum Electronics Conf.*, pp. 77-88, April, 2004.
- [2] R. Dionisio, G. Andriolo, "High power X-band helix TWT for airborne radar applications", *IEEE International Vacuum Electronics Conf.*, pp. 357-358, April, 2002.
- [3] Merrill Skolnik, "Radar Handbook," 3rd Edition, *MxGraw-Hill*, pp. 8.1-8.44, pp. 11.1-11.36, 2008.
- [4] D.O Edward, B.Michael, T.Harry C.james, "SOLID-STATE RADAR TRANSMITTERS", *ARTECH HOUSE, INC*, pp.131-142, 1985.
- [5] U.K. Mishra, P. Parikh, Y. Wu, "AlGaIn/GaN HEMTs-An Overview of Device Operation and Applications", *Proceeding of the IEEE*, Vol. 9, no. 6, pp. 1022-1031, June, 2002.
- [6] I. Boshnakov, "Practical Design Comparison Between High-Power GaAs MESFET and GaN HEMT", *High Frequency Electronics*, pp. 18-28, October, 2007.
- [7] J. Trew, G.L. Bilbro, W. Kuang, Y. Liu, H. Yin, "Microwave AlGaIn/GaN HFETs", *IEEE Microwave Magazine*, Vol. 6, pp. 56-66, March, 2005.
- [8] S.G. Qadir, J.K. Kayani, S. Malik "Digital Implementation of Pulse Compression Technique for X-band Radar" *International Bhurban Conf. Applied Sciences & Tech.*, pp. 35-39, January, 2007.
- [9] Li, Zhu, X, Hu, Y, Lin, "Pulse compression for radar pulse signal in matched Fourier transform domain", *International Conf. Radar CIE'06*, pp. 1-4, October, 2006.
- [10] Vendor Transistor datasheet, TOSHIBA Microwave Semiconductor.
- [11] Vendor Transistor datasheet, Eudyna device Inc.

— 저 자 소 개 —



김민수(학생회원)
 2009년 경남대학교 정보통신공학과
 학사 졸업.
 2009년 경남대학교 정보통신공학과
 석사 재학.
 <주관심분야 : 능동소자 설계 및
 응용, SSPA>



이춘성(정회원)
 1998년 금오공과대학교 전자통신
 공학과 학사 졸업.
 2009년 현재 (주)한국통신부품
 연구소 책임연구원.
 <주관심분야 : 능동소자 설계 및
 응용, SSPA>



이상록(정회원)
 1996년 경남대학교 전자공학과
 석사 졸업.
 2009년 현재 (주)한국통신부품
 연구소 책임연구원.
 <주관심분야 : 능동소자 설계 및
 응용, SSPA>



이영철(정회원)
 2009년 현재 경남대학교 정보통신
 공학과 교수.
 <주관심분야 : 능동소자 설계 및
 응용, SSPA>