GaN HEMT를 이용한 S-대역 레이더시스템용 고출력 펄스 SSPA 설계

김기원*, 곽주영*, 조삼열*
*(주)알에프에이치아이씨
e-mail:kwkim@rfhic.com

A Design of High Power Pulsed Solid State Power Amplifier for S-Band RADAR System Using GaN HEMT

Ki-Won Kim*, Ju-Young Kwack*, Samuel Cho*
*RFHIC CORPORATION

요 약

본 논문에서는 GaN HEMT 소자를 이용한 고출력 고효율 특성을 가지는 광대역 SSPA의 개발을 다루고 있다. 개발한 SSPA는 8W 급과 15W 급의 GaN HEMT 소자를 사용하여 Pre-Drive 증폭단을 구성하였으며, Drive 증폭단은 50W/150W급 GaN HEMT 소자를 직/병렬구조로 사용하였다. Main 증폭단은 4-way 분배기와 결합기를 이용한 Balanced Structure를 적용하여 높은 출력을 구현하였으며, 안정적인 동작을 위하여 음(-)전원 제어 회로와 출력신호 검출 회로를 포함하고 있다. 제작된 SSPA의 사용가능 대역은 2.9㎓~3.3㎓로 단일전원을 사용하고 있으며 100us 펄스 폭, 10% Duty Cycle 조건에서 60dB의 전압이득, 1㎾ 출력과 약 28% 효율 특성을 가지는 것으로 측정되었다. 본 논문에서 개발한 SSPA는 S-대역을 사용하는 레이더시스템의 송신단에 적용될 수 있다.

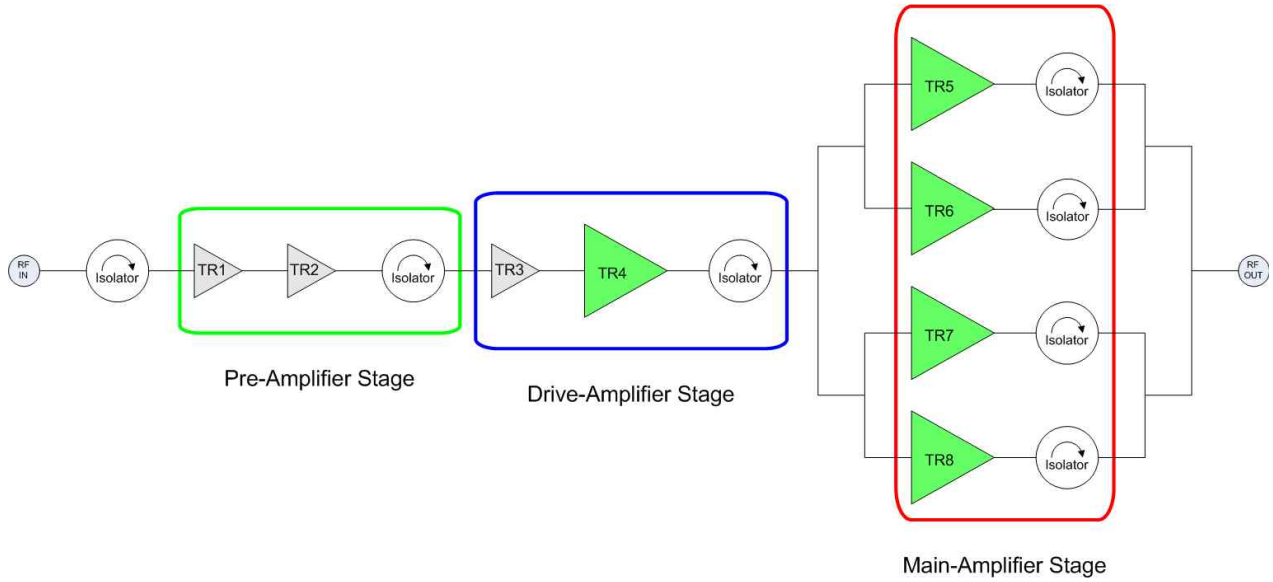
1. 서론

기존의 레이더시스템은 높은 출력 특성을 가지는 클라이스트론 (Klystron), 마그네트론 (Magnetron), TWTA (Traveling Wave Tube Amplifier)가 주를 이루어 왔다. 하지만 SSPA(Solid State Power Amplifier)의 효율성과 신뢰성 그리고 광대역 특성에 대한 관심이 높아지면서 레이더시스템에 적용하려는 노력이 높아지고 있다[1].

레이더시스템에 사용되는 전력증폭기의 경우 ㎾급 이상의 높은 출력 특성을 가지며, 이에 따라 크기가 크고 많은 열이 발생하는 등의 취약점을 가지며, 방열이 가능한 냉각 시스템이 동반되어야 하며 높은 비용이 발생되는 단점을 수반한다. 하지만, SSPA로 구성하게 될 경우 크기 및 냉각 시스템의 소형화는 물론 시스템 자체의 효율성에서도 높은 개선효과를 가질 수 있다. 이에 따라 높은 출력이 가능한 SSPA에 대한 개발이 이루어지고 있으며, 최근 들어 고효율과 고출력특성을 가지는 SSPA 연구에 대한 관심이 집중되고 있다.

특히 GaN(Gallium nitride) HEMT 소자를 이용한 증폭기는 다른 소자에 비해 높은 효율 특성을 가진다. 일반적으로 반도체에 사용되는 소자에는 규소(Si) 반도체와 갈륨비소 (GaAs) 반도체, 그리고 질화갈륨(GaN) 소자가 있다. 이 중 질화갈륨 (GaN) 소자를 기반으로 한 트랜지스터는 고출력이 요구되는 무선 통신용 출력단 증폭기로 주목 받고 있다. 앞서 언급한 질화갈륨을 이용한 GaN HEMT 소자는 높은 온도에서도 고출력 특성을 나타내며, 높은 항복 전압과 빠른 전자의 이동 속도 특성 및 절연파괴 내성으로 기존에 사용되고 있는 규소나 갈륨비소 기반의 소자들에 비해 고전압 고전류 특성을 갖는다[2].

본 논문에서는 레이더시스템에 적용이 가능한 고출력 고효율 특성을 가지는 펄스 SSPA의 제작에 관하여 다루고 있으며, 본론에서는 GaN HEMT 소자의 특징과 각각의 증폭단과 증폭단의 결합에 사용된 신호 분배기, 그리고 실제 제작된 SSPA의 특성에 대하여 다루고 있다.



[그림 1] 제작된 1kW급 펄스 SSPA의 블록도

2. 본론

2.1 GaN HEMT 소자

서론에서 설명한 바와 같이 GaN HEMT 소자는 높은 전계전자 이동속도와 파괴전계의 특성을 갖는 제 3세대 반도체 소자이다. 또한, 다른 물질에 비해 큰 Band-gap 특성으로 인해 GaN HEMT 소자는 높은 항복 전압, 극성효과 및 압전효과로 높은 전하밀도를 얻을 수 있으며, 높은 전류 밀도 구현이 가능하다. 고전압 고전류 특성 이외에도 높은 포화전자 이동속도로 인한 고주파 동작의 용이성은 고주파 고출력 전력증폭기의 사용에 적합하다. 하지만 높은 출력을 사용하는 전력증폭기에서 die 형태로의 적용은 어려움이 있으며, Packaging 공정을 통하여 사용 하여야 한다.

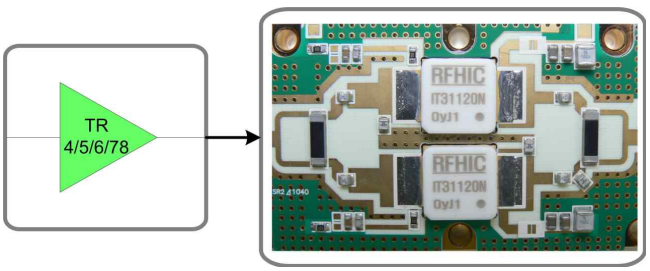
본 논문에서 제작된 SSPA에 사용된 GaN HEMT 소자는 8W, 15W, 50W 급 출력과 150W급 출력을 갖는 소자로써, (주)RFHIC에서 Packaging 공정을 통해 제작 하였다.

증폭기 제작에 사용된 GaN HEMT 소자는 S-대역에서 특성을 극대화 시킬 수 있도록 Package 내부에서 Wire와 Mos Capacitor를 이용한 Impedance 정합을 실시하였다. 질화갈륨 반도체 소자의 Active Model을 사용하여 Circuit Simulation Tool 인 Agilent사의 ADS를 통해 Transistor Internal Matching Simulation을 진행하였으며, 그에 따른 PCB External Matching Simulation을 진행하였다. 그 결과 제한된 면적 내에서 효율을 극대화 시킬 수 있었으며 PCB를 제작 검증 하였다.

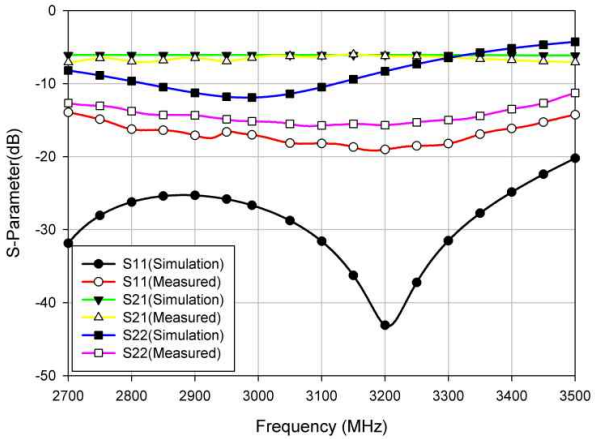
2.2 증폭단 및 전원부 구성

본 논문에서 제작된 SSPA는 전원회로부와 Pre-Drive 증폭단, Drive 증폭단, Main 증폭단으로 구성하였다. Pre-Drive 증폭단에서는 8W급, 15W급 GaN HEMT 소자를 직렬로 구동시켜 높은 이득을 가지도록 하였다. Drive 증폭단에서는 50W급, 150W급 GaN HEMT 소자를 직병렬로 구동하여 높은 이득과 출력특성을 갖도록 하였으며, 각각의 증폭단 소자의 보호를 위하여 증폭단 사이에 Isolator를 삽입하였다. [그림 2]에서는 Main 증폭단에 사용된 300W급 증폭단을 나타내고 있다. 300W급 증폭단은 150W급 GaN HEMT 소자를 Wilkinson 결합기/분배기를 이용하여 병렬로 구현하였으며, 높은 출력의 증폭이 가능하도록 하였다.

전원부에서는 각종 소자의 전원 공급과 보호를 위한 회로를 적용하여 회로의 안정성과 효율성을 높였다. GaN HEMT 소자는 Gate에 음(-)전원이 인가되어야 하며, 그러지 않은 상태에서 Drain 에 전압이



[그림 2] 150W급 GaN HEMT로 구성된 300W급 증폭단의 구조

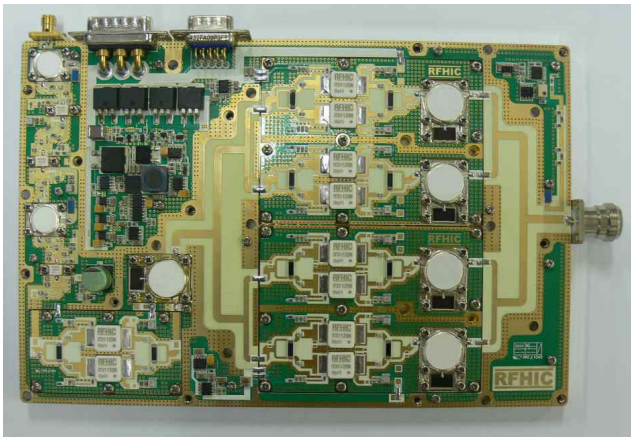


[그림 3] T-junction 분배기의 S-Parameter 측정 파형

인가될 경우 소자가 Damage를 입거나 상황에 따라 소손될 수 있다. 따라서 전원부에는 GaN HEMT 소자의 Gate에 안정적으로 음(-)전원을 공급할 수 있는 회로와 Gate와 Drain에 각각의 전원을 순차적으로 인가할 수 있는 순차회로가 필요하다. 제작된 SSPA는 FET 및 OP-AMP등을 이용한 각각의 회로를 구성하여 GaN HEMT 소자를 보호할 수 있도록 전원부를 구현하였다. 부가적으로, 증폭기의 스위칭 회로와 출력 검출 회로를 구현하여 포함 시켰다. 검출회로는 외부에서 증폭기의 출력 확인이 가능하도록 하며, 스위칭 회로를 이용하여 외부에서 증폭단을 스위칭을 할 수 있도록 하여 시스템단위의 효율을 높일 수 있도록 하였다.

2.3 Balanced Structure

본 논문에서 제작한 SSPA는 높은 출력을 구현하기 위해 각각의 GaN HEMT 소자를 [그림 2]와 같이 Balanced Structure 구조를 이용하여 병렬로 결합하였다. 일반적으로 신호의 분배와 결합에는 Wilkinson 방식과 T-Junction 방식을 사용한다. T-junction 분배기는 삽입 손실이 적어 높은 출력을 얻을 수 있는 이점이 있지만, Impedance 정합이 어려우며 각 Port간 Isolation이 좋지 않은 단점 역시 가지고 있다. Wilkinson 방식은 광대역 주파수 범위에서의 평탄한 이득 특성과 T-junction 방식에 비해 VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) 특성이 좋은 장점을 갖는다[3]. 이 구조는 높은 출력 전력과 안정된 격리 특성을 얻기 위한 구조로 널리 사용되고 있으며, 제작된 SSPA에서도 이점을 고려하여 2-way 분배기에는 Wilkinson 방식을 적용하였고, 4-way 분배기에는 T-Junction 방식을 적용하였다.



(a) 증폭기의 내부 모습

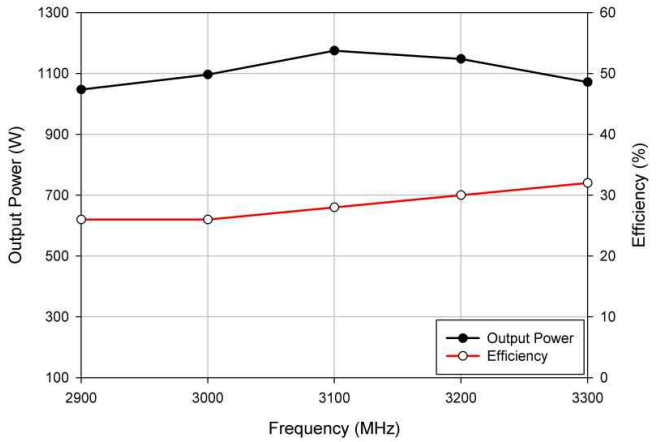
(b) 증폭기의 외부 모습

[그림 4] 제작된 1kW 전력 증폭기의 내부와 외부

제작된 SSPA의 증폭단은 2-way Balanced Power Amplifier를 기본 구조로 구성하였다. [그림 2]와 같이 두 개의 GaN HEMT 소자가 입력단/출력단에 Wilkinson 분배기를 이용해 병렬로 결합되어있다. 이를 다시 4-way 분배기를 이용하여 병렬로 결합하였다. Main 증폭단에 적용된 4-Way 분배기는 삽입 손실이 적은 T-Junction을 적용하여 고출력 고효율 특성을 유지하도록 하였다. [그림 3]에서는 Main 증폭단에 사용된 4-way T-Junction 분배기의 특성을 보이고 있다. 시뮬레이션을 이용하여 제작된 4-way 분배기는 PCB 기판으로 제작하여 실제 측정 시 대역 내에서 최소 -6.3dB의 삽입손실 특성과 최대 -16dB의 VSWR 특성을 가지는 것을 알 수 있다.

2.4 Amplifier의 제작 및 RF 특성 측정

[그림 4]는 본 논문에서 제작한 SSPA를 나타내었다. 앞서 설명한 바와 같이 하나의 Module안에 전원부와 증폭부를 모두 구성하였다. Module 전체의 이득은 60dB로 높은 이득으로 인한 소자간의 보호를 위하여 각각의 증폭단과 전원부를 격벽과 Isolator를



[그림 5] 제작된 증폭기의 주파수별 출력 및 효율 특성

이용하여 격리와 보호를 하였다.

제작된 SSPA는 50V의 단일 전원을 사용하였으며, 100us 펄스간격에 10% Duty Cycle의 펄스 조건에서 측정을 실시하였다. [그림 5]는 대역내 주파수별 출력 전력과 효율을 그래프로 나타낸 것이다. 측정 결과 각 주파수별 출력 전력은 일반적으로 1㎾, 효율은 28%이며, 펄스 Droop은 최대 1dB로 나타났다. 실제 제작된 SSPA의 크기는 220×145×25mm (Cover 포함)로 기존의 레이더시스템용 전력증폭기에 비해 매우 작은 크기로 구현이 가능한 것을 알 수 있다. 제작된 SSPA의 특성을 [표]1에 정리하였다.

3. 결론

본 논문에서는 차세대 소자로 주목받고 있는 고효율의 GaN HEMT 소자를 이용하여 고출력 고효율 특성을 갖는 펄스 증폭기를 구현하였으며, 높은 출력의 증폭을 위하여 Main 증폭단에서 4-Way Balanced Structure를 적용하여 ㎾급의 고출력 특성을 구현하였다.

제작된 펄스 증폭기는 Solid State 형태의 SSPA로 구현함에 따라 기존에 레이더시스템에서 사용되어 오던 마그네트론, 클라이스트론 방식에 비해 크기가 작은 장점을 가지고 있다. 또한 증폭소자를 기존의 Silicon BJT가 아닌 GaN HEMT로 구현함으로써 고출력 고효율 특성을 가질 수 있도록 하였다. 특히, Main 증폭단에 사용된 150W급 GaN HEMT 소자는 Package 내부에서 Internal Matching을 진행하여 S-대역에서의 출력과 효율을 극대화 하였다. 그 결과 2900~3300 ㎒의 S-대역에서 1㎾의 고출력 특성을 가지고, 목표 대역내에서 28%의 효율과 최대 1dB 이하의 펄스 droop 특성을 나타내었다.

[표 1] 제작된 SSPA의 측정결과

항목	측정결과	비고
동작 주파수	2900~3300 ㎒	
출력 전력	1000 W	Typ.
이득	60dB	Typ.
효율	28%	Typ.
펄스폭	100us	
Duty Cycle	10%	
펄스 Droop	1dB	max.
외형 크기	220×145×25 mm	

제작된 레이더시스템용 증폭기는 SSPA로 구현하여 기존의 증폭 시스템에 비해 동급 출력에서 높은 효율과 신뢰성 그리고 공간적인 장점을 가진다. 따라서 본 논문에서 제작된 SSPA를 레이더시스템에 적용시킬 경우 높은 RF 특성과 공간효율에서 큰 이점을 가질 수 있다.

참고문헌

[1] J. H. Woo, G. W. Choi, "1.5 ㎾ solid-state pulse microwave amplifier for S-band radar application", *IEEE Radio and Wireless Symposium 2006*, pp. 171-174, Jan. 2006.

[2] 오성민, "질화갈륨 고출력 소자의 성능 최적화에 관한 연구", 순천향대학교 공학석사학위논문, 2008.

[3] Pozar, Davied M., *Microwave and RF wireless systems*, WILEY, 2001

[4] STEVE C. CRIPPS, "RF Power Amplifiers for Wireless Communications", Artech House, 1999.

[5] GUILLERMO GONZALEZ, "Microwave Transistor Amplifiers Analysis and Design" Prentice Hall, 1997.