

자동 출력 제어를 적용한 Ku-대역 SSPA 개발

Development of Ku-Band SSPA Using Automatic Level Control

이동주 · 장채운 · 안세환 · 주지한 · 김혁* · 박재웅* · 나경일**

Dongju Lee · Cha Eun Jang · Se-Hwan An · Ji-Han Joo · Hyeok Kim* · Jae Woong Park* · Kyoungil Na**

요약

레이다 센서 분야에서는 기존의 TWTA(traveling-wave tube amplifier)를 SSPA(solid-state power amplifier)로 대체하기 위한 개발이 진행되고 있다. SSPA는 거친 환경 조건, 특히 주변 온도의 변동 조건에서도 안정적인 송신이 가능해야 하므로, 자동 출력 제어 회로를 개발하여 주변 온도에 따라 SSPA의 drain 전압을 조정할 수 있도록 하였다. 개발된 Ku-대역 펄스 방식의 SSPA는 $-30^{\circ}\text{C} \sim 70^{\circ}\text{C}$ 온도 범위 내에서 $56 \text{ dBm} \pm 0.5 \text{ dB}$ 의 출력 전력을 달성하였다.

Abstract

In radar sensors, solid-state power amplifiers (SSPAs) have been developed as replacements for the traveling-wave tube amplifiers (TWTAs). The SSPAs have to deliver stable output power at harsh environmental conditions, especially from change of ambient temperatures. Thus, we developed the automatic level control (ALC) circuit, which controls drain voltages versus temperatures of the SSPA. The Ku-band pulsed SSPA achieves output power of $56 \text{ dBm} \pm 0.5 \text{ dB}$ for the temperature range of -30°C to 70°C .

Key words: SSPA, High Power Amplifier, ALC, Automatic Level Control, Output Power Control

I. 서론

소형 레이더 센서 및 위성 분야에서는 고출력 송신 용도로 기존 TWTA(traveling-wave tube amplifier) 대신 반도체 소자를 적용한 SSPA(solid-state power amplifier)로 대체하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있으며^[1-3], 반도체 공정 기술의 발전으로 소형/집적화가 되어가는 추세이다.

Ku-대역 TWTA는 단일 TWT와 구동증폭기가 결합되어 시스템에서 요구하는 고출력 신호를 생성할 수 있지만, 동작을 위해 수십 kV 이상의 고전압 공급기가 요구되

며, 히터를 동작시키기 위한 부가 회로 및 예열시간이 필요하여 상대적으로 운용 절차가 복잡하다. 이에 비해 SSPA는 예열 시간이 요구되지 않으며, 단일 소자의 출력 레벨이 TWT보다 낮기 때문에 N-way 방식으로 소자를 결합하여 고출력 신호를 생성한다. 이 방식의 장점은 운용 중 일부 소자가 고장나더라도 나머지 소자들로 운용이 가능하며, 점검 및 불량 소자 교체가 용이하다.

Ku-대역 SSPA에서 고출력 송신을 위해서는 GaN (gallium nitride) 기반의 HPA(high power amplifier) 개발이 필요하다. 단일 HPA의 출력은 $50 \sim 100 \text{ W}$ 수준^[3]으로 제

†이 연구는 2025년도 LIG디펜스&에어로스페이스의 연구비 지원으로 연구되었음.

LIG디펜스&에어로스페이스 연구개발본부(R&D, LIG Defense&Aerospace)

*RFHIC 방산개발본부(R&D_Defense, RFHIC)

**국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· Manuscript received January 15, 2026 ; Revised February 25, 2026 ; Accepted March 9, 2026. (ID No. 20260115-001)

· Corresponding Author: Dongju Lee (e-mail: dongju.lee@ligdna.com)

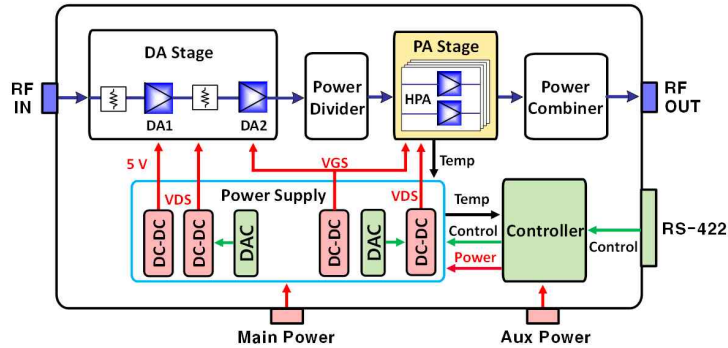


그림 1. SSPA 구조
Fig. 1. Architecture of the SSPA.

한되므로, 출력 한계를 극복하기 위해 binary 방식의 전력 결합으로 수백 W급 출력의 SSPA를 개발하였다^[1]. 해당 구조에서 적용한 binary 결합 방식은 결합 개수가 증가할 수록 경로 증가로 인한 손실이 커지므로 삽입 손실 최소화 및 안테나로 연결되는 급전경로를 고려하여 waveguide 기반의 전력결합기를 적용하였다.

소형 레이더용 SSPA는 다양한 환경 조건하에서 운용되기 때문에 공급 전압 및 RF 입력 변동뿐만 아니라 주변 온도의 변화에 대해서도 안정적인 송신 출력을 유지해야 한다. 공급 전압의 변동에 대해서는 SSPA 내부에 스위칭 방식의 DC-DC 컨버터를 적용하여 안정적인 출력 전압 공급이 가능하며^[4], RF 입력 변동에 따른 출력 변동을 최소화하기 위해서는 구동증폭기 및 전력증폭기가 포화 영역에서 동작하도록 다단으로 구성한다. 포화 영역에서 동작시 전력증폭기의 이득이 감소하기 때문에 구동증폭기 단에서 더 큰 출력 공급이 필요하지만, 주파수 대역 간 출력 편차를 최소화할 수 있다는 장점이 있다.

SSPA는 주변 온도 변화로 인해 출력 특성이 영향을 받으며, 특히 고온 조건에서 동작 시 반도체 소자의 thermal drift 현상으로 인해 초기 출력 레벨이 저하될 수 있다. 고온 조건에서 출력을 보상하는 방안으로는 가변 이득 증폭기(VGA)를 활용한 ALC(automatic level control) 기법이 고안되었으며^[5], 출력을 감지하여 VGA의 이득을 조절하는 방식으로 출력 레벨을 조정하였다. 이 방식은 SSPA가 선형 구간에서 동작할 경우 조절이 용이하나, 포화 영역에서 동작하는 SSPA의 출력을 제어하기 위해서는 더 많

은 감쇄가 필요하므로 선형 구간으로 진입하게 되어 RF 입력 변동에 민감해진다는 단점이 있다.

본 논문에서는 온도 조건에서 자동으로 출력 레벨을 조절할 수 있는 ALC 기능을 제안하였으며, 해당 기능을 집적하여 RF 입력 변동 및 주변 온도에 둔감한 Ku-대역 400 W급 SSPA를 개발하여 성능을 검증하였다.

II. 본 론

2-1 SSPA 개발

제안하는 SSPA의 블록 다이어그램을 그림 1에 나타내었다. 전원공급기는 넓은 공급 전압 범위에서 고효율로 동작해야 하므로 스위칭 방식의 Buck converter를 적용하였으며, 구동증폭기와 전력증폭기에 필요한 동작 전압인 +5 V, Drain 전압(VDS) 및 Gate 전압(VGS)으로 강압하여 공급한다. 모든 증폭기는 PRF(pulse repetition frequency) 신호에 동기화되어 펄스 방식으로 동작하므로 각 소자의 특성에 맞게 VDS 혹은 VGS를 펄스 변조 회로를 통해 공급한다. DA1(driver amplifier 1) 소자는 Analog Devices社의 제품을 적용하였으며, +5 V 전원을 입력받아 ON/OFF 동작을 수행한다. DA2 및 HPA 소자는 GaN HEMT 기반으로 자체 개발한 50 W 및 70 W급 MMIC를 각각 적용하였으며, 상승/하강시간 최소화를 위해 VGS 음전원을 통해 ON/OFF 동작을 수행한다.

RF 입력 변동 조건에서 SSPA 출력의 민감도를 최소화하기 위해 구동증폭기 및 전력증폭기가 포화 영역에서

동작하도록 증폭기를 다단으로 구성하였으며, 구동증폭기는 RF 입력 10 dBm 입력 시 40 dBm 이상 출력을 고려하여 50 W급 DA2 소자를 종단에 적용하였다.

2-2 50 W급 DA2 검증

50 W급 DA2는 UMS社의 GH15-10 Design Kit를 통해 150 nm GaN HEMT 기반으로 설계되었다. SSPA 내 구동 증폭기 적용을 고려하여 이득 30 dB 이상을 목표로 4-stage 구조를 적용하였고, 그림 2의 power sweep 시뮬레이션 결과에서는 입력 26 dBm 조건에서 PAE 30 % 이상으로 가장 좋은 특성을 보였다. 구동증폭기 출력을 결정하는 소자이므로 후단의 전력증폭기에 과입력이 인가되지 않도록 입력 레벨을 back-off 시켜 22 dBm 로 적용하였고, 이 조건에서 출력 레벨은 47 W (~46.72 dBm)으로 설계되었다. 설계된 DA2는 UMS社의 open foundry를 통해 그림 3과 같이 제작되었으며, 성능시험 결과를 표 1에 요약하였다. VDS=28 V, 입력 레벨 22 dBm 인가 시 출력 45.62~46.8 dBm으로 측정되어 목표 출력인 40 dBm 이상, PAE 25 % 이상을 충족하고 있다.

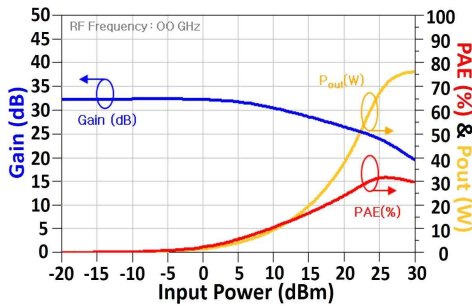


그림 2. DA2 출력, 이득 및 PAE 시뮬레이션 결과
Fig. 2. DA2 simulated results of pout, gain, and PAE.

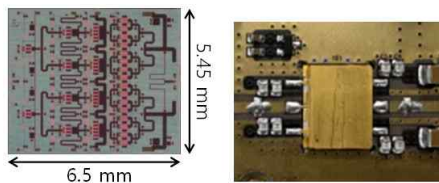


그림 3. 제작된 DA2 사진
Fig. 3. Photograph of the fabricated DA2.

표 1. DA2 시험 결과

Table 1. Measurement results of DA2.

Test Conditions		VDS=28 V, Pin=22 dBm		
Freq		F _L	F _C	F _H
DA2	Pout (dBm)	46.80	46.61	45.62
	Current (A)	5.40	5.20	4.30
	PAE (%)	31.6	31.4	30.2

2-3 70 W급 HPA 검증

70 W급 HPA 소자의 power sweep 시뮬레이션 결과를 그림 4에 나타내었다. 입력 23 dBm 조건에서 HPA의 출력은 48.7 dBm, PAE는 39 % 이상으로 가장 좋은 특성을 보였다. HPA의 출력을 더 높여 포화 영역에서 동작시키기 위해 그림 5와 같이 3-stage 증폭기 구조를 적용하였고, 최종 출력단에 T-junction 결합기를 적용하여 출력 효율을 극대화하였다. HPA는 공간 효율을 고려하여 PCB 내 2-path 구조로 제작되었으며, HPA의 상·하단 각 drain 바이어스 경로에 커패시터를 가능한 근접하게 배치하여 기생 성분을 최소화하고 펄스 상승/하강 시간을 단축하였다.

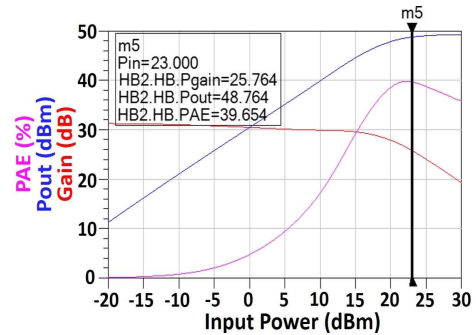


그림 4. HPA 출력, 이득 및 PAE 시뮬레이션 결과
Fig. 4. HPA simulated results of pout, gain, and PAE.

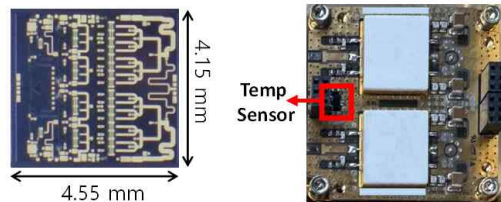


그림 5. 제작된 HPA 사진
Fig. 5. Photograph of the fabricated HPA.

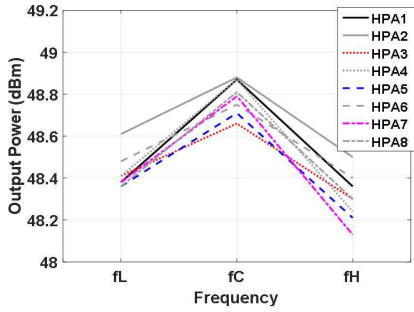


그림 6. HPA 출력 전력 측정 결과
Fig. 6. Measured output power of the HPA.

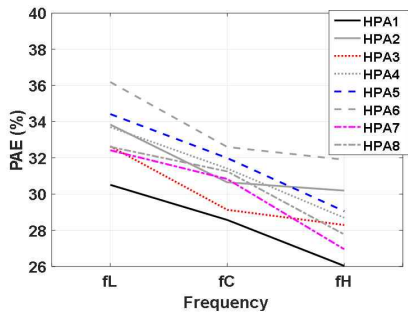
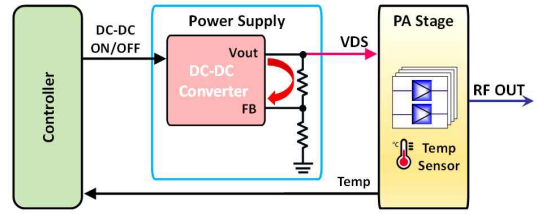


그림 7. HPA PAE 측정 결과
Fig. 7. Measured PAE of the HPA.

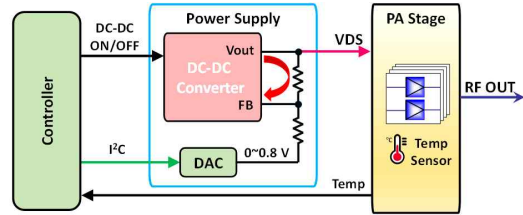
HPA1~8에 대한 출력 및 PAE 측정 결과를 그림 6 및 그림 7에 각각 비교하였다. 측정 조건은 $V_{DS}=22\text{ V}$, 입력 전력 26 dBm , duty cycle 10% 이며, peak power meter로 출력을 측정하였고 current probe로 peak current를 측정하여 PAE를 계산하였다. 그림 6에서 중심 주파수 기준으로 출력 $48.66\sim 48.88\text{ dBm}$ 범위로 목표치인 48.5 dBm 를 만족하고 있으며, 시제별 편차 0.4 dB 이내로 고른 결과를 보였다. f_c 주파수 대비 f_h 주파수에서 출력이 $0.3\sim 0.6\text{ dB}$ 저하되었으며, HPA 조립 시 wire bonding 및 PCB 전송선로의 영향으로 손실이 증가하여 PAE가 $2\sim 3\%$ 가량 저하되었으나, 목표치인 25% 이상을 충족하고 있다.

2.4 ALC 기능 구현

SSPA의 출력 레벨을 조정하기 위한 ALC 구현 방안을 그림 8에 나타내었다. DC-DC 컨버터의 v_{out} 전압을 조절하기 위해서는 v_{out} 전압을 센싱하여 분배 저항을 통해 결정한 전압값을 FB 단자에 인가하며, 분배 저항값을 조



(a) ALC 회로 미적용
(a) Without ALC circuit



(b) 제안하는 ALC 회로
(b) Proposed ALC circuit

그림 8. 제안하는 ALC 블록 다이어그램
Fig. 8. Block diagram of the proposed ALC.

정하면 컨버터 내부의 controller에 인가되는 FB 전압값을 변경할 수 있어 원하는 v_{out} 값을 설정할 수 있다. 단, 제안하는 SSPA에서는 온도별로 자동으로 v_{out} 값을 조정해야 하므로, 분배 저항값 대신 그림 8(b)와 같이 분배 저항의 ground 전압값을 조정하여 FB 전압값을 미세하게 조정하는 방안을 제시하였다. 온도 데이터는 그림 5와 같이 각 HPA 근처에 부착된 온도센서 전압값 총 8개를 제어기에서 입력받으며, 이 중 가장 높은 값을 기준으로 제어기에서는 EEPROM에 저장된 lookup table을 참조하여 DAC 제어값을 출력한다. 이 값은 DAC를 통해 DC-DC 컨버터의 FB 단자로 인가되어 원하는 v_{out} 전압으로 출력되며, 전력증폭기에 공급되어 HPA 8개의 V_{DS} 전압으로 활용된다. 해당 기능이 정상 동작하기 위해서는 온도 구간별로 SSPA 출력 레벨에 대한 lookup table이 필요하므로, 온도 챔버 환경에서 SSPA 단품 시험을 통해 그림 9와 같이 온도별 출력 레벨을 사전 검증하였다.

25°C 기준 SSPA 출력 및 효율 최적화를 위해 V_{DS} 를 18 V 로 조정하고 저온과 고온 조건에서 출력을 비교하였다. -30°C 에서는 증폭기의 이득이 증가하므로 최종 출력이 상온 대비 0.27 dB 상승하여 ALC 기능을 적용하지 않았으나, 70°C 에서는 출력이 0.78 dB 감소하여 적절한 출

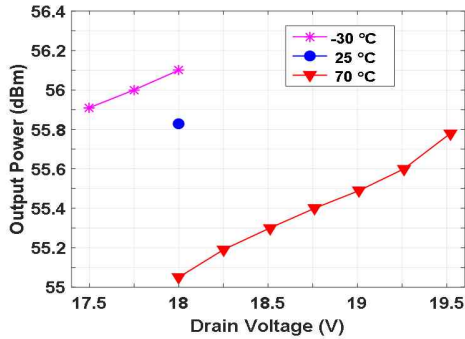


그림 9. VDS 대비 SSPA 출력 전력 측정 결과
Fig. 9. Measured output power of the SSPA versus VDS.

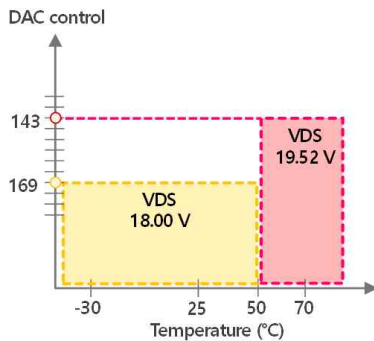


그림 10. 주변 온도별 VDS
Fig. 10. VDS vs ambient temperature.

력 보상이 필요하다. VDS 전압을 sweep하여 출력을 측정 한 결과, 19.5 V로 승압하면 출력이 55.78 dBm 으로 상승 하여 상온 출력과 유사하게 보상이 가능함을 시험으로 검증하였다. 온도별 Drain 전압 설정은 그림 10과 같으며, 50도 기준으로 DAC 제어값을 변경하여 출력 전력을 보상하는 로직을 반영하였고, 저온에서는 출력 변동이 크지 않아 보상값을 적용하지 않았다. 해당 ALC 기능을 포함한 SSPA의 성능을 검증하기 위해 구동증폭기, 전력증폭기, 전원공급기 및 제어기 등을 각각 PCB로 제작하였고, SSPA에 통합하여 검증하였다.

2-5 SSPA 시험 결과

SSPA 출력 검증을 위한 시험 구성도는 그림 11과 같다. SSPA 제어 신호 송신 및 상태 정보 수신을 위해 점검장비를 별도로 제작하였으며, 제어용 PC의 GUI 프로그램을 통해 제

어하며 시험을 진행하였다. 출력 측정은 장비의 손상 방지 및 power sensor의 포화를 방지하기 위해 40 dB waveguide coupler 및 attenuator로 감쇄하여 power sensor 및 peak power meter로 측정하였으며, 측정 결과는 그림 12와 같다.

상온 조건에서 SSPA 송신 출력은 55.83 dBm부터 시작 하며, 전력증폭기의 발열로 인해 출력이 점진적으로 저하 되기 때문에 알루미늄 재질의 SSPA 하우징을 통해 전도 방열이 가능하도록 제작하였고, duty cycle 30 % 조건에서 송신시 20초 후 출력 55.60 dBm을 기록하여 목표치인 56 dBm±0.5 dB 이내를 유지할 수 있음을 검증하였다.

온도 챔버 환경에서 SSPA 출력 시험 결과는 그림 13과 같다. 고온 조건에서만 ALC 기능이 활성화되도록 설정하였고, 최대 동작 온도인 70도에서 출력 55.78 dBm, 20초 송신시 출력이 약 0.24 dB 저하되나, 목표치인 55.5 dBm 이상을 유지하여 동작 온도 -30~70°C 범위에서 ALC 기능이 정상 동작함을 검증하였다.

SSPA의 성능을 표 2에 비교하였다. 본 연구에서는 HPA 결합 개수가 10개 미만이므로 전력결합기의 구조를 단순화 하고 삽입 손실 최소화를 위해 T-junction 방식의 WR-51

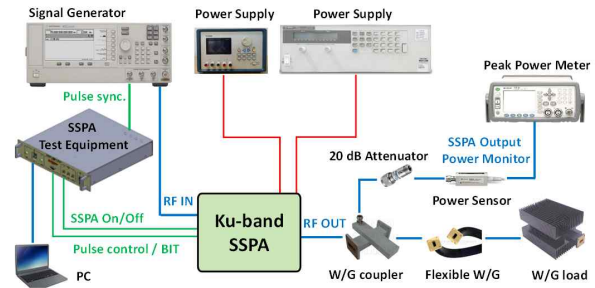


그림 11. SSPA 시험 셋업
Fig. 11. Measurement setup of the SSPA.

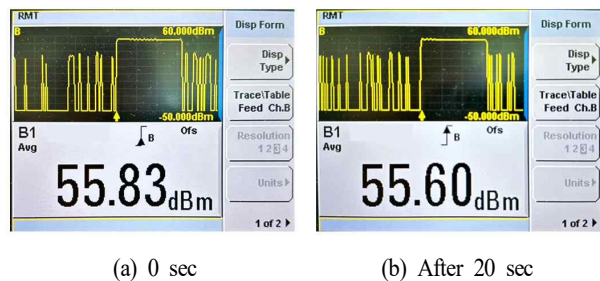


그림 12. SSPA 출력 측정 결과
Fig. 12. Measured output power of the SSPA.

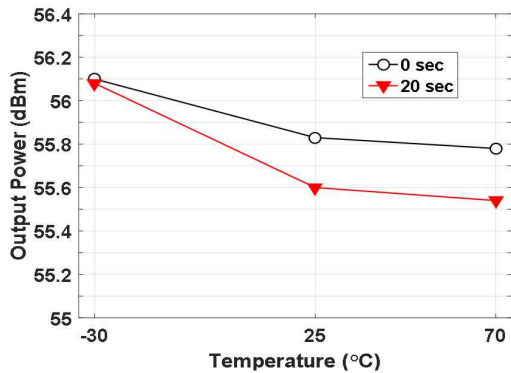


그림 13. 온도별 SSPA 출력 전력 측정 결과
Fig. 13. Measured output power vs ambient temperature.

표 2. SSPA 비교
Table 2. Comparison of the SSPAs.

Performance	This work	[6]	[7]
Frequency (GHz)	Ku-band	X-band (8~11)	Ku-band (13.75~14.5)
SSPA pout (dBm)	55.83	55	53
SSPA pout (W)	382.8	316.2	200
SSPA PAE (%)	25.2	27	N/A
HPA pout (dBm)	48.6 (P _{SAT})	47	43 (P _{1 dB})
# of HPAs for combining	8	8	10
Structure	T-junction combiner	Spatial combiner	Spatial combiner
Power combining efficiency (%)	79.4	87.5	82~91

waveguide로 제작하였다. 참고문헌 [6] 및 참고문헌 [7]의 공간결합 방식보다는 결합 효율이 낮지만, 동일 결합 수의 참고문헌 [6]과 비교 시 출력이 더 높게 측정되었으며, PAE는 약 2% 낮아 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 단위 HPA의 출력 및 효율 차이에 기인하는 것으로 추정된다.

III. 결 론

본 논문에서는 소형 레이다 센서에 적합한 Ku-대역 SSPA를 개발하였고, 출력 전력의 안정성을 검증하였다. 70 W급 HPA 모듈의 출력 성능을 최적화하여 전력증폭기를 개발하였으며, 펄스 동작 및 ALC 제어를 위해 전원공급기와 제어기를 통합하여 자동으로 출력 조절이 가능한 400 W 급 SSPA를 개발하였다. ALC 기능을 ON 할 경우

제어기에서 전력증폭기의 동작 전압을 자동으로 조절하여 출력 전력을 보상할 수 있으며, 동작 온도 $-30\sim 70^{\circ}\text{C}$ 조건에서 SSPA 출력 전력 $56\text{ dBm}\pm 0.5\text{ dB}$ 이내로 안정적으로 유지됨을 확인하였다.

References

- [1] K. Na, J. Park, Y. Lee, H. Kim, H. Kang, and S. Kim, "Study on the Ku band solid-state power amplifier (SSPA) through the 40 W-grade high power MMIC development and the combination of high power modules," *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, vol. 26, no. 3, pp. 227-233, Jun. 2023.
- [2] J. S. Han, J. Y. Jung, S. M. Park, K. D. Yu, B. G. Kim, and H. C. Kim, "Design and fabrication of Ka-band 50-W class solid-state power amplifier," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 32, no. 1, pp. 56-65, Jan. 2021.
- [3] M. Nagasaka, M. Kojima, T. Torii, H. Utsumi, K. Yamanaka, and S. Shinjo, et al., "120-W Ku-band GaN SSPA with diode linearizer for future broadcasting satellites," *IEICE Transactions on Electronics*, vol. E102.C, no. 10, pp. 717-724, Oct. 2019.
- [4] D. Lee, J. Joo, J. Park, J. Kim, and I. Jung, "Power supply for compact radar sensors," in *KIMST Annual Conference Proceedings*, Jeju, Jun. 2024, pp. 661-662.
- [5] N. Jaiswal, P. Bansal, D. R. Prajapati, R. Doshi, P. S. Bharadhwaj, and S. Singh, "Challenges of ALC in high power UHF SSPA for communication payloads," in *2013 Nirma University International Conference on Engineering (NUiCONE)*, Ahmedabad, Nov. 2013.
- [6] D. Passi, A. Leggieri, A. Mattioni, F. D. Paolo, M. D'Antoni, M. Bartocci, and E. Ciaccia, et al., "Small size, high power density, solid state amplifiers for space application," in *2018 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC)*, Rome, Jun. 2018.
- [7] K. Song, F. Zhang, S. Hu, and Y. Fan, "Ku-band 200-W pulsed power amplifier based on waveguide spatially power-combining technique for industrial applications," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 8, pp. 4274-4280, Aug. 2014.

이 동 주 [LIG디펜스&에어로스페이스/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-5847-5549>



2008년 2월: 광주과학기술원 전기전자컴퓨터공학부 (공학석사)
2016년 8월: 광주과학기술원 전기전자컴퓨터공학부 (공학박사)
2016년 9월~현재: LIG디펜스&에어로스페이스 수석연구원
[주 관심분야] 초고주파 SSPA 및 시스템

김 혁 [RFHIC/전문연구원]

<https://orcid.org/0009-0000-0050-5277>



2015년 2월: 한국외국어대학교 전자공학과 (공학사)
2017년 2월: 한국외국어대학교 전자공학과 (공학석사)
2017년 4월~현재: RFHIC 전문연구원
[주 관심분야] 레이더 시스템, 초고주파 송신기 및 시스템

장 채 운 [LIG디펜스&에어로스페이스/선임연구원]

<https://orcid.org/0009-0006-2331-1735>



2023년 2월: 한양대학교 ERICA 전자공학부 (공학사)
2023년 2월~현재: LIG디펜스&에어로스페이스 선임연구원
[주 관심분야] 초고주파 회로 및 시스템

박 재 응 [RFHIC/전문연구원]

<https://orcid.org/0009-0002-3719-6708>



2006년 2월: 순천향대학교 정보기술공학부 (공학사)
2005년 12월~현재: RFHIC 전문연구원
[주 관심분야] 레이더 시스템, 초고주파 송수신기 및 시스템

안 세 환 [LIG디펜스&에어로스페이스/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-8955-9067>



2004년 2월: 숭실대학교 정보통신공학과 (공학사)
2006년 2월: 숭실대학교 정보통신공학과 (공학석사)
2007년 1월~현재: LIG디펜스&에어로스페이스 수석연구원
[주 관심분야] 초고주파 송수신기, 초고주파 회로 및 시스템

나 경 일 [국방과학연구소/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-7759-6928>



2004년 2월: 경북대학교 센서공학과 (공학석사)
2009년 3월: (프) 그로노블 공대 전자공학과 (공학박사)
2010년 5월~2013년 8월: 한국전자통신연구원 선임연구원
2013년 9월~현재: 국방과학연구소 책임연구원

[주 관심분야] 신호처리, 반도체 설계, 소형 레이더 시스템

주 지 한 [LIG디펜스&에어로스페이스/연구위원]

<https://orcid.org/0000-0003-0643-6246>



2004년 8월: 광운대학교 전파공학과 (공학석사)
2008년 8월: 광운대학교 전파공학과 (공학박사)
2008년 7월~현재: LIG디펜스&에어로스페이스 연구위원
[주 관심분야] 레이더 시스템, 마이크로파

신호처리