

<https://doi.org/10.7236/JIIBC.2022.22.6.129>
JIIBC 2022-6-19

Ka대역 100 W급 SSPA 개발

SSPA Development of 100W Class in Ka-band

서미희*, 정해창*, 나경일*, 김소수*

Mihui Seo*, Hae-Chang Jeong*, Kyoung-Il Na*, Sosu Kim*

요약 본 논문에서는 10 W급 전력증폭 GaN MMIC(Microwave Monolithic Integrated Circuit)를 16개 전력 결합하여 100 W급 Ka대역 SSPA(Solid State Power Amplifier)를 개발하였다. 개발된 SSPA를 하나의 안테나를 이용하여 송수신을 하는 Ka 대역 소형 레이더에 적용을 위해 수신 구간에 MMIC 게이트 전원을 제어하여 SSPA 잡음이 수신기에 미치는 영향을 최소화 하였다. 또한 근접한 표적의 큰 수신신호에 의해 수신기가 포화되는 것을 막기 위해 SSPA의 출력 전력을 약 20 dB 감소시키는 기능을 추가하였다. 개발된 SSPA는 10%, 40% 듀티비의 펄스 조건에서 각각 52.4 dBm, 51.6 dBm 이상의 첨두전력을 출력하였으며, 이때 전력효율은 각각 19.2%, 15.8% 이상이다.

Abstract In this paper, a 100 W SSPA in Ka-band was developed by combining 16 GaN MMICs which were 10 W amplifiers, respectively. The gate voltage of SSPA was controlled to minimize the effect of SSPA noise on the receiver during the receiving time. And the transmit power could be reduced about 20 dB to prevent the receiver from being saturated by a large signal from a nearby target. At 10%, 40% duty ratio, the peak power and the power efficiency at center frequency were measured 52.4 dBm, 19.2%, and 51.6 dBm, 16.6% respectively.

Key Words : GaN MMIC, Ka-band, SSPA, Transmitter,

1. 서 론

기존의 레이더에서는 고전력 신호를 송신하기 위해 진행파관 증폭기(TWTA : Traveling wave tube amplifier)를 사용한다. TWTA는 고출력/고효율의 장점이 있으나 대부분 해외 개발품을 사용하므로 고장이 발생했을 경우 대처가 용이하지 않다. 또한, 전자총 동작을 위해 수십 kV의 전압을 사용하므로^[1] 그에 따른 고전압 생성부 개발에도 어려움이 있다. 추가적으로, 고전력 증폭기는 전략 물자 수출 통제(EL : Export License)물품이므로 수

출 규정에 의해 공급이 제한적이다. 따라서 최근 이런 문제들을 극복하고 소형, 경량화된 고출력 증폭기를 개발하기 위해 반도체형 송신기(SSPA, Solid State Power amplifier)^[2]연구가 활발히 진행되고 있다^{[3]-[5]}. 뿐만 아니라 무선통신, 차량용 레이더 등 소형 레이더의 활용도가 높아지면서 높은 전력밀도의 GaN MMIC의 수요가 증가하고, 그에 따른 반도체 설계 및 공정 기술력도 높아지고 있다.

본 논문에서는 10 W급 상용 GaN MMIC를 이용하여 Ka대역 100 W급 SSPA를 개발하였다. 전력분배, 결합

*정회원, 국방과학연구소
접수일자 2022년 9월 16일, 수정완료 2022년 11월 10일
게재확정일자 2022년 12월 9일

Received: 16 September, 2022 / Revised: 10 November, 2022 /
Accepted: 9 December, 2022

*Corresponding Author: seomihui@add.re.kr
Agency For Defense Development, Korea

손실을 최소화하는 분배기, 결합기를 제작하였으며, 레이다 시스템의 적용을 위한 항목들을 식별하여 SSPA에서 구현되도록 하였다.



그림 1. 개발된 SSPA
Fig. 1. Developed SSPA

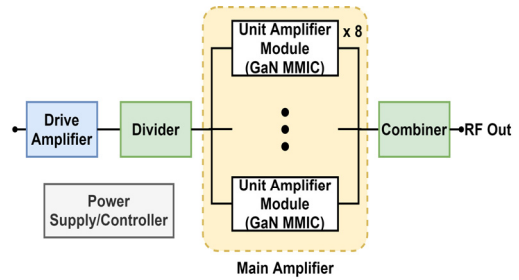


그림 2. SSPA 구조도
Fig. 2. Block diagram of SSPA

II. Ka 대역 SSPA 개발

1. 송신 출력 전력

본 논문에서는 그림 1과 같이 Ka대역 SSPA를 개발하였다. 전력증폭 소자로 국외에서 개발된 10 W급 GaN MMIC를 사용하였다.

개발된 SSPA의 구조도는 그림 2와 같다. 주파수합성기에서 입력된 RF 신호는 구동증폭기를 거쳐 증폭기의 입력전력으로 증폭된다. 송신기의 주증폭기는 8개의 단일 증폭 모듈로 구성된다. 단일 증폭 모듈에 입력된 신호는 T-junction 분배기를 거쳐 전력증폭MMIC에서 증폭된 후, T-junction 결합기에서 결합되어 출력된다. 초기에 개발한 PCB의 microstrip 형태 결합기는 PCB의 조립에 따라 손실이 크게 발생하였고, microstrip에 의한 손실이 추가되어 예상보다 단일 증폭 모듈의 출력이 낮게 측정되었다^[3]. 따라서 결합 손실을 줄이기 위해 T-junction을 도파관 형태로 재설계 하였으며, 제작된 결과 그림 3과 같이 입력손실(S21)과 반사손실(S11) 성능이 PCB상의 T-junction에 비해 향상된 것을 확인하였다. 도파관 T-junction을 적용한 단일 증폭 모듈의 성능은 40% 듀티비의 펄스 파형에서 28 dBm 입력전력에 대해 출력 첨두전력 42 dBm 이상, 이득 14 dB 이상으로 측정되었다(그림 4).

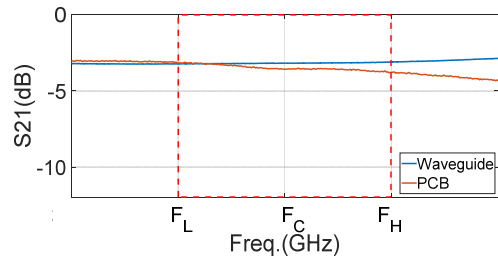
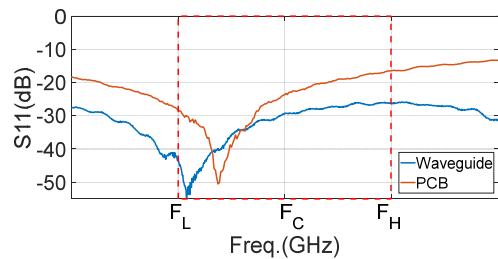


그림 3. T-junction의 S-parameter 측정결과 비교 (a) S11, (b) S21
Fig. 3. Comparison of S-parameter measurement results (a)S11, (b) S21

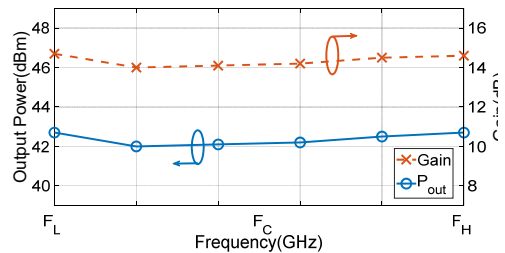


그림 4. 단일 증폭 모듈 측정 결과
Fig. 4. Measurement result of unit amplifier module

구동증폭기 신호를 주증폭기의 단일 증폭 모듈에 각각 분배하고, 각 단일 증폭 모듈의 출력 신호를 결합하기 위해 [6]의 결과를 바탕으로 제작한 삽입손실 0.7 dB 이하, 반사손실 16.36 dB 이상의 8-way 도파관 결합기와 분배기를 적용하였다(표 1).

표 1. 분배기와 결합기의 성능 결과

Table 1. Performance results of power divider and combiner

Parameter	Divider	Combiner
Pass band	Ka band	
Insertion loss 1(dB)	0.65	0.59
Insertion loss 2(dB)	0.72	0.67
Insertion loss 3(dB)	0.69	0.62
Insertion loss 4(dB)	0.57	0.57
Insertion loss 5(dB)	0.69	0.51
Insertion loss 6(dB)	0.48	0.47
Insertion loss 7(dB)	0.43	0.65
Insertion loss 8(dB)	0.52	0.49
Return loss(dB)	16.36	18.33
Isolation(dB)	11.49	16.16

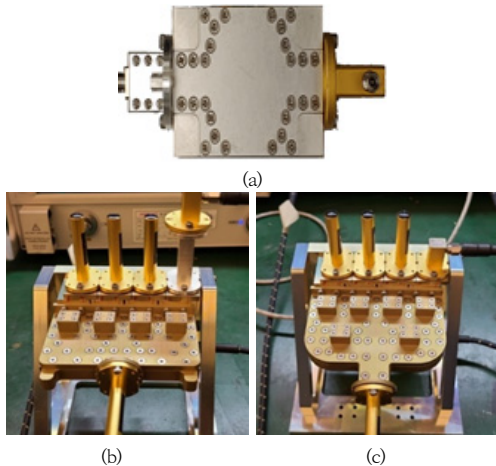


그림 5. (a) 단일 증폭 모듈, 8-way (b) 분배기 및 (c) 결합기
 Fig. 5. (a) Unit amplifier module, 8-way (b) divider and (c) combiner

위에서 기술한 단일 증폭 모듈, 8-way 도파관 결합기와 분배기(그림 5(a), (b))를 적용하여 SSPA를 제작하고 성능을 확인하였다. 송신펄스 듀티비에 따른 송신기의 출력과 효율을 측정한 결과를 그림 4에 나타냈다. 신호 발생기로부터 -5 dBm 신호가 인가될 때, 송신 듀티비 10%인 펄스 신호의 출력 첨두전력은 52.4 dBm 이상, 효율은 19.2 % 이상의 성능을 만족했다. 동일한 입력전력

조건에서 송신 듀티비가 40%로 높아지면 열에 의해 출력이 최대 0.8 dB 낮아지면서 효율이 최대 2.72 % 감소하였으나, 높은 듀티비 조건에서도 본 논문에서 목표로 한 100 W 이상의 출력 전력을 만족함을 확인하였다.

추가적으로 SSPA의 출력 전력이 제어신호에 따라 감소되는 기능을 추가하였다. 기존의 소형 레이더에서는 근접한 표적의 큰 신호로 인해 수신기가 포화되는 것을 방지하기 위해 수신기 초단에 스위치를 이용하여 수신신호를 감쇠시킨다. 단, 스위치는 수신기의 저잡음 증폭기 앞단에 추가 손실을 발생시키므로 수신기의 잡음지수 및 신호 대 잡음비 성능을 악화시키는 요인이 된다. 따라서 본 논문에서는 수신기의 잡음지수 성능 향상을 위해 송신신호 전력을 감쇠시켜 큰 수신신호에 의해 수신기가 포화되는 것을 방지할 수 있도록 하였다. 제어신호에 따라 구동증폭기의 출력을 변경하여 SSPA의 출력 전력이 변경되며, 송신 주파수 F_L , F_C , F_H 에 대해 측정된 감쇠량은 각각 20.7 dB, 19.6 dB, 20.6 dB이다.

2. 펄스 OFF 시 잡음 준위(NSSPA,1)

그림 6은 개발된 SSPA가 적용될 Ka대역 소형 레이더의 구성도이다. 이러한 구조에서는 수신 구간에 송신을 위한 RF 신호가 SSPA에 입력되지 않더라도 동작 중인 SSPA의 잡음지수 및 송신기 이득에 의한 잡음 $N_{SSPA,1}$ 이 수신기에 전달되어, 그림 8과 같이 수신기 단독의 열잡음($N_{Receiver}$)이 아닌 SSPA 잡음이 증폭된 값($N_{SSPA,2}$)이 출력될 수 있다.

본 논문에서 개발하고자 하는 SSPA는 -5 dBm 입력 전력에 대해 약 50 dBm의 출력을 생성하여야 하므로 총 이득은 55 dB 이상이 된다. 기존 Ka대역 수신기^[6] 모듈의 잡음지수와 이득이 각각 약 8 dB, 56 dB 임을 참고하여 송신기의 잡음지수도 동일하게 반영하면 송신기의 잡음준위는 $kT \cdot NF \cdot G$ 에 따라 -111 dBm/Hz가 된다. 여기에서 k 는 볼츠만 상수, T 는 상온 온도, NF 는 잡음지수, G 는 이득이다. 소형 레이더에서 사용하는 순환기의 송수신 분리도는 약 17 dB이므로 수신기에 입력되는 SSPA의 열잡음은 -128 dBm/Hz이다. SSPA 열잡음은 수신기에서 이득 56 dB만큼 증폭되어 $N_{SSPA,2}$ 는 -72 dBm/Hz로 출력된다. 반면에 잡음지수 8 dB, 이득 56 dB인 Ka대역 수신기의 열잡음 $N_{Receiver}$ 는 -110 dBm/Hz로 $N_{SSPA,2}$ 보다 40 dB 이상 더 낮다. 즉 수신 구간에서 SSPA의 잡음으로 인해 레이더의 신호 대 잡음비가 악화 될 가능성이 있다.

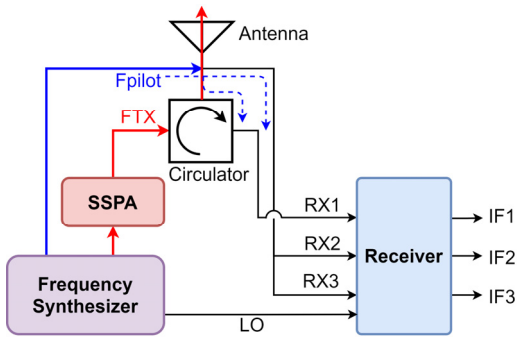


그림 6. Ka대역 소형 레이더용 송수신기 구성도
Fig. 6. Block diagram of transmitter for Ka-band compact radar

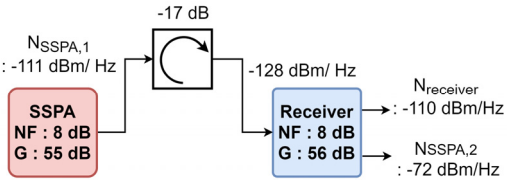


그림 7. SSPA 잡음과 수신기 잡음 비교
Fig. 7. Comparison of noise density between SSPA and receiver

이러한 문제를 피하기 위해 수신기 열잡음을 유지할 수 있는 $N_{SSPA,1}$ 최대값을 그림 8을 참고하여 분석하였다. NF와 G는 수신기 성능을 반영하였으며, 수신기에 입력되는 N_{in} 는 $N_{SSPA,1}$ 에서 송수신 분리도 17 dB 감쇠된 값으로 설정하였다.

그림 9에서 파란 실선은 SSPA 잡음을 포함해서 계산되는 수신기 총 출력잡음 N_{TOT} 이며, 검은 점선은 수신기 단독의 잡음 $N_{receiver}$ 이다. 계산 결과 $N_{SSPA,1}$ 이 -157 dBm/Hz이하이면 N_{TOT} 가 $N_{receiver}$ 와 같을 것으로 판단된다. 따라서 본 논문에서는 SSPA의 열잡음을 -157 dBm/Hz이하로 낮추기 위해 수신 구간에서 이득을 최소화하도록 SSPA의 게이트 전압을 제어하는 기능을 추가하였다.

SSPA의 이득을 제어하는 방안은 드레인 전원을 제어하는 방안과 게이트 전원을 제어하는 방안으로 나눌 수 있다. 드레인 전원을 제어하면 주증폭기를 완전히 OFF 상태로 전환하여 이득을 최소화 할 수 있으나, 드레인 출력단의 높은 캐패시턴스에 의해 스위칭 속도에 한계가 있다. 이상적인 펄스는 사각 파형을 생성해야 하지만, 느린 스위칭 속도에 의해 상승/하강 시간이 길어지면 파형

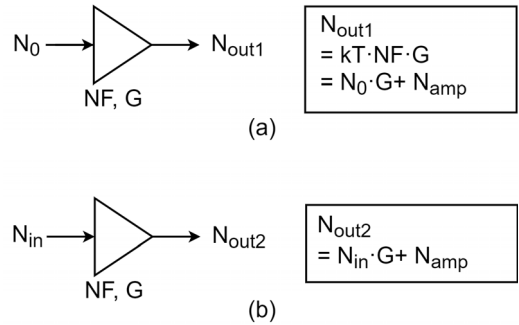


그림 8. (a) 상온 상태의 백색잡음(N_0) 혹은 (b) 이외의 잡음(N_{in})이 입력되었을 때 증폭기에서 출력되는 잡음 분석
Fig. 8. Analysis the output noise of amplifier according to the noise density which is (a) white noise(N_0) or (b) other noise(N_{in})

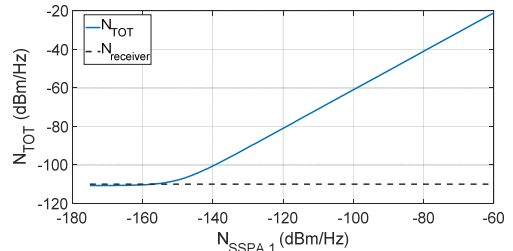


그림 9. SSPA 잡음에 따른 수신기 총 출력잡음 계산 결과 (N_{TOT})
Fig. 9. Analysis result of total noise power density of the receiver according to the SSPA Noise

이 사다리꼴이 되거나 그 형태가 무너져 펄스의 평균전력을 낮추는 요인이 된다. 또한 적용된 MMIC의 드레인 전압은 28 V로 -10 V인 게이트 전압에 비해 높다. 따라서 전원 제어의 안정성 및 빠른 스위칭 속도를 위해 게이트 전원을 제어하여 레이더 운용 파형에 맞춰 펄스로 게이트 전원이 동작되도록 하였다. 개발된 SSPA의 게이트 전원 제어 증 상승/하강 시간은 펄스 반복 주파수(PRF : pulse repetition frequency)와 펄스폭에 관계없이 10.8 nsec/4.1 nsec 로 측정되었다(그림 10). 여기에서 상승 시간은 상승 중 펄스 전력이 10%에서 90% 까지 도달하는데 소요되는 시간이며, 하강 시간은 하강 중 펄스 전력이 90 %에서 10 %까지 도달하는데 소요된 시간을 의미한다. 개발된 SSPA를 이용하면 상승/하강 시간에 대해 전력이 선형적으로 증가한다고 가정할 때, 이상적인 평균전력에 대해 93 nsec의 펄스폭에서 90 %, 930 nsec의 펄스폭에서는 99 %의 평균전력을 출력할 수 있을 것으로 판단된다.

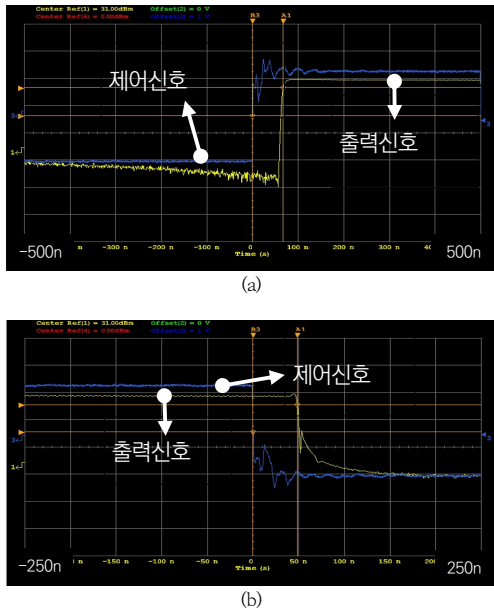


그림 10. SSPA 출력신호의 (a) 상승, (b) 하강 시간 및 지연시간 측정 결과
 Fig. 10. Measurement results of (a) rising, (b) falling time and delay time of SSPA output signal

표 2. 펄스 OFF 시 잡음 준위 측정 결과
 Table 2. Measurement result of SSPA noise power during the pulse OFF

Parameter	F _L	F _c	F _H
N _{out1} (dBm/Hz)	-123.5	-122.6	-120
G(dB)	44.5	45.2	46.7
N _{out2} (dBm/Hz)	-122	-120.3	-118.9
N _{SSPA,1} (dBm/Hz)	-169.8	-168.1	-169.9

그림 10에서 SSPA 출력 신호와 펄스 제어신호 사이에 지연시간이 확인되었다. 펄스 신호의 상승/하강 중, 펄스 제어신호 50% 시점과 출력 신호 50% 시점 사이의 시간 차이를 상승/하강 지연시간으로 정의하며, 각각 67 nsec, 48 nsec로 측정되었다. 다만, 측정된 지연시간을 반영하여 펄스 제어신호를 조절하면 레이더에서 요구하는 SSPA의 운용 파형을 출력할 수 있으므로, 상승/하강 지연시간은 레이더의 성능에 미치는 영향은 미미할 것으로 판단된다.

전원을 제한한 상태에서 N_{SSPA,1}을 측정하였다. -157 dBm/Hz 이하의 열잡음을 계측기를 통해 직접 측정하는 것이 어려우므로 Ka대역 증폭기로 잡음을 증폭하여 스펙트럼 분석기를 통해 측정하였다. 일반적으로 증폭기의

출력 열잡음 N_{out1}은 그림 8(a)와 같이 입력된 상온의 백색잡음 N₀이 증폭기 이득만큼 증폭된 N₀·G와 증폭기 내부 잡음 N_{amp}의 총합으로 계산된다. 따라서 N_{amp}는 아래의 식으로 표현된다.

$$N_{amp} [dB] = 10 \log_{10} \left(10^{N_{out1} [dB]/10} - 10^{(N_0 [dB] + G [dB])/10} \right) \quad (1)$$

이 때 N_{in}은 상온 기준 열잡음 준위로 -174 dBm/Hz이다. 그림 8(b) 셋업으로 SSPA와 증폭기를 연결하면 N_{in}이 N_{SSPA,1}로 대체되어 출력 잡음이 N_{out2}로 측정된다. 따라서 N_{SSPA,1}는 아래의 식으로 계산할 수 있다.

$$N_{in} [dB] = 10 \log_{10} \left(10^{N_{out2} [dB]/10} - 10^{N_{amp} [dB]/10} \right) - G [dB] \quad (2)$$

송신기 출력 주파수 범위 내에서 증폭기 이득 및 N_{out1}과 N_{out2}를 각각 측정하여 N_{SSPA,1}를 계산한 결과를 표 2에 나타내었다. 측정 결과 SSPA의 전원을 제어하면 펄스 OFF 시 잡음이 -157 dBm/Hz이하를 만족하므로, 개발된 SSPA는 펄스 OFF 중에도 Ka 대역 레이더의 수신기 잡음에 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

표 2의 결과에서는 본 Ka대역 수신기와 유사한 성능의 증폭기를 사용했음에도 불구하고 N_{out1}보다 N_{out2}가 더 크게 측정되었다. 이는 그림 8(b)에서 증폭기에 입력되는 SSPA 잡음이 그림 7과 같은 레이더 구성에서 수신기로 입력되는 SSPA 잡음보다 송수신 격리도 만큼 높은 것으로 설명할 수 있다.

III. 결 론

본 논문에서는 10 W 전력증폭 GaN MMIC를 16개 전력 결합하여 100 W급 Ka대역 SSPA를 개발하였다. SSPA는 주증폭기의 입력전력을 제공하는 구동증폭기, 주증폭기를 구성하는 8개의 단일 증폭 모듈, 단일 증폭 모듈 각각에 입력전력을 분배하고, 출력전력을 결합하는 분배기와 결합기를 개발하였다. 단일 증폭 모듈에 도파관 형태의 T-junction 분배기/결합기를 적용하여 PCB T-junction에 비해 삽입손실, 반사손실 성능을 향상시켜 단일 증폭 모듈의 출력전력이 증가하였다. 개발된 SSPA는 10%, 40% 듀티비의 펄스 조건에서 각각 52.4

dBm, 51.6 dBm 이상의 첨두전력을 출력하였으며, 이때 전력효율은 각각 19.2%, 15.8% 이상이다.

추가적으로 개발된 SSPA와 함께 Ka대역 레이더를 구성하는 수신기의 잡음지수 성능 향상을 위해 기존 수신기의 초단 스위치가 수행하던 근접 표적의 신호 감쇠 기능을 SSPA가 대체할 수 있는 방안을 마련하였다. 구동증폭기 제어를 통해 주증폭기의 입력전력을 감소시켜 SSPA의 출력전력이 20 dB 가량 감쇠될 수 있는 기능을 추가하였다. 또한, 하나의 안테나로 송수신을 하는 레이더에 적용을 위해 펄스 OFF 상태에서 SSPA의 잡음이 수신기에 미치는 영향을 최소화 하도록 주증폭기의 게이트 전원을 PRF에 따라 제어하는 기능을 반영하였다. 시험 결과 펄스 OFF 상태에서 SSPA의 잡음은 -163 dBm/Hz이며, 레이더의 송수신 격리도 17 dB에 의한 추가 감쇠를 고려하면 수신기에 미치는 영향은 미미할 것으로 판단된다. 따라서 본 논문에서 개발된 SSPA는 기존의 소형 레이더의 TWTA 송신기를 대체할 수 있을 것으로 기대한다.

References

- [1] S. C. Song, S. K. Kim, S. W. Lee, S. K. Min, "Design and Fabrication of a High-power Pulsed TWTA for Millimeter-Wave (Ka-Band) Multi-Mode Seeker", The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, Vol. 30, No. 4, pp.307-313, Apr. 2019.
DOI: <https://doi.org/10.5515/KJKIEES.2019.30.4.307>.
- [2] K. S. Byun, J. Y. Choi, J. W. Park, "Development of Compact and Lightweight Broadband Power Amplifier with HMIC Technology", Journal of the Korean Academia-Industrial Cooperation Society, Vol. 19, No. 11, pp.695-700, Nov. 2018.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2018.19.11.695>
- [3] J. S. Han, J. Y. Jung, S. M. Park, K. D. Yu, B. G. Kim, 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.
DOI: <https://doi.org/10.5515/KJKIEES.2021.32.1.56>.
- [4] J. H. Lee, H. C. Kim, H. R. Cho, D. J. Lee, S. H. An, M. H. Lee, J. H. Joo, H. R. Kim, "Design and Fabrication of 200W SSPA in Ka-band", The Journal of Korean Institute Information Technology, Vol. 20, No. 2, pp. 79-88, Feb. 2022.
DOI: <https://doi.org/10.14801/jkiit.2022.20.2.79>.
- [5] H. C. Kim, H. R. Cho, J. H. Lee, D. J. Lee, S. H. An, M. H. Lee, J. H. Joo, J. B. Kwon, H. C. Jeong, S. S. Kim, "Design and Fabrication of Ka-band high Power and Low Loss Waveguide Combiner", The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication, Vol. 21, No. 3, pp. 35-42, Jun. 2021.
DOI: <https://doi.org/10.7236/IIBC.2021.21.3.35>.
- [6] H. C. Kim, H. R. Cho, J. H. Lee, D. J. Lee, S. H. An, M. H. Lee, J. H. Joo, J. B. Kwon, H. C. Jeong, S. S. Kim, "Design and Fabrication of Ka-band high Power and Low Loss Waveguide Combiner", The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication, Vol. 21, No. 3, 35-42, Jun. 2021.
DOI: <https://doi.org/10.7236/IIBC.2021.21.3.35>.

저 자 소 개

서 미 희(정회원)



- 2006년 2월 : 고려대학교 물리학과 (이학사)
- 2013년 2월 : 한국과학기술원 물리학과 (이학박사)
- 2013년 3월 ~ 현재 : 국방과학연구소 선임연구원

• 주 관심분야 : 초고주파 레이더 시스템, 초고주파 송수신기

정 해 창(정회원)



- 2008년 2월 : 충남대학교 전자전파 정보통신공학과 (공학사)
- 2010년 2월 : 충남대학교 전자전파 정보통신공학과 (공학석사)
- 2013년 8월 : 충남대학교 전자전파 정보통신공학과 (공학박사)
- 2013년 9월 ~ 현재 : 국방과학연구소 선임연구원

• 주 관심분야 : 초고주파 능동회로 및 시스템

나 경 일(정회원)



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

• 주 관심분야 : 신호처리, 반도체 설계, 소형 레이더 시스템

김 소 수(정회원)



- 1993년 2월 : 경북대학교 전자공학과 (공학사)
 - 1996년 2월 : 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
 - 2014년 2월 : 충남대학교 전자공학과 (공학박사)
 - 1996년 1월 ~ 현재 : 국방과학연구소 책임연구원
- 주 관심분야 : 초고주파 소형 레이더 시스템

※ 이 논문은 2022년 정부의 재원으로 수행된 연구 결과임