

2차 고조파 기반 표적 탐지 레이더용 S-대역 GaN HEMT 전력 증폭기

GaN HEMT Power Amplifier for S-Band 2nd Harmonic-Based Target Detection Radar

문단아¹ · 김지수² · 이다주³ · 오준택⁴Dana Moon¹ · Jisu Kim² · Daju Lee³ · Juntaek Oh⁴

요 약

본 논문은 2차 고조파 기반 표적 탐지 레이더용 2.9~3.2 GHz 범위의 S-대역 전력 증폭기의 설계 및 제작 결과를 제시한다. 90도 개방 스티브를 활용하여 높은 고조파 억제 특성을 달성할 뿐만 아니라, 입력 및 출력 정합단의 추가적인 삽입 손실이 없도록 정합단을 효과적으로 구현함으로써 높은 효율을 가지는 전력 증폭기 구성이 가능하다. 제작된 전력 증폭기의 단일 측정 결과, 2.9~3.2 GHz 범위에서 40 dBm 이상의 최대 포화 전력, 11.6~13.3 dB의 전력 이득, 60.3~73.7 %의 드레인 효율, 58.6 dBc 이상의 2차 고조파 억제 레벨을 확인하였다. 구동 증폭기로 구현된 송신 시스템의 전력 증폭기 측정 결과, 3.0~3.2 GHz 범위에서 60 dBc 이상의 고조파 억제 레벨을 달성하여 2차 고조파 기반 표적 탐지 레이더용 전력 증폭기에 대한 적합성을 검증하였다.

Abstract

This paper presents an S-band power amplifier (PA) operating in the 2.9~3.2 GHz range for 2nd harmonic-based target detection radar. The input and output matching networks utilize transmission lines and $\lambda/4$ open stubs at 2nd harmonic frequencies to effectively match the load impedance to the optimal power matching contours at fundamental frequencies while achieving high 2nd harmonic suppression characteristics. This design achieves these goals without simultaneously introducing additional insertion losses at the input and output. Single measurements of the fabricated PA demonstrate a maximum saturated power exceeding 40 dBm, power gain ranging from 11.6 to 13.3 dB, and 2nd harmonic suppression level of 58.6 dBc or better across the 2.9~3.2 GHz range. When employed as a driver amplifier in the transmitter system, the PA exhibits a 2nd harmonic suppression level of 60 dBc or better within the 3.0~3.2 GHz range, affirming its suitability for 2nd harmonic-based target detection radar applications.

Key words: GaN HEMT, Power Amplifier, Harmonic-Based Target Detection, Harmonic Suppression

I. 서 론

비선형 레이더는 전자 장치의 비선형 응답 특성을 활

용하여 주변 환경의 잡음으로부터 표적을 식별할 수 있는 혁신적인 기술로 주목받고 있으며, 군사 보안뿐만 아니라, 건강 모니터링, 환경 감시 등 다양한 응용 분야에서

「이 연구는 2024년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방과학연구소의 지원을 받아 수행된 미래도전국방기술 연구개발사업임 (No.912902601).」

송실대학교 지능형반도체학과(Department of Intelligent Semiconductors, Soongsil University)

1: 석사과정(<https://orcid.org/0009-0004-0794-7579>), 2: 석 · 박사과정(<https://orcid.org/0000-0002-8633-9253>),

3: 석 · 박사과정(<https://orcid.org/0000-0003-4614-4248>), 4: 부교수(<https://orcid.org/0000-0003-4694-8545>),

· Manuscript received July 10, 2024 ; Revised July 15, 2024 ; Accepted July 15, 2024. (ID No. 20240710-064)

· Corresponding Author: Juntaek Oh (e-mail: kingojt@ssu.ac.kr)

발전되어 왔다^{[1]~[3]}.

비선형 레이다 시스템은 송신부에서 고출력 신호를 방사한 후, 표적에서 반사된 신호의 고조파 성분을 수신부에서 식별하는 원리로 작동된다. 고조파 신호는 기본파 신호에 비해 전력이 작고 신호 대 잡음비(SNR)가 낮으므로, 고조파 신호의 탐지 정확도를 높이기 위해 전력 증폭기에서는 기본파 신호의 출력이 높아야 할 뿐만 아니라, 불필요한 고조파 성분을 포함하지 않아야 한다^[4]. 전력 증폭기는 송신부의 핵심적인 장치로서, 고출력 신호를 방사하는 동시에 높은 고조파 억제 수준을 갖추어야 한다. 고조파 억제 수준을 평가하는 대표적인 지표로, 고조파 억제 레벨[dBc]이 있으며, 이는 전력 증폭기의 1차 출력 전력에 2차 출력 전력을 뺀 값이다. 기존에 보고된 S-대역 고조파 제어 전력 증폭기^{[5],[6]}의 고조파 억제 레벨은 동작 주파수 대역에서 약 45 dBc 이상으로 평가되었다.

본 논문에서는 GaN HEMT 트랜지스터를 이용한 2차 고조파 기반 표적 탐지 레이더용 S-대역 전력 증폭기를 설계하였으며, 제안된 전력 증폭기의 단일 성능 평가 환경과 구현된 구동 증폭기와 제안된 전력 증폭기가 통합된 송신 시스템의 성능 평가 환경에서 약 38.5~39.5 dBm의 출력 전력과 함께 60 dBc의 우수한 2차 고조파 억제 특성을 가지는 것으로 검증되었다.

II. S-대역 GaN HEMT 전력 증폭기 설계

그림 1은 제안하는 전력 증폭기의 회로도이며, 개방스터브를 활용한 2차 고조파 억제 필터가 결합된 정합단으로 구성된다. 입력 정합단에는 6.15 GHz, 6.25 GHz, 출력 정합단에는 6 GHz, 6.2 GHz, 6.4 GHz에 대한 90도 개방

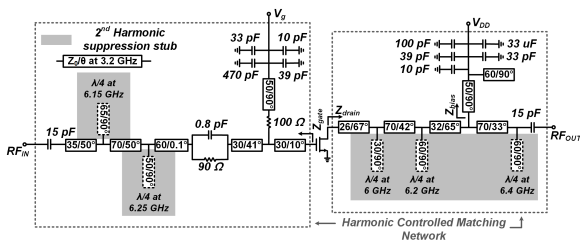


그림 1. 제안한 전력 증폭기의 회로도
Fig. 1. Schematic of the proposed PA.

스터브를 통해 2차 고조파 신호에 대한 억제를 이루었으며, 직렬 전송 선로와 더불어 최적의 로드 및 소스 임피던스를 갖도록 정합하였다. 바이어스 라인으로 보이는 기본파에 대한 임피던스(Z_{bias})가 캐패시터로 인해 완전한 무한값을 가지지 않으므로 기본파의 출력을 높이하고자 기본파에 대한 90도 개방 스테르브를 추가하여 무한대의 임피던스를 갖도록 조정하였다.

그림 2는 동작 주파수(2.9~3.2 GHz) 및 2차 고조파(5.8~6.4 GHz)에 대한 로드풀 임피던스($Z_{loadpull}$) 및 제한한 회로의 드레인에서 보이는 임피던스(Z_{drain})의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 개방 스테르브의 두께와 직렬 전송선로의

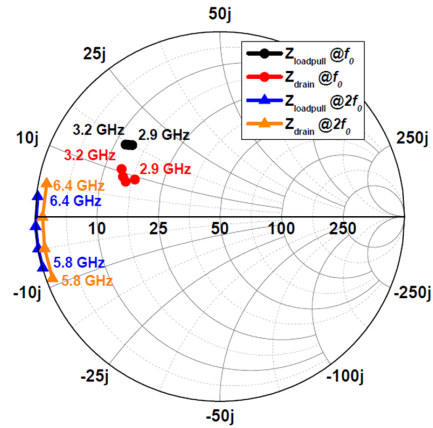


그림 2. 제안한 전력 증폭기의 로드풀 시뮬레이션 결과
Fig. 2. Simulated load pull impedance of the proposed PA.

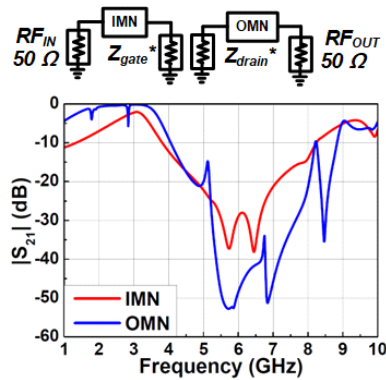


그림 3. 제안한 전력 증폭기의 입력 및 출력 정합단의 $|S_{21}|$ 시뮬레이션 결과
Fig. 3. Simulated $|S_{21}|$ results of input and output matching network of the proposed PA.

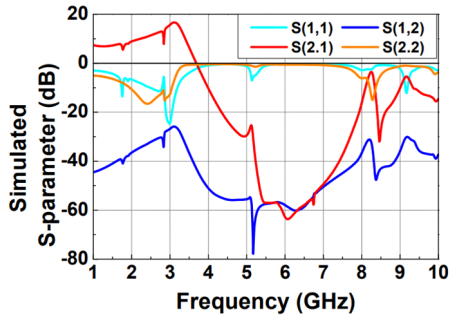


그림 4. 제안한 전력 증폭기의 S-parameter 시뮬레이션 결과

Fig .4. Simulated S-parameter of the proposed PA.

길이 및 두께를 조절하여 로드플 임피던스에 맞춰 최적화하였다. 그림 3은 3.0 GHz에서 보이는 게이트 및 드레인 임피던스(Z_{gate} , Z_{drain})를 중단으로 적용하여 본 입력 및 출력 정합단의 $|S_{21}|$ 시뮬레이션 결과이다. 2.9~3.2 GHz 기본과 대역에서 정합이 잘 이루어진 것을 확인할 수 있으며, 동시에 5.8~6.4 GHz의 주파수 범위에서 입력 및 출력단의 삽입손실은 $-36.4 \sim -28$ dB 및 $-52.6 \sim -42.1$ dB로, 90도 개방 스테르브를 통한 높은 2차 고조파 억제가 이루어진다. 그림 4는 제안한 전력 증폭의 S-parameter 시뮬레이션 결과이다. 소신호 전력 이득 $|S_{21}|$ 의 값은, 2.9~3.2 GHz의 범위에서 약 14.4~16.7 dB의 이득과 2차 고조파 주파수(5.8~6.4 GHz)의 범위에서 약 $-57 \sim -63.7$ dB의 값으로 높은 억제 특성을 가지는 것을 확인하였다.

III. 측정 결과

그림 5는 제작된 S-대역 2차 고조파 제어 전력 증폭기의 회로 사진이다. PCB는 3.2의 유전율과 0.79 mm의 두

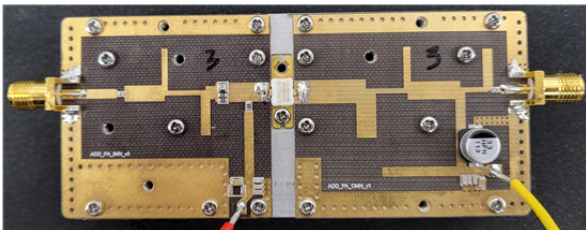


그림 5. 제작된 전력 증폭기의 회로 사진
Fig. 5. Photograph of the implemented PA.

께를 갖는 Taconic 사의 TLC-32 기판으로 제작되었으며, 전체 회로의 크기는 40 mm×93.8 mm이다. Cree 사의 CGH40010F 10W GaN HEMT 트랜지스터를 사용하였으며, gate voltage는 $V_{GS} = -2.6$ V, drain voltage는 $V_{DS} = 28$ V를 인가하여 신호 분석기를 통해 검증하였다. 측정 결과, 2.9~3.2 GHz의 주파수 범위에서 40 dBm 이상의 포화 출력 전력과 약 11.6~13.3 dB의 전력 이득을 갖는다(그림 6). 그림 7은 주파수에 따른 증폭기의 드레인 효율(DE) 및 최대 전력 부가효율(PAE) 및 2차 고조파 억제 레벨의 시뮬레이션 및 측정 결과를 비교한 그래프이며, DE 및 2차 고조파 억제 레벨은 최대 PAE와 동일한 입력 전력에 대한 측정 값을 나타내었다. 측정 결과, 2.9~3.2 GHz의 주파수 범위에서 DE는 60.3~73.7 %, PAE는 52~66.3 %를

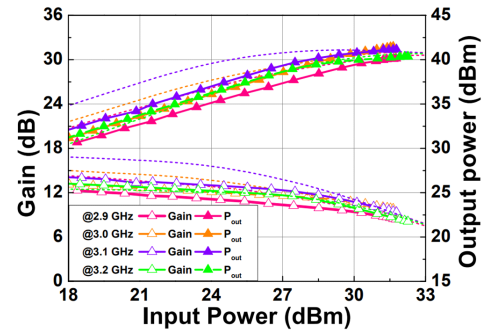


그림 6. 입력 전력에 따른 출력 전력 및 이득 시뮬레이션 결과

Fig. 6. Simulated and measured P_{out} and gain versus input power.

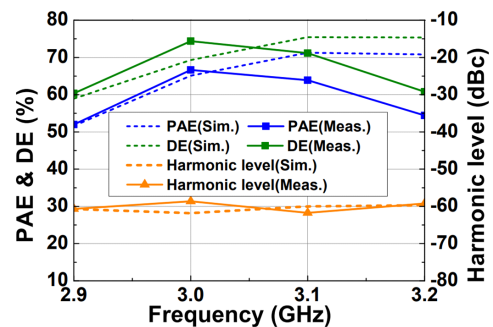


그림 7. 주파수에 따른 출력 전력 및 2차 고조파 억제 레벨 시뮬레이션 및 측정 결과

Fig. 7. Measured results versus operating frequency for P_{out} , gain and 2nd harmonic level.

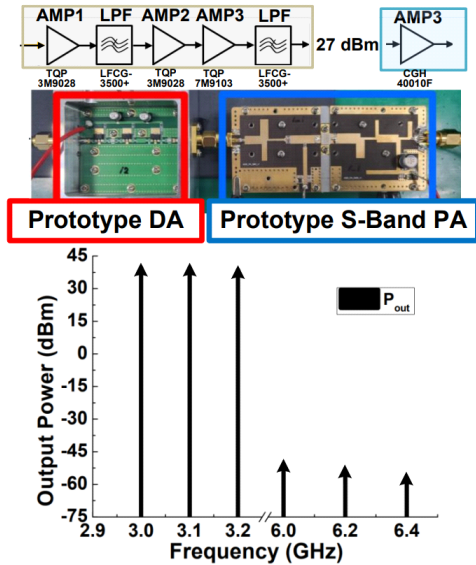


그림 8. 구동 증폭기를 결합한 전력 증폭기의 link budget 및 측정 결과

Fig. 8. Link budget and measurement results using the driver amplifier.

갖는다. 또한, 2차 고조파 억제 레벨은 58.8~61.7 dBc로 높은 고조파 억제 특성을 확인하였다.

그림 8은 구현된 구동 증폭기 모듈을 사용한 link budget 및 측정 결과로, 3.0~3.2 GHz의 주파수 범위에서 약 27 dBm의 포화 전력을 갖는 구동 증폭기와 제안된 전력 증폭기로 구성된 측정 환경을 통해 고조파 기반 표적 탐지 레이더용 송신부 전력 증폭기에 대한 유효성을 검증하였다. 측정 결과, 3.0~3.2 GHz의 주파수 범위에서 38.5~39.5 dBm의 출력 전력과 2차 고조파 출력 전력이 -54~-51 dBm으로 측정되어, 60 dBc 이상의 고조파 억제 레벨을 확인하였다.

IV. 결 론

본 논문은 GaN HEMT 소자를 이용한 고조파 제어 전력 증폭기를 제안한다. 고조파에 대한 개방 스테르브를 활용하여 고조파 억제 필터를 구현하여 높은 고조파 억제 레벨을 달성하였으며, 트랜지스터 모델에 대한 최적의 로드 및 소스 임피던스로 최적화된 전송 선로 정합단을 통해 고전력 출력을 갖추었다. 제작된 전력 증폭기의 단일

측정 결과, 2.9~3.2 GHz 주파수 범위에서 40 dBm 이상의 최대 포화 전력, 60.3~73.7 %의 DE, 58.6 dBc 이상의 2차 고조파 억제 레벨을 확인하였다. 구동 증폭기로 구현된 시스템의 측정 결과, 3.0~3.2 GHz 주파수 범위에서 38.5 dBm 이상의 출력 전력, 60 dBc 이상의 2차 고조파 억제 레벨을 통해 2차 고조파 기반 표적 탐지 레이더용 전력 증폭기에 대한 적합성을 검증하였다.

References

- [1] K. A. Gallagher, R. M. Narayanan, G. J. Mazzaro, K. I. Ranney, A. F. Martone, and K. D. Sherbondy, "Moving target indication with non-linear radar," in *Proceedings of 2015 IEEE Radar Conference(RadarCon)*, Arlington, VA, May 2015, pp. 1428-1433.
- [2] L. Chioukh, H. Boutayeb, D. Deslandes, and K. Wu, "Noise and sensitivity of harmonic radar architecture for remote sensing and detection of vital signs," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 62, no. 9, pp. 1847-1855, Sep. 2014.
- [3] Z. Li, Z. Yang, C. Song, C. Li, Z. Peng, and W. Xu, "E-eye: Hidden electronics recognition through mmWave nonlinear effects," in *Proceedings of the 16th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, Shenzhen, Nov. 2018, pp. 68-81.
- [4] A. El-Awamry, F. Zheng, T. Kaiser, and M. Khaliel, "Harmonic FMCW radar system: Passive tag detection and precise ranging estimation," *Sensors*, vol. 24, no. 8, p. 2541, Apr. 2024.
- [5] J. Jang, J. Kim, and J. Oh, "S-band GaN HEMT power amplifier based on the harmonic control matching network," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 32, no. 11, pp. 1027-1030, Nov. 2021.
- [6] J. Kim, S. K. Hong, and J. Oh, "Highly efficient power amplifier based on harmonic-controlled matching network," *IEEE Microwave and Wireless Technology Letters*, vol. 33, no. 1, pp. 43-46, Jan. 2023.