

# 고조파 제어 매칭단 기반 S-대역 GaN HEMT 전력 증폭기

## S-Band GaN HEMT Power Amplifier Based on the Harmonic Control Matching Network

장 재 원<sup>1</sup> · 김 지 수<sup>2</sup> · 오 준 택<sup>3</sup>

Jaewon Jang<sup>1</sup> · Jisu Kim<sup>2</sup> · Juntaek Oh<sup>3</sup>

### 요 약

본 논문은 2차 고조파 제어가 가능한 매칭단 기반의 고효율 S-대역 전력 증폭기를 제작한 결과를 제시한다. 기본파 및 고조파 대역의 최적 전력 매칭 임피던스에 정합이 가능할 뿐만 아니라, 고조파 대역을 차단이 가능한 체비쇼프 필터 기반 고조파 제어 매칭단을 제안하였으며, 제안된 매칭단을 적용한 전력 증폭기는 추가적인 저역 통과 필터 없이 우수한 고조파 억제 성능과 함께 높은 효율을 가진다. 제안된 회로를 검증하기 위해 제작 및 측정을 진행하였다. 제작된 전력 증폭기는 2.8~3.2 GHz의 주파수 대역에서 61.3~76.3 %의 드레인 효율을 얻었으며, 고조파 대역에서 최소 -46 dBc의 2차 고조파 억제가 이루어짐을 확인하였다.

### Abstract

This paper presents a high-efficiency power amplifier based on a harmonic control matching network. We proposed a harmonic control matching network based on a Chebyshev filter that can match the load to the optimum power matching impedance at fundamental and harmonic frequencies as well as block harmonic signals. The power amplifier applied to the proposed harmonic control matching network has high efficiency and excellent harmonic suppression performance without an additional low-pass filter. The fabrication and measurements were conducted to verify the proposed circuit. The implemented power amplifier achieved 61.3~76.3% drain efficiency in the frequency band of 2.8~3.2 GHz, and it was shown that a second harmonic suppression of under -46 dBc was achieved.

Key words: Harmonic Suppression, Nonlinear Radar, Power Amplifier

### I. 서 론

전자 기기의 소형화로 인하여 기존 군사적 용도로 사용되던 비선형 레이더가 소형 단말기나 불법 촬영·도청 장치의 탐지 등의 다양한 어플리케이션으로 활용 범위가 확대됨에 따라서, 비선형 레이더에 대한 다양한 연구가

진행되고 있다. 전력 증폭기는 비선형 레이더 송수신 회로에서 가장 중요한 회로 중 하나로서, 동작 주파수 대역에서 높은 전력을 출력하는 것뿐만 아니라, 선형성을 유지하면서 고조파 신호의 송신을 억제하여 수신감도를 높이는 것이 중요하다.

최근 이러한 비선형 레이더에 적용 가능한 고조파 신

「이 논문은 국방과학연구소 미래도전국방기술 과제의 재원을 지원받아 수행된 연구임 (UD200035RD).」

승실대학교 전자정보공학부 (School of Electronic Engineering, Soongsil University)

1: 학사과정(<https://orcid.org/0000-0002-3321-7092>), 2: 석사과정(<https://orcid.org/0000-0002-8633-9253>), 3: 조교수(<https://orcid.org/0000-0003-4694-8545>)

· Manuscript received October 27, 2021 ; Revised November 9, 2021 ; Accepted November 12, 2021. (ID No. 20211027-097)

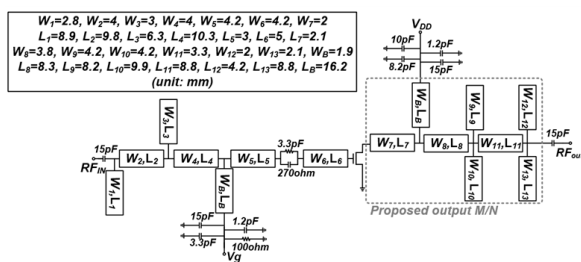
· Corresponding Author: Juntaek Oh (e-mail: kingojt@ssu.ac.kr)

호 억제 기능을 갖는 전력 증폭기의 다양한 연구가 발표되었다<sup>[1]~[5]</sup>. 하지만 가장 간단한 방법으로서 전력 증폭기에 대역 저지 필터를 삽입하는 방식은 추가적인 삽입 손실과 함께 크기가 커지게 된다<sup>[1]</sup>. 출력 정합 회로 내부에 전송선로 기반의 공진회로의 필터부를 구성한 논문들의 경우, 삽입손실은 발생하지 않지만 높은 선택성을 구현하기 위하여 2차 고조파의 임피던스는 정합되지 않아 효율이 감소하거나<sup>[2]</sup>, 결합된(coupled) 전송선로 구조의 한계로 인하여 비교적 넓은 면적을 차지하였다<sup>[3]</sup>. 이를 보완하기 위해 체비쇼프 저역 통과 구조를 추가한 연구에서는 낮은 삽입 손실을 갖는 광대역 출력 정합단을 제안하였으나, 구현 시 크기가 커진다는 단점이 있다<sup>[4]</sup>.

본 논문에서는 정합단과 고조파 억제단이 결합된 체비쇼프 필터 기반 고조파 제어 매칭단을 적용한 전력 증폭기를 제안하였다. 제안된 고조파 매칭단을 이용하여 기본파 및 고조파 주파수의 최적 로드 임피던스에 정합과 동시에 2차 고조파 억제를 통해서 전력 증폭기 회로의 소형화와 고효율을 동시에 달성하고자 했다.

## II. 회로 설계

그림 1은 제안하는 전력 증폭기의 도식도이다. 비선형 레이다는 송신된 기본파 신호가 전자기기 목표물에 수신되면 반도체 소자 특유의 비선형 특성으로 인해 고조파 신호를 생성하는데, 생성 및 수신부로 반사되는 고조파 신호는 반사되는 기본파 신호에 비해 전력이 작다. 따라서 기본파 기반의 레이다에 비해 신호 대 잡음비가 낮으므로 전력 증폭기 측면에서는 출력되는 기본파 신호 대비 고조파 신호의 비율을 최대한 낮추어 잡음을 낮추는



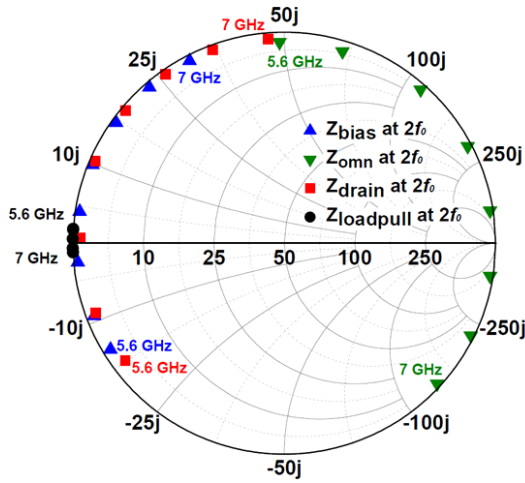


그림 3. 고조파 주파수에서 제안한 출력 매칭단의 로드 임피던스

Fig. 3. Impedance loci of the proposed output matching network at 2nd harmonic frequencies.

### III. 측정 결과

그림 4는 제작된 S-대역 고효율 전력 증폭기의 회로 사진을 나타낸 것이다. 입출력 정합회로가 구현된 PCB 기판은 0.79 mm의 두께와 3.2의 유전율을 갖는 Taconic사의 TLC-32기판을 사용하였으며, Cree사의 6W급 CGH40006S GaN HEMT 트랜지스터 소자를 사용하여 회로를 구현하였다. 제작된 전력 증폭기 회로의 면적은  $71.1 \times 42.7 \text{ mm}^2$ 이다. 제작된 회로는 게이트의 전압  $V_{GS} = -2.7 \text{ V}$ , 드레인 전압  $V_{DS} = 28 \text{ V}$ , 드레인 전류  $I_{dq} = 50 \text{ mA}$ 의 조건에서 측정이 진행되었다. 전력 증폭기의 정확한 측정값을 위해서 입력전력과 출력 전력을 각각 실시간으로 스펙트럼 분석기와 전력 센서를 이용하였다.

그림 5는 제작된 전력 증폭기의 S-파라미터 시뮬레이

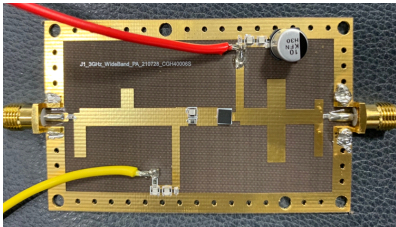


그림 4. 제작된 전력 증폭기 사진

Fig. 4. Photograph of the implemented power amplifier.

션 및 측정 결과를 나타낸 그래프이다. 측정된  $S_{21}$ 은 2.8~3.2 GHz 대역에서 11~13 dB의 이득을 가지며, 5.6~6.4 GHz 대역에서 -47 dB 이하의 값을 갖는 것을 확인하였다. 그림 6은 주파수에 따른 제작된 전력 증폭기의 출력 전력 및 전력 이득 측정 결과를 나타낸 그래프이며, 2.8~3.2 GHz에서 37 dBm 이상의 출력 전력을 가지면서, 7.4~10.2 dB의 전력이득을 갖는 것을 확인하였다. 그림 7은 주파수에 따른 최대 드레인 효율 (DE) 및 최대 전력 부가효율 (PAE)을 나타낸 그래프이며, DE는 61.3~76.3 %, PAE는 53.8~63.4 %로 측정되었다. 그림 8은 2차 고조파 억제 레벨에 대한 시뮬레이션 및 측정 결과를 나타낸 것이며, 5.6~6.4 GHz 대역에서 -46~-58 dBc의 높은 억제 레벨을 갖는다.

표 1은 S-대역 전력 증폭기 간의 성능을 비교한 표이며, 기존의 연구와 비교하여 상대적으로 높은 주파수 대역에서 DE 특성이 비슷한 값을 가졌으며, 동시에 우수한

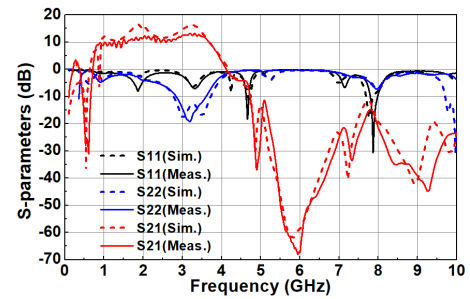


그림 5. 제작된 전력 증폭기의 S-파라미터 시뮬레이션 및 측정 결과

Fig. 5. Simulated and measured PA S-parameters.

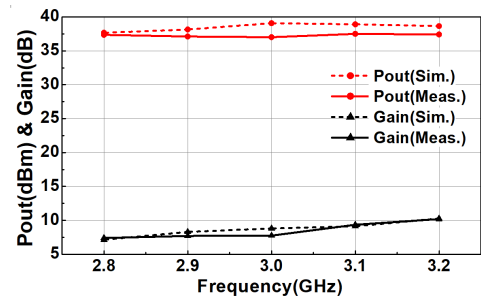


그림 6. 출력 전력 및 전력 이득 시뮬레이션 결과 및 측정 결과

Fig. 6. Simulated and measured output power and gain.

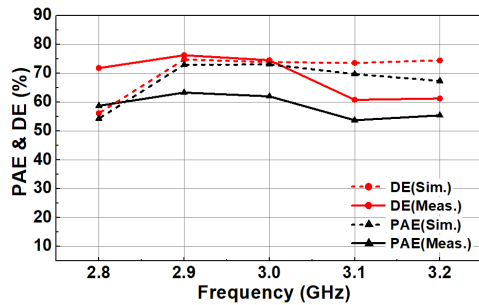


그림 7. 드레인 효율 (DE) 및 전력 부가 효율 (PAE) 시뮬레이션 결과 및 측정 결과

Fig. 7. Simulated and measured DE and PAE.

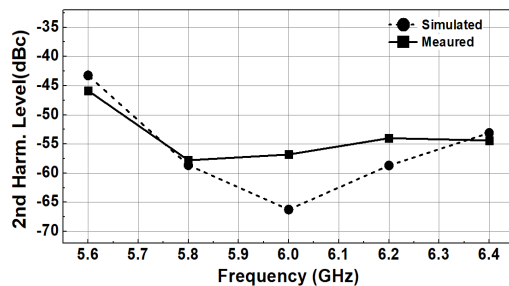


그림 8. 고조파 레벨 시뮬레이션 및 측정 결과

Fig. 8. Simulated and measured harmonic levels over the bandwidth.

표 1. 이전 발표된 연구들과의 성능 비교

Table 1. Comparison with the previously reported works.

	[2]	[4]	This work
Frequency [GHz]	1.9~3.1	2~2.9	2.8~3.2
$P_{sat}$ [dBm]	39~40.5	37~39	37~37.4
Gain [dB]	9.3~10.7	12~14	7.4~10.2
$DE_{max}$ [%]	48~56.6	69~78.5	61.3~76
2 <sup>nd</sup> harmonic level [dBc]	N/A	-49~-65	-46~-58
Size [mm <sup>2</sup> ]	67×45	82×50	71.1×42.7

2차 고조파 억제 성능을 얻었다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 고조파 제어가 가능한 매칭단 기반의 S-대역 고효율 전력 증폭기 설계결과를 제시하였다. 제안된

전력 증폭기는 전송선로를 이용한 체비쇼프 필터 기반 매칭단을 제안하여 2차 고조파의 억제와 함께 넓은 대역에서 기본 주파수와 2차 고조파 대역에서 최적의 임피던스를 정합하면서 2차 고조파 신호 출력이 억제가 가능하였다. 이는 추가적인 필터 없이 매칭단만으로 고조파 신호를 억제하여 회로의 소형화뿐만 아니라, 낮은 삽입손실로 인해 전력 증폭기가 높은 효율 특성을 보이도록 하였다. 제작된 전력 증폭기는 2.9~3.2 GHz 대역에서 37 dBm 이상의 최대 출력 전력과 61.3~76.3 %의 드레인 효율을 보였고, 동작 주파수의 2차 고조파 대역에서 -46 dBc 이하의 2차 고조파 레벨을 얻어, 제안된 매칭단의 효용성을 검증하였다.

#### References

- [1] Y. C. Wu, K. Chen, E. J. Naglich, and D. Peroulis, "A wideband 0.7~2.2 GHz tunable power amplifier with over 64% efficiency based on high-Q second harmonic loading," in *2013 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest(MTT)*, Seattle, WA, Jun. 2013, pp. 1-4.
- [2] M. F. Haider, F. You, W. Shi, S. Ahmad, and T. Qi, "Broadband power amplifier using hairpin bandpass filter matching network," *Electronics Letters*, vol. 56, no. 4, pp. 182-184, Feb. 2020.
- [3] M. F. Haider, F. You, T. Qi, C. Li, and S. Ahmad, "Co-design of second harmonic-tuned power amplifier and a parallel-coupled stub loaded resonator," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 67, no. 12, pp. 3013-3017, Dec. 2020.
- [4] D. A. Nguyen, C. Seo, "A high-efficiency design for 2.0~2.9 GHz 5-W GaN HEMT class-E power amplifier using passive Q-constant non-foster network," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 62, no. 2, pp. 615-624, Oct. 2019.
- [5] L. H. Zhou, X. Y. Zhou, W. S. Chan, T. Sharma, and D. Ho, "Wideband class-F-1 power amplifier with dual/quad-mode bandpass response," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 67, no. 7, pp. 2239-2249, Jul. 2020.