

넓은 입력전력 범위를 갖는 S-대역 광대역 고조파 응답기

S-Band Wideband Harmonic Transponder with Wide Input Power Range

김 선 규 · 김 지 수 · 오 준 택

Sungyu Kim · Jisu Kim · Juntaek Oh

요 약

본 논문에서는 비선형 레이다 센서용 S-대역 통과방식 고조파 응답기 설계를 제시한다. 제안된 회로는 입출력단에 2단 L형 정합단을 통하여 넓은 동작 주파수 범위뿐만 아니라, 광대역에서 정합이 되도록 최적화하였다. 종래의 고조파 응답기에서는 $\lambda/4$ 길이의 스텝을 임피던스 독립성과 대역저지를 위해 입력단과 출력단 모두에 사용하였지만, 본 논문에서는 후면부의 고조파 정합단에만 오픈 스텝을 사용하여 삽입손실을 최소화하면서 독립적인 정합이 가능하도록 하였다. 제안된 고조파 응답기의 특성을 확인하기 위해서 제작을 진행하였으며, 제작된 회로의 크기는 37.6 mm×16.1 mm이다. 측정을 통해 입력전력이 -5.5 dBm일 때 2.8~3.8 GHz의 범위에서 변환이득이 -15 dB가 넘는 것을 확인하였으며, 3.1 GHz 동작 주파수에서 -17.5~11.5 dBm의 범위에서 변환이득이 -15 dB가 넘는 것을 확인하였다.

Abstract

This paper presents a through-type harmonic transponder for S-band nonlinear radar. To increase the operating frequency range, a 2-stage L-shaped matching network was configured for the input and output matching networks. In previous studies, conventional harmonic transponders were configured with $\lambda/4$ stubs in the input and output matching networks to minimize the influence of these networks because the impedance mismatch suppresses the second harmonic and fundamental signals. However, in this design, a $\lambda/4$ open stub was utilized at the output and configured with the output matching network to alleviate the insertion loss of the additional open stub. For verification, the proposed circuit was implemented with the circuit size of 37.6 mm×16.1 mm. The measurement results show that the conversion gain is maintained over -15 dB for frequencies between 2.8~3.8 GHz at -5.5 dBm and -17.5~11 dBm at 3.1 GHz of input power.

Key words: Backscattering, Harmonic Transponder, Nonlinear Radar, Wide Operating Frequency

I. 서 론

레이다 시스템에서 내외부 환경에 따른 잡음은 필연적이며, 이에 따라서 레이다 시스템의 SNR을 증가시키기

위해서 다양한 시도가 있다. 일반적인 레이다 시스템에서는 송신 시스템에서 나오는 기본파는 물체의 신호 반사를 통해 물체를 감지하는데, 여러 대상체가 존재하는 복잡한 환경에서는 수신 시스템에서 원하는 응답을 구분

「이 논문은 과기정통부 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 연구되었음(NRF-2022R1F1A1072302).」

승실대학교 전자정보공학부(School of Electronic Engineering, Soongsil University)

· Manuscript received January 13, 2023 ; Revised February 3, 2023 ; Accepted April 13, 2023. (ID No. 20230113-004)

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

하는 데에 어려움이 있다. 따라서 레이더 시스템에서는 메시지 신호를 잡음과 구별될 수 있도록 높은 응답 출력 전력을 가져야 하며, 배터리와 같은 전원 필요로 한다. 이를 보완하기 위한 기술로 RFID 기술과 같은 백스캐터링 방식의 기술을 적용하여 메시지 신호를 잡음과 구별될 수 있도록 응답이 가능하고 무전원 동작이 가능하나, 기본적으로 전력 소모가 없는 수동 회로이기 때문에 원거리 탐지가 어렵다는 단점이 존재한다.

비선형 레이더 기술은, 기존 레이더 시스템과 대비되는 새로운 개념의 레이더로, 기본파를 송신하여 전자기기의 반도체에서 발생하는 비선형 응답을 통해 발생하는 고조파 또는 혼변조 신호를 수신하는 기술로서, 높은 잡음 환경에 관계 없이 수신된 고조파만을 획득 가능하다는 장점이 있다^[1]. 이러한 비선형 레이더 기술의 장점을 극대화하기 위해서 비선형 응답을 최대화하는 비선형 응답기에 대한 다양한 연구가 존재한다^{[2]~[15]}. 비선형 응답기의 구성 방법에 따라서 반사형 및 통과형 방식으로 나눌 수 있으며, 기본파를 효율적으로 억제하고 높은 고조파를 반사할 수 있다는 장점에 따라서 통과형 비선형 응답기 방식이 많이 개발되고 있다^{[3]~[4]}. 하지만 기존의 통과형 비선형 응답기는 높은 입력 전력에서 최대 변환이득을 가지는데, 낮은 전력이 입사되는 원거리 탐지에서는 낮은 변환이득을 가지는 응답기는 다소 부적합하다.

이번 연구에서는 넓은 입력 전력 및 넓은 동작 주파수에서 높은 변환이득을 갖는 고조파 응답기를 제안하였다. 제안된 고조파 응답기는 효과적으로 고조파 정합이 가능함과 동시에, 광대역 동작이 $-20 \sim 0$ dBm의 낮은 전력에서 높은 변환이득을 가지도록 정합단을 최적화하였다. 기본파의 억제를 달성하기 위해 통과방식을 사용하였고, 기존의 통과방식 사용과는 다르게, 기본파의 $\lambda/4$ 에 해당하는 스테브를 출력단에만 사용하여 변환이득을 가짐과 동시에 입력단과 출력단이 독립적으로 정합이 가능하도록 설계하였다.

II. 회로 설계

그림 1은 제안하는 고조파 응답기의 도식도이며, 기본파 대역 입력 정합단, 고조파 대역 출력 정합단, 다이오드

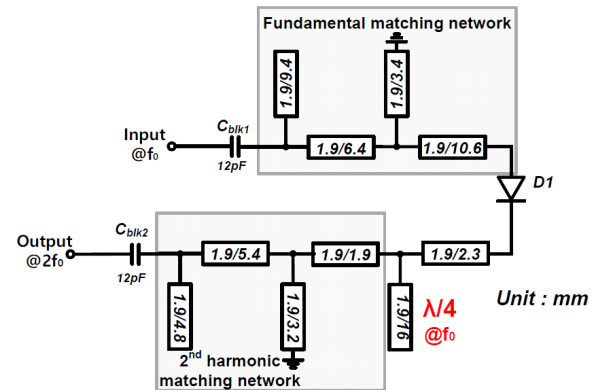


그림 1. 제안하는 고조파 응답기 도식도
Fig. 1. Schematic of proposed harmonic transponder.

로 구성되어 있다. 제안한 고조파 응답기는 2차 고조파 출력을 목표로 하였으며, 기본파 신호 출력을 최소화하고 동시에 고조파 신호를 효과적으로 출력하기 위해서 입력단과 출력단이 분리된 통과형 방식으로 구성되었다.

먼저 고조파 대역 출력단을 살펴보면, 고조파 매칭부 우측에 기본파의 $\lambda/4$ 에 해당하는 단락 스테브가 있다. 이는 회로에서 기본파 주파수에서 해당 연결 지점이 단락으로 임피던스가 보이게 함으로써 기본파 출력을 차단할 뿐만 아니라, 내외부 변화에 따른 고조파 출력단으로 바라보는 임피던스의 변화가 발생하더라도, 입력단에서는 기본파 주파수에서 임피던스의 변화가 보이지 않는 독립성을 갖게 된다. 이러한 입력단과 출력단 간의 설계적 독립성은 추후에 해당 회로가 다른 디바이스에 연결이 되거나 혹은 이식 등의 내외부 환경 변화에도 임피던스 변화가 최소화된다는 장점이 있다.

그럼에도 불구하고, $\lambda/4$ 의 스테브는 회로에서 긴 스테브이며, 삽입 손실에 큰 기여를 한다. 종래의 고조파 응답기 연구^{[3]~[6]}에서는 다이오드 양단에 $\lambda/4$ 크기의 스테브를 사용하여, 입력단과 출력단 모두에 설계적 독립성을 확보하였다. 이번 연구에서는 기본파의 입력에서 삽입 손실을 최소화하여 다이오드에 입력되는 전력의 최대화를 중요 목표로 설계를 진행하였고, $\lambda/4$ 길이의 스테브를 출력단에만 사용하여, 삽입 손실을 줄였다.

해당 회로는 입력단과 출력단의 양쪽에 DC를 차단하는 커패시터를 넣었지만, 비선형 소자인 다이오드는 기본

파를 입력신호로 넣었을 때, 2차 고조파와 기본파뿐만 아니라, DC 성분의 값 또한 나올 수 있다. 이러한 DC 성분의 발생은 출력단에서 전하가 쌓여 다이오드의 캐소드 부분에서 전압이 높아지는 역전압 현상을 발생시킬 수 있으며, 역전압 현상에 따른 부작용은 다음과 같다. 1. 전하들이 쌓여 역전압이 과하게 높아지게 된다면, 다이오드의 작동이 보장되지 않는다. 2. 역전압으로 인한 다이오드의 임피던스 변화가 발생되며, 임피던스 부정합이 생기게 된다. 이러한 역전압이 생기는 것을 방지하기 위해 출력단에서 전하가 쌓이는 것을 막을 수 있어야 한다. 종래의 연구에서는 저항 혹은 인덕터를 사용함으로써, DC 성분을 제거하였으나, 이번 연구에서는 매칭 단계에서 입력단과 출력단에 단락 스테브를 사용하여, 양쪽의 전압을 같게 만들었다.

입력단과 출력단은 2단 L형 정합단을 사용하여 매칭을 수행하였다. 다단매칭을 사용함으로써, 동작 주파수 범위를 늘렸으며, 인풋과 아웃풋의 스미스 차트는 그림 2를 통해서 나타내었으며, 주파수와 입력 전력에 따른 변환이득은 그림 3을 통해서 나타내었다. 시뮬레이션 결과에 따르면, $-20 \sim -9$ dBm의 입력 범위에서 변환이득이 -15

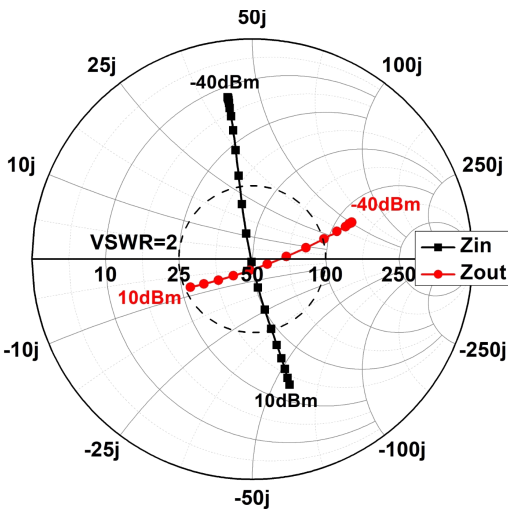


그림 2. 제안한 응답기의 3.1 GHz에서 입력 전력에 따른 입출력 임피던스 시뮬레이션 결과

Fig. 2. Simulated input and output impedance of the harmonic transponder at 3.1 GHz with input power at $-40 \sim 10$ dBm.

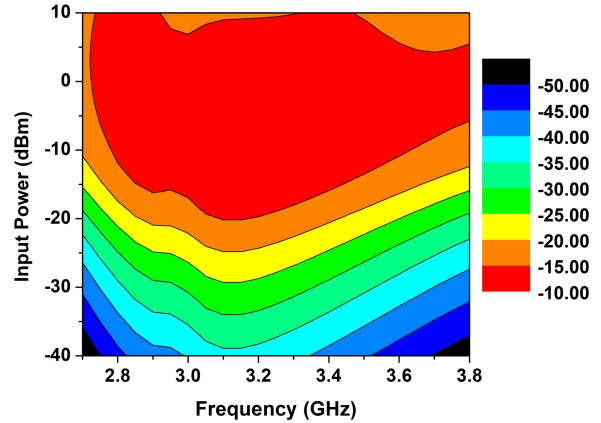


그림 3. 입력 전력 및 주파수에 따른 변환이득 시뮬레이션 결과

Fig. 3. Simulated conversion gain with frequency and input power.

dB 이상이며, -9.5 dBm인가 시 $2.8 \sim 3.65$ GHz에서 변환이득이 -15 dB 이상이다.

III. 측정 결과

그림 4는 제안된 고조파 응답기를 제작한 사진이다. 사용된 PCB는 Taconic사의 TLC-32 기판으로, 3.2의 유전율, 0.003의 손실 탄젠트, 0.813 mm의 두께를 가졌다. 제안된 고조파 응답기에서 사용한 주파수는 SMS-7630을 사용하였으며, 이는 상대적으로 다른 다이오드에 비해서 낮은 입력전력에서 높은 변환이득을 가졌다. 제안한 회로는 ADS(advanced design system)를 기반으로 도식도 및 레이아웃을 최적화하였다. 제작된 고조파 응답기를 검증하기 위해서 E8247C 신호발생기와 N58182A 스펙트럼 분석기를 통해 고조파의 출력 특성을 확인하였다.

그림 5는 3.1 GHz의 동작 주파수에서 제작된 회로의

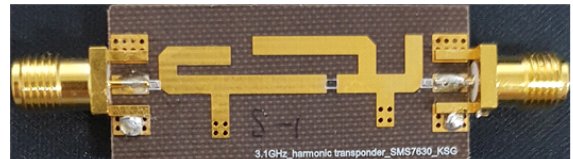


그림 4. 제작된 고조파 응답기의 사진

Fig. 4. Photograph of the implemented harmonic transponder.

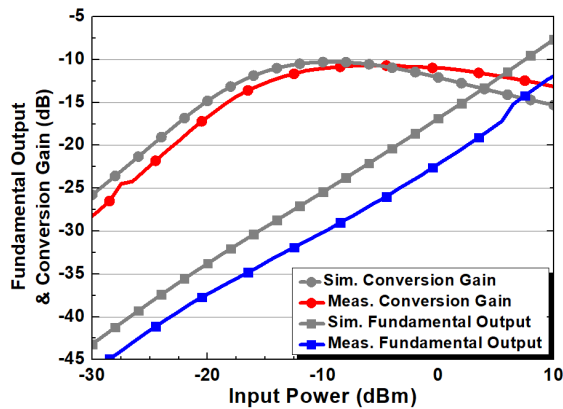


그림 5. 제작된 고조파 응답기의 입력전력에 따른 변환이득과 기본파 출력 시뮬레이션 및 측정 결과

Fig. 5. Simulated and measured conversion gain and fundamental output with input power at 3.1 GHz.

입력 전력에 따른 변환 이득과 기본파의 출력을 나타낸 그래프이다. 최대 변환이득은 -5.5 dBm의 입력전력에서 -10.7 dB를 가졌으며, 변환이득이 -15 dB 이상인 구간은 입력전력이 $-17.5 \sim 11.5$ dBm인 것을 확인하였다. 기본파는 입력 전력에 비해 최대 22.65 dB만큼 기본파가 억제되었으며, 모든 입력 전력 범위에서 기본파 억제 범위는 $16.05 \sim 22.65$ dB인 것을 확인하였다. 그림 6은 주파수와 입력 전력에 따른 변환 이득을 나타낸 것이며, -5.5 dBm 인가 시 $2.8 \sim 3.8$ GHz의 넓은 동작 주파수 범위에서

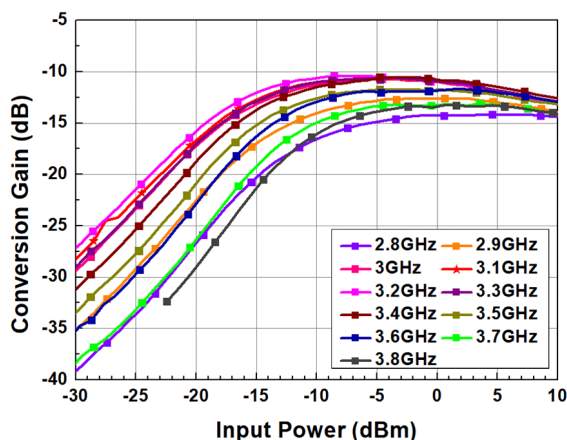


그림 6. 주파수 및 입력전력에 따른 변환이득 측정 결과

Fig. 6. Measured conversion gain with input power and frequency.

표 1. 이전 발표된 연구들과의 성능 비교

Table 1. Comparison with the previously reported works.

	Ref. [3]	Ref. [4]	Ref. [5]	Ref. [6]	This work
Fund. freq. (GHz)	2.5	0.868	2.45	2.4	3.1
Type	Thru.	Thru.	Reflect	Thru.	Thru.
Peak CG	Power (dBm)	0^*	-8^*	-15^*	-10
	CG (dB)	-12.5^*	-18^*	-20^*	-12.5
Freq. range (GHz) (CG>-15 dB)	0.4	N.A.	N.A.	N.A.	1
Size [mm×mm]	30×30	N.A.	24×15	10×12	37.6×15.1
Diode	SMV-1405	HSMS-2850	HSMS-2850	SMS-7630	SMS-7630

*Graphically estimated.

변환이득이 -15 dB 이상임을 확인하였다.

표 1은 기존에 발표된 통과방식의 고조파 응답기이며, 제안한 회로의 검증결과를 비교한 표이다. 제안한 회로는 기존 연구결과 대비 확장된 입력 전력 범위에서 높은 효율을 가질 뿐만 아니라, 넓은 주파수 범위에서도 높은 변환이득을 가짐을 확인하였다.

IV. 결 론

본 논문에서는 S-대역에서 사용되는 비선형 레이다용 소형 비선형 태그를 설계 및 제작하였다. 제작된 회로에서는 다양한 대역뿐만 아니라, 다양한 거리에서 센싱에 활용이 될 수 있도록, 입력전력 -5.5 dBm에서 $2.8 \sim 3.8$ GHz의 넓은 대역에서 변환이득이 -15 dB 이상 동작하는 것을 확인하였으며, 3.1 GHz 주파수에서 변환이득이 -15 dB 이상인 구간이 $-17.5 \sim 11$ dBm의 넓은 입력 범위를 갖는 것을 확인하였다. 제안된 회로는 기존의 회로에 비해서, 소형화된 정합단을 이용하여 향상된 변환이득을 넓은 주파수 및 입력 전력 범위에서 가지는 것을 확인 하였으며, 이에 따라서 본 연구의 우수성을 확인하였다.

References

- [1] G. J. Mazzaro, A. F. Martone, K. I. Ranney, and R. M. Narayanan, "Nonlinear radar for finding RF electronics: System design and recent advancements," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 65, no. 5, pp. 1716-1726, May 2017.
- [2] K. Gumber, C. Dejous, and S. Hemour, "Harmonic reflection amplifier for widespread backscatter internet-of-things," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 69, no. 1, pp. 774-785, Jan. 2021.
- [3] R. Raju, G. E. Bridges, "A compact wireless passive harmonic sensor for packaged food quality monitoring," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 70, no. 4, pp. 2389-2397, Apr. 2022.
- [4] A. Lazaro, R. Villarino, and D. Gurbau, "A passive harmonic tag for humidity sensing," *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2014, p. 670345, Jul. 2014.
- [5] M. Khaliel, A. Batra, A. Fawky, and T. Kaiser, "Low-profile harmonic transponder for IoT applications," *Electronics*, vol. 10, no. 17, Aug. 2021.
- [6] J. Zhang, S. D. Joseph, Y. Huang, and J. Zhou, "Design of a compact harmonic transponder based on quarter-wavelength impedance transformers," in *2021 51st European Microwave Conference(EuMC)*, London, Apr. 2022, pp. 680-683.
- [7] S. Cho, J. Kim, and J. Oh, "Design of 915 MHz low-loss through-type harmonic transponder," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 33, no. 12, pp. 966-969, Dec. 2022.
- [8] M. Polivka, H. Vacek, and M. Svanda, "Harmonic balance/full-wave analysis of wearable harmonic transponder for IoT applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 70, no. 2, pp. 977-987, Feb. 2022.
- [9] A. Lavrenko, B. Litchfield, G. Woodward, and S. Pawson, "Design and evaluation of a compact harmonic transponder for insect tracking," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 30, no. 4, pp. 445-448, Apr. 2020.
- [10] L. Zhu, H. Huang, M. M. C. Cheng, and P. Y. Chen, "Compact, flexible harmonic transponder sensor with multiplexed sensing capabilities for rapid, contactless microfluidic diagnosis," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 68, no. 11, pp. 4846-4854, Nov. 2020.
- [11] X. Gu, N. N. Srinaga, L. Guo, S. Hemour, and K. Wu, "Diplexer-based fully passive harmonic transponder for sub-6-GHz 5G-compatible IoT applications," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 67, no. 5, pp. 1675-1687, May 2019.
- [12] V. Palazzi, L. Roselli, M. M. Tentzeris, P. Mezzanotte, and F. Alimenti, "Energy-efficient harmonic transponder based on on-off keying modulation for both identification and sensing," *Sensors*, vol. 22, no. 2, p. 620, Dec. 2022.
- [13] A. Mishra, W. McDonnell, J. Wang, D. Rodriguez, and C. Li, "Intermodulation-based nonlinear smart health sensing of human vital signs and location," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 158284-158295, Oct. 2019.
- [14] X. Hui, T. B. Conroy, and E. C. Kan, "Near-field coherent sensing of vibration with harmonic analysis and balance signal injection," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 69, no. 3, pp. 1906-1916, May 2021.
- [15] L. Zhu, T. D. Ha, Y. H. Chen, H. Huang, and P. Y. Chen, "A passive smart face mask for wireless cough monitoring: A harmonic detection scheme with clutter rejection," *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, vol. 16, no. 1, pp. 129-137, Feb. 2022.

김 선 규 [숭실대학교/학부생]

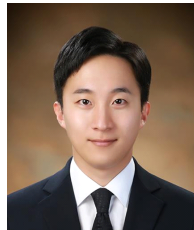
<https://orcid.org/0009-0008-1766-5953>



2018년 3월~현재: 숭실대학교 전자정보
공학부 전자공학과 학부생
[주 관심분야] 레이더 송수신 하드웨어,
RF 무선전력 전송 기술 등

오 준 택 [숭실대학교/부교수]

<https://orcid.org/0000-0003-4694-8545>



2010년 1월: 한국과학기술원 전기 및 전자
공학과 (공학사)
2012년 1월: 한국과학기술원 전기 및 전자
공학과 (공학석사)
2016년 8월: 한국과학기술원 전기 및 전자
공학부 (공학박사)
2018년 8월: 한국전기연구원 첨단의료기
기연구본부 선임연구원

2020년 2월: 영남대학교 로봇기계공학과 조교수

2020년 3월~현재: 숭실대학교 전자정보공학부 부교수

[주 관심분야] 밀리미터파 집적회로, 레이더 송수신 하드웨어,
RF 무선전력전송 기술 등

김 지 수 [숭실대학교/석·박사통합과정]

<https://orcid.org/0000-0002-8633-9253>



2017년 3월~2021년 2월: 영남대학교 로
봇기계공학과 (공학사)
2021년 3월~현재: 숭실대학교 전자정보
공학부 전자공학과 석·박사통합과정
[주 관심분야] 레이더 송수신 하드웨어,
RF 무선전력 전송 기술 등