

S/C 이중대역 비선형 안테나를 활용한 은닉표적 탐지

Concealed Target Detection Using S/C Dual-Band Nonlinear Antenna

오 수 영¹ · 이 원 렬² · 홍 순 기³Sooyoung Oh¹ · Wonryeol Lee² · Sun-Ki Hong³

요 약

비선형 레이더는 비선형 전자 표적에서 발생하는 비선형 응답 신호, 즉 고조파와 상호변조의 탐지가 가능하다. 일반적으로 레이더 시스템의 경우 송수신 안테나가 서로 다른 주파수를 활용하므로 다른 안테나를 활용하지만 시스템의 최소화를 위해서는 결합된 이중 대역 안테나를 활용하는 것이 효과적이다. 이중 대역 안테나를 활용할 경우 송신 포트에서 수신 포트에 신호가 간섭되는 것을 방지하기 위해서는 대역 간의 격리도가 높아야한다. 본 논문에서는 S/C 이중대역 안테나를 활용하여 다양한 전자표적에 대한 비선형 은닉 탐지 결과를 제시한다. 제안된 시스템의 송신부 운용 주파수는 3 GHz이며 수신부 운용 주파수는 송신 주파수의 2차 고조파 영역에 해당하는 6 GHz이다. 총 네 가지 표적에 대한 은닉 탐지 시험이 수행되었으며 제시된 환경에서 모두 표적 탐지가 가능한 것이 확인되었다.

Abstract

Nonlinear radar systems can detect nonlinear response signals, such as harmonics and intermodulations, generated by nonlinear electronic targets. Typically, nonlinear radar systems use separate antennas for transmit (Tx) and receive (Rx) since they operate at different frequencies. However, to miniaturize the overall system, it is effective to use a dual-band antenna on a single platform. For such antennas, a high isolation between bands is essential to prevent signal interference between the Tx and Rx ports. This paper presents the detection results of nonlinear concealed targets using an S/C dual-band antenna. The proposed system operates at 3 GHz for Tx and 6 GHz for Rx, which corresponds to the second harmonic of the Tx frequency. The detection results using four different targets demonstrate the system's capability of detecting concealed nonlinear targets.

Key words: Nonlinear Radar System, Harmonic, Intermodulation, Dual-Band, Concealed-Target

I. 서 론

최근 기술이 발전함에 따라 도청 장치, 불법 통신 장비와 감시 장치 등과 같이 다양한 불법적인 소형 전자기기

들이 증가하고 있다. 이와 같은 기기들은 크기가 작고 신호가 미약하여 기존 레이더 탐지 기술인 선형 레이더로는 쉽게 식별되지 않기 때문에 다양한 장소에서 불법적인 목적으로 사용된다.

「이 연구는 2024년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방과학연구소의 지원을 받아 수행된 미래도전국방기술 연구개발사업(No. 912902601).」
 숭실대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Soongsil University)

1: 석 · 박사통합과정(<https://orcid.org/0000-0002-7984-5377>), 2: 석사과정(<https://orcid.org/0000-0002-5855-9136>),

3: 부교수(<https://orcid.org/0000-0002-3794-3171>)

· Manuscript received September 30, 2024 ; Revised October 2, 2024 ; Accepted October 16, 2024. (ID No. 20240930-105)

· Corresponding Author: Sun-ki Hong (shong215@ssu.ac.kr)

선형 레이다 시스템이 가지는 이러한 한계점을 극복하기 위해 비선형 탐지를 기반으로 하는 비선형 레이다에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 비선형 레이다는 클러터가 많은 환경에서도 소형 전자 표적의 탐지가 가능하다는 장점이 있으며, 이는 전자 표적에 포함되어 있는 반도체 소자 및 회로에서 발생하는 고조파 및 상호변조를 탐지하는 방법으로 구현할 수 있다. 송수신 주파수가 같은 선형 레이다와 달리 송신 주파수와 수신 주파수의 운용대역이 서로 다르기에 수신 안테나를 수신 주파수 대역에만 맞추어 수신을 진행할 경우 클러터로부터 반사되는 송신 주파수 대역은 억제하며 표적에서 형성되는 고조파 신호만의 탐지가 가능하다^{[1][2]}.

일반적으로 비선형 레이다는 송수신 안테나의 주파수 대역이 다르기에 서로 다른 안테나를 활용한다. 하지만 레이다 시스템의 전체적인 사이즈를 고려할 때 개구면을 공유하는 이중 대역 안테나를 활용하는 것이 효율적이다. 비선형 응답 신호는 기본 신호에 비해 세기가 작으므로 비선형 레이다 시스템을 구현할 때 자체 고조파의 억제가 중요하다. 따라서 단일 안테나를 활용할 경우 송신 대역에서 수신 대역으로의 격리도가 일정량 이상 높아야 자체 고조파의 억제가 가능하다^{[3][4]}.

본 논문에서는 S/C 이중 대역 안테나 기반의 비선형 레이다 시스템을 설계함으로써 비선형 표적 탐지에 대한 가능성에 대하여 소개한다. 은닉된 휴대용 불법 소형 전자기기를 탐지하는 것을 목적으로 가방 속 전자기기를 탐지하였으며 총 4개의 전자 표적에 대한 측정을 다양한 측정 환경에 대해서 진행하였다.

II. 비선형 레이다 시스템 하드웨어 설계

그림 1은 비선형 응답 측정을 위한 비선형 레이다 시스템 블록 다이어그램을 보여준다. 송신부는 3 GHz의 CW 신호 형성을 위한 신호 발생기(Agilent E4436B), 신호를 1 W까지 증폭하기 위한 전력증폭기(AR 100S1G4), 그리고 증폭기로부터 형성된 자체 고조파를 억제하기 위한 3 GHz 대역의 저역 통과 필터로 이루어져 있다. 송수신을 담당하는 안테나는 송신 주파수 3 GHz와 2차 고조파인 6 GHz의 수신주파수를 모두 운용할 수 있는 이중대역 안

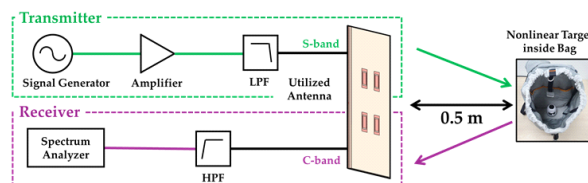


그림 1. 비선형 레이다 시스템 블록 다이어그램
Fig. 1. Block diagram for nonlinear radar system.

테나로 구성이 되어있으며 그림 2에서 확인할 수 있다^[5]. 해당 안테나는 비선형 탐지를 위해 설계된 안테나로 S 대역(3 GHz)과 C 대역(6 GHz)을 표적하며 설계 수치는 표 1에서 확인할 수 있으며 안테나의 반사 계수 및 투과 계수는 그림 3에서 확인할 수 있다. 다양한 클러터가 존재하는 환경에서도 성공적인 측정을 진행하기 위해 원형편파를 형성하도록 설계하였으며, 일반적으로 표적에 반사되어 되돌아오는 신호는 편파가 반대가 되는 것을 고려하여 S 대역은 RHCP가 형성되도록, C 대역 편파는 반대가 되도록 설계하였다. 3 GHz 송신 대역의 안테나 이득은 8.56 dBi이며, 6 GHz 수신 대역의 안테나 이득은 6.97 dBi이다. 송신 주파수 대역과 수신 주파수 대역간의 격리도(S_{sc})는 -20 dB 이하이다. 수신부는 6 GHz 대역의 고조파 신호만 안정적으로 수신할 수 있도록 대역 통과 필

표 1. 안테나의 최적화 설계 수치

Table 1. Value of optimized design parameters.

Parameter feature	Value (mm)
width of outer patch	18.85
length of inner patch	11.85
distance of patches	43

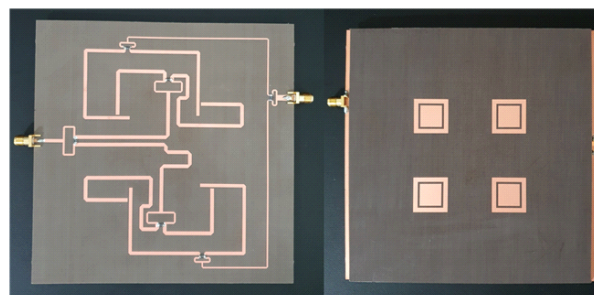


그림 2. 비선형 레이다용 이중대역 안테나
Fig. 2. S/C dual-band antenna applicable to nonlinear radar.

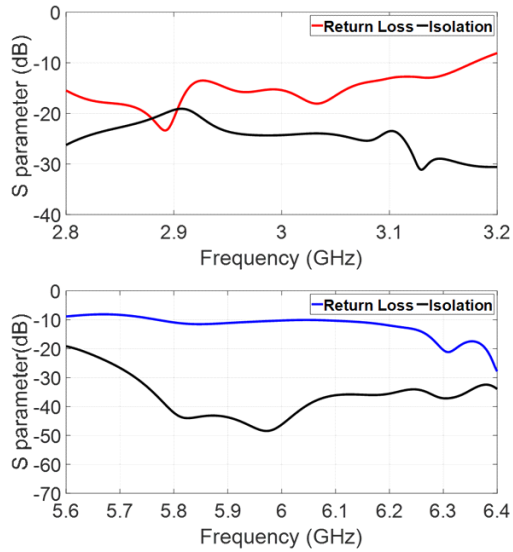


그림 3. 이중대역 안테나의 S-parameters
Fig. 3. S-parameters of dual-band antenna.

터(VHF-4600+)를 배치하였으며 고조파 신호를 확인할 수 있는 스펙트럼 분석기(Agilent E4407B)를 배치하였다.

표적의 종류를 쉽게 은닉할 수 있는 네 가지 종류의 소형 전자기기를 선정하였으며, 이는 그림 4에서 확인할 수 있다. 표적이 은닉 상태에 있다는 것을 나타내기 위해 두 가지 방법을 활용하였다. CCTV와 소형 무전기1은 가방에 넣은 상태로 측정을 진행하였으며, 소형 카메라와 소



(a) CCTV
(a) CCTV



(b) 소형 무전기1
(b) Small radio1



(c) 소형 카메라
(c) Small camera



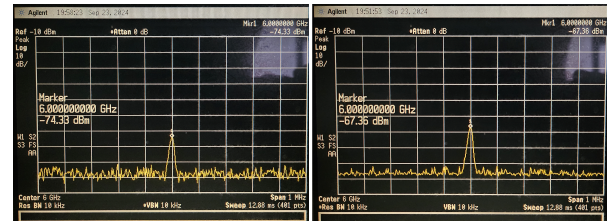
(d) 소형 무전기2
(d) Small radio2

그림 4. 비선형 탐지를 위해 선정된 표적
Fig. 4. Selected targets for nonlinear detection.

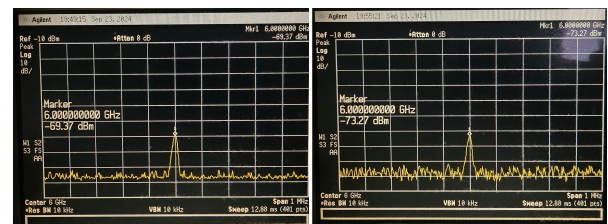
형 무전기2는 자켓에 넣은 상태로 측정을 진행하였다. 표적과 레이더 시스템과의 거리는 0.5 m로 설정하였다. 표적의 배치 방향은 수직 방향이 되도록(표적이 포함하고 있는 PCB 보드의 면적이 가장 크게 보이도록) 배치하였다. 실제 은닉 표적의 경우 표적의 배치가 임의로 결정이 되고, 표적의 각도에 따라 송신신호가 인가될 PCB에 포함되어 있는 전자소자의 개수가 달라지므로 비선형 응답 신호의 세기 또한 달라지지만 본 논문에서는 은닉표적에 대한 가능성의 여부를 확인하기 위해 해당 배치를 적용하였다.

III. 비선형 은닉 표적 탐지 결과

측정 결과는 그림 5에서 확인할 수 있으며, 네 가지 소형 전자기기 모두 송신 주파수의 2차 고조파인 6 GHz에서 비선형 응답 신호가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 가



(a) CCTV 2차 고조파 수신 신호
(b) 소형 무전기 2차 고조파 수신 신호
(a) Second harmonic signal back-scattered from CCTV
(b) Second harmonic signal back-scattered from small radio1



(c) 소형 카메라 2차 고조파 수신 신호
(d) 소형 무전기2 2차 고조파 수신 신호
(c) Second harmonic signal back-scattered from small camera
(d) Second harmonic signal back-scattered from small radio2

그림 5. 은닉환경에서 측정한 표적의 비선형 탐지 결과
Fig. 5. Results of nonlinear detection at concealed-target environment.

표 2. 표적별 2차 고조파 RCS의 크기

Table 2. Value of second harmonic RCS depending on the targets.

Target	second harmonic RCS σ_2 (m ⁴ /W)
CCTV	2.22×10^{-8}
Small radio1	1.1×10^{-7}
Small camera1	6.97×10^{-8}
Small radio2	2.84×10^{-8}

방 안에 은닉된 채 측정을 진행한 CCTV와 소형 무전기1로부터 발생한 고조파 응답은 각각 -74.33 dBm, -67.36 dBm인 것을 확인할 수 있으며, 자켓에 은닉된 채 측정을 진행한 소형 카메라와 소형 무전기2로부터 발생한 고조파 응답은 각각 -69.37 dBm, -73.27 dBm인 것을 확인할 수 있다.

수신 전력을 기반으로 비선형 레이다 방정식을 활용하여 비선형 RCS를 계산할 수 있으며, 2차 비선형 RCS를 계산하기 위한 수식은 식 (1)과 같다.

$$\sigma_2 = \frac{P_{r_2} (4\pi)^4 R^6 L_{system}}{(P_t G_t)^2 G_{r_2} \lambda_2^2}, \quad (1)$$

이때, P_t 는 송신 전력, G_t 는 송신 안테나 이득, G_{r_2} 는 수신 안테나 이득, λ_2 는 수신 주파수 대역의 파장, P_{r_2} 는 수신 전력, R 은 표적과 레이다 시스템의 거리, L_{system} 은 레이다 시스템의 손실값을 의미한다. 식 (1)을 통해 네가지 표적의 RCS를 계산한 결과는 표 2에서 확인할 수 있다. 네 가지 표적 모두 일반적인 전자기기가 가지는 2차 고조파 RCS의 범위인 $10^{-9} \sim 10^{-5}$ (m⁴/W)에 포함되어 있는 것을 확인하였고 이는 은닉된 상태에서도 탐지가 성공적으로 되었음을 나타낸다.

IV. 결 론

본 논문에서는 이중대역 안테나를 활용하여 CW 기반의 비선형 레이다 시스템 설계 및 은닉 환경에서의 비선형 탐지결과에 대해 제시하였다. 제안된 시스템의 송신 운용 대역은 3 GHz이며 수신 운용 대역은 6 GHz으로 네가지 비선형 전자 표적에 대하여 은닉 환경에서 탐지되는 것을 확인되었다. 따라서 제안된 시스템은 비선형 표적을 탐지하는데 적용 가능할 것으로 사료된다.

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, Jan. 2017.
- [2] S. Y. Oh, K. H. Cha, H. Hong, H. Park, and S. K. Hong, "Measurement of nonlinear RCS of electronic target detection," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 22 no. 4, pp. 447-451, Jul. 2022.
- [3] K. A. Gallagher, "Harmonic radar: Theory and applications to nonlinear target detection, tracking, imaging and classification," Ph.D. dissertation, Pennsylvania State University, Philadelphia, PA, 2015.
- [4] G. J. Mazzaro, "Nonlinear junction detection vs. electronics: System design and improved linearity," in *2020 IEEE International Radar Conference(RADAR)*, Washington, DC, Apr. 2020, pp. 654-658.
- [5] S. Oh, H. S. Park, J. Oh, and S. K. Hong, "Circularly polarized S/C dual-band antenna for nonlinear detection," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 21, no. 7, pp. 1467-1471, Jul. 2022.