

# 비선형 FMCW 레이더를 통한 자유공간 및 은닉 표적 탐지

## Free-Space and Concealed Target Detection Using Nonlinear FMCW-Based Radar

오수영<sup>1</sup> · 이원열<sup>2</sup> · 홍순기<sup>3</sup>

Sooyoung Oh<sup>1</sup> · Wonryeol Lee<sup>2</sup> · Sun K. Hong<sup>3</sup>

### 요 약

비선형 탐지기술은 반도체 소자에 의한 비선형 상호작용, 즉 고조파 및 상호 변조를 탐지하는 기술로 산란 면적이 작은 소형 전자기기와 같은 비선형 물체를 탐지할 수 있게 한다. 이러한 비선형 레이더의 특성은 보안 및 군사 분야에서 소형 전자기기를 보유한 표적에 대하여 위장, 은폐 등의 환경에서 효과적인 탐지를 가능하게 한다. 따라서 본 논문은 비가시거리 환경에서 소형 전자기기의 비선형 응답을 탐지하기 위하여 FMCW(frequency modulated continuous wave)를 활용한 비선형 레이더 시스템을 구축하였다. 구축된 시스템을 활용하여 네 가지의 소형 전자기기와 자체 제작된 비선형 표적을 10 m의 가시거리에서 확인 탐지를 진행하였으며, 6 m의 비가시거리 환경에서 측정을 진행하여 탐지에 성공하였다.

### Abstract

Nonlinear detection is a technique that detects nonlinear interactions, such as harmonics and intermodulation, caused by semiconductor junctions, enabling the remote detection of nonlinear objects, such as small electronic devices with small radar cross-sections. The characteristics of such nonlinear radars enable the effective detection of targets equipped with small electronic devices in camouflaged and concealed environments, particularly in security and military applications. Therefore, this study constructs a nonlinear radar system utilizing FMCW to effectively detect the nonlinear response of small electronic devices at long distances. Using the constructed system, four small electronic devices, and manufactured nonlinear targets, successful detection was confirmed at a line-of-sight condition of 10 m, and even at a nonline-of-sight condition of 6 m.

Key words: Nonlinear Detection, Harmonic, Intermodulation, Concealed Target, FMCW

### I. 서 론

레이더는 1930년대에 개발된 이래 현재까지 군사 및 상업용 탐지 분야에서 광범위하게 활용되고 있으며, 송·수신 신호의 주파수가 같은 선형 탐지기술을 기반으로 산란체로부터 반사된 송신 펄스를 수신하여 표적의 유무,

거리 및 속도 등을 탐지한다. 하지만 소형 전자기기와 같이 상대적으로 산란 면적이 작은 물체는 주변 클러터(clutter)로 인해 기존의 선형 탐지 방식으로 검출이 어렵다는 한계가 존재한다<sup>[1]</sup>. 이를 극복하기 위해 1970년대에 제시된 비선형 탐지기술은 모든 전자기기에 포함되어있는 반도체 소자의 비선형(nonlinear) 특성을 감지하는 기

「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 April 15, 2024 ; Revised April 23, 2024 ; Accepted May 24, 2024. (ID No. 20240415-038)

· Corresponding Author: Sun K. Hong (e-mail: shong215@ssu.ac.kr)

술로, 면적이 작은 전자기기와 인조 소형물의 검출을 가능하게 한다<sup>[2]</sup>. 비선형 특성을 갖는 물체는 입사 신호에 대해 비선형 응답을 보이며, 이는 반도체 소자에 의한 상호작용으로 생성되는 송신 펄스의 고조파(harmonic) 또는 상호 변조(intermodulation)를 의미한다. 송신신호의 주파수와 상이한 주파수를 가지는 비선형 응답만 수신함으로써 기존의 선형 탐지기술이 가진 소형 비선형 표적에 대한 탐지 한계를 극복할 수 있다<sup>[2]</sup>. 이러한 비선형 레이더의 특성은 보안 및 군사 분야에서 소형 전자기기를 보유한 표적에 대하여 위장, 은폐 등의 환경에서 효과적으로 탐지할 수 있게 된다. 비선형 레이더에 주파수 스텝 변조 방식 및 주파수 연속 변조 방식(FMCW, frequency-modulated continuous wave)을 활용하는 경우, 고정 및 이동 표적에 대한 보다 정확한 거리 탐지가 이루어질 수 있다<sup>[3]</sup>. 하지만 일반적인 소형 전자기기의 비선형 응답은 안테나의 유무에 따른 이득 크기, 동작 대역에 대한 내부 회로의 임피던스 및 EMI(electronic interference) 설계와 같은 다양한 조건에 의하여 원거리에서 탐지 어려운 수준의 출력을 가질 수 있다. 특히, 은닉환경은 비가시거리(NLOS, non-line-of-sight)로 벽 투과 등에 의하여 전파의 감쇠가 발생하므로 기존의 은닉 전자기기에 대한 탐지 연구는 수십센치미터 정도의 근거리에서 진행되었다<sup>[4]</sup>. 따라서 본 논문에서는 중심 주파수 3.1 GHz, 주파수 변조 폭이 200 MHz인 FMCW를 활용한 비선형 레이더 환경을 구축하고, 10 m 거리에 위치한 비선형 표적의 2차 고조파를 측정함으로써 보다 원거리에서 소형 전자기기의 탐지 가능성을 확인하였다. 또한 은닉 상태에서의 표적을 측정하기 위해 레이더와 표적 사이 벽을 위치한 후 6 m에서의 표적 측정을 진행하였다.

## II. FMCW 기반 비선형 레이더 시스템 구축

본 연구에서 진행한 비선형 탐지는 고조파 탐지를 기반으로 하며, 일반적으로 고조파의 세기는 기본파에 비해 세기가 현저히 작다. 따라서 성공적인 고조파 탐지를 위해서는 충분한 송신 전력, 송·수신 안테나의 이득과 배경 잡음 및 송·수신간의 간섭의 억제가 필수적이다.

그림 1은 비선형 레이더 측정 셋업의 도식을 보여준다.

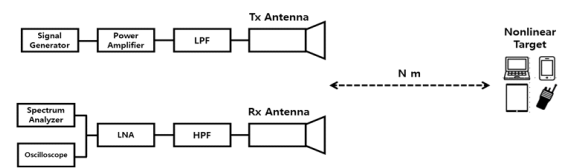


그림 1. 비선형 레이더 시스템의 도식

Fig. 1. Nonlinear radar system setup.

신호 발생기로부터 중심 주파수 3.1 GHz, 주파수 변조 폭 200 MHz, 주파수 변조 시간 1,000 ns인 FMCW를 형성하며, 이는 전력증폭기를 통과하여 대략 50 dBm의 전력을 생성한다. 송신단의 전력증폭기에서 발생하는 고조파 성분은 비선형 표적 오탐지를 야기하는 원인 중 하나이기에 전력증폭기와 송신 안테나 사이에 70 dB의 C대역 억제 저대역 통과필터(LPF)를 사용하였다. 송신 안테나의 이득은 24 dBi로 최종적으로 대략 74 dBm의 송신단 실효 복사 전력(effective radiated power)를 가진다.

수신단의 경우, 비선형 전자 표적으로부터 산란되어 돌아오는 미약한 고조파의 탐지를 위해 C대역에서 21.5 dBi의 이득을 가지는 안테나와 40 dB의 이득을 가지는 저잡음 증폭기를 배치하였다. 송신단의 고출력 신호가 송·수신 안테나간의 커플링을 통해 수신단 저잡음 증폭기로 인가될 경우, 저잡음 증폭기의 비선형성으로부터 고조파를 생성하기에 S대역에 대하여 40 dB의 억제력을 가지는 고대역 통과 필터를 수신 안테나와 저잡음 증폭기 사이에 배치하였다. 실제 시스템에서는 신호 발생기로부터 발생한 송신 신호가 수신단 고조파 대역을 가질 수 있도록 체배과정을 거친 후, 수신단으로 전달되어야 하며, 수신 안테나로부터 수신된 고조파와 mixing과정을 통해 down-convert되어 비트 신호를 형성한다. 하지만 본 논문에서는 오실로스코프에서 direct-sampled된 데이터로 해당 과정을 디지털신호처리로 대체하였다.

## III. 비선형 전자 표적 측정 및 분석

설계한 비선형 레이더 시스템을 측정하기 위한 환경 구성은 그림 2에서 보여준다. 자유공간에서 표적이 탐지되는 것을 확인하고자  $15.4 \times 29.3 \times 10 \text{ m}^3$ 의 크기를 가지는 대형 전자파 차폐실내에서 레이더 시스템과 표적 간의 거리가 10 m가 되도록 환경을 구축하였다. 표적의 종류

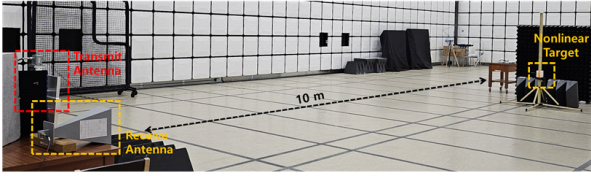


그림 2. 전자파 차폐실에서의 측정 환경

Fig. 2. Measurement environment in an anechoic chamber.

와 크기는 표 1에 표기되어 있으며, 표적 및 측정의 다양성을 위해 서로 다른 네 종류의 전자기기를 선정하였으며, 기존 전자기와 비교를 위하여 상대적으로 고조파 세기가 높은 인공 제작 표적인 다이오드-접합 안테나를 포함하였다.

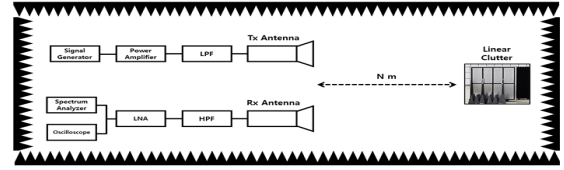
측정에 앞서 설계된 시스템이 충분한 자체 고조파 억제력을 가지고 있는 것을 확인하기 위하여 이와 같은 검증을 진행하였다. 그림 3(a)와 같이 선형 RCS가 매우 큰 철재 구조물(선형 클러터)을 위치시켜 고조파 신호 형성 여부를 확인하였다. 그림 3(b)는 선형 클러터로부터 반사되어 되돌아온 수신 신호이다. 수신 신호가 송신 신호의 고조파 대역인 6~6.4 GHz에서 확인 어려운 수준의 크기를 가진다. 즉, 비선형 표적 측정에서 선형 반사에 의한 오탐지에 대해 충분히 억제력을 가지고 있다는 것을 확인하였다.

그림 4는 다이오드-접합 안테나로부터 반사된 2차 고조파를 보여준다. 수신 2차 고조파는 선형 클러터와 다르게 송신 신호의 2차 고조파 대역인 6~6.4 GHz에서 정확하게 형성되는 것을 확인할 수 있으며, 신호의 위상이 비선형성을 가지는 것을 확인하였다. 각 표적에 대한 고조파 전력 값은 표 1에서 확인할 수 있다. 그림 5는 각 표적

표 1. 표적 종류별 크기와 수신 고조파의 침투 전력

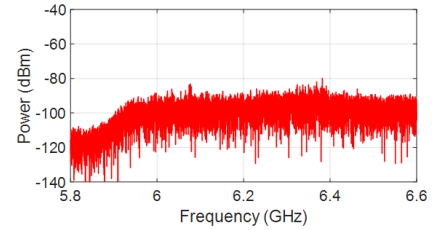
Table 1. Size and received peak power of nonlinear target.

Target	Target size (cm×cm)	Target harmonic power level (dBm)
Radio	3.5×9	-75
Sensor	8×8	-68
Dash Camera	5×7	-67
CCTV	10×15	-59
Diode-terminated antenna	9×13	-62



(a) 선형 clutter를 배치하였을 때의 환경

(a) Measurement environment with linear clutter



(b) 수신 고조파 신호

(b) Received signal at second harmonic

그림 3. 선형 clutter를 배치하였을 때의 (a) 측정 환경 및 (b) 수신 신호

Fig. 3. (a) System environment when linear clutter is placed and (b) its received signal.

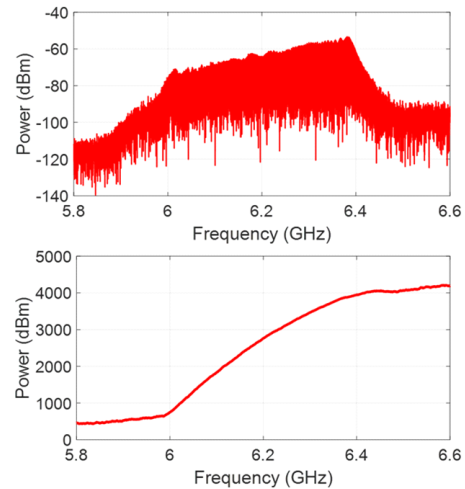


그림 4. 다이오드-접합 안테나의 수신 신호 및 위상

Fig. 4. Received signal from diode-terminated antenna and its phase.

으로부터 수신된 2차 고조파로부터 얻은 탐지 거리 결과를 보여준다. 비트 주파수 탐지의 결과, 모든 표적으로부터 신호가 대략 10 m에서 형성되는 것을 볼 수 있으며, 자유 공간에서 표적의 고조파 탐지가 성공적으로 이루어

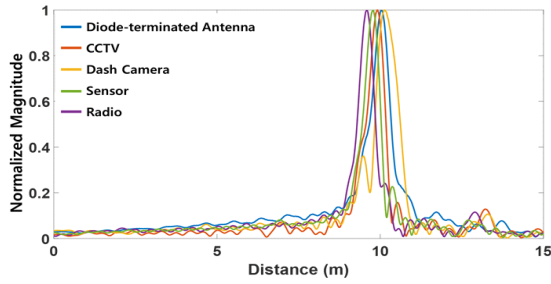


그림 5. 자유공간에서 각 표적에 대한 탐지 결과  
Fig. 5. Detection results for each nonlinear target in free space condition.

졌다는 것을 의미한다. 표적 탐지 거리의 결과가 조금씩 상이한 것을 확인할 수 있는데, 그 이유는 세밀한 거리 해상도로 예상된다. 거리 해상도의 수식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta R = \frac{c \times T \times \Delta f}{2 \times BW}, \text{ where } \Delta f \text{ is } \frac{f_s}{N_s} \quad (1)$$

이때  $c$ 는 빛의 속도,  $T$ 는 주파수 변조 시간,  $BW$ 는 고조파 대역의 주파수 변조 폭,  $f_s$ 는 샘플 주파수,  $N_s$ 는 샘플 데이터의 개수를 의미한다. 해당 측정세팅에서의 거리 해상도는 37.5 cm로 도출되며 약간의 표적의 세팅 변화에도 거리 도출 결과가 예민하게 달라지게 된다.

은닉 표적 탐지에 대한 측정 환경은 그림 6과 같다. 레이더와 표적 사이에 벽을 위치하여 비가시거리 환경을 조성하였으며, 레이더와 벽 사이 거리는 2.5 m로 설정하였다. 벽 투과에 의한 신호의 감쇠가 발생하므로 표적과 안테나간의 거리는 6 m로 설정하였다. 앞선 자유공간 탐지와 동일한 실험과정을 진행하였으며, 표적에 대한 탐지 결과는 그림 7에서 확인할 수 있다. 각 표적의 탐지 결과와 거리 해상도에 따른 오차를 보여주지만, 모든 표적이 대략 6 m에서 형성되어 탐지가 성공적으로 진행되었다는

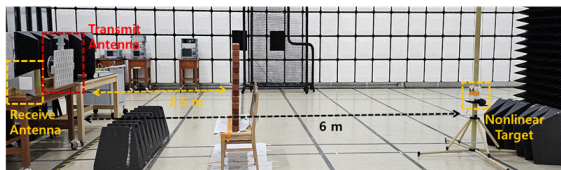


그림 6. 은닉표적 탐지를 위한 환경  
Fig. 6. Measurement setup for detecting concealed target.

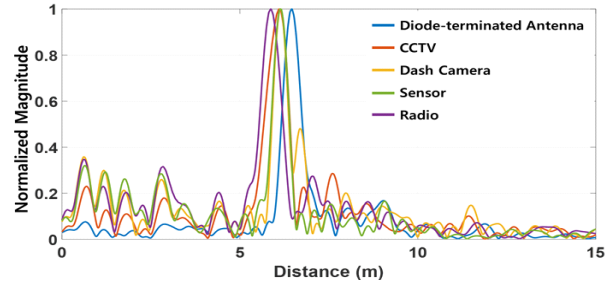


그림 7. 은닉 탐지 환경에서 각 표적에 대한 탐지 결과  
Fig. 7. Detection results for each nonlinear target in concealed target detecting environment.

것을 확인하였다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 원거리의 가시 및 비가시 환경에서 산란 면적이 작은 소형 전자기기의 탐지를 진행하였다. 표적 거리 탐지를 위해 FMCW 기반의 비선형 레이더 시스템을 구축하였으며, 다섯 종류의 불특정 범용 전자 장비의 2차 고조파 수신 전력을 측정하였다. 10 m의 가시거리와 2.5 m에 벽이 존재하는 6 m의 비가시거리 환경에서 수신된 2차 고조파의 탐지 결과 해당 거리에서 성공적인 탐지를 확인하였다. 이러한 실험적인 측정 결과는 원거리 가시 및 비가시거리 환경에서 효과적인 전자 장비 탐지를 위한 척도를 제시한다.

#### References

- [1] D. W. Steele, F. S. Rotondo, and J. L. Houck, "Radar system for manmade device detection and discrimination from clutter," *U.S. Patent 7,830,299*, Nov. 2010.
- [2] M. A. Flemming, F. H. Mullins, and A. W. D. Watson, "Harmonic radar detection system," in *Proceedings of the International Radar Conference on Radar*, London, Oct. 1977, pp. 552-555.
- [3] K. Cha, S. Oh, H. Hong, H. Park, and S. K. Hong, "Detection of electronic devices using FMCW nonlinear radar," *Sensors*, vol. 22, no. 16, p. 6086, Aug. 2022.
- [4] K. Cha, H. S. Park, and S. K. Hong, "Nonlinear through-the-wall detection using DORT applied with LFM pulses," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 22, no. 6, pp. 1331-1335, Jun. 2023.