

FMCW 기반의 비선형 레이다 시스템 설계 및 성능 시험

Design of FMCW-Based Nonlinear Radar System and Its Performance Test

오수영 · 정태용* · 남형석** · 김지수 · 오준택 · 서철헌 · 황금철* · 홍순기

Sooyoung Oh · Taeyong Jeong* · Hyungseok Nam** · Jisu Kim ·
Juntaek Oh · Chulhun Seo · Keum Cheol Hwang* · Sun K. Hong

요 약

본 논문에서는 FMCW 기반의 비선형 레이다 시스템을 설계 및 제작하고 비선형 표적에 대한 시험 결과를 제시한다. 제안된 시스템의 송신부 운용 대역은 3~3.2 GHz이며, 수신부 운용 대역은 송신 대역의 2차 고조파 영역에 해당하는 6~6.4 GHz이다. 송/수신부 배열 안테나 이득은 모두 19 dBi이며, 전력증폭기의 최대 출력 및 저잡음 증폭기 최대 이득은 각각 37 dBm, 16.4 dB이다. 제안된 시스템 성능 검증은 자유공간 및 은닉 조건에서 수행되었으며 표적 탐지 시 오탐지 방지를 위해 사용된 신호처리 기법은 CA-CFAR이다. 총 6가지 비선형 표적에 대한 탐지 시험이 수행되었으며 제시된 시험 환경에서 모두 표적 탐지가 가능한 것이 확인되었다.

Abstract

In this study, we designed and fabricated an FMCW-based nonlinear radar system and presented test results for nonlinear targets. The operating band of the transmitter of the proposed system is 3~3.2 GHz, and the operating band of the receiver was 6~6.4 GHz, which corresponded to the second harmonic of the transmission band. The transmit/receiver array antenna gain was 19 dBi, whereas the maximum output of the power amplifier and the maximum gain of the low-noise amplifier were 37 dBm and 16.4 dB, respectively. The performance of the proposed system was verified in free space and concealed conditions, and the signal processing technique used to prevent false alarms is the cell-averaged constant false alarm rate (CA-CFAR). Target detection tests were performed with six nonlinear targets, and it was confirmed that the targets were successfully detected in all tested environments.

Key words: FMCW, Nonlinear Radar System, Harmonic Radar, CA-CFAR

I. 서 론

레이다 시스템은 전자기파를 이용하여 물체를 탐지하고 위치를 측정하는 기술로, 20세기 초반에 처음 개발된

이후로 끊임없이 발전해왔다. 기존의 선형 레이다 시스템은 송신된 전자기 신호가 목표물에 반사되어 수신기로 돌아오는 신호의 시간 지연과 주파수 변화를 분석하여 목표물의 거리, 속도, 방향 등을 측정한다. 그러나 이러한

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

송실대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Soongsil University)

*성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과(Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University)

**한화시스템(Hanwha System)

· Manuscript received August 29, 2024 ; Revised September 1, 2024 ; Accepted September 9, 2024. (ID No. 20240829-086)

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

선형 레이다는 위장된 물체나 비금속 물체, 작은 전자 장치 등을 탐지하는 데 한계가 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해 비선형 레이다 기술이 개발되었다^[1].

비선형 레이다는 기존의 선형 레이다와는 다른 방식의 신호처리 방법이 필요하다. 비선형 레이다는 송신 신호가 비선형 표적에 도달했을 때, 표적의 비선형적 응답을 반사하는 특성을 이용하는데 이는 표적에 내장된 반도체 소자 및 회로 등에서 방출되는 고조파 및 상호변조 성분으로, 해당 신호를 탐지하여 선형 레이다가 탐지하기 어려운 소형 전자기기 등과 같은 표적의 존재 유/무를 확인할 수 있다. 따라서 송신부와 수신부의 주파수 운용 대역을 다르게 하여 수신 주파수 대역만 수신함으로써 이를 달성할 수 있다.

본 논문에서는 FMCW(frequency modulated constant wave) 기반의 비선형 레이다 시스템을 제작 및 측정함으로써 비선형 표적 식별에 대한 가능성에 대하여 소개한다. 비선형 레이다 시스템의 하드웨어부터 이를 제어하는 GUI까지 모든 부분을 설계하였으며 해당 시스템을 통해 6개의 전자 표적에 대한 측정을 다양한 측정 환경에 대해서 진행하였다.

II. 비선형 레이다 시스템 하드웨어 설계

그림 1은 비선형 레이다 시스템 블록 다이어그램으로 송신부, 수신부, 신호생성부, 디지털 수신 모듈, 빔 형성부로 구성되어 있다. 송신부와 수신부는 각각 25채널 시스템으로 구성되어 있으며 송신파는 3~3.2 GHz의 주파수 대역을 가지는 FMCW이며 수신 대역은 송신 대역의

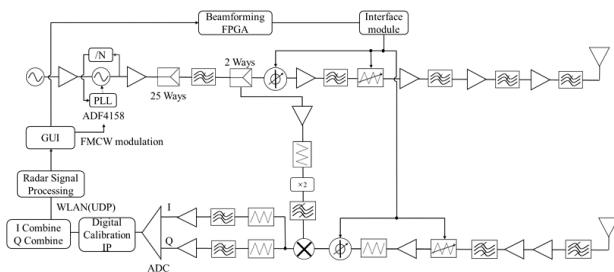
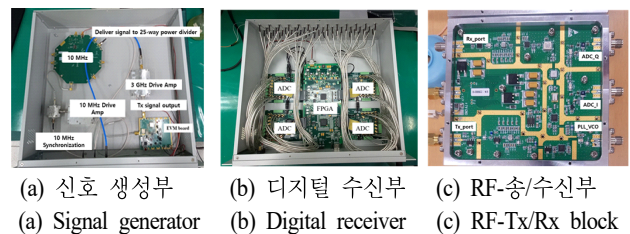


그림 1. 비선형 레이다 시스템 블록 다이어그램
Fig. 1. Block diagram for nonlinear radar system.

2차 고조파에 해당하는 6~6.4 GHz이다. 안테나 이득은 19 dBi이며 고조파 억제도는 34.3 dB이다. 전력증폭기 최대 출력은 각각 37 dBm이며, 고조파 억제도는 평균 52 dB이다^{[2],[3]}. 저잡음 증폭기의 경우 이득 16.4 dB ~ 12.5 dB, 잡음지수 1.3 dB이다^[4]. 소스원은 ADF4158 주파수 합성기 EVM 보드가 활용되었으며 25채널 전력 분배기를 통해 각 채널로 신호가 전달된다. 이후 2-way 전력 분배기를 통하여 송신부와 수신부로 분배되고, 수신부로 분배된 신호는 체배과정을 거치고 mixer의 LO에 입력되어 기저대역으로 하향변환이 된다. 기저 대역 신호를 I/Q로 나누어 ADC(analog to digital convertor)에 전달하고 calibration IP를 거쳐 신호처리 알고리즘으로 전달된다. 여기서 calibration IP는 신호 합성을 수행하기 전에 각 채널 간 틀어진 위상을 보상해 주는 역할이다. Beamforming FPGA 및 interface module은 RF-송/수신부에 결합된 위상 변위기 및 감쇠기를 제어한다.

그림 2는 본 제안하는 시스템에 결합된 시스템 블록이다. 디지털 수신 모듈에는 Xilinx사의 Spartan FPGA가 활용되어 ADC를 제어한다. ADC 사용 모델은 AD7616이며, 4개의 ADC에서 13채널, 13채널, 12채널, 12채널 샘플링을 수행한다. 신호생성부에는 10 MHz 분기 신호기가 활용되었으며, 출력된 10 MHz는 드라이브 앰프를 통하여 EVM 보드에 입력된다. 해당 보드에서 출력된 신호(3~3.2 GHz)를 17 dBm로 드라이브 앰프가 증폭을 시킨 후 25 채널 전력분배기를 통해 분배한다. RF-송/수신부는 그림 1의 블록 다이어그램에서 소개된 블록들이 결합하여 제작된 형태로 동작 메커니즘은 그림 1에 서술한 것과 같다.

그림 3은 제안된 비선형 레이다 시스템 검보정 방식에 대한 블록 다이어그램이다. 제안된 시스템 송신부 및 수



(a) 신호 생성부 (b) 디지털 수신부 (c) RF-송/수신부
(a) Signal generator (b) Digital receiver (c) RF-Tx/Rx block

그림 2. 제안된 시스템을 위한 블록
Fig. 2. Fabricated blocks for proposed system.

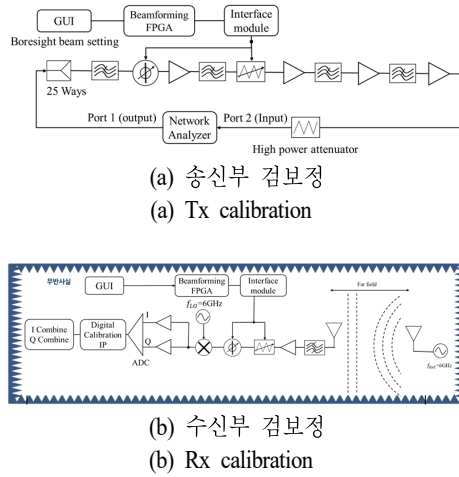


그림 3. 제안된 시스템 검보정 방식
Fig. 3. System calibration for proposed system.

신부 검보정 방법은 2가지로 나뉘어 수행되며 절차는 표 1과 같다.

Ⅲ. 비선형 표적 탐지를 위한 신호처리

그림 4는 시스템 시험 성능을 위한 환경 및 사용된 표적을 보여주고 있으며 자유공간 및 은닉조건 하에 시험이 수행되었다. 은닉환경 조성을 위하여 표적 앞에 벽돌 및 철근으로 된 장애물을 형성하였다.

그림 5는 자유공간, 은닉조건, 그리고 빔 포밍(자유공

표 1. 제안된 시스템의 검보정 방식
Table. 1. System calibration for proposed system.

Transmit-end calibration method	Receive-end calibration method
Step 1) Turn off all channels except for the one to be measured Step 2) Set the phase shifter and variable attenuator values of the measurement cahnnel to 0o and 0 dB in the GUI. Step 4) Connect the high-power attenuator to the input port of the network analyzer (NA) and perform calibration on the NA Step 5) Apply a signal from the NA output port at the center frequency of the operating band to the transmitter input Step 6) Verify the phase of the NA after passing through the high-power attenuator from the power amplifier output Step 7) Obtain S_{21} for all channels and apply an offset to the phase shifter	Step 1) Position a reference antenna operating in the receiver band in the far-field region from the receiver antenna Step 2) Ensure the phase centers of the reference and receiver antennas are aligned in line of sight Step 3) Radiate from the reference antenna to the receiver antenna at -30 dBm ($f_c=6.2$ GHz) Step 4) Verify that phase synchronization of signals from each channel output through the calibration IP is achieved Step 5) Check that the magnitude of the I/Q combined data output from the calibration IP is consistent, and that there is a 90° phase difference between I and Q Step 6) Pass the calibrated signal to the target identification algorithm

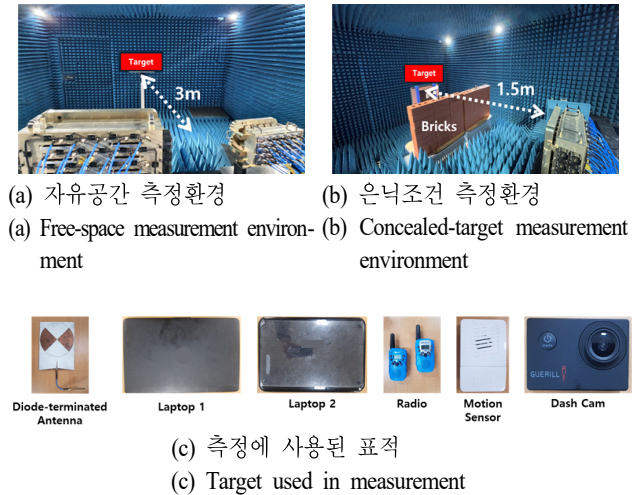


그림 4. 시스템 성능 시험 환경 및 사용된 표적
Fig. 4. System performance test environment and targets used.

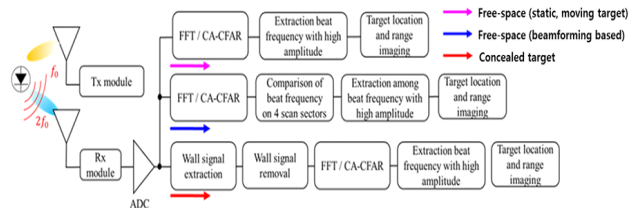


그림 5. 자유공간, 은닉조건, 그리고 빔 포밍 기반의 신호 처리 방법
Fig. 5. Signal processing method at free space, concealed condition, and beam forming.

간) 기반의 신호처리 과정을 보여주며, 본 시스템에는 3 가지 경우에 대한 신호처리 기법이 사용된다. 해당 시스템에서 사용되는 송신파가 FMCW이기에 세 경우 모두 비트 신호를 통해 비트 주파수를 추출하며 오탐지율을 줄이기 위해 CA-CFAR(cell averaged-CFAR) 기법을 활용한다는 공통점이 있다. 자유공간에서의 신호처리 방법은 기본적인 비트 주파수 분석법과 동일하다. 비트 신호를 FFT를 통해 비트 주파수로 변환하여 표적과의 거리 및 위치를 계산한다. 이는 정적 표적일 때와 동적 표적일 때 모두 해당된다. 은닉조건과 자유공간에서의 신호처리 기법 중 가장 큰 차이는 벽에 의한 신호를 제거하는 지에 대한 여부이다. 벽에 의해 반사된 신호로 인한 표적 식별 능력 악화를 방지하기 위하여 벽에 의한 신호를 미리 측정하고 신호처리 수행 전 벽에 의한 신호를 제거하여 비트 주파수를 추출하였다. 이에 대한 결과를 그림 6에 제시하며 파란색 라인은 비트주파수를 의미한다. 그림 6에서 확인할 수 있듯 잡음이 포함된 표적 비트주파수(그림 6 (b))에서 벽의 잡음 비트주파수(그림 6(a))를 제거한 결과 그림 6(c)와 같이 잡음이 제거되며 표적이 위치한 1.5 m에서 비트주파수가 정확하게 형성되는 것을 확인할 수 있다. 빔 포밍 기반의 경우 사전에 저장된 빔조향 시나리오에 따라 임의의 구역을 스캔하고, 스캔한 구역 중 가장 큰 비트 주파수가 추출된 곳을 표적이 위치한 곳을 정의하였다^{[5],[6]}. 그림 7 및 그림 8은 자유공간, 은닉환경, 빔포밍 수행 시 표적 식별 결과를 보여주고 있다. CA-CFAR 문턱값을 나타내는 빨간색 라인을 기준으로 가장 높은 진폭을 가지는 파란색 라인인 비트주파수가 자유공간의 경우 3 m, 은닉 환경의 경우 1.5 m에서 탐지 되는 것을

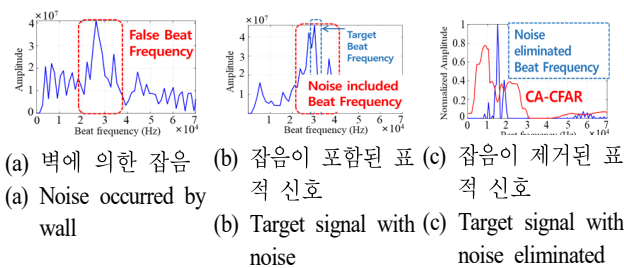


그림 6. 은닉조건 하 표적 탐지 방법

Fig. 6. Target detection method in concealed condition.

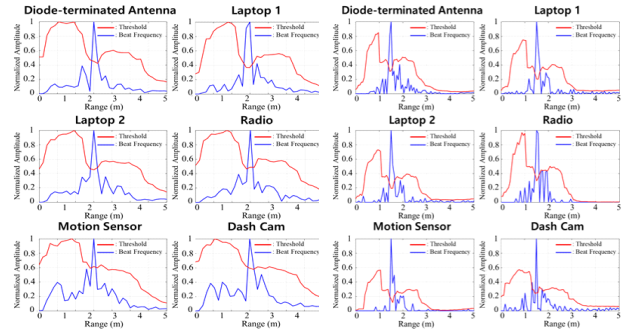


그림 7. 자유공간 및 은닉조건에서 표적 식별 결과

Fig. 7. Target detection results in free space and concealed condition.

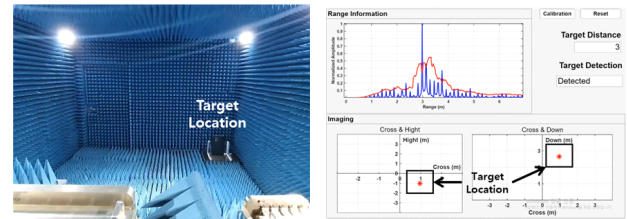


그림 8. 빔포밍 표적 탐지 환경 및 탐지 결과

Fig. 8. Beamforming target detection environment and results.

모든 표적에서 확인 할 수 있다. 이는 자유공간의 경우, 은닉표적 탐지의 경우 벽에 의한 잡음이 성공적으로 제거되었음을 의미하며 빔포밍의 경우 레이다 기준 방위각 및 고각 방향으로 (1 m, -1 m) 좌표에 표적탐지를 성공적으로 확인하였다.

IV. 결 론

본 논문에서는 FMCW 기반의 비선형 레이다 시스템 설계 및 표적 식별 시험 결과에 대하여 제시하였다. 제안된 시스템은 25채널 송/수신 제안된 시스템의 송신 운용 대역은 3~3.2 GHz이며 수신 운용 대역은 6~6.4 GHz로 6가지 비선형 전자 표적에 대하여 자유공간 및 은닉

환경에서 식별이 가능한 것이 확인되었다. 따라서 제안된 시스템은 비선형 표적을 탐지하는데 적용 가능할 것으로 사료된다.

References

- [1] 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.
- [2] T. Jeong, D. G. Lee, K. C. Hwang, "Design of an active phased-array antenna with suppressed high-order harmonics radiation," *Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 33, no. 10, pp. 794-797, Oct. 2022.
- [3] J. Jang, J. Kim, and J. Oh, "S-Band GaN HEMT power amplifier based on the harmonic control matching

network," *Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 32, no. 11, pp. 1027-1030, Nov. 2021.

- [4] H. Nam, K. Woo, and C. Seo, "Design of 6 GHz adaptive low noise amplifier using adaptive bias circuit for radar receiver," *Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers*, vol. 59, no. 12, pp. 22-26, Dec. 2022.
- [5] 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.
- [6] S. Y. Oh, K. H. Cha, H. Hong, H. Park, and S. K. Hong, "Measurement of nonlinear RCS of electronic targets for nonlinear detection," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 22, no. 4, pp. 447-451, Jan. 2022.

오 수 영 [숭실대학교/석·박사통합과정]

<https://orcid.org/0000-0002-7984-5377>



2021년 2월: 숭실대학교 전자공학과 (공학사)
2021년 3월~현재: 숭실대학교 전자공학과 석·박사 통합과정
[주 관심분야] 비선형 탐지, 레이더 신호 처리, 안테나, 밀리미터파 WPT

남 형 석 [한화시스템/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-5610-3437>



2017년 9월: 숭실대학교 정보통신전자공학부 (공학사)
2017년 3월~2024년 8월: 숭실대학교 전자정보공학부 정보통신공학과 (공학박사)
2024년 9월~현재: 한화시스템 선임연구원

[주 관심분야] EMC/EMI, RF 회로, WPT, 안테나, 레이더

정 태 용 [성균관대학교/석·박사통합과정]

<https://orcid.org/0000-0002-4779-937X>



2018년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학사)
2019년 9월~현재: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 석·박사통합과정
2018년 1월~2019년 4월: Keysight Technologies Korea Ltd. Engineer
[주 관심분야] 위상배열안테나 설계, 필터 일체형 안테나 설계, 최적화 알고리즘

김 지 수 [숭실대학교/석·박사통합과정]

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



2017년 3월~2021년 2월: 영남대학교 로봇기계공학과 (공학사)
2021년 3월~현재: 숭실대학교 전자정보공학부 전자공학과 석·박사통합과정
[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

2018년 9월~2020년 2월: 영남대학교 로봇기계공학과 조교수
2020년 3월~현재: 숭실대학교 전자정보공학부 IT융합전공 및 지능형반도체학과 부교수

[주 관심분야] 레이다 송·수신 하드웨어, RF 무선전력전송 기술, 양자컴퓨터용 cryo-CMOS 집적회로, 밀리미터파 집적회로 등

황 금 철 [성균관대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-8074-1137>



2001년 2월: 부산대학교 전자공학과 (공학사)
2003년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자 전공 (공학석사)
2006년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자 전공 (공학박사)
2006년 1월~2008년 7월: 삼성탈레스 기

술연구소 책임연구원

2015년 3월~2018년 8월: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학부 교수

2018년 9월~현재: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학부 교수
[주 관심분야] 전자파 복사 및 산란 해석, 안테나, 최적화 알고리즘 등

서 철 현 [숭실대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-6765-8734>

한국전자파학회논문지, 32(3) 참조

홍 순 기 [숭실대학교/부교수]

<https://orcid.org/0000-0002-3794-3171>



2005년 5월: 미국 University of Maryland, ECE (공학사)
2008년 12월: 미국 Virginia Tech, ECE (공학석사)
2012년 12월: 미국 Virginia Tech, ECE (공학박사)
2008년 5월~2015년 10월: 미국 해군연구

소 (NRL) 연구원

2015년 11월~2017년 2월: 미국 Rose-Hulman 공대 ECE 조교수
2017년 3월~현재: 숭실대학교 전자정보공학부 부교수

[주 관심분야] 레이다 및 센서, 마이크로파/밀리미터파 시스템, 무선전력전송, 고출력 전자기파