

FMCW 신호를 활용한 비선형 합성개구레이다

Nonlinear Synthetic Aperture Radar using FMCW signal

이 원 렬, 홍 순 기[★]

Won-Ryeol Lee, Sun K. Hong[★]

Abstract

In this paper, we propose a synthetic aperture radar based on FMCW using a nonlinear radar platform. we construct a nonlinear radar platform with different transmit and receive frequencies using FMCW signals. The platform moves along a 1.5 m path to acquire second harmonics signals, implementing a nonlinear SAR (synthetic aperture radar). Multiple nonlinear targets were placed in an indoor multipath environment with linear objects to detect weak second harmonics. After undergoing the SAR focusing process, a 2D hamming window was applied to enhance the focusing performance.

요 약

본 논문은 FMCW(frequency modulation continuous wave)기반의 비선형 레이더 플랫폼을 활용한 합성개구레이다를 제안하였다. 송·수신 주파수가 다른 비선형 레이더 시스템 플랫폼을 구성하고 FMCW신호를 활용하였으며, 플랫폼은 1.5 m 길이의 경로를 이동하면서 2차 고조파를 취득하여 비선형 합성개구레이다를 구현하였다. 선형 물체가 다수 존재하는 실내 다중 경로 환경에서 다수의 비선형 표적을 배치하여 미약한 2차 고조파를 탐지하여 합성개구레이다 영상화 과정을 거친 후, 2차원 해밍 윈도우를 통해서 이미징 성능을 향상시켰다.

Key words : Nonlinear Radar, Harmonic Radar, Synthetic Aperture Radar, FMCW, Multi-Target Detection

1. 서론

레이더 기술은 군사적 용도로부터 다양한 산업까지 다양한 응용 분야에서 중요한 역할을 하고 있다. 특히, 합성개구레이다(Synthetic aperture radar; SAR)는 기상 조건과 관계없이 관측 및 지형 분석에 있어 큰 이점이 존재하여 우주, 항공과 지상 등 다양한 플랫폼에 적용되고 있다. 고해상도 SAR 이미지는 클러스터들과 표적을 구

분하기 위하여 필수적이며, 이를 위해 안테나 설계 및 신호처리 연구가 진행되고 있으나 산란 면적이 매우 작은 소형 표적 탐지에는 한계가 존재한다. 이러한 SAR 기술은 선형 레이더에 의존했으나, 최근 비선형 소자의 비선형 특성을 포착하여 SAR 이미지(SAR Imaging)를 생성하는 비선형 합성개구면레이다(Nonlinear Synthetic aperture radar; NL-SAR) 기술이 제안되었다[1].

비선형 특성은 다이오드와 트랜지스터에 존재하는 PN

(Master degree student, Associate Professor), Dept. of Electronic Engineering, Soongsil University

★ Corresponding author

E-mail : shong215@ssu.ac.kr, Tel : +82-2-820-0939

※ Acknowledgment

This research was supported by the Challengeable Future Defense Technology Research and Development Program through the Agency for Defense Development (ADD) funded by the Defense Acquisition Program Administration (DAPA) in 2024 (No.912902601)

Manuscript received May. 16, 2024; revised Jun. 7, 2024; accepted Jul. 24, 2024.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

접합면에서 발생하는 비선형 전압-전류 곡선에 의한 것으로 기본파(fundamental)가 인가되면 고조파(harmonic)를 발생하게 된다. 이러한 특성은 비선형 소자만의 특수성으로 비선형 소자가 존재하지 않은 선형 물체들과 구분할 수 있는 특징으로 여겨진다. 반면, 또 다른 비선형 표적 영상화(focusing)를 위한 연구로 DORT(decomposition of the time-reversal operator)를 활용한 탐지가 제안되었지만[2], 영상화 방위각(azimuth) 해상도는 향상을 위해서는 안테나의 얇은 빔 폭 및 배열 안테나의 크기 증가를 필요로 한다. 그럼에도 불구하고 SAR에 비해 취득 데이터의 크기가 부족하여 충분한 해상도를 확보하지 못한다는 단점이 존재한다. 또한 DORT 기법은 표적의 개수에 따라 시스템 안테나 개수가 증가하지만, SAR 기법은 표적의 개수와 시스템 안테나의 개수가 무관하다는 이점이 존재한다. 즉, NL-SAR 기술은 선형 물체와 비선형 표적이 존재하는 환경에서도 고조파를 생성하는 비선형 표적에 대해서 SAR 이미지화가 진행되어 산란 면적이 작은 표적들도 효과적인 탐지가 가능하다.

기존의 제안되었던 NL-SAR 연구는 stepped frequency wave를 활용하였으며, 무반사 챔버에서 안테나가 레일 위를 이동하면서 정지 상태의 비선형 표적에서 재방사된 2차 고조파 신호에 대하여 합성 개구면(synthetic aperture)을 이루어 NL-SAR 이미지화를 진행하였다[1]. 하지만 stepped frequency wave는 동일한 대역폭에서 FMCW(frequency modulation continuous wave)와 비교하여 신호 발생 및 취득하는 시간이 길어진다는 단점이 존재한다. 이러한 다수의 신호를 취득 시간의 증가는 해상도 감소와 이동 표적에 대하여 이미지 왜곡이 발생할 수 있으며, 일반적인 실내 환경이 아닌 무반사 챔버에서 측정을 진행하여 벽에 의한 반사 영향을 확인할 수 없다.

따라서 본 논문에서는 일반적인 실내 환경에서 FMCW 신호를 활용한 NL-SAR 시스템을 구성하였으며 시스템 기본 검증을 위하여 다이오드-접합 안테나를 비선형 표적으로 선정하여, 비선형 표적들의 고조파를 측정하였다. 또한 미약한 고조파로 인한 SAR 이미지 약화를 해밍(hamming) 2 차원 윈도우를 활용하여 성능을 향상하였다.

II. 본론

1. 비선형 합성개구레이다 신호처리

기존의 선형 SAR와 NL-SAR의 차이점은 비트(beat) 신호 추출과정에서 존재한다. 비선형 FMCW 레이더는

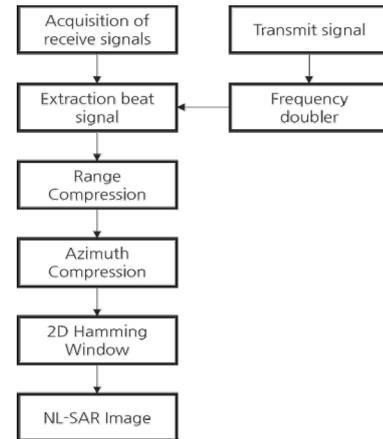


Fig. 1. Block diagram of NL-SAR signal processing.

그림 1. NL-SAR 신호처리 블록도

수신 신호의 주파수가 송신 신호의 주파수보다 고조파 배수만큼 크므로 비트 신호를 추출하기 위하여 송신 신호를 사용하고자 하는 수신단의 중심 주파수만큼 체배시켜야 한다.

본 논문에서는 2차 고조파 기반의 시스템을 구성해 그림 1과 같이 송신 신호의 주파수를 2배로 체배 후 비트 신호를 추출하게 된다. 레이더 시스템은 방위각 방향으로 움직이면서 2차 고조파를 탐지하여 원시 데이터가 취득된다. 취득된 원시 데이터는 체배된 송신 신호와 곱해진 후 Fast Fourier Transform(FFT)를 통해 방위각 별 비트 주파수(beat frequency)를 얻게 된다. 이때 거리 방향의 거리 해상도(ΔR)는 다음 수식과 같으며[3],

$$\Delta R \approx \frac{c}{2BW_{2nd}} \quad (1)$$

여기서 c 는 빛의 속도, BW_{2nd} 는 송신 신호의 2차 고조파 대역폭을 의미한다. 거리 압축(range compression) 과정 이후에 레이더 시스템 위치 변화에 따른 도플러 필터를 활용하여 방위각 압축(azimuth compression)을 진행한다.

방위 방향의 방위각 해상도(Δx)는 다음 수식과 같이 표현 가능하며,

$$\Delta x \approx H\lambda/L \quad (2)$$

여기서 H 는 표적과 플랫폼과의 최단 거리, λ 는 수신 주파수의 파장, L 는 수신 안테나의 개구면 길이로 사용된 수신 안테나의 개구면 길이는 0.25 m이다. 자세한 SAR 영상화 과정은 참고문헌[3]에서 확인할 수 있다. 하지만 미약한 고조파는 이미지의 성능을 악화시키므로,

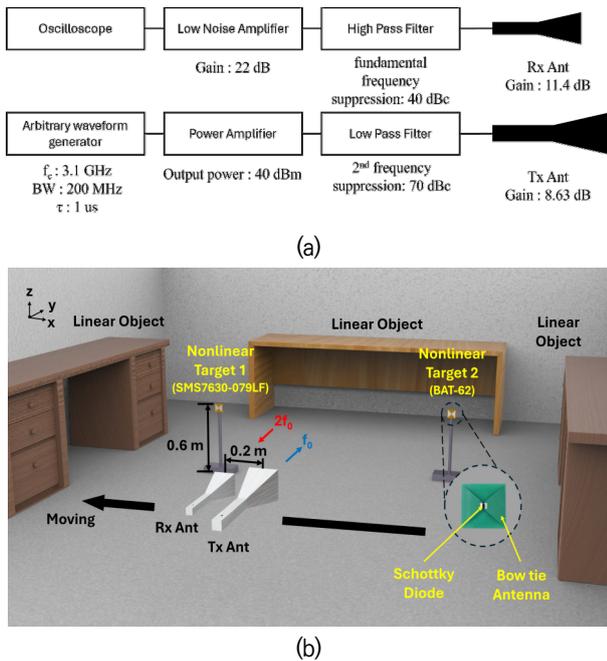


Fig. 2. (a) Schematic of nonlinear FMCW radar system, (b) Indoor measurement environment for synthetic aperture radar.

그림 2. (a) 비선형 FMCW 레이더 시스템의 도식도, (b) 합성개구레이더를 위한 실내 측정 환경

실험적으로 도출한 최적의 3×7 크기의 2차원 해밍 윈도우를 적용하여 NL-SAR 이미지를 향상하였다.

2. FMCW 기반 비선형 레이더 측정 셋업

본 논문에서 활용한 고조파는 기본파와 비교하여 세기가 현저히 작아 성공적인 NL-SAR를 위해서는 충분한 송신 신호의 크기, 낮은 수신 신호 취득을 위한 수신단 이득 그리고 측정 시스템의 자체고조파 억제를 필요로 한다.

그림 2-(a)는 NL-SAR 신호 취득을 위한 측정 시스템 도식도를 보여준다. 임의파형발생기로부터 중심 주파수 3.1 GHz, 대역폭 200 MHz, 신호 변조시간 1 us를 가지는 FMCW를 형성하고 전력증폭기를 통해 대략 40 dBm(9 Watts)로 신호를 증폭시킨다. 전력증폭기에서 발생하는 자체고조파를 억제하기 위하여 C 대역에 대하여 70 dB 억제력을 가지는 저역 통과필터를 사용하였다. 송수신 안테나의 이득은 각각 8.63, 11.4 dBi이며, 송수신단 커플링을 통해 수신단에 인가되는 기본파를 억제하기 위하여 S 대역에 대하여 40 dB의 억제력을 가지는 고역 통과필터를 활용하였다. 또한 미약 고조파를 탐지하기 위하여 22 dB의 이득을 가지는 저잡음증폭기를 통해 고조파 신호를 증폭 후 오실로스코프로 신호 습득

을 진행하였다.

측정환경은 그림 (b)에서 묘사하듯이 4×7 m² 크기의 일반적인 실내환경에서 선형 물체가 다수 존재하는 다중 경로 환경으로 구성하였으며, 송수신 안테나는 지면으로부터 0.6 m 높이 위치하고 총 1.5 m의 거리를 5 cm 간격으로 수평적으로 이동하면서 수신 신호를 취득하였다. 비선형 표적은 2.5×2.5 cm² 크기의 나비형 안테나에 비선형 특성을 가지는 쇼키 다이오드가 접합되어 있으며, 안테나와 동일한 높이에 위치한다. 다이오드의 비선형 특성에 따른 탐지 성능을 확인하기 위하여 서로 다른 쇼키 다이오드를 안테나에 접합하여 비선형 표적으로 선정하였다. 표 1에서는 두 가지의 배치 상황에 따른 비선형 표적의 위치와 송수신 안테나 플랫폼의 위치를 확인할 수 있다.

Table 1. Target position by case.

표 1. 배치 상황 별 따른 표적 위치

| Target label (Type of Diode) | Target Coordinate | | Unit |
|---------------------------------------|-------------------|--------------|----------------|
| | case 1(x, y) | case 2(x, y) | |
| Nonlinear Target 1 (BAT-62) | (-0.3, 1) | (0.3, 1) | (meter, meter) |
| Nonlinear Target 2 (SMS7630-079LF) | (0.4, 1) | (-0.3, 0.7) | |

* Platform Position (x, y): (- 0.75 m to 0.75 m, 0 m)

3. NL-SAR 이미지화 결과 및 분석

FMCW 비선형 레이더 시스템을 통해 측정한 2차 고조파 데이터를 기반으로 앞선 장에서 언급한 신호처리 과정을 거치게 된다. 그림 3-(a), 그림 4-(a)는 각 배치 상황별 거리 압축 신호이며, 그림 3-(b), 그림 4-(b)는 거리 압축 신호에 레이더 시스템 이동에 따른 도플러를 유추하여 방위 압축 및 2차원 해밍 윈도우를 적용하였을 때의 NL-SAR 이미지를 보여준다. 제한된 NL-SAR의 영상화 성능 지표를 확인하기 위하여 단일 비선형 표적에 대한 임펄스 신호 분석을 수행하였을 때, 미약한 고조파 신호로 인하여 부엽을 수신되는 불필요한 신호의 크기를 의미하는 peak to side-lobe ratio(PSLR)과 integrated side-lobe ratio(ISLR)이 각각 -11.83 dB, -6.04 dB를 가지는 것을 확인하였다. 모든 배치 상황에서 비선형 표적들의 위치를 확인할 수 있으나, 구성된 레이더 시스템의 낮은 출력과 낮은 이득 송수신 안테나 한계로 근거리에서 충분한 신호를 비선형 표적에 인가하지 못하여 세밀한 해상도를 가지지 못한 것으로 보인다. 비선형 응답은 비선형 소자에 인가되는 신호의 전력 증가에 따라 비

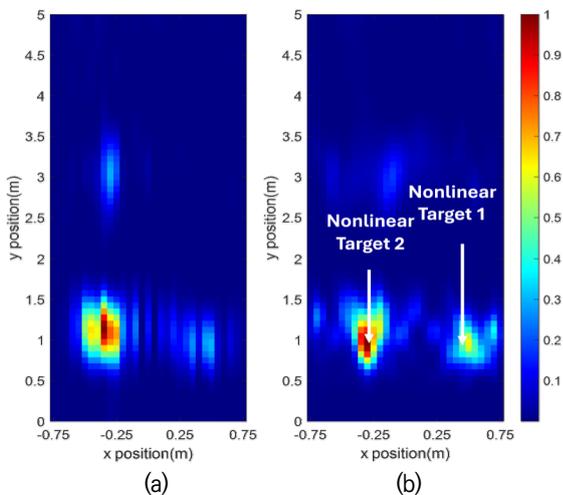


Fig. 3. (a) Range compressed signal (b) azimuth compressed signal with 2-D hamming window of case 1 data.

그림 3. 배치 상황 1번의 (a) 거리 압축 신호와 (b) 2차원 해밍 윈도우가 적용된 방위각 압축 신호

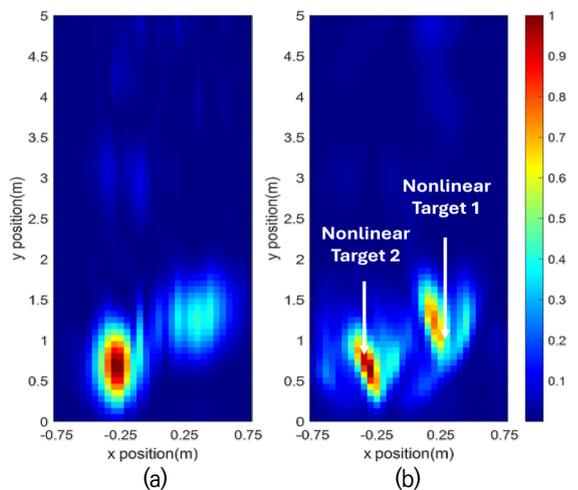


Fig. 4. (a) Range compressed signal (b) azimuth compressed signal with 2-D hamming window of case 2 data.

그림 4. 배치 상황 2번의 (a) 거리 압축 신호와 (b) 2차원 해밍 윈도우가 적용된 방위각 압축 신호

선형적으로 증가하므로 송신단의 높은 출력은 NL-SAR의 성능을 향상시킬 수 있다. 배치 상황 1에서 발생하는 유령 표적은 측정이 진행된 일반적인 환경에서 재생산된 2차 고조파가 일부 선형 물체들에 산란에 의해 발생한 것으로 예상된다[4]. 표적들간 영상화 해상도 차이는 사용된 비선형 표적의 다이오드의 하모닉 재생산 정도 차이에 의한 것이다. 수동적인 측정 방식으로 인간 오차 (human error)가 존재하여 도플러 모호성(doppler ambiguities)을 야기해 NL-SAR의 영상화를 약화시키

므로 레일 기반의 SAR를 사용하게 된다면 보다 높은 성능의 영상화를 기대할 수 있다.

III. 결론

본 논문에서는 다중 경로 환경에서 비선형 FMCW 레이다 시스템 기반의 합성개구레이다를 구현하였다. 총 2개의 다이오드-접합 안테나인 비선형 표적을 근거리배치하여, 측정을 통해 거리해상도 0.375 m, 1 m 거리에서 방위각 해상도 0.194 m를 가지는 SAR 이미지를 형성하였다. 비선형 레이다를 활용하여 선형 클러터의 영향을 최소화하였으며, 2차원 해밍 윈도우를 통해 비선형 표적에 대한 이미지 영상화를 성공적으로 수행하였다. 이러한 결과는 실내 환경에서의 NL-SAR의 가능성을 시사하며, 원거리의 탐지에서 높은 해상도 및 정확도의 NL-SAR 이미지를 생성하는 연구의 초석이 될 것으로 예상된다.

References

- [1] K. A. Gallagher, R. M. Narayanan, G. J. Mazzaro, A. F. Martone, K. D. Sherbondy, "Static and Moving Target Imaging Using Harmonic Radar," *Electronics*, 30, 6, 2017. DOI: 10.3390/electronics6020030
- [2] Y. J. Song and S. K. Hong, "Detection of Buried Nonlinear Targets Using DORT," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 24, no.3, pp.226-233, 2024. DOI: 10.26866/jees.2024.3.r.223
- [3] J. -W. Ting, D. Oloumi and K. Rambabu, "FMCW SAR System for Near-Distance Imaging Applications Practical Considerations and Calibrations," *IEEE Tras. Microwave Theory and Techniques*, vol.66, no.1, pp.450-461, 2018. DOI: 10.1109/TMTT.2017.2706693
- [4] Z. Wang, J. Yi, Z. Gong and X. Wan, "Mechanism and Characteristic of Nonlinear Clutter in Harmonic Radar With Frequency-Modulated Waveform," *IEEE Tras. on Aerospace and Electronic Systems*, vol.59, no.4, pp.4240-4249, 2023. DOI: 10.1109/TAES.2023.3237659