

비선형 FMCW 레이더에서 효과적인 탐지를 위한 자체고조파 억제 알고리즘

Self-Harmonic Suppression Algorithms for Effective Detection in Nonlinear FMCW Radar

이 원 렬¹ · 오 수 영² · 홍 순 기³Won-Ryeol Lee¹ · Soo-Young Oh² · Sun-Ki Hong³

요 약

비선형 레이더 시스템 기반의 비선형 탐지기술은 선형 물체가 제외된 전자기기의 미약한 비선형 응답을 취득하여 전자기기의 정보를 탐지하는 기술이다. 하지만 전자기기의 비선형 응답을 유도 및 취득하기 위해서는 고출력 증폭기와 고이득 저잡음 증폭기가 필수적이므로, 시스템 자체에서 발생하는 자체고조파의 발생이 불가피하다. 이러한 자체고조파를 억제하기 위하여 본 논문은 자체고조파 발생 경로를 예측하여 선형 물체 거리에 따른 자체고조파 LUT(look-up-table) 데이터를 확보하였으며, 입자 군집 최적화(PSO, particle swarm optimization) 알고리즘을 통해 LUT 데이터별 최적의 가중치를 능동적으로 도출하였다. 제안된 알고리즘을 검증하기 위하여 6 m 에 위치하는 세 종류의 비선형 표적과 2.5 m, 4 m 에 벽이 위치하는 두 가지 은닉환경을 구성하여 측정을 진행하였다. 측정 데이터 기반으로 알고리즘 적용 결과를 살펴보았을 때, CA-CFAR(cell average constant false alarm rate)의 임계치가 표적의 위치에서 감소하여 탐지 성능이 향상된 것을 확인할 수 있었다.

Abstract

Nonlinear radars detect electronic targets by capturing weak nonlinear responses from electronic devices and excluding linear objects. However, inducing and capturing these responses require high-power and high-gain amplifiers, which inevitably produce self-generated harmonics. To suppress these harmonics, this study developed a technique that predicts their generation paths and collects look-up table (LUT) data based on the distances to linear objects. The optimal weights for the LUT data were derived using the particle swarm optimization (PSO) algorithm. Measurements were performed with three nonlinear targets at 6 m and walls at 2.5 m and 4 m. The results indicate improved detection performance, with a reduced cell-average constant false alarm rate (CA-CFAR) threshold at the target position when the proposed algorithm was applied.

Key words: Nonlinear Detection, Optimization, Self-Harmonics, Concealed Target, FMCW

I. 서 론

현대에서 레이더 기술은 군사, 보안, 기상 관측 등 다양

한 분야에서 특수 목적에 맞게 기술 발전을 이루고 있다. 전통적인 레이더 시스템은 송신된 전자기파 신호가 물체에 반사되어 돌아오는 반사파의 특성을 분석하여 물체의

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

송실대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Soongsil University)

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

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

· Manuscript received September 23, 2024 ; Revised September 25, 2024 ; Accepted September 27, 2024. (ID No. 20240923-098)

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

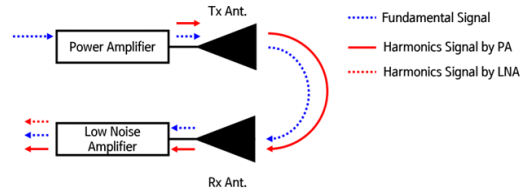
정보를 취득하는 송수신 주파수가 동일한 선형 반응에 기초하고 있다. 그러나 이러한 선형 시스템은 반사 면적 및 반사율이 높은 물체에 대해서는 높은 성능을 발휘하지만, 반사 면적과 반사율이 작은 전자기기를 탐지하기에는 어려움이 존재한다. 이를 극복하기 위하여 최근 전자 기기에 필수적으로 사용되는 다이오드 및 트랜지스터의 비선형 응답을 탐지하는 연구가 제안되었다^[1].

비선형 응답을 탐지하기 위해서는 비선형 소자가 고조파 성분을 재생산하기 위한 충분한 송신 전력과 비선형 RCS^[2]에 따른 미약한 고조파 탐지를 위하여 높은 이득을 가지는 수신부를 필요로 한다. 이전 연구^[3]를 통해 10 m의 자유공간과 6 m 은닉환경에서 비선형 표적들의 비선형 응답을 취득에 필요한 비선형 레이더 시스템의 성능을 확인하였다. 하지만 자유공간 탐지에 비해 은닉환경에서는 낮은 신호 대 잡음비(SNR, signal-to-noise ratio)에 의해 낮은 탐지율을 가지게 된다. 이러한 낮은 SNR 환경은 비선형 레이더의 자체 고조파로부터 야기될 수 있으며, 필터 기반의 시스템 구성으로는 자체 고조파 억제에 한계가 존재한다.

따라서 본 논문은 은닉환경에서 자체 고조파의 발생 경로를 예측하고 자체 고조파를 억제하여 탐지율 향상을 위한 LUT(look-up table) 기반의 자체고조파 억제 알고리즘을 제안한다. 제안된 억제 알고리즘의 성능을 확인하기 위하여 구성된 주파수 연속 변조 방식(FMCW, frequency-modulated continuous wave)의 비선형 레이더 시스템의 비트 주파수(beat frequency)와 CA-CFAR(cell average constant false alarm rate)를 활용하여 탐지율 향상을 확인하였다.

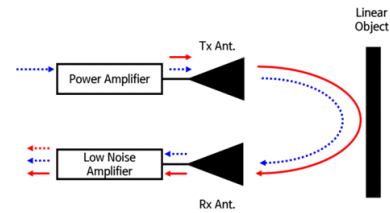
II. 자체고조파 발생 경로 예측

자체고조파 억제 알고리즘을 사용하기에 앞서 하드웨어 구성을 통해 충분한 자체고조파 억제력을 통해 알고리즘이 사용 가능한 시스템 구성을 필요로 한다. 비선형 레이더 시스템에서 비선형 탐지는 고조파 탐지를 기반으로 하므로, 송신부와 수신부의 사용 주파수 대역이 다르게 구성이 되어 있다. 일반적으로 사용 주파수 대역이 다르게 구성되어 있으면, 송신부에 저역통과필터와 수신부에 고역통과필터를 배치하게 되면 높은 격리도를 기대할 수 있다. 하지만 상용 전자기기에 대해서 효과적인 비선



(a) 안테나간 직접 결합

(a) Directly coupling between antennas



(b) 선형 물체에 의한 반사

(b) Reflection for linear object

그림 1. 자체고조파 발생 경로

Fig. 1. Self-harmonics generation path.

형 탐지를 위해서는 높은 송신부 출력과 수신부 이득을 필요로 하며, 이를 위해서는 비선형 소자가 존재하는 증폭기 사용이 필수적이다.

시스템 내부의 비선형 소자들에 의해 발생하는 자체고조파가 발생하는 경로는 그림 1에서 묘사하고 있다. 그림 1(a) 경로의 경우 송수신 안테나 간 높은 격리도를 구현할 수 있는 기술을 필요로 한다. 두 가지 경로는 공통적으로 송신부의 전력증폭기 뒷단에 저역통과대역 필터, 수신부의 저잡음증폭기 앞단에 고역통과 대역을 필터를 위치하여 자체고조파 억제 효과를 기대할 수 있다. 하지만 자체고조파 억제를 위해 다수의 필터 사용은 출력 감소와 시스템 크기 증가를 야기할 수 있으며, 명시된 경로뿐만 아니라, 고출력 전력증폭기의 전파 간섭 및 다중 경로 간섭으로 인해 송신부에 영향을 미칠 수 있다.

III. 자체고조파 억제 알고리즘

자체고조파의 발생 경로는 앞 장에서 설명한 바와 같이 다양한 경로를 통해 발생할 수 있으며, 필터와 안테나 구성을 통해 자체고조파 억제력을 구현할 수 있다. 그러나 상용 전자기기의 비선형 응답은 미약하며, 은닉환경의 경우 선형 물체에 의한 비선형 응답 감소로 인해 비선형

탐지 성능은 자체고조파에 매우 취약해진다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 제안된 자체고조파 억제 알고리즘은 다양한 경로를 통해 발생되어 결합된 자체고조파 신호를 사전에 취득 활용하였다. 또한 비선형 표적이 없는 측정 환경에서 취득한 다양한 위상지연과 진폭을 가지는 수신 대역 FMCW 신호들을 그림 2의 비트 주파수 추출과정을 거친 기저대역 신호의 주파수 스펙트럼을 식 (1)을 활용하여 거리에 대한 정보로 변환된 신호를 자체고조파로 정의하였다.

$$d = \frac{c f \tau}{2BW} \quad (1)$$

여기서 c 는 빛의 속도, f 는 주파수, τ 는 송신 FMCW 변조 시간, BW 는 수신 FMCW 주파수 대역이다.

은닉환경에서 비선형 표적의 거리에 대한 비트 주파수를 취득하게 되면 식 (2)처럼 표현이 가능하다.

$$y(d) = x_{NL}(d) + k_{self}(d) + n(d) \quad (2)$$

여기서 x_{NL} 는 비선형 표적의 비트 주파수, n 는 백색잡음이다. 이때 k_{self} 는 선형 물체의 위치에 따라 그림 1(b)에서 발생하는 자체고조파 차이가 존재하므로 이를 유추하기 위하여 비선형 표적이 존재하지 않는 환경에서 RCS가 높은 철제 구조물을 임의의 위치에 두어 자체고조파 LUT 데이터를 확보하는 과정을 거친다. 이렇게 확보된 LUT 데이터를 활용하여 데이터별 가중치를 곱한 후 합산하게 되면 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$k_{self}(d) \cong \sum_{m=1}^M a_m k_{self,m}(d) \quad (3)$$

여기서 M 은 LUT 데이터의 개수, $k_{self,m}$ 는 m 번째 LUT 데이터, a_m 는 $[0,1]$ 의 범위를 가지는 LUT 데이터의

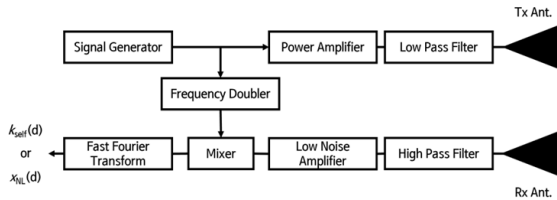


그림 2. 자체고조파 및 비트주파수 추출과정
Fig. 2. Extraction process of self-harmonics and beat frequency.

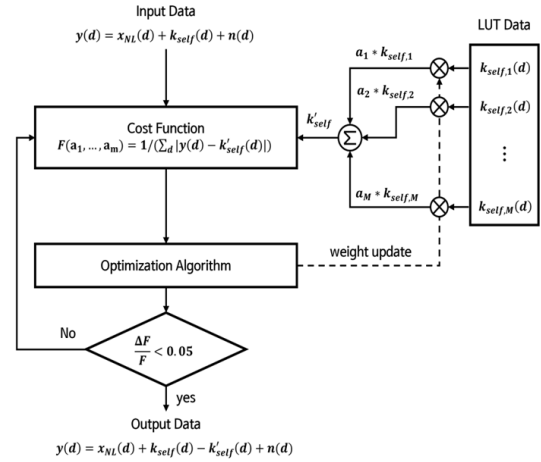


그림 3. 제안된 자체고조파 억제 알고리즘 블록도
Fig. 3. Block diagram of proposed self-harmonics suppression algorithm.

가중치이다. 이때 LUT 확보에 RCS가 높은 선형 물체를 활용하였기 때문에 일반적인 선형 물체는 이보다 낮은 RCS를 가지므로 가중치의 범위를 $[0,1]$ 로 설정하였다. 따라서 제안된 자체고조파 억제 알고리즘의 전체 시스템 블록도는 그림 3과 같이 구성하였다. 비용함수(cost function)는 자체고조파를 제외한 비선형 응답과 잡음 신호의 크기를 최대화할 수 있게 구성되었으며, 최적의 가중치를 찾기 위해 최적화 알고리즘이 사용된다.

IV. 알고리즘 적용 결과

제안된 알고리즘을 검증하기 위하여 안테나로부터 2.5 m에서 10 m 구간 내에서 9개의 LUT 데이터를 그림 4와 같이 추출하였다. 사용된 표적의 종류는 전자기기 2종과 특수성을 고려하여 다이오드-접합 안테나를 선정하였으며, 은닉환경을 구성하기 위한 벽돌을 활용하였다. 최적의 해를 찾기 위한 알고리즘은 진화 연산보다 수행 속도가 빠른 입자 군집 최적화(PSO, particle swarm optimization)로 선정하였으며^[4], 군집의 개수는 50개, 최대 반복 횟수는 100회로 설정하였다. 은닉환경에서 벽은 각각 2.5 m, 4 m에 위치하는 상황을 구현하였으며 표적의 위치는 6 m로 고정하였다. 동일한 파라미터를 적용한 CA-CFAR를 사용하여 탐지 성능을 그림 5와 같이 확인하였을 때,

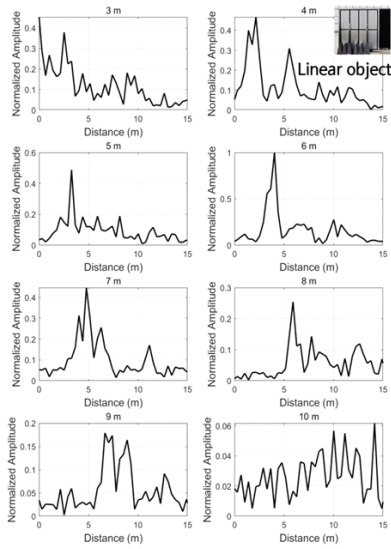


그림 4. 선형 물체 위치에 따른 자체고조파 반사 신호
Fig. 4. Self-harmonic echo vs. linear object position.

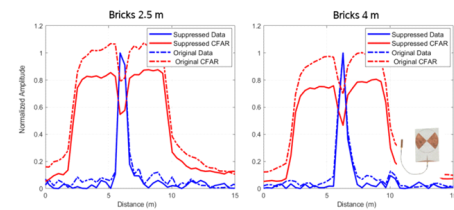
모든 상황에 대하여 CFAR의 임계값이 표적의 위치에서 낮아져 탐지 성능이 향상하는 것을 확인할 수 있다.

V. 결 론

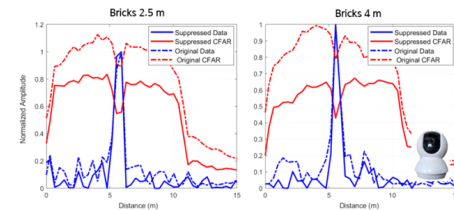
본 논문에서는 비선형 FMCW 레이더 시스템에서 발생하는 자체고조파를 억제하여 비선형 탐지 성능을 향상시키기 위해 LUT와 PSO 기반의 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘을 검증하기 위하여 벽이 2.5 m 또는 4 m에 위치하는 은닉환경을 구현하여 총 3가지 비선형 표적으로부터 비선형 응답을 취득하였다. PSO를 통해 LUT의 최적의 가중치를 도출하였으며, 모든 상황에 대해서 표적 위치의 CA-CFAR 임계치가 감소 되어 탐지 성능이 향상된 것을 확인할 수 있었다. 또한 최적화 알고리즘의 최적화 속도가 향상하게 된다면 시스템 또는 비선형 표적 동적 환경에서도 적용될 수 있다. 이를 통해 비선형 레이더 시스템의 하드웨어 한계를 극복할 수 있는 초석이 될 수 있을 것으로 예상된다.

References

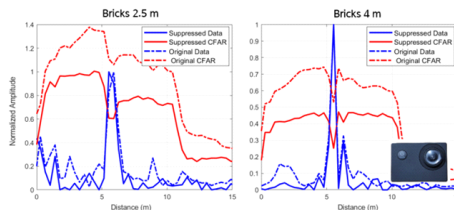
[1] G. J. Mazzaro, A. F. Martone, K. I. Ranney, and R. M. Narayanan, "Nonlinear radar for finding RF electronics: System design and recent advancements", *IEEE Tran-*



(a) 다이오드-접합 안테나
(a) Diode-junction antenna



(b) 홈캠
(b) HomeCam



(c) 블랙박스
(c) Dash Cam

그림 5. 자체고조파 억제알고리즘 결과
Fig. 5. Result of self-harmonics suppression algorithm.

sactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 65, no. 5, pp. 1716-1726, May 2017.

[2] 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, Jul. 2022.

[3] S. Oh, W. Lee, and S. K. Hong, "Free-space and concealed target detection using nonlinear FMCW-based radar," *Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 35, no. 6, pp. 513-516, Jun. 2024.

[4] J. Kennedy, R. Eberhart, "Particle swarm optimization," in *Proceedings of ICNN'95-International Conference on Neural Networks*, Perth, Nov.-Dec. 1995, pp. 1942-1948.