

압축센싱 기반 고해상도 거리 프로파일 기법 연구

백지웅*, 윤주호*, 박종일*,
 윤기철**, 김관성**, 이준호^o

A Study on the High Resolution Range Profile Method Based on Compressive Sensing

Ji Woong Paik*, Juho Yun*, Jongil Park*,
 Kichul Yoon**, Kwan Sung Kim**,
 Joon-Ho Lee^o

요약

본 논문은 압축센싱 기법을 적용하여 소형 표적 탐지 성능을 높이는 방법을 제안한다. 기존의 소형 표적 탐지 기법의 경우 레이다 시스템자원에 따라 탐지 성능이 정해지게 된다. 최소 최적화를 통해 자원과 시스템 오류에 강인한 고분해능 소형 표적 탐지 기법을 구현할 수 있다.

Key Words : compressive sensing, covariance fitting smoothed L0-norm, high resolution range profile

ABSTRACT

An enhanced small target detection method based on compressive sensing is presented in this paper. In the case of the conventional method, the performance of the detection is depend on system resources. By using sparse recovery, the small target detection method can be improved in resolution and robustness against system resources and system error.

1. 서론

다기능 능동 위상배열 레이다 시스템에서 소형 표적 탐지 기능은 특정 기준의 RCS(Radar Cross Section)를 갖는 작은 부피의 표적을 탐지하는 기능이다. 소형 표적 탐지를 위한 파형은 일반적으로 LFM(Linear Frequency Modulation) 기반 SFW(Stepped Frequency Waveform) 또는 SCW(Stepped Chirp Waveform)을 이용하며 파형 설계 파라미터에 따라 소형 표적 탐지의 분해능과 모호성이 없는 최대 탐지 거리가 결정된다¹⁾.

SCW 파형을 이용하는 기법의 경우 크게 3개의 과정으로 소형 표적을 탐지한다. 첫 번째 과정으로는 LFM 파형을 이용하여 펄스 압축을 수행하면서 얻는 저 해상도 거리 프로파일을 생성한다. 두 번째 과정으로는 CFAR를 이용하여 표적이 있다고 판단되는 높은 신호 레벨의 셀을 찾는다. 세 번째 과정으로는 SFW 알고리즘 기반 고해상도 거리 프로파일 기법(High Resolution Range Profile, HRRP)²⁾을 이용하여 두 번째 과정에서 선택한 거리 셀로부터 모호성이 없는 최대 탐지 거리 내에 존재하는 표적의 거리 정보를 추정한다.

기존 HRRP 기반 알고리즘의 경우 해의 개수보다 조건의 개수가 많은 과결정계의 해를 구하는 기법으로 정의할 수 있다. 따라서 HRRP 기반 알고리즘의 조건에 해당하는 펄스 개수 N_p , 펄스 간의 스텝 주파수 Δf 에 따라 알고리즘의 성능이 크게 좌우한다. 시스템 오동작으로 인한 펄스 개수 빠짐 현상, 또는 펄스 별로 동일하게 설정되어야 하는 스텝 주파수의 오차에 의해 성능이 크게 저하된다.

이에 반해 압축센싱 기법³⁾을 적용한 HRRP 알고리즘의 경우 표적 정보는 공간적으로 최소하다는 성질을 이용한다. 기존의 과결정계를 조건보다 해가 많은 과소결정계로 변환하고 최소 최적화를 통해 잠재적 해집합 (potential solution set)의 무수히 많은 해 중 가능한 해집합(feasible set)에 속하는 해를 구한다. 따라서 압축센싱(Compressive Sensing, CS) 기법을 적용한 HRRP 알고리즘을 통해 소형 표적을 탐지한다

* This research was supported by Agency for Defense Development

• First Author : (ORCID:0000-0003-3610-3258) Hanwha Systems, jw.paik90@hanwha.com, 전문연구원, 정회원

◦ Corresponding Author : (ORCID:0000-0003-3715-3943) Sejong University Department of Information & Communication Engineering, joonhlee@sejong.ac.kr, 정교수, 정회원

* Hanwha Systems, wngh0501@hanwha.com, 전문연구원, 정회원; ji0115.park@hanwha.com, 수석연구원

** Agency for Defense Development, yoonkc@add.re.kr, 선임연구원; kimg@add.re.kr, 책임연구원

논문번호 : 202209-201-A-LU, Received September 5, 2022; Revised September 21, 2022; Accepted September 21, 2022

면 기존 기법보다 우수한 거리 분해능을 보이며 과형 생성 오류와 같은 시스템 오류에 더욱 강인하다.

본 논문에서는 펄스 압축으로 생성한 저 해상도 거리 프로파일에서 CFAR를 넘은 거리 셀 데이터를 행렬식으로 표현하고 과소결정계로 확장하는 과정 및 공분산 행렬 최적화 기반 smoothed l_0 -norm 기법을 적용한 HRRP 알고리즘을 보인다. 또한 모의시험 결과를 통해 압축센싱 기반 HRRP 알고리즘의 우수한 탐지 성능을 보인다.

II. 신호 모델링 및 기존 HRRP 알고리즘

CFAR를 통과한 k 번째 PRI의 특정 거리 셀의 IQ 신호 $z_k(t_i)$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$z_k(t_i) = a(t_i)e^{-j2\pi f_k \Delta t_i} + n_k(t_i), \quad k = 1 \dots N_p \quad (1)$$

f_k 는 k 번째 펄스의 주파수이며 Δt_i 는 시간 지연, $a(t_i)$ 는 진폭 그리고 N_p 는 펄스 개수이다. $n_k(t_i)$ 의 경우 k 번째 PRI 구간의 수신 잡음이다. 하나의 버스트에서 수집한 특정 거리 셀의 IQ 신호 $\mathbf{z}(t_i)$ 는 다음과 같다.

$$\mathbf{z}(t_i) = \begin{bmatrix} z_1(t_i) \\ z_2(t_i) \\ \vdots \\ z_{N_p}(t_i) \end{bmatrix} = a(t_i) \begin{bmatrix} e^{-j2\pi f_1 \Delta t_i} \\ e^{-j2\pi f_2 \Delta t_i} \\ \vdots \\ e^{-j2\pi f_{N_p} \Delta t_i} \end{bmatrix} + \mathbf{n}(t_i). \quad (2)$$

N_p 개의 펄스 주파수의 경우 스텝 주파수 Δf 씩 증가한다. 따라서 식 (2)를 Δf 와 거리 R_i 로 표현하면 다음과 같다.

$$\mathbf{z}(t_i) = a(t_i) \cdot \begin{bmatrix} e^{-j2\pi \Delta f(1-1) \frac{2R_i}{c}} \\ e^{-j2\pi \Delta f(2-1) \frac{2R_i}{c}} \\ \vdots \\ e^{-j2\pi \Delta f(N_p-1) \frac{2R_i}{c}} \end{bmatrix} + \mathbf{n}(t_i). \quad (3)$$

N_p 개의 펄스 간의 균일한 위상차를 성분으로 갖는 벡터를 \mathbf{d} 로 정의하면 $\mathbf{z}(t_i)$ 은 다음과 같다.

$$\mathbf{d} = \begin{bmatrix} e^{-j2\pi \Delta f(1-1) \frac{2R_i}{c}} \\ e^{-j2\pi \Delta f(2-1) \frac{2R_i}{c}} \\ \vdots \\ e^{-j2\pi \Delta f(N_p-1) \frac{2R_i}{c}} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

$$\mathbf{z}(t_i) = \mathbf{d}a(t_i) + \mathbf{n}(t_i). \quad (5)$$

SFW 알고리즘 기반 HRRP 기법의 거리에 따른 스펙트럼은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$p_{conv}(r) = E[|\mathbf{d}(r)^H \mathbf{z}(t_i)|^2], \quad (6)$$

$$R_i \leq r \leq R_i + \frac{c}{2\Delta f}.$$

III. 압축센싱 기반 HRRP 기법

$\mathbf{z}(t_i)$ 를 과소결정계로 확장하면 식 (7)과 같다.

$$\mathbf{z}(t_i) = \mathbf{D} \cdot \mathbf{a}(t_i) + \mathbf{n}(t_i). \quad (7)$$

$$\mathbf{D} = [\mathbf{d}(r_1) \ \dots \ \mathbf{d}(r_{N_r})]. \quad (8)$$

$$\mathbf{a}(t_i) = [a_1(t_i) \ \dots \ a_{N_r}(t_i)]^T. \quad (9)$$

N_r 은 잠재적 표적 거리 집합(potential target range set)의 성분 개수이며 \mathbf{D} 는 $C^{N_r \times N_p}$ 이며, $N_r \gg N_p$ 을 만족한다. $\mathbf{z}(t_i)$ 의 공분산 행렬 \mathbf{C} 는 다음과 같다.

$$\mathbf{C} = \mathbf{D}\mathbf{C}_a\mathbf{D}^H + \mathbf{E}. \quad (10)$$

\mathbf{C}_a 는 $\mathbf{z}(t_i)$ 의 신호 공분산 행렬이며 \mathbf{E} 는 $\mathbf{n}(t_i)$ 의 공분산 행렬이다. 식 (10)을 이용하여 최소 최적화의 비용함수를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\min \|\mathbf{C}_a\|_0 \text{ subject to } \mathbf{C} = \mathbf{D}\mathbf{C}_a\mathbf{D}^H. \quad (11)$$

본 논문은 기존의 불연속 함수인 $\min \|\cdot\|_0$ 을 연속 함수에 맵핑한 이후 내리막 경사법을 통해 최댓값(Global maxima)을 구하는 공분산 행렬 최적화 기반 smoothed l_0 -norm 기법을 이용한다. 본 논문에서는 가우시안 함수 f_σ 를 이용하며 해당 함수에 맵핑(mapping)한 신호 공분산 행렬 \mathbf{C}_a 는 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$f_{\sigma}((\mathbf{C}_a)_{i,j}) \approx \begin{cases} 1, & \text{when } |(\mathbf{C}_a)_{i,j}| \ll \sigma \\ 0, & \text{when } |(\mathbf{C}_a)_{i,j}| \gg \sigma \end{cases} \quad (12)$$

$(\mathbf{C}_a)_{i,j}$ 는 신호 공분산 행렬의 i 행 j 열 성분을 나타내며 σ 는 가우시안 함수의 표준 편차이다. 식 (12)을 이용하면 \mathbf{C}_a 의 l_0 -norm은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \|\mathbf{C}_a\|_0 &\approx N_r^2 - F_{\sigma}(\mathbf{C}_a) \\ F_{\sigma}(\mathbf{C}_a) &= \sum_{i=1}^{N_r} \sum_{j=1}^{N_r} f_{\sigma}((\mathbf{C}_a)_{i,j}). \end{aligned} \quad (13)$$

σ 가 매우 작은 값을 가질 때, 식 (11)의 최소 최적화 비용함수는 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$\max F_{\sigma}(\mathbf{C}_a) \text{ subject to } \mathbf{C} = \mathbf{D}\mathbf{C}_a\mathbf{D}^H. \quad (14)$$

IV. 수치 결과

4.1 모의신호 기반 시뮬레이션 결과

현재 운용하는 다기능 능동 위상배열 레이더 시스템에서 이용하는 파형 설계값을 이용하여 저 해상도 거리 프로파일에서 CFAR를 통과한 N_p 개의 특정 거리 셀의 IQ 신호를 모의했다. HRRP의 모호성 없는 거리상에 2개의 표적 정보가 존재하며 두 표적의 신호 레벨의 경우 SNR을 이용하여 설정했다. 수신 잡음의 경우 $N(0,1)$ 인 복소 가우시안 랜덤 변수로 모의했다. 모호성 없는 거리를 통해 현재 장비에서 이용하는 파형 설계값을 계산할 수 있으므로 보안상 본 논문에서

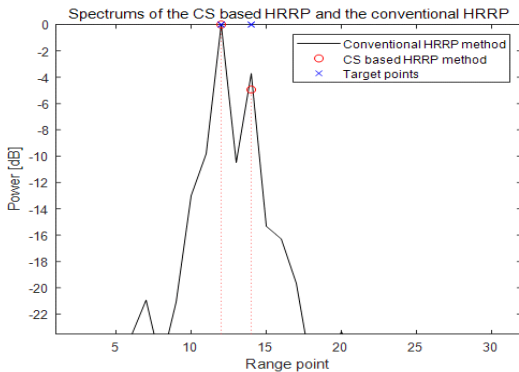


그림 1. 압축센싱 기반 HRRP 기법과 기존의 HRRP 기법의 표적 분해능(펄스의 개수가 $2N_p$ 인 경우)
Fig. 1. Target resolution of the compressive sensing based HRRP method and the conventional HRRP method (when the number of pulses is $2N_p$)

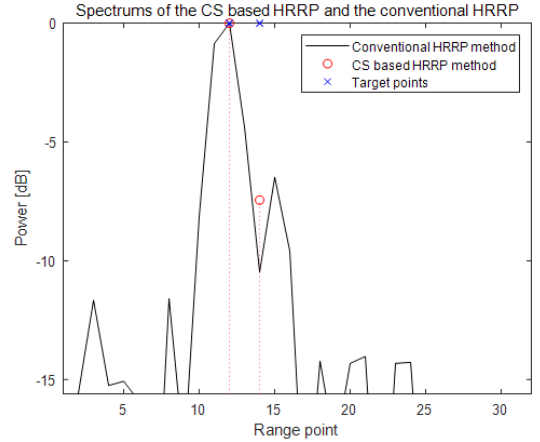


그림 2. 압축센싱 기반 HRRP과 기존의 HRRP 기법의 표적 분해능(펄스의 개수가 N_p 인 경우)
Fig. 2. Target resolution of the compressive sensing based HRRP method and the conventional HRRP method (when the number of pulses is N_p)

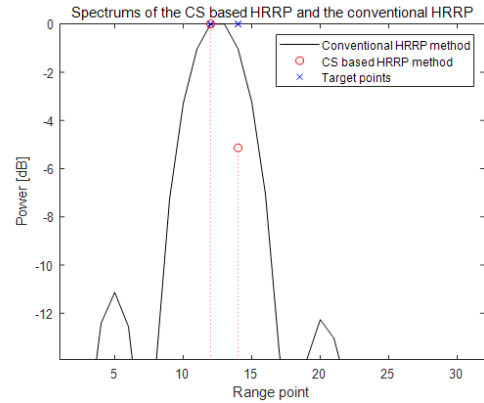


그림 3. 압축센싱 기반 HRRP 기법과 기존의 HRRP 기법의 표적 분해능(펄스의 개수가 $N_p/2$ 인 경우)
Fig. 3. Target resolution of the compressive sensing based HRRP method and the conventional HRRP method (when the number of pulses is $N_p/2$)

서는 거리 정보를 포인트로 표현했다.

그림 1, 2 그리고 3의 경우 모두 표적이 2 포인트 (point) 차이로 인접하게 존재하며 세로축은 HRRP의 CFAR 레벨까지만 도시했다. 그림 1의 경우 N_p 가 기존 설계값보다 2배 많으며 두 표적의 SNR을 각각 30 dB, 25 dB로 설정했을 때의 CS 기반 HRRP 기법과 기존 HRRP 기법의 탐지 성능을 보인다. 두 기법 모두 정확히 두 표적의 거리 포인트를 추정했지만 기존 기법의 경우 설정한 CFAR 레벨을 넘는 가짜 피크 포인트(peak point)가 존재한다. 그림 2의 경우 N_p 가 기존 설계값과 동일하며 두 표적의 SNR을 각각 10 dB,

5 dB로 설정했을 때의 두 기법의 탐지 성능을 보인다. N_p 가 설정값과 동일하며 두 표적의 SNR을 각각 10 dB, 5 dB로 설정했을 때의 시험 결과를 보인다. 기존 기법의 경우 적어진 펄스의 개수에 비례하여 분해능이 저하되었으며 다수의 가짜 피크 포인트가 존재한다. 이에 반해 압축센싱 기반 HRRP 기법의 경우 인접한 두 표적을 정확히 추정한다.

그림 3의 경우 시스템 오류 및 고장을 모의하기 위해 N_p 를 기존 설정값의 1/2로 설정했으며 두 표적의 SNR은 그림 2의 경우와 같다. 기존 기법의 경우 저하된 분해능으로 인해 하나의 표적만 추정한다. 이에 반해 CS 기반 HRRP 기법의 경우 인접한 두 표적을 정확히 추정한다.

V. 결 론

본 논문에서는 압축센싱 기반 고해상도 거리 프로파일 기법을 제안한다. 수신신호와 제안한 알고리즘을 수식적으로 유도했으며 현재 운용 중인 다기능레이더의 파형 설정값을 기반으로 모의시험을 수행했다. 해당 시험의 결과를 통해 제안한 기법의 시스템 오류 및 고장에 강인함과 우수한 분해능을 확인했다. 실시간 표적 탐지를 위해 제안한 기법의 계산량 감소가 요구되며 향후 Truncation 기법을 통해 연산량을 감소시키는 연구를 진행할 계획이다.

References

- [1] B.-L. Cho, J.-M. Kim, C.-H. Kim, and S.-W. Hong, "A study on high-resolution range profile construction for target in narrowband radar systems," *J. KIIT*, vol. 18, no. 9, pp. 69-74, Sep. 2020.
- [2] Z. Nuo and C. Wei, "High range resolution profile automatic target recognition using sparse representation," *Chin. J. Aeronautics*, vol. 23, no. 5, pp. 556-562, Oct. 2010.
- [3] H. Mohimani, M. Babaie-Zadeh, and C. Jutten, "A fast approach for overcomplete sparse decomposition based on smoothed L0 norm," *IEEE Trans. Sign. Process.*, vol. 57, no. 1, pp. 289-301, Oct. 2008.