

# 압축 센싱 기반 FMCW 레이다 검출기

조 옹 호\*, 조 대 영\*, 고 학 림<sup>o</sup>

## Compressed Sensing-Based FMCW Radar Detector

Yong-Ho Cho\*, Dae-Young Cho\*,  
Hak-lim Ko<sup>o</sup>

### 요 약

본 논문은 FMCW 레이다에서 CFAR (Constant False Alarm Rate) 검출과 압축 센싱 (compressed sensing) 기반 검출 방식을 알아보고, 실제 구현한 레이다의 실측 결과를 통해 상기 두 검출기의 표적 검출 성능을 분석한다. 실험 결과 압축 센싱 기반 검출기가 실제 표적만 정확히 검출함을 확인하였다.

**Key Words** : FMCW, compressed sensing, radar

### ABSTRACT

This paper studies target detection algorithms based on CFAR (Constant False Alarm Rate) and compressed sensing for FMCW radar, and analyzes performance of the two detection algorithms through field tests using developed FMCW radar. It is verified from the field tests that the compressed sensing based detector detects true targets accurately.

### I. 서 론

일반적으로 소형 선박에서는 마그네트론에서 발생한 높은 전력의 펄스 신호를 이용하는 탐지 방식을 갖는 레이다를 사용한다. 이러한 레이다는 회전 모터를 이용하여 전방향의 물표를 탐지한다. 하지만 높은 출

력을 발생시키는 마그네트론과 염분 섞인 해풍이나 해수에 의해 마모되는 회전 모터를 주기적으로 교체해야 하는 문제점을 갖는다. 이러한 문제를 해결하기 위해 위상 배열 안테나와 FMCW 신호를 이용한 전자적으로 회전하는 레이다에 대한 연구가 진행되었다<sup>1)</sup>.

FMCW 신호를 사용하는 레이다는 저전력 신호로도 물표 탐지 성능이 우수하기 때문에 선박, 자동차 등 많은 분야에서 널리 사용되고 있다<sup>2)</sup>. 본 논문에서는 FMCW 레이다의 표적 검출시 기존에 널리 사용되는 CFAR (Constant False Alarm Rate) 검출기와 압축 센싱 (compressed sensing) 검출기에 대해 알아보고, 실제 구현한 레이다를 이용한 실측 결과를 통해 상기 두 검출기의 성능을 분석한다.

### II. 시스템 모델

FMCW 레이다에서는 시간에 따라 주파수가 선형으로 변하는 파형을 사용한다. 송출 신호가 표적에 반사되어 수신되었을 경우, 수신 신호의 주파수는 표적까지의 거리에 비례하는 시간만큼 지연된다. 수신기에서는 송수신 신호의 주파수 차이를 분석하여 표적까지의 거리를 추정한다. 이 때 송수신 신호의 주파수 차이를 비트 주파수(beat frequency)라고 한다.

FMCW 레이다의 송신 신호는 다음과 같다.

$$s(t) = \exp\left(j2\pi\left(f_0 t + \frac{1}{2}\alpha t^2\right)\right) \quad (1)$$

여기서  $f_0$ 는 FMCW의 시작 주파수이고,  $\alpha$ 는 FMCW 신호의 대역폭  $B$ 와 펄스 길이  $T$ 의 비와 같다( $\alpha = B/T$ ). 식 (1)을 살펴보면 FMCW 신호의 주파수는 다음과 같이 표현됨을 알 수 있다.

$$f = f_c + \alpha t \quad (2)$$

식 (1)에서 표현한 FMCW 신호는 PLL에서 발생한 고주파 신호를 이용해 X-band로 상향된 후 안테나로 송출된다.

수신기에서는 송출 신호가 여러개의 표적에 반사되

\* 본 연구는 한국해양과학기술진흥원의 국가R&D사업인 “기계적인 회전을 사용하지 않는 중소형 어선용 고정식 레이다 개발”에 의해 수행되었습니다(과제고유번호:1525007076).

• First Author : (ORCID:0000-0002-7550-206X)Hoseo University Oceanic IT Convergence Research Center, yhcho@hoseo.edu, 정희원  
 ◦ Corresponding Author : Hoseo University Department of Information and Telecommunication Eng., hlko@hoseo.edu, 정희원

\* SAN Engineering, cdyzone@sanengr.com, 정희원

논문번호 : KICS2018-04-081, Received April 12, 2018; Revised April 27, 2018; Accepted May 8, 2018

어 서로 다른 크기, 위상, 시간 지연을 거쳐 수신된다. 이 후 수신 신호는 믹서에서 송출 신호와 곱해진 후 저역통과필터를 거쳐 차주파수 신호로 변환된다.  $M$  개의 표적이 있다고 가정할 때, 저역통과필터를 거친 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$r(t) = \sum_{i=0}^{M-1} A_i r_i(t, \tau_i) + n(t) \quad (3)$$

여기서  $A_i$ 와  $\tau_i$ 는 각각 표적  $i$ 에 해당하는 크기 및 위상 성분과 시간 지연을 나타낸다.  $n(t)$ 는 잡음 신호이다.  $r_i(t, \tau_i)$ 는 표적  $i$ 에 해당하는 차주파수 신호로서 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$r_i(t, \tau_i) = \exp\left(j2\pi\left(\alpha\tau_i t + f_o\tau_i - \frac{1}{2}\alpha\tau_i^2\right)\right) \quad (4)$$

식 (4)를 살펴보면  $i$ 번째 표적 신호의 주파수  $f_i$ 는  $\alpha\tau_i$ 와 같음을 알 수 있다. 따라서 표적  $i$ 까지의 거리는 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$R_i = cf_i/2\alpha = cT/2Bf_i \quad (5)$$

### III. 표적 검출

일반적으로 FMCW 레이더에서 표적 검출은 수신 신호(식 (5))를 샘플링한 후, FFT (Fast Fourier Transform)과 CFAR 검출기를 이용해 수행한다. 본 논문에서는 CFAR 검출기 방식 및 압축 센싱 기법을 이용한 표적 검출 방식에 대해 알아본다.

#### 3.1 CFAR 검출기

CFAR 검출기는 우선 샘플링된 수신 신호에 FFT를 취해 수신 신호에서 각 비트 주파수별 성분을 추출한다. 각 비트 주파수별 FFT 출력값을 문턱값과 비교하여, 각 비트 주파수에 해당하는 표적 유무를 검출한다. 이 때 각 비트 주파수에 따라 문턱값이 가변 조정 되도록 함으로써 검출기의 오경보율 (false alarm rate)이 고정된 값을 갖도록 한다.

일반적으로 문턱값은 현재 검사하는 비트 주파수의 주변 비트 주파수에 해당하는 FFT 출력값을 이용해 결정하는데, 결정하는 방식에 따라 크게 CA(cell averaging)-CFAR<sup>[3]</sup> 방식과 OS(order statistic)-CFAR<sup>[4]</sup> 방식이 존재한다.  $N$ -point FFT 출력을

Step 1. set  $\mathbf{r}_0 = \mathbf{y}$ ,  $k = 1$ ,  $\tilde{S} = \emptyset$ ,  
 $M = \text{Number of targets to be detected}$

Step 2. Find  $i_k$  such that,  

$$i_k = \arg \min_{i \in S \setminus \tilde{S}} \|\mathbf{B}^H[i] \mathbf{r}_{k-1}\|_2^2$$

Step 3.  $\tilde{S} \leftarrow \tilde{S} \cup \{L i_k, \dots, (L+1) i_k - 1\}$

Step 4. Find  $\mathbf{x}[i]$  as solution to  

$$\min \left\| \mathbf{r} - \sum_{i \in \tilde{S}} \mathbf{B}[i] \mathbf{x}[i] \right\|_2$$

Step 5.  $\mathbf{r}_k \leftarrow \mathbf{r} - \sum_{i \in \tilde{S}} \mathbf{B}[i] \mathbf{x}[i]$ ,  $k \leftarrow k + 1$

Step 6. if  $k < M$ , goto Step 2

그림 1. Block OMP 알고리즘  
 Fig. 1. Algorithm for block OMP

$Y_k, k = 0, \dots, N-1$ 라 할 때  $i$ 번째 비트 주파수에 대한 CA-CFAR 방식과 OS-CFAR 방식의 문턱값  $\lambda_{CA}$ 와  $\lambda_{OS}$ 은  $i$ 번째 비트 주파수 주위의  $U$ 개의 비트 주파수 성분을 이용해 아래와 같이 주어진다.

$$\lambda_{CA} = \frac{1}{U} \sum_{k=i-U/2, k \neq i}^{k=i+U/2} |Y_k|^2 \quad (6)$$

$$\lambda_{OS} = [ |Y_k|^2, k = i - U/2, \dots, i + U/2, k \neq i ]_\beta$$

여기서  $[a]_\beta$ 는 집합  $a$ 의 원소 중  $\beta$ 번째로 큰 원소를 나타낸다. 마지막으로  $\max(T_{CS}\lambda_{CA}, T_{OS}\lambda_{OS})$ 와  $|Y_i|^2$ 를 비교하여  $i$ 번째 비트 주파수에 해당하는 표적 유무를 결정한다. 이 때  $T_{CS}$ 와  $T_{OS}$ 는 목표로 하는 오경보율에 따른  $\lambda_{CA}$ 와  $\lambda_{OS}$ 의 스케일링 상수이다. CFAR 검출기의 경우 오경보율에 따라 문턱값이 결정되며, 그 결과 탐지되는 물표의 개수가 달라지게 된다. 또한 탐지하고자 하는 물표 및 레이더 운용 환경에 따라 적절한 오경보율이 달라진다. 따라서 CFAR 검출기에서는 상기 사항들을 고려하여 오경보율을 결정해야 한다.

#### 3.2 압축 센싱 기반 검출기

아래와 같은 선형 시스템을 고려하자.

$$\mathbf{y} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (7)$$

식 (7)에서  $\mathbf{A}$ 는  $M \times N$ 행렬일 때, 일반적으로  $M < N$ 일 경우 방정식의 수가 변수의 수보다 적은 underdetermined 시스템이 되고 무수히 많은 해가 존

재한다. 만일 변수를 나타내는 벡터  $\mathbf{x}$ 의 대부분 원소가 0값을 가질 경우, 즉  $K$ 개의 원소만 0이 아닌 값을 갖는  $K$ -sparse이고, 행렬  $\mathbf{A}$ 가 restricted isometry property (RIP)<sup>[5]</sup> 조건을 만족하며,  $M \geq cK \log N / K$ 를 만족하면 압축 센싱 기법을 이용하여 측정 값  $\mathbf{y}$ 로부터 변수  $\mathbf{x}$ 를 정확히 추정할 수 있다.

FMCW 레이더에서 역시 구별 가능한 비트 주파수 중에서 매우 소수의 비트 주파수만 실제 표적들에 해당한다. 즉 총  $N$ 개의 비트 주파수중 표적에 해당하는 비트 주파수의 개수  $M$ 이  $M \ll N$ 을 만족하면 압축 센싱 기법을 이용하여 표적에 해당하는 비트 주파수를 정확히 검출할 수 있다.

식 (3)과 (4)의 샘플링된 신호는 다음과 같다.

$$\mathbf{r} = \mathbf{B}\mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (8)$$

여기서  $\mathbf{B}$ 는  $M \times N$ 행렬로서  $\mathbf{B}$ 의  $(i, j)$  원소는  $[\mathbf{B}]_{i, j} = e^{j2\pi N i j}$ 인 부분 FFT 행렬이고,  $\mathbf{s}$ 는  $i$ 번째 원소가  $[\mathbf{s}]_i = A_i e^{j2\pi(f_o \tau_i - \frac{1}{2} a \tau_i^2)}$ 인 벡터이다. 압축 센싱 관점에서 식 (8)의 해를 얻는 기법에는 Basis Pursuit, Least Absolute Shrinkage and Selection Operator (LASSO), Othogonal Matching Pursuit (OMP) 등 다양한 방식이 존재한다. 일반적으로 레이더에서는 표적의 부피 때문에 표적에 해당하는 비트 주파수가 군집을 이루어 큰 값을 갖는 경우가 많다. 본 논문에서는 수신 신호의 이러한 성질을 이용하기 위해 Block OMP<sup>[5]</sup> 방식을 적용한다. 그림 1에 Block OMP 방식을 나타내었다.

#### IV. 실험 결과

본 논문에서는 실제 제작한 선박용 FMCW 레이더를 이용하여 어섬 비행장과 영흥도에서 물표 탐지 시험을 진행하였다. 어섬 비행장에서는 레이더에서 630m 떨어진 두 개의 물표를 22m거리로 떨어뜨려 놓고 탐지 시험을 진행하였다. 영흥도 실측시 레이더로부터 약 6km 떨어진 5개의 선박에 대해 검출 시험을 진행하였다. CFAR 검출기의  $T_{CS}$ 와  $T_{OS}$ 의 오경보율은 각각  $10^{-4}$ 과  $10^{-3}$ 로 설정하였다.

그림 2와 3에 어섬 비행장과 영흥도에서 CFAR와 압축 센싱 검출기의 표적 검출 결과를 나타낸다. 이때 표적의 크기에 따라 해당 표적을 빨간색, 노란색, 파란색, 하늘색으로 표시하였고, 실제 표적은 노란색 원

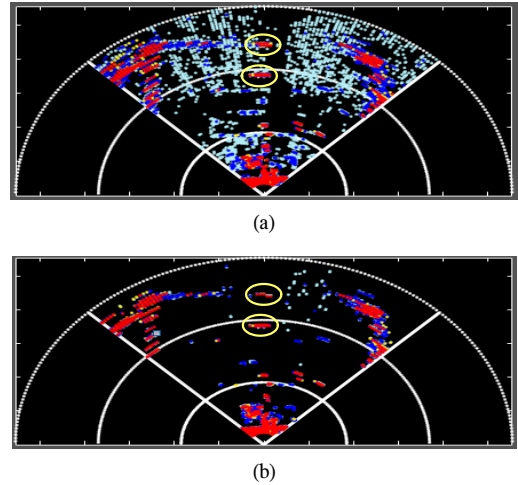


그림 2. 어섬 비행장 시험 결과 (a) CFAR 검출기 (b) 압축 센싱 기반 검출기  
Fig. 2. Result of test at eoseombihaengjang (a) CFAR detector (b) compressed sensing based detector

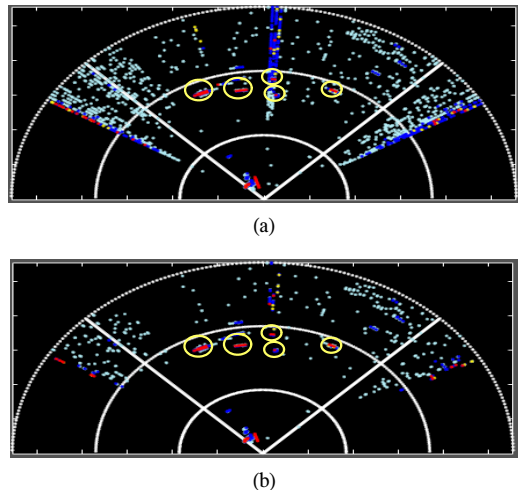


그림 3. 영흥도 시험 결과 (a) CFAR 검출기 (b) 압축센싱 기반 검출기  
Fig. 3. Result of test at Youngheungdo (a) CFAR detector (b) compressed sensing based detector

으로 표시하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 두 검출기 모두 실제 표적을 검출하였다. 하지만 CFAR 검출기는 실제 표적과 함께 여러 물표를 검출하여 영흥도 시험에서의 경우 몇몇 선박의 식별이 어려운 반면, 압축 센싱 기반 검출기는 실제 표적외에 다른 물표를 거의 검출하지 않았다. 따라서 압축 센싱 기반 검출기의 경우 실제 표적만 정확히 검출하는 반면 CFAR 검출기의 경우 오경보율을 조정하거나 추가적인 후처리가 필요함을 알 수 있다.

## References

- [1] D. W. Cho, "The radar development of the low output using the phased array antenna," *JKIICE*, vol. 21, no. 5, pp. 913-920, May 2017.
- [2] D. S. Shin, "Design and implementation of 77GHz FMCW radar signal processing algorithms for automotive environments," *J. KICS*, vol. 43, no. 01, pp. 181-190, Jan. 2018.
- [3] H. M. Finn and R. S. Johnson, "Adaptive detection mode with threshold control as a function of spatially sampled clutter-level estimates," *RCA Rev.*, vol. 29, pp. 414-464, Sept. 1968.
- [4] H. Rohling, "Radar CFAR thresholding in clutter and multiple target situations," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.* AES-19, pp. 608-621, Jul. 1983.
- [5] Y. C. Eldar, P. Kuppinger, and H. Bolcskei, "Compressed sensing of block-sparse signals: Uncertainty relations and efficient recovery," *IEEE Trans. Sig. Proc.*, vol. 58, no. 6, pp. 3042-3054, Jun. 2010.