

## 해상 클러터 환경에서의 표적 거리, 속도 추정 알고리즘

## Algorithm for Estimating the Target Range and Velocity in Sea Clutter

서진배 · 전주환 · 정지현\* · 김진욱\*

Jin-Bae Suh · Joo-Hwan Chun · Ji-Hyun Jung\* · Jin-Uk Kim\*

## 요 약

본 논문에서는 낮은 SCR(Signal to Clutter power Ratio)을 가지는 느리게 움직이는 표적에 대해 해상 클러터의 속도와 상관관계(correlation)의 차이를 이용하여 클러터를 억제하고, 표적의 거리와 속도를 추정하는 방법을 제안한다. 거리-도플러 맵에서 표적이 없는 상황에서 해상 클러터의 시간적 상관관계에 대한 표본 공분산 행렬을 구하고, 이를 고유값 분해(eigen value decomposition: EVD)하여 가장 작은 고유값에 해당하는 고유벡터를 이용하여 클러터를 억제할 수 있다. 또한 펄스축으로 이산 푸리에 변환 행렬(discrete Fourier transform matrix: DFT matrix)을 이용하여 표적과 클러터의 속도를 구할 수 있다. 두 가지 특징을 결합한 알고리즘을 사용하여 추정한 표적의 위치와 속도에 대한 평균 제곱근 오차(root mean square error: RMSE), 표적 탐지 확률을 모의실험을 통해 확인한다. 제안된 알고리즘을 이용하여 표적을 탐지하였을 경우, CA-CFAR 방법을 이용했을 경우보다 훨씬 높은 표적 탐지 확률을 가지는 것을 확인하였다.

## Abstract

In this paper, we propose a method for suppressing sea clutter and estimating the range and velocity of a slow target with a low SCR(Signal to Clutter power Ratio) using the difference in the velocities and correlation characteristics of the target and sea clutter. Sea clutter is suppressed using the eigenvector corresponding to the smallest eigenvalue of a sample covariance matrix for temporal correlation of sea clutter in the absence of a target in the range-Doppler map. In addition, the velocities of the target and clutter are obtained using a DFT matrix as the pulse axis. To verify the performance of the algorithm, we simulate the root mean square error of the range and velocity of the target and obtain the detection probability. It was proven that the detection probability that was obtained using the proposed algorithm was much higher than that obtained using the CA-CFAR method.

Key words: Sea Clutter, EVD(Eigen Value Decomposition), DFT(Discrete Fourier Transform), Detection Probability

## I. 서 론

레이다에서 쏜 신호가 해상에 있는 표적 이외의 다른 물체에 맞고 들어오는 레이다 수신 신호를 해상 클러터

라 한다. SCR(Signal to Clutter power Ratio)이 낮은 환경에서 CA-CFAR 방법을 이용하여 표적을 탐지할 경우<sup>[1]</sup>, 해상 클러터 신호의 크기가 상대적으로 크기 때문에 레이다 수신 신호의 크기만을 이용하여 표적을 탐지하는 것

「본 연구는 한화시스템 산학협동과제로 수행되었음.」

한국과학기술원 전기 및 전자공학부(School of Electronic Engineering, KAIST)

\*한화시스템(Hanwha Systems) PGM Group

· Manuscript received December 18, 2019 ; Revised January 6, 2020 ; Accepted January 16, 2020. (ID No. 20191218-136)

· Corresponding Author: Jinbae Suh (e-mail: sjb6697@gmail.com)

은 어렵다. 또한, 해상 클러스터의 도플러 파워 스펙트럼을 보면, 낮은 도플러 주파수에 대부분의 파워가 존재하기 때문에<sup>[2]</sup>, 속도가 느린 표적은 해상 클러스터와 구분하기가 어렵다.

해상 클러스터 환경에서 표적을 탐지하는 방법은 다기능 레이더를 사용하는 경우 해상 클러스터 모델링과 표적 탐지 방법<sup>[3]</sup>, 공중레이더에서 STAP(Space-Time Adaptive Processing) 방법을 이용하여 낮은 SCR의 느린 표적을 탐지하는 방법<sup>[4]</sup> 등의 연구들이 진행 중이다. 또한 참고문헌 [5]는 표적과 클러스터의 펄스 간 상관관계의 차이를 이용하여 표적 거리를 추정하는 방법을 설명하였다.

해상 클러스터는 파도 높이, 바람 세기 등의 파라미터로 정해지는 평균 파워에 해당하는 텍스처(texture) 성분과 클러스터 패치에 균등하게 존재하는 여러 개의 산란점에 대한 신호인 스펙클(speckle) 성분으로 구성되어 있다. 텍스처 성분은 감마 확률분포를 따르고, 스펙클은 가우시안 분포를 따른다. 두 가지 성분으로 구성된 해상 클러스터의 크기를  $K$  확률분포를 표현할 수 있다. 그리고 해상 클러스터의 도플러 스펙트럼은 가우시안 분포의 형태를 따른다<sup>[2]</sup>. 또한, 텍스처 성분의 시간적 상관관계는 스펙클의 상관관계보다 상대적으로 길다. 그리고 각 거리 bin끼리 스펙클 성분의 공간적 상관관계는 독립적이기 때문에 텍스처 성분의 공간적 상관관계에 의해 클러스터의 공간적 상관관계가 나타난다<sup>[6]</sup>. 이러한 클러스터의 크기, 도플러 스펙트럼 및 상관관계 특징을 이용하여 코히어런트 펄스를 사용하는 펄스 도플러 레이더에서의 클러스터를 SIRV(Spherically Invariant Random Vector)로 모델링할 수 있다<sup>[7]</sup>.

기존 연구<sup>[5]</sup>의 방법은 표적이 있는 거리만 추정하는 알고리즘을 제시하고, 표적의 속도는 추정하지 못하는 단점이 있다. 본 논문에서는 펄스 도플러 레이더를 사용하여 얻은 데이터를 표적과 해상 클러스터의 상관관계, 속도 특징의 차이를 이용하여 낮은 RCS의 느린 표적의 거리와 속도를 추정하는 방법을 제시한다. 정합 필터를 통과한 펄스 축으로의 클러스터에 대한 공분산 행렬을 구한 후, 고유값 분해(eigen value decomposition: EVD)를 하여 구한 고유값을 이용하여 클러스터를 억제할 수 있다. 또한 이산 푸리에 변환 행렬을 통해 클러스터와 표적의 속도 성분의

차이를 알 수 있다. 모의실험을 통해 제안된 알고리즘의 성능을 SCR에 대한 표적의 거리와 속도에 대한 평균 제곱근 오차(root mean square error: RMSE)와 표적 탐지 확률(detection probability)로 알고리즘의 성능을 확인한다.

## II. 해상 클러스터 환경에서의 레이더 신호처리

### 2-1 수신신호 모델

펄스 도플러 레이더의  $m$  번째 펄스에 해당하는 수신 신호는 식 (1)로 표현된다<sup>[5]</sup>.

$$r^m(t) = a_{tgt}^m s(t - \tau_{tgt}^m) \exp(j2\pi f_0(t - \tau_{tgt}^m)) + \sum_{l=1}^L a_{c,l}^m s(t - \tau_{c,l}^m) \exp(j2\pi f_0(t - \tau_{c,l}^m)) + n(t) \quad (1)$$

여기서,  $s(t)$ 는 송신 신호,  $f_0$ 는 중심 주파수,  $n(t)$ 는 잡음이다.  $a_{tgt}^m$ ,  $\tau_{tgt}^m$ 는 표적에 대한 복소 반사계수, 시간 지연을 의미하고,  $a_{c,l}^m$ ,  $\tau_{c,l}^m$ 는  $l$  번째 거리 bin에 해당하는 클러스터의 복소 반사계수, 시간 지연이다. 그리고  $L$ 은 총 거리 bin의 개수이다. 표적은 거리  $R_{tgt}$ 에서 등속도( $v_{tgt}$ )로 움직이고 있다고 가정하고, 표적의 시간 지연은  $\tau_{tgt}^m = \frac{2(R_{tgt} + v_{tgt}t)}{c}$ 이다. 반면에, 클러스터의 산란점은 각 거리 bin의 중앙에 위치하고, 레이더와 클러스터의 평균 상대속도는 0이라고 가정한다. 따라서 클러스터의 시간 지연은  $\tau_{c,l}^m = \frac{2R_{c,l}}{c}$ 이다. 그리고 클러스터가 큰 환경이라고 가정하여 잡음은 무시한다.

클러스터의 반사계수를  $a_c = \sqrt{\rho_c} z_c$ 로 표현가능하다. 여기서  $\rho_c$ 는 감마 분포를 따르는 텍스처,  $z_c = z_{c,l} + jz_{c,q}$ 는 평균이 0이고, 분산이 1인 복소 가우시안 분포를 따르는 스펙클을 의미한다.

$l$  번째 거리 bin에서 펄스 축으로의 클러스터 벡터는

$$\mathbf{a}_{c,l} = \sqrt{\rho_l} \mathbf{z}_{c,l} \quad (2)$$

이다.

여기서,  $\mathbf{a}_{c,l} = [a_{c,l}^1 \ a_{c,l}^2 \ \dots \ a_{c,l}^M]^T$ ,  $\mathbf{z}_{c,l} = [z_{c,l}^1 \ z_{c,l}^2 \ \dots \ z_{c,l}^M]^T$ ,  $M$ 은 펄스 개수,  $\rho_l$ 은 상수이다. 그리고  $[\cdot]^T$ 는 전치이다.

텍스처( $\rho_l$ )는 상대적으로 시간적 상관성이 길기 때문에

짧은 CPI(Coherent Pulse Interval) 동안에는 텍스처는 상수로 표현할 수 있고, 따라서 클러터의 시간적 상관관계는 스펙클( $\mathbf{z}_{c,l}$ )로 표현된다.

$m$  번째 펄스에서 거리 축으로의 클러터 벡터는

$$\mathbf{a}_c^m = \sqrt{\rho_c^m} \mathbf{z}_c^m \quad (3)$$

이다.

여기서,  $\mathbf{a}_c^m = [a_{c,1}^m \ a_{c,2}^m \ \dots \ a_{c,L}^m]^T$ ,  $\rho_c^m = [\rho_{c,1}^m \ \rho_{c,2}^m \ \dots \ \rho_{c,L}^m]^T$ ,  $\mathbf{z}_c^m = [z_{c,1}^m \ z_{c,2}^m \ \dots \ z_{c,L}^m]^T$  이다.

스펙클  $\mathbf{z}_c^m$ 의 공간적 상관관계는 거리 빈에 따라 독립적이기 때문에 클러터의 공간적 상관관계는 텍스처  $\rho_c^m$ 로 표현할 수 있다. 그리고 반사계수의 크기는  $K$  확률분포(식 (4))를 따르고, 클러터의 도플러 스펙트럼은 가우시안 형태(식 (5))를 따른다.

$$f_R(r) = \frac{2b}{\Gamma(a)} \left(\frac{br}{2}\right)^a K_{a-1}(br) u(r) \quad (4)$$

여기서,  $r = |a_{c,l}^m|$ ,  $a$ 는 모양 파라미터,  $b$ 는 크기 파라미터,  $K_N(\cdot)$ 은  $N$ 차 제2종 변형 베셀 함수,  $u(\cdot)$ 은 단위 계단 함수이다.

$$S_c(f) = \frac{P_c}{T_r \sigma_f \sqrt{2\pi}} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{(f-k/T_r)^2}{2\sigma_f^2}\right) \quad (5)$$

여기서,  $\sigma_f^2 = \sigma_\mu^2 + \sigma_s^2 + \sigma_w^2$ 은 클러터의 분산을 의미하고,  $\sigma_\mu^2$ 는 레이더의 움직임에 의한 분산,  $\sigma_s^2$ 는 안테나 스캔 속도에 의한 분산,  $\sigma_w^2$ 은 바람에 의한 분산이다.  $T_r$ 는 펄스 반복 주기를 의미한다.

## 2-2 정합필터

레이더 수신신호에서 표적의 거리를 찾기 위해 정합필터를 수행한다. 우선, 식 (1)의 수신 신호를 샘플링 간격  $t_s$ 로 샘플링한 후 신호 처리한다.

$$r^m[n] = r^m(n \times t_s) \quad (6)$$

정합필터  $\mathbf{h}$ 는 SCR(Signal to Clutter power Ratio)를 최대화하도록 설계한다.

$$\mathbf{h} = R_h^{-1} \mathbf{s}_r^H \quad (7)$$

여기서  $\mathbf{s}_r = [s_N \ s_{N-1} \ \dots \ s_1]^T$ 은 송신 신호를 시간 전한 신호,  $[\cdot]^H$ 는 켈레전치,  $t_p$ 는 펄스너비,  $N = \text{round}\left(\frac{t_p}{t_s}\right)$ 은 펄스 너비의 샘플 개수를 의미한다.  $R_h$ 는 클러터 수신 신호의 공분산 행렬이고, 클러터의 공간적 상관관계를 이용하여  $R_h$ 를 구할 수 있다.

공간적 상관관계는 거리 빈의 신호로 결정된다. 스펙클의 공간적 상관관계는 거리 빈끼리 독립적이기 때문에 서로 다른 거리 빈에 존재하는 스펙클의 상관관계는 0이 된다. 따라서  $p$  번째 거리 빈에 존재하는 클러터와  $q$  번째 거리 빈에 존재하는 클러터의 공분산은 식 (8)이다.

$$E\left[a_{c,p}^m (a_{c,q}^m)^*\right] = E\left[\sqrt{\rho_{c,p}^m} \sqrt{\rho_{c,q}^m} z_{c,p}^m (z_{c,q}^m)^*\right] = \begin{cases} E[\rho] & p = q \\ 0 & p \neq q \end{cases} \quad (8)$$

$m$  번째 펄스의 수신 신호에 대해 그림 1, 식 (8)을 이용하여  $i$  번째 수신 신호 샘플(식 (9))과  $j$  번째 수신 신호 샘플(식 (10))의 공분산(식 (11), 식 (12))을 구해보면,

$$r_i^m = s_N a_{c,i}^m + s_{N-1} a_{c,i+1}^m + \dots + s_1 a_{c,i+N-1}^m \quad (9)$$

$$r_j^m = s_N a_{c,j}^m + s_{N-1} a_{c,j+1}^m + \dots + s_1 a_{c,j+N-1}^m \quad (10)$$

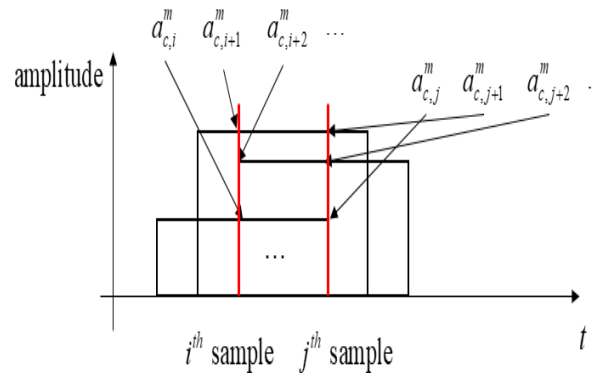


그림 1.  $m$  번째 펄스의 수신 신호에 대한 샘플  
Fig. 1. Samples of received signal for the  $m$  th pulse.

$$\begin{aligned}
E[r_i^m(r_j^m)^*] &= E[r_i^m(r_{i+k}^m)^*] \\
&= E[(s_N a_{c,i}^m + L + s_1 a_{c,i+N-1}^m)(s_N a_{c,i+k}^m + L + s_1 a_{c,i+k+N-1}^m)^*] \\
&= E[(s_{N-k} a_{c,i+k}^m)(s_N a_{c,i}^m)^* + L + (s_1 a_{c,i+N-1}^m)(s_{1+k} a_{c,i+k+N-1}^m)^*] \\
&= s_{N-k} s_N E[a_{c,i+k}^m (a_{c,i}^m)^*] + L + s_1 s_{1+k} E[a_{c,i+N-1}^m (a_{c,i+k+N-1}^m)^*] \\
&= E[\rho](s_{N-k} s_N + L + s_1 s_{1+k}) \quad (11)
\end{aligned}$$

여기서  $i$  번째 수신신호 샘플과  $j$  번째 수신신호 샘플간의 간격을  $k$  로 정의한다. 만약  $i = j$  라면,

$$\begin{aligned}
E[r_i^m(r_i^m)^*] &= E[(s_N a_{c,i}^m + L + s_1 a_{c,i+N-1}^m)(s_N a_{c,i}^m + L + s_1 a_{c,i+N-1}^m)^*] \\
&= E[(s_N a_{c,i}^m)(s_N a_{c,i}^m)^* + L + (s_1 a_{c,i+N-1}^m)(s_1 a_{c,i+N-1}^m)^*] \\
&= s_N s_N E[a_{c,i}^m (a_{c,i}^m)^*] + L + s_1 s_1 E[a_{c,i+N-1}^m (a_{c,i+N-1}^m)^*] \\
&= E[\rho](|s_1|^2 + |s_2|^2 + L + |s_N|^2) \quad (12)
\end{aligned}$$

이다.

### III. 클러터 억제 알고리즘

표적이 없고 해상 클러터만 있는 상황에서 얻은 수신신호를 정합 필터에 통과시킨 결과는  $C_r \in \mathbb{C}^{M \times L}$  이다.

$C_r$  의 펄스 축으로의 클러터 표본 공분산 행렬을 구한다.

$$C = \frac{1}{M} C_r C_r^H \quad (13)$$

식 (14)의 공분산 행렬에 대해 고유값 분해(Eigen Value Decomposition)를 한다.

$$[U, S, U^H] = EVD(C) \quad (14)$$

여기서  $U$ : 고유벡터 행렬,  $S$ : 고유값의 대각행렬이다.

식 (14)에서 구한 고유값 중 가장 작은 고유값에 해당하는 고유벡터를  $\mathbf{u}_s$ 라 한다. 고유벡터  $\mathbf{u}_s$ 와 펄스축으로의 클러터 벡터와 내적하면 거리-도플러 맵에서 클러터를 억제할 수 있다.

또한, 표적은 등속도로 움직이고 있고, 해당 표적이 있는 거리 bin에 대해 펄스 축으로 푸리에 변환을 하면 표적 속도에 해당하는 특정 주파수에서 피크 값을 가진다. 본 논문에서는 표적의 속도를 찾기 위해서 제로 패딩을 이

용하여 세밀한 주파수를 가진 이산 푸리에 변환 행렬( $D$ )을 이용한다.

표적과 클러터의 시간적 상관관계와 속도의 차이를 고려한 제안된 알고리즘을 사용하면, 특정 거리 bin에 표적이 있을 경우, 나머지 거리 bin에 대해서는 식 (14)에서 구한 고유벡터  $\mathbf{u}_s$ 를 내적하여 클러터를 억제시키고, 동시에 해당 거리 bin에서는 이산 푸리에 변환 행렬  $D$ 를 곱하여 표적의 거리와 속도를 동시에 찾을 수 있다.

1.  $l$  번째 거리 bin에 해당하는 클러터는  $\mathbf{r}_l$  이다.  
 $1 \leq l \leq L$

2.  $l$  번째 거리 bin을 제외하고 나머지 거리 bin의 신호에 대해 고유벡터  $\mathbf{u}_s$ 를 내적한다.

$$\mathbf{f}_i = \mathbf{u}_s^H \mathbf{r}_i, \quad 1 \leq i \leq L, \quad i \neq l$$

여기서,  $\mathbf{f} = [f_1 \quad L \quad f_{l-1} \quad f_{l+1} \quad L \quad f_L]^T$  이다.

3.  $l$  번째 거리 bin의 신호에 이산 푸리에 변환 행렬을 곱한다.  $\mathbf{g}_l = D \mathbf{r}_l$ ,  $D$ : 이산 푸리에 변환 행렬

4. 2번 과정에서의  $\mathbf{f}$ 의 크기 중 최대 값( $f_{l,\max}$ )과 3번 과정으로 구한  $\mathbf{g}_l$ 의 크기 최대 값( $g_{l,\max}$ )의 비

$$(p_l = \frac{g_{l,\max}}{f_{l,\max}}) \text{를 구한다.}$$

5.  $p_l$  값이 특정 역치(threshold)를 보다 클 경우에 표적이 있다고 판단한다. 여기서 역치는  $\alpha M \times SCR$ ,  $\alpha$ 는 상수,  $M$ 은 펄스 개수,  $SCR$ 은 평균 SCR이다.

6. 역치보다 큰  $p_l$ ,  $1 \leq l \leq L$ 의 값에서  $f_{l,\max}$ 에 해당하는 인덱스  $l_{\max}$ 는 표적의 위치를 나타내고,  $g_{l,\max}$ 의 크기가 가장 큰 값을 가지는 인덱스  $m_{\max}$ 가 표적 속도이다(그림 2).

### IV. 모의실험

중심 주파수  $f_0=10^9$ [HZ], 대역폭  $BW=2.4 \times 10^6$ [HZ], 펄스 너비  $t_p=5 \times 10^{-6}$ [sec]인 선형 주파수 변형 송신 신호를 사용하였다. 그리고 펄스 반복 주기는  $T_r=40 \times 10^{-6}$ [sec], 샘플링 간격은  $t_s=1.6 \times 10^{-6}$ [sec]이다. 그리고 펄스 너비의 샘플 개수는  $N=30$ , 역치에 사용되는  $\alpha = N \times 0.8$ 를 사용하였다.

클러터는 SIRV로 생성한다<sup>[7]</sup>. 텍스처는 감마 확률분포

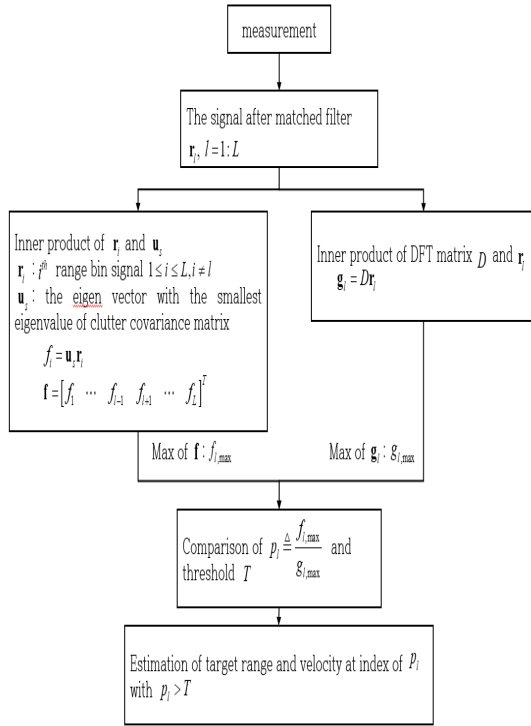


그림 2. 제안된 알고리즘의 흐름도  
Fig. 2. Flow chart of proposed algorithm.

를 따르고, 모양 파라미터  $a=2$ , 크기 파라미터  $b=1$  을 가진다. 스펙클은 가우시안 확률분포를 따른다.

클러터의 공간적 상관관계는 그림 3, 클러터의 시간적 상관관계는 그림 4의 상관관계를 가진다.

표적은 거리  $R_{tgt}=10,000[m]$ , 속도  $v_{tgt}=10[m/s]$  이다. 그리고 표적의 복소 반사계수의 실수, 허수 각각 평균이  $\bar{x}_{tgt}$  이고 공분산이  $\sigma^2 I$  인 가우시안 확률 분포  $N(\bar{x}_{tgt}, \sigma^2 I)$  를 따른다.

$$SCR = \frac{P_s}{P_c} = \frac{P_s}{\left(\frac{2}{b}\right)^2 \frac{\Gamma(a+1)}{\Gamma(a)}} \quad (15)$$

식 (15)는 평균 SCR이고, 여기서  $P_s$  는 표적 신호의 파워,  $P_c$  는 클러터의 파워,  $a$ ,  $b$  는 K 분포에서의 모양 파라미터, 크기 파라미터이다.

$SCR=-3[db]$  일 경우, 정합 필터 결과를 통과한 신호에 대해 클러터를 억제하기 전(그림 5)과 클러터 공분산 행렬에서 가장 작은 고유값에 해당하는 고유 벡터  $\mathbf{u}_s$  를

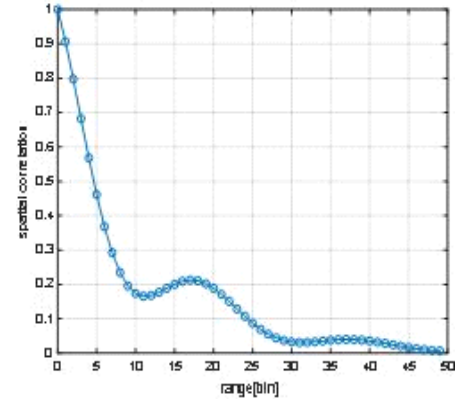


그림 3. 해상 클러터의 공간적 상관관계  
Fig. 3. Spatial correlation of sea clutter.

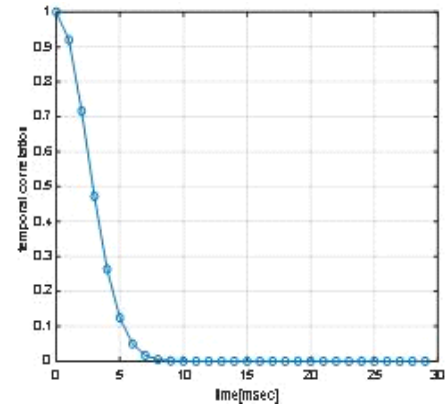


그림 4. 해상 클러터의 시간적 상관관계  
Fig. 4. Temporal correlation of sea clutter.

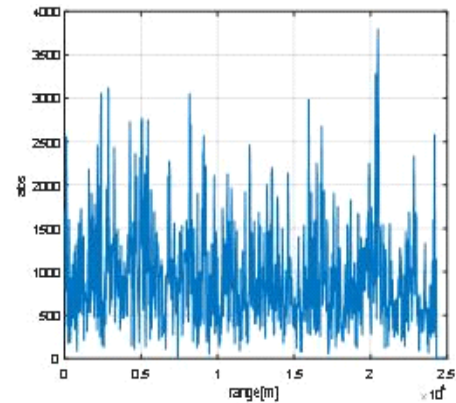


그림 5. 해상 클러터를 억제하기 전 결과  
Fig. 5. The results before suppressing sea clutter.

내적하여 클러스터를 억제한 결과(그림 6)를 표현했다. 고유 벡터  $u_s$  와 내적하면 클러스터 공분산에서의 가장 작은 고유 값에 해당하는 값을 가지게 되기 때문에 클러스터가 억제되어 표적의 위치를 찾을 수 있다.

그림 7은 그림 6에서 가장 큰 크기에 해당하는 거리에서 이산 푸리에 변환 행렬을 수행한 결과이다. 표적의 속도는 등속도로 움직이고 있다고 가정하였기 때문에 이산 푸리에 변환 행렬과 내적하면 표적의 도플러 주파수에 해당하는 값에서 피크 값을 가지게 되고, 이를 이용하여 피크 값에 해당하는 도플러 주파수로 표적의 속도를 추정할 수 있다.

거리-도플러 맵에서 CA-CFAR<sup>[1]</sup> 방법을 사용할 경우, 테스트 셀에 표적을 탐지하기 위해서 8개의 가드 셀, 15개의 주위 셀을 사용하여 알고리즘을 진행하였다. CA-CFAR 방법은 테스트 셀의 주위 셀을 이용하여 역치를 구하고, 테스트 셀의 값이 역치보다 클 경우에 표적이 있다고 판단한다.

그림 8, 그림 9는 CA-CFAR 방법과 제안된 알고리즘을 수행하였을 경우, 표적의 거리와 속도의 평균 제곱근 오차를 나타냈다. 각 그래프에서 빨간색 그래프는 CA-CFAR 방법을 이용하여 표적의 거리, 속도를 추정하였을 경우 평균 제곱근 오차를 나타냈고, 파란색 그래프는 제안된 알고리즘을 사용하여 구한 표적의 거리, 속도를 추정하였을 경우 평균 제곱근 오차를 표현했다. 낮은

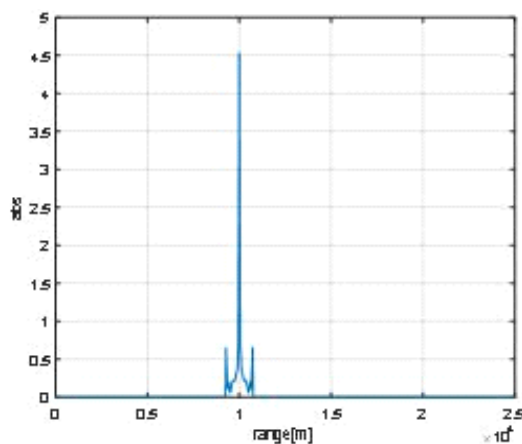


그림 6. 해상 클러스터를 억제한 후의 결과  
Fig. 6. The results after suppressing sea clutter.

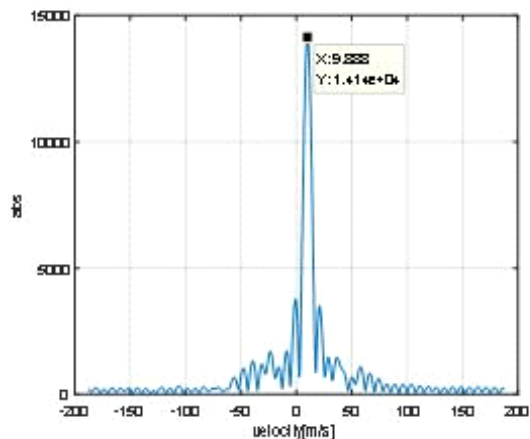


그림 7. 이산 푸리에 변환 행렬을 수행한 결과  
Fig. 7. Result of DFT matrix.

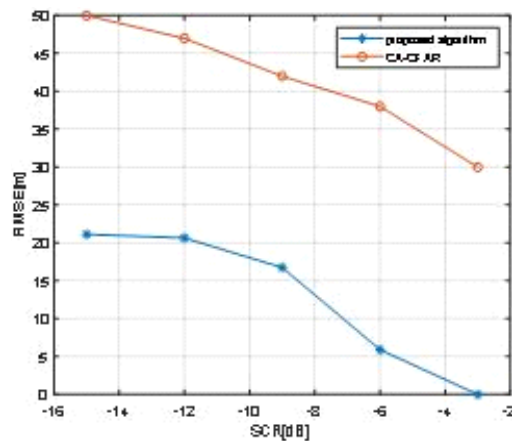


그림 8. 표적 거리의 RMSE  
Fig. 8. RMSE of the target range.

SCR 환경에서 CA-CFAR 방법을 사용하면 거리-도플러 맵에서 해당 셀 주위의 값들이 상대적으로 크기 때문에 표적의 거리, 속도를 추정하는데 많은 오차가 발생하게 된다. 이에 반해 제안된 알고리즘을 사용하면 클러스터를 억제시키고 표적의 정보를 추정하기 때문에 상대적으로 적은 오차가 발생한다. 제안된 알고리즘으로 표적의 거리와 속도를 추정하였을 경우, SCR이  $-15$  dB일 경우 표적의 거리와 속도의 오차가 상대적으로 크지만, SCR이 높아질수록 표적 거리와 속도의 RMSE 값이 줄어드는 것을 확인하였다.

그림 10은 오경보 확률을 0.1일 경우에 Monte Carlo 방

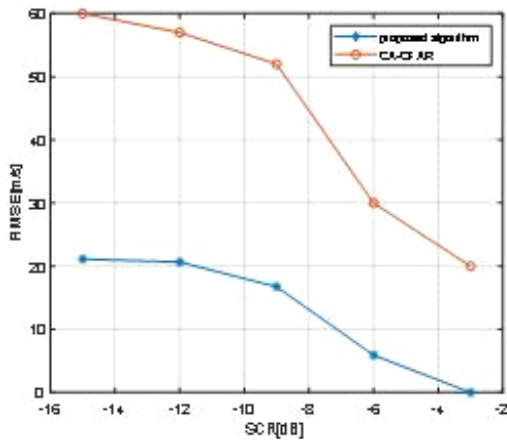


그림 9. 표적 속도에 대한 RMSE  
Fig. 9. RMSE of the target velocity.

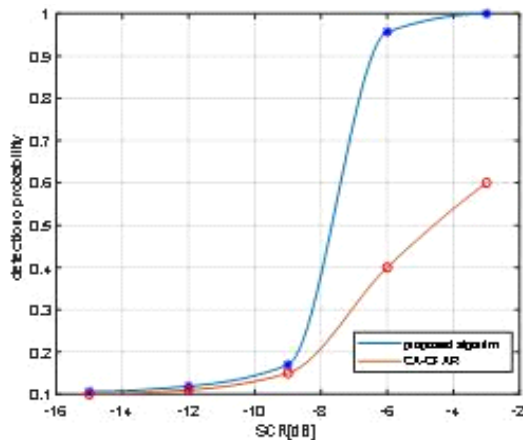


그림 10. SCR에 따른 표적 탐지 확률  
Fig. 10. Detection probability with respect to SCR.

법을 수행하여 얻은 SCR에 따른 탐지 확률을 구하였다. 빨간색 그래프는 기존 CA-CFAR를 사용하였을 경우 탐지 확률, 파란색 그래프는 제안된 알고리즘을 사용하였을 경우 탐지 확률이다. 낮은 SCR에서는 CA-CFAR 방법을 이용하면 주위 셀 값으로 구한 역치가 높기 때문에 표적 탐지 확률이 낮다. 하지만 제안된 알고리즘으로 구한 탐지 확률은 CA-CFAR를 이용하여 구한 탐지 확률보다 훨씬 높은 탐지 확률을 가지는 것을 확인할 수 있다.

## V. 결 론

해상 클러터와 표적의 상관관계, 속도의 차이를 이용

하여 바다 위에 있는 표적 탐지 및 거리, 속도를 추정할 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘을 수행한 결과, 기존 CA-CFAR로 표적을 탐지할 경우보다 월등히 높은 탐지 확률을 가지는 것을 확인하였다.

## References

- [1] S. Watts, "The performance of cell-averaging CFAR systems in sea clutter," in *Record of the IEEE 2000 International Radar Conference*, Alexandria, VA, 2000, pp. 398-403.
- [2] K. D. Ward, S. Watts, and R. J. Tough, *Sea Clutter: Scattering, the K Distribution and Radar Performance*, London, Institution of Engineering and Technology(IET), vol. 20, 2006.
- [3] M. J. Lee, J. E. Kim, S. M. Lee, H. M. Jeon, W. Y. Yang, and K. T. Kim, "Detection of low-RCS targets in sea-clutter using multi-function radar," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 30, no. 6, pp. 507-517, 2019.
- [4] V. Gracheva, J. Ender, "Multichannel analysis and suppression of sea clutter for airborne microwave radar systems," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 54, no. 4, pp. 2385-2399, Apr. 2016.
- [5] S. P. Sira, D. Cochran, A. Papandreou-Suppappola, D. Morrell, W. Moran, and S. Howard, et al., "A subspace-based approach to sea clutter suppression for improved target detection," in *2006 Fortieth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, Pacific Grove, CA, 2006, pp. 752-756.
- [6] Y. Dong, L. Rosenberg, and G. V. Weinberg, "Generating correlated gamma sequences for sea-clutter simulation," in *2013 International Conference on Radar*, Adelaide, SA, 2013, pp. 548-553.
- [7] M. Rangaswamy, D. D. Weiner, and A. Ozturk, "Non-Gaussian random vector identification using spherically invariant random processes," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 29, no. 1, pp. 111-124, Jan. 1993.



서 진 배 [한국과학기술원/석박사통합과정]

<https://orcid.org/0000-0003-3612-4382>



2015년 2월: 성균관대학교 전자전기공학부 (공학사)  
2015년 3월~현재: 한국과학기술원 전기 및 전자공학부 석박사통합과정  
[주 관심분야] 레이더 신호처리

정 지 현 [한화시스템/전문연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-7410-6033>



2004년 2월: 단국대학교 전자공학과 (공학사)  
2006년 2월: 고려대학교 전파공학과 (공학석사)  
2011년 2월: 고려대학교 전파공학과 (공학박사)  
2016년 3월~현재: 한화시스템 레이더·

PGM 연구소 전문연구원  
[주 관심분야] 레이더 시스템 설계, 레이더 신호처리

전 주 환 [한국과학기술원/교수]

<https://orcid.org/0000-0001-7326-9252>



1980년: 서강대학교 전자공학과 (공학사)  
1984년: 미국 Cornell University 전자공학과 (공학석사)  
1989년: 미국 Stanford University 전자공학과 (공학박사)  
2007년~현재: 한국과학기술원 전기 및 전자공학부 교수  
[주 관심분야] 레이더

김 진 옥 [한화시스템/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-7162-0974>



2012년 2월: 충남대학교 메카트로닉스공학과 (공학사)  
2014년 7월: 충남대학교 기계설계메카트로닉스공학과 (공학석사)  
2017년 5월~현재: 한화시스템 레이더·PGM 연구소 전문연구원  
[주 관심분야] 레이더 시스템 설계, 레이더 신호처리