

클러터 환경을 고려한 효과적 소형 무인기 탐지에 관한 연구

Efficient Detection of Small Unmanned Aerial Vehicles in Cluttered Environment

최재호 · 강기봉 · 선선구* · 이정수* · 조병래* · 김경태

Jae-Ho Choi · Ki-Bong Kang · Sun-Gu Sun* · Jung-Soo Lee* · Byung-Lae Cho* · Kyung-Tae Kim

요 약

본 논문에서는 실제 환경을 고려하여 비행 중인 소형 무인기를 탐지할 수 있는 기법을 제안한다. 소형 무인기는 일반적으로 시가지 혹은 산악 지형 내에서 저고도 비행을 수행하므로 클러터(clutter)에 의해 자주 가려지게 된다. 따라서 우수한 탐지 성능 획득을 위해서는 잡음뿐만 아니라, 클러터를 고려한 탐지가 필수적이며, 각각의 클러터 제거 기법에 따른 성능 분석이 요구된다. 제안된 탐지 과정은 클러터 제거 기법 및 펄스 합성 기법을 통해 클러터 및 잡음을 억제한 후, CFAR 검출기를 통해 소형 무인기 탐지를 수행한다. 이때, 3가지 클러터 제거 기법을 적용한 후, 각 기법에 따른 소형 무인기 탐지 성능을 분석한다. 실제 야외 환경에서의 실험을 통한 측정 데이터(data)를 토대로 소형 무인기 탐지에 적합한 클러터 제거 기법을 도출할 수 있었다.

Abstract

In this paper, we propose a method to detect small unmanned aerial vehicles(UAVs) flying in a real-world environment. Small UAV signals are frequently obscured by clutter signals because UAVs usually fly at low altitudes over urban or mountainous terrain. Therefore, to obtain a desirable detection performance, clutter signals must be considered in addition to noise, and thus, a performance analysis of each clutter removal technique is required. The proposed detection process uses clutter removal and pulse integration methods to suppress clutter and noise signals, and then detects small UAVs by utilizing a constant false alarm rate detector. After applying three clutter removal techniques, we analyzed the performance of each technique in detecting small UAVs. Based on experimental data acquired in a real-world outdoor environment, we found it was possible to derive a clutter removal method suitable for the detection of small UAVs.

Key words: Radar Signal Processing, Target Detection, Constant False Alarm Rate(CFAR), Micro-Doppler

I. 서 론

위협 표적의 존재 유·무 및 위치 정보를 사전에 파악하는 것은 국가 방호 체계의 핵심 요소 중 하나이다. 레이

다(radar)는 주야에 상관없이 운용이 가능하며, 악천후 조건에서도 목표물에 대한 탐지 및 추적이 가능하고, 먼 거리에 위치한 표적의 정보를 획득할 수 있는 장점을 가지고 있으므로 표적 탐지에 적합한 센서(sensor)라 할 수 있

「본 연구는 국방과학연구소가 지원하는 위협표적 모델링 및 특성분석 사업의 일환으로 수행되었습니다.」

포항공과대학교 전자전기공학부(Department of Electrical and Electronic Engineering, Pohang University of Science and Technology)

*국방과학연구소(Agency of Defence Development)

· Manuscript received February 8, 2019 ; Revised March 19, 2019 ; Accepted May 14, 2019. (ID No. 20190208-015)

· Corresponding Author: Kyung-Tae Kim (e-mail: kkt@postech.ac.kr)

다. 따라서 레이더를 이용한 표적 탐지 기법에 대한 다양한 연구가 국내·외로 활발히 수행되고 있다^{[1]~[3]}.

대표적인 레이더 탐지 기법으로는 일정 오경보율(constant false alarm rate: CFAR) 검출기 기반의 기법들이 존재한다^{[4],[5]}. CFAR 기법은 표적의 레이더 반사 면적(radar cross section: RCS)이 상대적으로 큰 점을 이용하여 탐지를 수행한다. 즉, 잡음(noise) 환경에서 적응적 임계값(adaptive threshold)을 형성하고, 임계값을 넘는 신호를 표적으로 간주한다.

최근 고정익기, 드론(drone) 등 소형 무인기의 관심이 대두되면서, 다양한 분야에서 그 사용이 급증하고 있다. 특히, 군사적 분야에서 소형 무인기가 활용될 경우 높은 위협성을 보유하게 되므로, 사전 탐지가 필수적이다. 그러나 소형 무인기는 시가지 혹은 산악 환경 내에서 사용되며, 일반적으로 저고도에서 비행하므로 클러터의 영향력이 커지게 된다. 결과적으로, 잡음 환경만을 고려한 레이더 탐지 기법만으로는 소형 무인기에 대하여 우수한 탐지 성능을 유지할 수 없다.

따라서 실제 환경 내 비행 중인 소형 무인기의 효과적 탐지를 위해서는 클러터의 억제 과정이 필수적이다. 클러터의 경우, 표적과 달리 시간에 따른 움직임이 존재하지 않으므로 해당 특성을 이용하여 클러터 제거를 수행할 수 있다. 이때, 대표적인 클러터 제거 기법으로는 특이 값 분해(singular value decomposition: SVD), 이동 평균 필터(running average filter), 평균 벡터(mean vector) 차분 등을 이용한 기법들이 존재한다^{[6],[7]}.

공중 표적에 대한 기존의 레이더 탐지 기법^{[2]~[5]}은 클러터 제거를 고려하지 않은 채 CFAR 알고리즘을 이용하여 표적 탐지를 수행하였다. 고고도 비행하는 공중 표적의 경우 클러터를 고려할 필요가 없을 뿐만 아니라, 클러터 제거 기법을 수행할 경우 표적 신호가 함께 제거될 우려가 존재하기 때문이다. 이에 본 논문에서는 CFAR 기반의 표적 탐지 과정 이전에 클러터 제거 알고리즘을 추가함으로써 실제 환경에서 소형 무인기의 탐지 성능을 향상할 수 있는 방안을 제시한다. 먼저, 소형 무인기의 신호 분석을 통해, 클러터 제거 과정에서 소형 무인기 신호는 제거되지 않음을 수학적으로 검증한다. 다음으로, 실제 환경 내 측정된 소형 무인기 신호를 통해, 클러터 제거 기

법이 탐지 성능을 개선할 수 있음을 보인다. 마지막으로, 각 클러터 제거 알고리즘 별 탐지 성능을 분석함으로써 실제 상황에서 소형 무인기 탐지에 적합한 최적의 클러터 제거 기법을 도출한다.

II. 소형 무인기 신호 모델

본 절에서는 소형 무인기에 대한 레이더 수신 신호의 수학적 모델링(modeling)에 관해 기술하며, 그림 1은 실제 환경에서 점 산란원(point scatterer)의 기하구조 모델을 도시한다. 상기 기하구조 내 소형 무인기 신호로부터, 거리 압축(range compression)을 수행 후, 특정 시간 t 에서의 τ 번째 레이더 수신 펄스 $r(t, \tau)$ 는 다음과 같이 정의된다^[8].

$$r(t, \tau) = \sum_{p=1}^P A_p \text{sinc} \left\{ BW \left(t - \frac{2R_T(\tau)}{c} \right) \right\} \exp \left\{ -j \frac{4\pi f_c}{c} R_T(\tau) \right\} + \sum_{l=1}^L \sum_{b=1}^B B_{l,b} \text{sinc} \left\{ BW \left(t - \frac{2R_{l,b}(\tau)}{c} \right) \right\} \exp \left\{ -j \frac{4\pi f_c}{c} R_{l,b}(\tau) \right\}, \quad (1)$$

여기서 P, L, B 은 각각 소형 무인기 강체(rigid body)의 산란원 개수, 로터(rotor)의 개수, 단일 로터 내 날개의 개수이다. A_p 는 RCS에 의해 결정되는 산란원의 반사 계수, BW 는 레이더의 주파수 대역폭, f_c 는 중심 주파수, c 는

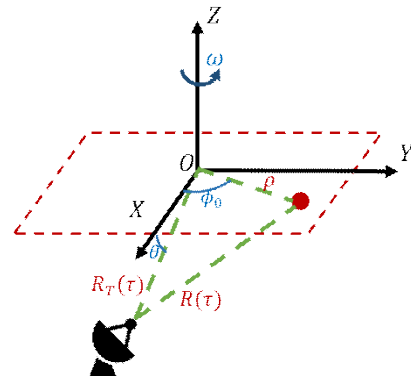


그림 1. 실제 환경에서의 단일 점 산란원 기하구조
Fig. 1. Geometry for a single point scatterer in real environment.

빛의 속도이다. $B_{l,b}$ 및 $R_{l,b}(\tau)$ 는 각각 l 번째 로터, b 번째 날개에 대한 반사 계수 및 거리 정보를 나타낸다. 이때 소형 무인기의 각 날개를 단일 점 산란원으로 가정 시, 레이더와 산란원 사이의 거리는 다음과 같다.

$$R_{l,b}(\tau) = R_T(\tau) + R_{M_{l,b}}(\tau), \quad (2)$$

상기 식에서 $R_T(\tau)$ 는 병진 운동(translational motion)에 의한 거리 정보, $R_{M_{l,b}}(\tau)$ 는 미세 운동(micro motion)에 의한 거리 정보로서 다음과 같이 정의된다.

$$R_T(\tau) = R_0 + v\tau + \frac{1}{2}a\tau^2, \quad (3)$$

$$R_{M_{l,b}}(\tau) = r_{l,b}\cos(\theta)\cos(\omega\tau + \phi_{0_{l,b}}), \quad (4)$$

여기서 R_0 은 레이더로부터 원점 O 사이의 초기 거리, v 는 레이더 가시선(radar line of sight: RLOS) 방향으로의 속도, a 는 같은 방향으로의 가속도 값이다. $r_{l,b}$ 는 원점 O 로부터 각 산란원까지의 거리, θ 는 회전 평면 XY 와 RLOS 사이의 각도, ω 는 날개의 각속도, $\phi_{0_{l,b}}$ 는 XY 평면 상에서 각 산란원의 초기 위상값이다.

소형 무인기는 일반적으로 이동 비행 혹은 정지 비행(hovering) 운동을 수행한다. 소형 무인기가 이동 비행을 수행할 경우, 병진 운동 및 미세 운동에 의해 시간에 따라 변화하는 신호를 수신하게 된다. 반면, 소형 무인기가 정지 비행을 수행할 경우, 식 (3)의 $R_T(\tau)$ 는 R_0 가 되고, 결과적으로 식 (1)의 레이더 수신 신호는 미세 운동에 의존적인 함수가 된다.

III. 클러스터 제거

실제 환경에서 레이더 수신 신호는 크게 표적(target), 클러스터, 잡음(noise)으로 이루어진다(그림 2). 이때, 클러스터란 건물, 숲 등 표적을 제외한 원치 않는 물체로부터 반사된 신호로서 표적과 달리 시간에 따른 움직임이 느린 특징을 갖고 있다. 이러한 특성을 이용하여 시간에 따른 변화가 작은 신호를 제거함으로써 클러스터를 억제할 수 있다. 이때 소형 무인기는 이동 비행 및 정지 비행 모든 경우에 시간에 따른 변화가 존재하므로, 클러스터 제거 기법을 적용하여도 소형 무인기의 신호는 제거되지 않는다.

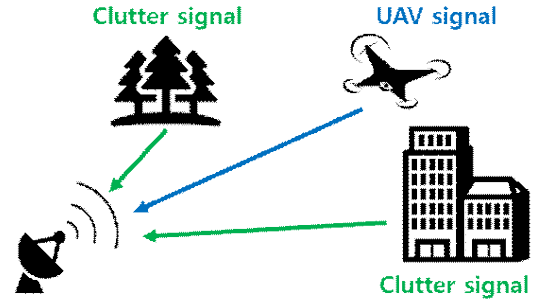


그림 2. 실제 환경에서의 레이더 수신 신호
Fig. 2. Received signals of a radar in real environment.

따라서, 소형 무인기 표적 탐지 과정 이전에 클러스터 제거 알고리즘을 추가함으로써 클러스터에 의한 오경보(false alarm)를 억제할 수 있게 된다.

본 절에서는 SVD 기반, 이동 평균 필터 기반, 평균 벡터 차분 기반의 클러스터 제거 알고리즘을 서술한다. 다음으로, 각각의 기법을 통하여 실제 환경 내 소형 무인기 수신 신호로부터 클러스터를 억제 후, 각 결과에 대한 비교 및 분석을 수행한다.

3-1 특이 값 분해

고정 클러스터는 레이더 수신 신호에서 대부분의 비중을 차지하고 있다. SVD는 데이터 행렬을 특이 값에 따라 재구성할 수 있는 기법으로서, 큰 특이 값에 해당하는 행렬을 클러스터로 가정 후, 이를 제거함으로써 클러스터 제거를 수행한다⁷⁾.

식 (1)에서 레이더 수신 신호는 t 와 τ 에 대한 이차원 행렬의 형태로 표현할 수 있고, SVD를 적용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$r = \mathbf{U}\mathbf{S}\mathbf{V}^T, \\ = \sigma_1\mathbf{u}_1\mathbf{v}_1^T + \sigma_2\mathbf{u}_2\mathbf{v}_2^T + \dots + \sigma_g\mathbf{u}_g\mathbf{v}_g^T, \quad (5)$$

여기서 $\sigma_1 \gg \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_g > 0$ 이며, \mathbf{u}_i 는 \mathbf{U} 의 i 번째 열 벡터(column vector), \mathbf{v}_i^T 는 \mathbf{V} 의 i 번째 행 벡터(row vector)를 의미한다. 식 (5)로부터 클러스터에 해당하는 큰 특이 값 성분 및 잡음에 해당하는 작은 특이 값 성분을 제외하고 신호 행렬을 재구성함으로써 다음과 같이 표적 신호 y 를 획득할 수 있다.

$$y = \sigma_2 \mathbf{u}_2 \mathbf{v}_2^T + \sigma_3 \mathbf{u}_3 \mathbf{v}_3^T + \dots + \sigma_s \mathbf{u}_s \mathbf{v}_s^T, \quad (6)$$

이때, $\sigma_2, \dots, \sigma_s \gg \sigma_{s+1}, \dots, \sigma_g$ 를 만족하며, σ_1 은 클러터 성분에 해당하는 특이 값, $\sigma_{s+1}, \dots, \sigma_g$ 는 잡음 성분에 해당하는 특이 값을 의미한다.

3-2 이동 평균 필터링

클러터는 움직이는 표적에 비해 시간에 따른 변화가 미미한 특징을 가진다. 이동 평균 필터링 기법은 이러한 특성을 이용하여 시간에 따른 분산(variance) 값이 작은 클러터를 억제하는 방법으로 다음과 같이 정의된다^[8].

$$\begin{aligned} c(t, \tau) &= \alpha c(t, \tau - 1) + (1 - \alpha)r(t, \tau), \\ y(t, \tau) &= r(t, \tau) - c(t, \tau). \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 $c(t, \tau)$ 는 τ 번째 펄스에 대한 클러터로서 이전 펄스의 클러터와 현재 수신 신호 펄스를 사용하여 계산된다. α 는 가중 인자로서 시간 당 변화가 작은 신호를 어느 정도 만큼 클러터로 간주할지의 비율을 결정한다.

3-3 평균 벡터 차분

평균 벡터 차분 기법은 이동 평균 기법과 마찬가지로 시간에 따른 변화가 작은 클러터를 평균을 통해 계산한다. 획득한 신호 펄스를 전부 사용하여 한번에 평균을 계산하는 점이 이동 평균 필터링과의 차이점이며, 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} c(t) &= \frac{1}{W} \sum_{i=0}^{W-1} r(t, \tau + i), \\ y(t, \tau) &= r(t, \tau) - c(t) \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 W 는 획득한 펄스 개수를 의미한다.

IV. OS-CFAR 탐지기

CFAR 알고리즘은 잡음 환경 내 존재하는 표적 신호로부터 일정한 오경보율을 유지하도록 적응적 임계값을 형성함으로써 탐지를 수행하는 알고리즘으로, 임계값 형성 방법에 따라 CA(Cell Averaging)-CFAR, OS(Ordered Statistics)-CFAR 등 다양한 기법이 존재한다^[9]. 이 중, OS-CFAR 알고리즘은 비균일한 특성의 잡음 환경 내에서도 우수한 성

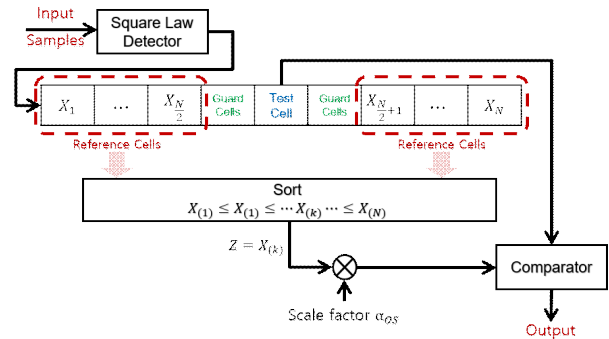


그림 3. OS-CFAR 알고리즘의 수행 절차
Fig. 3. Procedure of OS-CFAR algorithm.

능을 보이는 특징을 가지며, 그림 3은 OS-CFAR 알고리즘의 상세한 수행 절차를 나타낸다.

알고리즘의 입력 벡터는 테스트 셀(test cell), 참조 셀(reference cell), 가드 셀(guard cell)로 나뉜다. 이때, 테스트 셀은 소형 무인기 표적의 존재 유·무를 판단하고자 하는 셀이며, 참조 셀은 잡음 환경의 분석을 위해 사용하는 셀, 가드 셀은 테스트 셀로부터 누설되는 정보를 차단하기 위해 사용하는 셀이다. 결과적으로 OS-CFAR 알고리즘을 통해, 각 테스트 셀에서의 표적의 존재 유·무를 판단할 수 있게 된다.

OS-CFAR 알고리즘의 처리 순서는 다음과 같다. 먼저, 각 테스트 셀로부터 참조 셀 데이터 $\{X_1, X_2, \dots, X_N\}$ 을 오름차순으로 정렬한다. 새롭게 정렬된 데이터 $\{X_{(1)}, X_{(2)}, \dots, X_{(N)}\}$ 의 k 번째 값 $X_{(k)}$ 을 간섭(interference) 신호의 대푯값으로 이용함으로써 다음과 같이 임계값을 계산할 수 있다.

$$\hat{T} = \alpha_{OS} X_{(k)}, \quad (9)$$

여기서 \hat{T} 는 OS-CFAR 알고리즘을 통해 추정된 임계값, α_{OS} 는 가중치 인자를 의미한다. 이때 α_{OS} 는 사전에 설정한 오경보율에 의해 결정되며, 다음과 같이 수신된 잡음이 복소 가우시안 분포(Gaussian distribution) 및 사승 법칙을 따르는 확률밀도함수로 표현된다고 가정함으로써 계산할 수 있다.

$$p_{X_i}(X_i) = \frac{1}{\beta^2} e^{-X_i/\beta^2}, \quad (10)$$

여기서 X_i 는 참조 값, β^2 는 잡음의 총 전력을 의미한다. 이때 X_i 를 $y_i = X_i/\beta^2$ 으로 정규화 할 시, 오경보율 및 평균 오경보율을 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{FA}(T) = \int_T^{+\infty} e^{-y} dy = e^{-T}, \quad (11)$$

$$\overline{P_{FA}} = \int_0^{+\infty} P_{FA}(T)p_T(T)dT, \quad (12)$$

여기서 $p_T(T)$ 는 임계값의 확률밀도함수를 의미한다. 또한, 식 (9)의 추정된 임계값을 이용하여 확률밀도함수 $p_{\hat{T}}(\hat{T})$ 를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$p_{\hat{T}}(\hat{T}) = \frac{k}{\alpha_{OS}} \binom{N}{k} [e^{-\hat{T}/\alpha_{OS}}]^{N-k+1} \times [1 - e^{-\hat{T}/\alpha_{OS}}]^{k-1}, \quad (13)$$

최종적으로, 식 (11) 및 식 (13)을 식 (12)에 대입하여 다음의 수식을 얻을 수 있다.

$$\overline{P_{FA}} = k \binom{N}{k} \frac{\Gamma(\alpha_{OS} + N - k + 1)\Gamma(k)}{\Gamma(\alpha_{OS} + N + 1)}, \quad (14)$$

여기서 $\Gamma()$ 는 감마 함수를 의미한다. 식 (14)를 이용함으로써 사전 설정된 오경보율에 따라 α_{OS} 를 획득할 수 있다.

V. 소형 무인기 탐지 기법

본 절은 실제 환경 내 소형 무인기 표적에 대하여 효과적으로 탐지를 수행할 수 있는 기법을 제안한다. 그림 4는 제안된 소형 무인기 탐지 알고리즘의 순서도를 도시한다. 먼저 레이더로부터 표적 및 주변 환경에 대한 수신 신호를 획득 후, 펄스 압축 기법^[10]을 통해 1차원 고해상도 거리측면도(high resolution range profile: HRRP)를 형성한다. 이때, 해당 과정에서 형성된 HRRP 데이터는 표적 신호뿐만 아니라, 잡음 및 클러터 또한 존재하므로 이를 억제하기 위한 처리 과정이 필요하다.

제안된 알고리즘은 획득한 HRRP 정보로부터 클러터 제거 기법을 이용하여 클러터를 억제한다. 소형 무인기 고정지 비행을 수행할 경우, 클러터 제거 과정에서 소형 무인기의 병진 운동 성분이 함께 억제되므로 신호 대 잡음

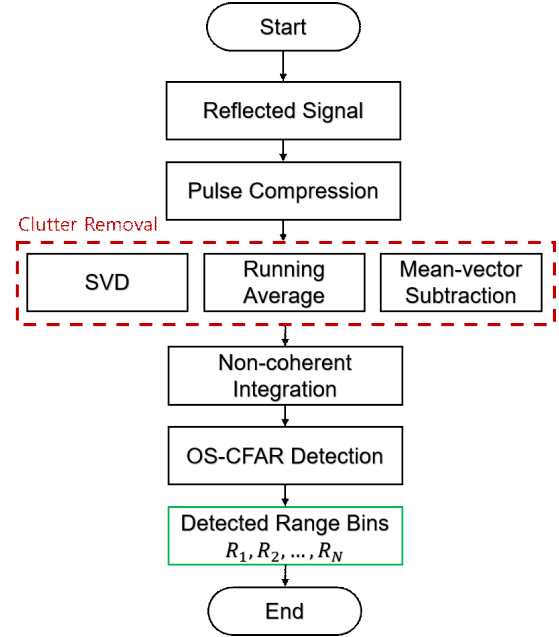


그림 4. 소형 무인기 탐지 기법
Fig. 4. Detection method for small UAV..

비(signal to noise ratio: SNR)가 감소하게 된다. 따라서 이를 보상하고, SNR을 더욱 향상시키기 위해 비동기 합성(non-coherent integration)을 적용함으로써 탐지 성능을 향상시킨다^[10].

클러터 제거 기법을 수행할 경우, 위상 신호가 변화되므로 제안된 탐지 알고리즘은 비동기 합성 기법을 사용하여 펄스 합성을 수행한다. 최종적으로, 상기 과정을 통해 얻어진 펄스 벡터에 IV절의 OS-CFAR 탐지기를 적용함으로써 소형 무인기 탐지를 수행한다.

VI. 실측 데이터를 이용한 탐지 성능 분석

본 절은 소형 무인기 탐지 알고리즘의 성능 검증을 위하여, 실제 환경 내에서 측정된 드론 신호에 대한 탐지를 수행하고, 이에 대한 결과를 분석한다. 반사 신호 획득을 위하여 X-밴드 레이더 시스템(그림 5)을 구축하였다. 시스템은 송·수신 혼 안테나, RF 박스, IF 박스, 신호 발생기, 아날로그-디지털 변환기, 컴퓨터로 이루어져 있으며, 자세한 시스템의 구성도 및 운영방법은 참고문헌 [11]에 직관적으로 명시되어 있다. 레이더의 상세 사양은 표 1에

정



그림 5. 레이더 시스템 및 드론
Fig. 5. The radar system and drone.

표 1. 레이더 시스템 사양
Table 1. The specification of the radar system.

Carrier frequency	9.85 GHz
Frequency bandwidth	30 MHz
PRF	20 kHz
Sampling frequency	65 MHz
Measured time	0.05 s
Antenna beam width	20°
Antenna gain	20 dB

정리되어 있다.

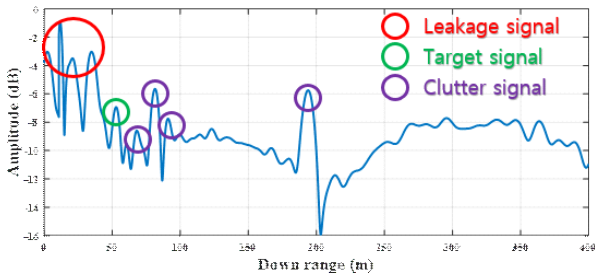
구축된 레이더는 칩(chirp) 펄스 신호를 송신 후, 표적 및 클러터로 구성된 주변 환경으로부터 반사 신호를 수신한다. 안테나를 통해 수신된 반사 신호는 RF 박스 및 IF 박스를 거쳐 샘플링(sampling)된 신호의 형태로 저장되게 된다. 저장된 소형 무인기 수신 데이터를 이용하여 각각의 클러터 제거 기법에 따라 클러터를 억제 후, 탐지 알고리즘을 적용함으로써 클러터 제거 기법별 탐지 성능을 분석할 수 있다.

실험은 일반적인 실외 환경에서 수행하였다. 소형 무인기로는 DJI(社)의 PHANTOM 4 드론 모델을 사용하였으며, 레이더로부터 거리가 점점 멀어지며 비행하고 있는 소형 무인기의 반사 신호를 0.05초 동안 획득하였다. 레이더의 펄스 반복 주파수(Pulse Repetition Frequency: PRF)

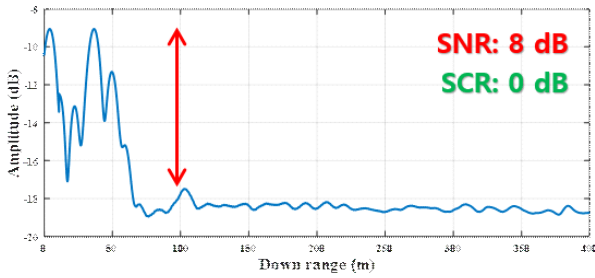
는 20 kHz이므로 0.05초 동안 1,000개의 펄스 신호를 획득할 수 있다. 이때 실험 환경 내에는 나무, 가로등 등 클러터가 존재하므로, 레이더 반사 신호는 소형 무인기 신호뿐만 아니라, 클러터 또한 함께 수신되게 된다. 수신 신호로부터 펄스 압축을 수행하여 HRRP를 형성 후, 각각의 클러터 제거 기법을 적용한 결과는 그림 6과 같다.

그림 6(a)는 레이더 LoS 방향 50 m 부근에서 비행하고 있는 소형 무인기에 대한 반사 신호를 나타낸다. 반사 신호는 누설 신호, 클러터, 잡음, 표적 신호로 이루어져 있다. 누설 신호의 경우, 안테나 송신단으로부터의 신호가 직접 수신되어 발생하므로 30 m 거리 내에 발생된다. 또한 표적 신호의 경우, GPS 정보를 이용하여 사전에 레이더로부터 표적까지의 거리를 파악해둠으로써 해당 거리의 신호 피크를 표적 신호라 판단 가능하다. 이 때, 표적 신호가 누설 신호 및 클러터로 인해 가려져 있음을 확인할 수 있다. 따라서 평균 벡터 차분, SVD, 이동 평균 필터 3가지의 클러터 제거 기법을 사용하여 총 3가지 경우의 클러터 제거 기법에 대한 성능 분석을 수행하였다.

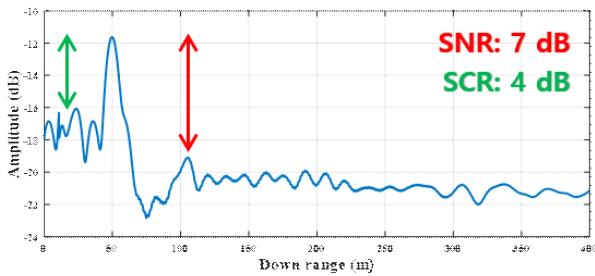
각 클러터 제거 기법 수행 과정에서는 탐지에 최적화 되도록 변수 미세 조정(fine tuning)을 수행하였다^{[6],[12]}. 결과적으로 SVD 수행 과정에서 $s=12$, 이동 평균 필터링 과정에서 $\alpha=0.8$ 의 값을 채택하였다. 결과를 보면, 원 신호에서는 드러나지 않는 표적 신호가 클러터 제거 이후 나타남을 확인할 수 있다. 평균 벡터 차분 및 SVD 기법은 표적 신호의 SNR이 각각 약 8 dB, 7 dB로 이동 평균 필터 기법의 3.5 dB에 비해 우수한 반면, 클러터 및 누설 신호가 명확하게 제거되지 않는다. 이동 평균 필터 기법의 경우 매 펄스 당 클러터를 계산하여 차분하기 때문에, 대부분의 클러터 및 누설 신호를 억제할 수 있지만, 표적 신호 또한 함께 억제되어 SNR이 낮아지게 된다. 즉, 이동 평균 기법은 신호 대 클러터 비(signal to clutter ratio: SCR) 측면에서는 효과적이지만 SNR 측면에서는 평균 벡터 차분 및 SVD 기법에 비해 비효율적이다. 신호 각 클러터 제거 기법의 탐지 성능을 비교하고, 소형 무인기 탐지에 가장 적합한 클러터 제거 기법을 도출하기 위하여 거리 별 총 60세트의 소형 무인기 데이터를 획득하였다. 이후, 세트당 구해진 탐지율과 오경보율에 산술 평균을 취함으로써 각 기법에 따른 소형 무인기 탐지 성능을 분석하였다(그림 7).



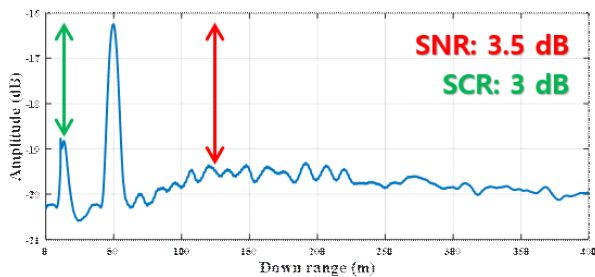
(a) 원 신호
(a) Raw signal



(b) 평균 벡터 차분
(b) Mean vector subtraction



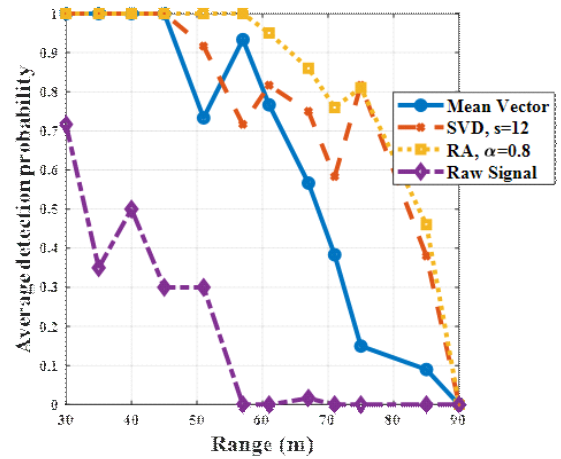
(c) SVD



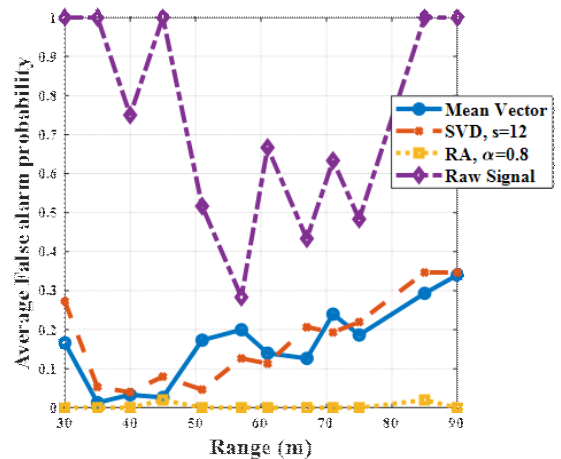
(d) 이동 평균 필터
(d) Running average filter

그림 6. 클러터 제거 및 펄스 압축 기법에 따른 레이더 반사 신호

Fig. 6. The radar echo signal according to clutter removal and pulse integration methods.



(a) 평균 탐지율
(a) Average detection probability



(b) 평균 오경보율
(b) Average false alarm probability

그림 7. 클러터 제거 및 펄스 합성 기법 별 소형 무인기 탐지 성능 분석

Fig. 7. Analysis of small UAV detection performance according to clutter removal and pulse integration methods.

분석 과정에서 원 신호를 이용하여 탐지를 수행한 경우, OS-CFAR 과정에서 P_{FA} 를 0.01로 설정하였다. 반면, 클러터를 제거한 경우, 소형 무인기의 병진 운동 성분 또한 일부 제거되기 때문에 SNR이 감소하므로 P_{FA} 를 0.1로 설정하여 기존보다 낮은 임계값이 설정되도록 하였다. 그림 7(a)는 소형 무인기의 평균 탐지율을 나타내며, 그림 7(b)는 평균 오경보율을 나타낸다. 즉, 평균 탐지율이 높고

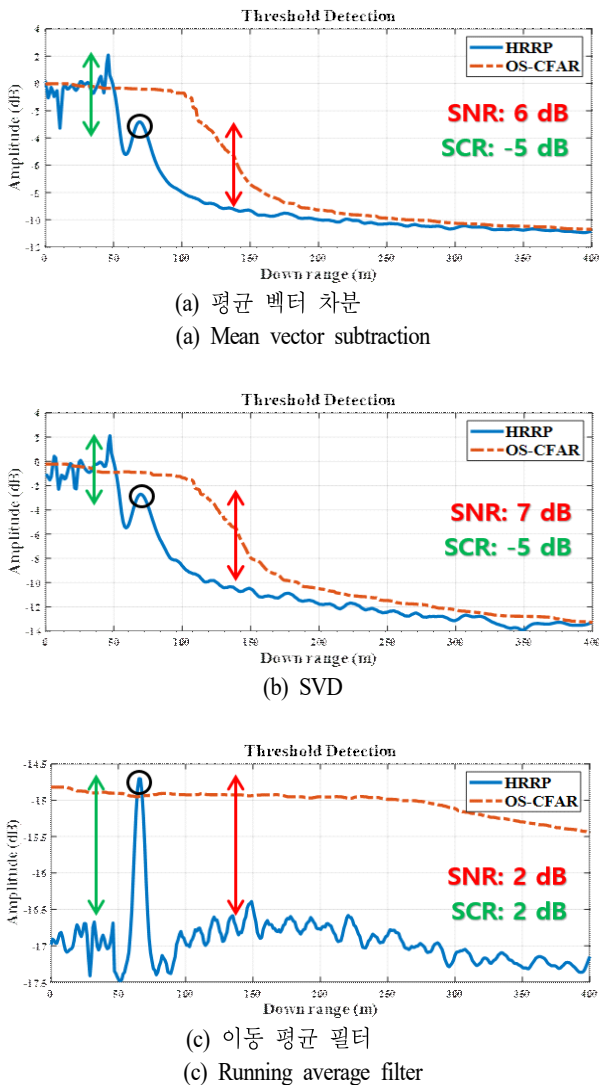


그림 8. 클러터 제거 기법에 따른 OS-CFAR 탐지 결과
Fig. 8. OS-CFAR detection result according to the clutter removal methods.

평균 오경보율이 낮을수록 탐지 성능이 우수하다고 판단할 수 있다. 여기서 Mean Vector, SVD, Running Average는 각각 평균 벡터 차분, SVD, 이동 평균 필터의 클러터 제거 방식을 사용했음을 의미하며, Raw Signal은 클러터 제거를 수행하지 않은 채, 펄스 합성만 적용하여 탐지를 수행한 결과이다.

결과를 확인하여 보면 클러터 제거 기법을 수행할 경우, 원 신호에 비해 탐지율이 월등히 상승하며, 오경보율

또한 월등히 감소하게 됨을 확인할 수 있다. 이로부터 실제 환경 내 소형 무인기 탐지를 위해서는 사전에 클러터 제거 기법을 통한 전처리가 필수적임을 확인할 수 있다.

3가지 클러터 제거 기법 중에서는 이동 평균 필터를 이용한 클러터 제거 기법이 가장 우수한 탐지 성능을 나타내었다. 특히 소형 무인기가 70 m 지점에 위치한 경우, 이동 평균 기법은 다른 두 기법에 비해 높은 탐지율을 보이면서도 오경보가 발생하지 않았다. SNR 손실이 가장 크에도 불구하고, 이동 평균 기법을 이용한 클러터 제거 기법이 가장 우수한 이유를 확인하기 위하여, 소형 무인기가 70 m 지점에 위치한 경우에 각 기법에 따른 OS-CFAR 탐지 결과를 자세히 분석하여 보았다.

그림 8은 각 클러터 제거 기법을 수행한 후의 HRRP 및 OS-CFAR 임계 값을 나타낸다. 임계 값을 넘는 피크가 OS-CFAR를 통해 탐지된 결과가 된다. 또한, 검은색 원은 실제 소형 무인기 표적 피크를 나타낸다. 즉, 초록색 원이 임계 값을 넘을 경우 정확한 탐지, 다른 피크가 임계 값을 넘을 경우 오경보가 된다. 그림을 보면 평균 벡터 차분 기법 및 SVD 기법은 각각 약 6 dB, 7 dB SNR의 표적 신호를 보였다. 그러나 근방의 클러터가 정확히 제거되지 않아 약 -5 dB, -5 dB의 SCR을 나타냈으며, CFAR 임계 값이 높게 형성되어 소형 무인기 표적은 탐지되지 않고 클러터 만이 탐지되어 미탐지 및 오경보 현상이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이동 평균 필터 방식에 경우 약 2 dB의 낮은 SNR을 보이지만, 클러터 또한 정확히 제거되어 약 2 dB의 SCR을 보이고 CFAR 임계 값이 정확히 형성되는 것을 확인할 수 있다. 이는 평균 벡터 차분 및 SVD 기법은 모든 펄스 정보를 종합하여 하나의 클러터를 계산하지만, 이동 평균 필터 기법은 매 펄스마다 클러터를 계산하기 때문에 SNR 손실에도 불구하고, 정확한 클러터 제거를 수행할 수 있기 때문이라고 분석할 수 있다.

Ⅶ. 결 론

본 논문에서는 실제 환경에서 효과적인 소형 무인기 탐지를 위한 프레임워크를 제안한다. 소형 무인기는 일반적으로 시가지 또는 산악 환경에서 사용되며, 저고도 비행을 수행하므로 클러터가 함께 수신되게 된다. 따라서 잡음뿐만 아니라, 클러터 환경까지 함께 고려한 탐지 기

법이 연구되어야 한다. 따라서 제안된 알고리즘은 펄스 합성 및 클러터 제거 기법을 통해 잡음 및 클러터를 억제하고, OS-CFAR 탐지기를 통해 소형 무인기 탐지를 수행한다. 해당 과정에서 소형 무인기 신호 분석을 통해 클러터 제거 알고리즘을 적용하더라도 소형 무인기 신호는 제거되지 않음을 검증하였다. 실제 환경에서 X-밴드 레이더 시스템을 이용한 실험을 통해 획득된 소형 무인기 데이터로부터 3가지의 클러터 제거 기법을 적용하여 각각의 탐지 성능을 분석함으로써 이동 평균 필터를 이용한 신호 전처리 방식이 소형 무인기 탐지에 가장 적합함을 확인할 수 있었다.

References

- [1] 백인선, 이태식, "소형 무인기 탐지를 위한 패시브 레이더망 최적 배치 연구," 한국군사과학기술학회지, 19(4), pp. 443-452, 2016년.
- [2] M. Jian, Z. Lu, and V. C. Chen, "Drone detection and tracking based on phase-interferometric Doppler radar," in *2018 IEEE Radar Conference(RadarConf18)*, Oklahoma City, OK, USA, Apr. 2018, pp. 1146-1149.
- [3] A. Parsa, "Fast moving target detection in sea clutter using non-coherent X-band radar," in *2014 IEEE Radar Conference*, Cincinnati, OH, Aug. 2014, pp. 1155-1158.
- [4] 신상진, "효율적인 CFAR 알고리즘 연구," 한국전자과학회논문지, 25(8), pp. 849-856, 2014년 8월.
- [5] P. P. Gandhi, S. A. Kassam, "Analysis of CFAR processors in homogeneous background," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 24, no. 4, pp. 427-445, Jul. 1988.
- [6] M. W. Y. Poon, R. H. Khan, and S. Le-Ngoc, "A singular value decomposition(SVD) based method for suppressing ocean clutter in high frequency radar," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 41, no. 3, pp. 1421-1425, Mar. 1993.
- [7] J. W. Choi, D. H. Yim, and S. H. Cho, "People counting based on an IR-UWB radar sensor," *IEEE Sensors Journal*, vol. 17, no. 17, pp. 5717-5727, Sep. 2017.
- [8] 강기봉, 선선구, 이정수, 조병래, 박상홍, 김경태, "실측 데이터를 기반으로 한 기동 소형 무인기의 미세운동 신호 특성 분석," 한국전자과학회 하계종합학술대회, 2018년 8월.
- [9] P. P. Gandhi, S. A. Kassam, "Analysis of CFAR processors in homogeneous background," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 24, no. 4, pp. 427-445, Jul. 1988.
- [10] M. I. Skolnik, *Introduction to Radar Systems*, London, McGraw-Hill, 2002.
- [11] 최인오, 김시호, 이승필, 김영수, 김경태, 박상홍, "탄도미사일의 미세도플러 분석을 위한 측정환경 구성," 한국전자과학회 하계종합학술대회, 2014년 8월.
- [12] B. Lee, S. Lee, Y. J. Yoon, K. M. Park, and S. C. Kim, "Adaptive clutter suppression algorithm for human detection using IR-UWB radar," in *2017 IEEE Sensors*, Glasgow, Oct.-Nov. 2017, pp. 1-3.

최 재 호 [포항공과대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0001-9484-4869>



2017년 2월: 고려대학교 컴퓨터·통신공학부 (공학사)
 2019년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)
 2019년 2월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 박사과정
 [주 관심분야] 레이더 신호 처리 및 영상, 휴먼 탐지, 미세도플러 분석

이 정 수 [국방과학연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-1703-0332>



2000년 2월: 충남대학교 전자전기공학부 (공학사)
 2002년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)
 2002년 3월~2005년 12월: LG 전자 연구원
 2006년 1월~현재: 국방과학연구소 선임연구원
 [주 관심분야] 안테나, 송수신기, 레이더 시스템 설계 등

강 기 봉 [포항공과대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0003-2846-3616>



2015년 2월: 부경대학교 전자공학과 (공학사)
 2017년 2월: 부경대학교 전자공학과 (공학석사)
 2017년 2월~2018년 8월: 포항공과대학교 전자전기공학과 연구원
 2018년 9월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 박사과정
 [주 관심분야] 레이더 표적식별, 레이더 신호처리, 미세도플러 분석 등

조 병 래 [국방과학연구소/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-9160-3362>



1999년 2월: 경북대학교 전자전기공학부 (공학사)
 2001년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)
 2005년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)
 2005년 3월~2006년 1월: 포항공과대학교 전자전기공학과 연구원
 2006년 1월~현재: 국방과학연구소 책임연구원
 [주 관심분야] 레이더 신호처리, 영상레이더 등

선 선 구 [국방과학연구소/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-6560-8285>



1987년 2월: 한양대학교 전자공학과 (공학사)
 1989년 2월: 한양대학교 전자공학과 (공학석사)
 2003년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
 1989년 2월~현재: 국방과학연구소 책임연구원
 [주 관심분야] 레이더 신호처리, 영상레이더, 컴퓨터비전 등

김 경 태 [포항공과대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0003-1200-5282>



1994년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학사)
 1996년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)
 1999년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)
 2002년 3월~2011년 2월: 영남대학교 전자공학과 교수
 2011년 3월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 교수
 2012년 9월~2018년 2월 : 레이더/IR 표적식별 특화연구실 실장
 2018년 2월~현재: 무인감시정찰기술 연구센터 센터장
 [주 관심분야] 레이더 신호 처리 및 영상, 레이더 표적인식 및 패턴인식, 전자기수치해석 및 RCS 추정 등