

압축센싱 기반의 UWB 클러터 제거를 통한 비행 드론의 근거리 탐지 성능 개선

Compressed Sensing Based Clutter Rejection of UWB Radar for Near Field Detection of Moving Drones

이새미*¹⁾ . 천형일¹⁾ . 이우경¹⁾

Saemi Lee*¹⁾ . Hyungil Chun¹⁾ . Wookyung Lee¹⁾

[초 록]

UWB(Ultra Wideband Radar) 레이더는 매우 좁은 펄스를 사용하여 근거리 드론을 보다 높은 분해능으로 탐지 가능 하고, 광대역을 사용하여 투과성이 좋아 효율적인 물체 탐지에 적합하다. 본 연구에서는 군집 드론 시스템에서는 이동 드론의 충돌 방지를 위해 레이더 센서를 도입한다. UWB 레이더를 이용해 드론을 탐지하는 실험을 수행하고, 드론 탐지 신호의 거리 및 속도 정보 정확도를 개선하기 위한 방안을 제안한다. 탐지 정확도를 개선하기 위해서는 수신 잡음을 제거하는 과정이 필요한데, 기존의 LMS 적응 필터를 이용하면 표적신호를 클러터로 판단해 오경보율을 높이는 현상이 발생한다. 본 논문에서는 압축센싱 기반의 알고리즘을 적용한 선별적 필터 알고리즘을 설계하여 오경보율을 일정하게 유지하면서 클러터를 효과적으로 제거하는 방안을 제시하고자 한다.

[ABSTRACT]

UWB (Ultra Wideband Radar) radar is suitable for efficient object detection using very narrow pulses with high permeability. With minimal power consumption, it can detect near-field drones with high resolution. In this study, experiments are we performed to detect drones using UWB radar and proposed a method to improve the accuracy of distance and velocity information of received signals. In order to improve the detection accuracy, attempt is made to suppress clutter noise in received signals. Conventional LMS adaptive filter often suffer from errors in target detection due to strong nearby clutter leading to increased false alarm rate. In this paper, a compressive sensing based adaptive filter is proposed to effectively remove clutter while maintaining false alarm rate by designing adaptive CFAR.

Key Words : Clutter Removal(클러터 제거), UWB Radar, LMS Apative Filter, CFAR, Drone Detection(드론 감지)

1. 서 론

대체로 안티 드론 시스템은 기후나 밤낮, 장애물에 관계없이 물체 탐지가 가능한 레이더를 기반으로 이루어진다. 레이더 장비는 민간에서 도입하기에 가격이 매우 높고 실제 노이즈가 존재하지 않는 환경에서 실험하기에 어려운 조건이 따른다. 특히 드론을 식별하기 좋은 기술로서 FMCW(Frequency

Modulated Continuous Wave)가 대표적인데^{[1],[2]}, 연속파 레이더는 휴지시간 없이 지속적으로 신호를 발사하여 배터리의 소모가 방대하고 따라서 오랜 시간 물체 탐지가 불가능하다.

본 연구에서는 가로 세로 3cm의 초소형, 저비용 UWB(Ultra Wideband Radar) 레이더의 극히 짧은 펄스 신호를 사용하여 소모 전력을 줄이고 따라서 장시간 물체 탐지를 가능하게 한다. 나아가 UWB 시스템은 수 나노 혹은 피코 초의 매우 좁은 펄스를 사용함으로써 높은 분해능을 확보 할 수 있다.^[3] 또 휴대전화 및 무선 LAN의 이용대역의 100-1000배 이상인 수 GHz를 사용하여 높은 데이터 전송속도를 확보할 수 있고 이는 저주파수 대역에서도 매우 큰 대역을 유지하기 때문에 투과성이 좋아 효율적인 물체 탐지에 적합하다.

드론을 감지하기 위해서는 수신된 표적신호를 배경신호로부터 구별하고 이를 표적으로 확인하는 과정이 필요하다. 이 과

1) 한국항공대학교 항공전자공학과(Department of aElectronic Engineering, Korea Aerospace University)

* Corresponding author, E-mail: wklee@kau.ac.kr

Copyright © The Korean Institute of Defense Technology

Received : February 01, 2021

Revised :

Accepted : February 16, 2021

정에서 수신되는 불필요한 배경 신호를 클러터라고 한다. UWB 레이더를 이용하여 수신된 비관심영역의 신호잡음을 제거하면 표적의 탐지 신호를 좁은 펄스로 생성해 탐지 정확도를 높일 수 있다.^[4] 그러나 클러터를 제거하는 과정에서 일반적으로 신호 손실이 불가피한데, 이러한 단점을 보완하기 위해 연구된 기법이 적응필터이다. 드론 탐지에 있어서 수신신호의 통계적 특성을 예측 하지 못하므로 적응 필터를 적용하면 신호 왜곡을 줄일 수 있다. 적응형 필터 중 가장 잘 알려진 기법은 LMS 필터인데^{[5][6]}, 일반적으로 LMS 필터를 사용하면 원하는 관심영역과 나머지 비관심 영역 모두에서 신호 제거가 적용되어 효율적인 클러터 제거가 불가능하다.

따라서 본 연구에서는 클러터와 표적신호를 구분하는 기준 신호레벨을 설정하여 탐지 정확도를 개선하는 방안을 제안한다. 이 때 배경 잡음 신호보다 큰 신호를 무조건 표적신호로 판단하면 표적이 아닌 신호를 표적으로 오인하는 오경보가 발생하는데, 이러한 오경보율을 일정하게 유지하기 위해 CFAR 프로세싱^{[7][8]}을 적용해 보완된 LMS 기법을 제안한다. 본문 II에서는 잡음 신호의 효과적 제거를 위해 신호의 상관 분석을 먼저 진행하고, LMS 적응 필터와 CFAR를 적용한 클러터 제거 방안을 수치적으로 분석한다. 본문 III에서는 실제 UWB 레이더로 드론을 탐지한 신호에 대해 제안된 기법을 수행하고 결과를 분석하였다. 나아가 드론 반사 신호의 도플러 특성을 파악하고 제안된 기법의 효과를 분석하였다.

2. 제안된 기법

2.1 상관관계 분석을 통한 탐지 정확도 개선

드론은 반사도가 낮은 재료로 이루어져, 레이더를 이용한 감지가 어려운 것으로 알려져 있다. 이는 신호 및 영상처리에서 Cross-Correlation (상호 상관)을 이용하여 탐지 정확도를 개선할 수 있다. 일반적으로 상호 상관은 서로 다른 신호의 유사성을 판단하기 위해 사용된다. 입력 신호 $f(t)$ 와 시스템 신호 $g(t)$ 의 상호 상관 식은 (1)과 같이 주어진다. 는 신호 상관 식을, 는 입력신호의 켄레 복소수(conjugate number)를 나타낸다.

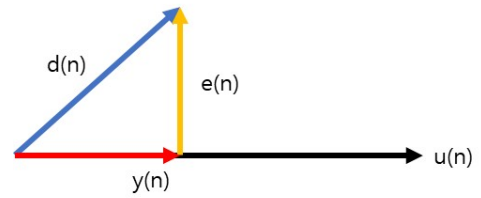
$$f(t) \circ g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f^*(t)g(t+\tau)dx \quad (1)$$

신호의 세기가 낮은 드론 반사 신호를 입력 신호로 설정하고 송신기 측에서 방사된 신호가 지연된 파형을 시스템 신호로 설정하여 신호 상관을 분석하면 두 신호가 일치하는 시점에서 진폭의 높이가 최댓값을 이룬다. 이는 특정 송신신호에 의해 반사된 표적신호를 강조하고 배경 잡음에 의해 반사된 신호의 세기를 상대적으로 덜 강조함으로써 표적 드론의 탐지 정확도를 개선시킨다.

2.2 적응형 LMS 알고리즘

적응필터는 시간이 지남에 따라 통계적인 특성이 달라지는 non-stationary 한 수신 신호의 Optimum Wiener Filter 계

수를 매시간 추정해 가는 알고리즘이다. 최적 필터는 수신 신호 $u(n)$ 의 크기를 가중치 벡터 $w(n)$ 을 이용해 이상적인 신호 $d(n)$ 와 가장 근접하도록 즉, 오차 $e(n)$ 의 크기를 최소화 시키도록 하는 가중치를 찾는다. 이를 그림 1에서 시각적으로 보여준다. 오차 $e(n)$ 은 수식 (2)와 같이 나타 낼 수 있다.



← $y(n) = w(n) \cdot u(n)$, $w(n)$: 가중치 벡터

그림 1. 최적 필터의 원리

Fig. 1. Principle of optimal filter

$$e(n) = d(n) - w(n) \cdot u(n), n = 0 \dots M \quad (2)$$

- $u(n)$: 수신 신호
- $w(n)$: 가중치 벡터
- $d(n)$: 이상적인 신호
- $e(n)$: 오류값
- $y(n)$: 출력 신호

이 때 클러터 신호에서 가중치 벡터가 곱해진 오류값을 자승 평면 공간 내에서 최소화하는 과정이 LMS(Least Mean Square) 알고리즘이다. 오차의 제곱은 다음과 같이 전개 된다.

$$\begin{aligned} \epsilon &= \sum_{n=0}^M e^2(n) = \sum_{n=0}^M [d(n) - \sum_{k=0}^{N-1} w(k)u(n-k)]^2 \\ &= \sum_{n=0}^M d^2(n) - 2 \sum_{k=0}^{N-1} w(k)r_{dx}(k) \\ &\quad + \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{N-1} w(k)w(i)r_{xx}(k-i) \end{aligned} \quad (3)$$

$$r_{dx}(k) = \sum_{n=0}^M d(n)u(n-k), 0 \leq k \leq N-1 \quad (4)$$

$$r_{xx}(k) = \sum_{n=0}^M d(n)u(n+k), 0 \leq k \leq N-1 \quad (5)$$

오차의 제곱을 최소화하기 위해 위 오차 제곱식을 필터의 가중치로 미분하고 그 값이 0일 때의 가중치 값을 찾는다.

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial w(m)} = 0, 0 \leq m \leq N-1 \quad (6)$$

위 식을 만족하는 $w(k)$ 는 다음과 같이 정리된다.

$$\sum_{k=0}^{N-1} w(k)r_{xx}(k-m) = r_{dx}(m) \quad (7)$$

$$0 \leq m \leq N-1$$

이를 재귀적 경사법으로 적절한 가중치를 찾으면, 매시간 업데이트 되는 필터의 계수는 다음과 같다.

$$w(n+1) = w(n) + \mu e(n)u(n) \quad (8)$$

$$0 \leq k \leq N-1, n = 0, 1, \dots$$

μ : 스텝 크기

이 때 스텝 크기는 최적의 해로 수렴하는 속도를 결정하고, 알고리즘의 안정성을 확보하기 위해 다음과 같은 범위 안에 있어야 한다.

$$0 < \mu < \frac{1}{10NP_x}, P_x = \frac{1}{1+M} \sum_{n=0}^M x^2(n) = \frac{r_{xx}(0)}{M+1} \quad (9)$$

결과적으로 출력 신호 $y(n)$ 은 다음과 같이 정의된다.

$$y(n) = \sum_{k=0}^{N-1} w(n)u(n-k), n = 0, \dots, M \quad (10)$$

그림 2는 오류값 $e(n)$ 을 도출하는 LMS 적응필터 과정을 블록도를 보여준다.

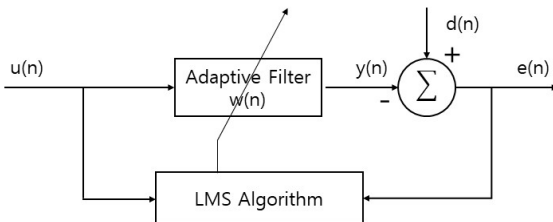


그림 2. LMS 적응필터 구조
Fig 2. Structure of LMS adaptive filter

LMS 적응 필터를 사용하면 드론 탐지 시 광대역 잡음이 인가되었을 때 매시간 필터의 계수를 업데이트함으로써 수신 신호 손실을 막을 수 있고 최적의 수신 신호를 출력하기까지 수렴 속도가 빠르다는 장점이 있다. 그러나 다른 클러스터 처리 알고리즘에 비해 상대적으로 구현이 복잡하며, 드론에 반사된 원시 신호를 그대로 처리하는 과정에서 관심영역과 비관심영역의 클러스터를 모두 제거하여 탐지 효율을 낮추는 결과를 초래한다. 따라서 표적신호화 배경 잡음 신호를 구분하여 선택적으로 LMS 적응 필터를 적용하는 개선된 알고리즘을 제안하고자 한다.

2.3 압축센싱 알고리즘 적용

압축센싱 이론에서 수신 신호는 다음과 같이 표현된다

$$\mathbf{y} = \Phi\Psi\mathbf{x} + \mathbf{n} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (11)$$

이때 각 변수는 다음과 같이 정의된다.

- \mathbf{x} = K 개의 0이 아닌 원소를 갖는 $N \times 1$ 벡터
- Φ = $M \times N$ 측정 행렬 (measurement matrix), Ψ = $N \times N$ 기저 행렬 (기저 행렬)
- A = $M \times N$ 센싱 행렬, \mathbf{n} = $M \times 1$ 잡음 벡터
- $\mathbf{s} = \Psi\mathbf{x}$ = K 차 산재 벡터

위의 식에서 \mathbf{y} 는 산재 벡터 \mathbf{s} 를 측정 행렬 Φ 를 이용해서 샘플링해서 얻은 것으로 볼 수 있다. 압축센싱 이론은 수신 신호 \mathbf{y} 로부터 산재성을 갖는 원 신호 벡터 \mathbf{x} 를 찾는 방법을 제시한다.

압축센싱은 sub-Nyquist 샘플링, 데이터 압축, 신호 보간, 신호 분리, 간섭 제거 등에 활용할 수 있다. 실제 통신 신호와 영상 신호의 경우 일부 주파수 성분이 상대적으로 크게 표현되지만 완전히 산재 신호로 표현되지는 않는다. 편의상 \mathbf{x} 의 원소 중 m 번째 큰 계수를 $|x|_{(m)}$ 으로 정의하자. $|x|_{(m)} \leq m^{-r}$ ($r > 1$)이고, $\|\mathbf{n}\|_2 \leq \epsilon$ 일 때 불완전한 산재성을 갖는 실제 신호를 압축센싱을 이용하여 복원하는 경우 오차는 다음 조건을 만족한다.

$$\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_M\|_2 \leq \sqrt{\frac{N}{M}}\epsilon + \left(\frac{\log N}{M}\right)^r \quad (12)$$

알려진 압축센싱 알고리즘 중 BPDN(Basis Pursuit Denoising)은 다른 기법에 비해 신호 복원 능력이 우수하고 산재 신호 분해능이 좋은 반면 연산량이 증가하는 단점이 있다. 원칙 기반의 FPGA로 구현되는 고속 UWB 수신기에서는 BPDN 알고리즘의 동작이 보장될 수 있다.

BPDN에서 정의된 l_1 -norm 최적화 문제는 다음과 같이 선형 목적식과 이차부등식 제약조건을 갖는 convex 최적화 문제로 등가적으로 변형할 수 있다.

$$\min_{\mathbf{x}, \mathbf{u}} J(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \sum_{n=1}^N u_n \quad (13)$$

$$\text{s.t. } \frac{1}{2} \left(\|\mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{y}\|_2^2 - \epsilon^2 \right) \leq 0$$

$$-u_n \leq x_n \leq u_n, n = 1, 2, \dots, N$$

$$u_n \geq 0, n = 1, 2, \dots, N \quad (14)$$

잡음이 없는 경우 $\epsilon=0$ 이므로 BPDN은 BP 복원 기법으로 바뀌고, 선형프로그램을 통해 보다 쉽게 해를 구할 수 있다.

BPDN은 기본적으로 실수 신호에 대한 산재신호 복원에 사용된다. 본 논문에서는 드론으로부터 반사되는 미세 UWB 신호가 손실되는 시나리오에서 BPDN기반의 압축센싱 알고리즘을 통한 거리 정보 보상을 수행하였다.

3. 드론 탐지 실험 결과 분석

3.1 드론 탐지 시나리오

실제 드론 탐지 실험은 Xethru사의 X4M06 UWB 레이더를 이용하였다. 그림 5는 실험환경과 사용한 레이더를 보여준다. 실험은 드론의 운동방향을 크게 두 가지 경우로 나누어 진행하였다. 먼저 레이더를 기준으로 앞뒤로 운동하며 거리 R에 따른 파형을 분석하였고 고도각 α 와 방위각 θ 를 변화시키면서 신호를 확인하였다.

그림 5는 실제 실험 환경을 보여주고 그림 6은 실험 시나리오와 실제 사용한 UWB 레이더를 보여준다. 드론의 이동 간격은 표 1에 나타내었고 탐지 거리를 수집한 순간의 실제 거리와 각도 정보를 보여주었다.

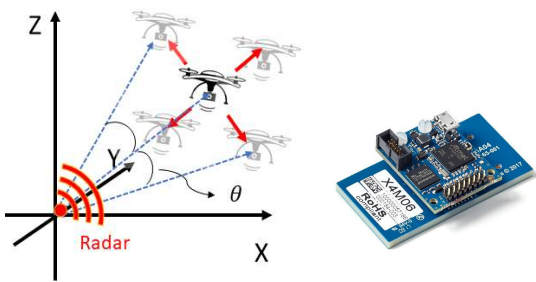


그림 3. 실험 시나리오와 X4M06 UWB 레이더
Fig 3. Experimental scenarios and X4M06 UWB Radar

표 1. 드론의 이동 구간 및 거리 고도값의 범위

Table 1. Range of drone movement and look angle interval

	Value	Moving Interval
Range	6.3789[m]	1~10[m]
Elevation Angle	9.0193°	-10°~10°
Azimuth Angle	0°	-45°~+45°

송신부에서 4.1dBm의 저전력 펄스 신호를 드론에 송신하면 드론의 RCS에 따라 반사된 신호를 안테나에서 이득 6.75dB, 빔 폭 65도로 받아들인다. 본 실험은 10m 이내의 근거리에서 높은 분해능을 요구하였으므로 7.25-10.2GHz 대역의 중심주파수를 가지는 펄스 신호를 사용하였다. 표 2은 사용한 레이더의 parameters를 보여준다.

표 2. 레이더 사양 변수

Table 2. Radar parameters

Parameters	Values
Bandwidth	10GHz
Transmitted power	4.1dBm
Pulse Repetition Frequency	40MHz
Antenna Gain	6.75dB
Azimuth and Elevation Angle	65°

3.2 LMS 적응 필터 적용 결과

드론을 탐지한 신호를 수집해서 기존 LMS 적응 필터를 적용한 결과가 그림 7에 보여진다. 첫 번째 샘플부터 마지막 샘플까지 재귀적으로 진행 되는 LMS 필터의 경우 표적 신호 영역을 지난 후반부의 클러터 신호에 대해서 비교적 확실한 제거를 보여준다. 그러나 드론이 감지된 피크 관심 영역에서는 LMS 필터를 통과한 후에도 펄스가 여전히 좁혀지지 않은 것을 확인 할 수 있다. 또한 표적 신호까지 클러터 신호로 판단해 피크 전력이 감소한 것을 볼 수 있다. 이는 그림 8의 전력 신호에서 눈에 띄게 나타난다.

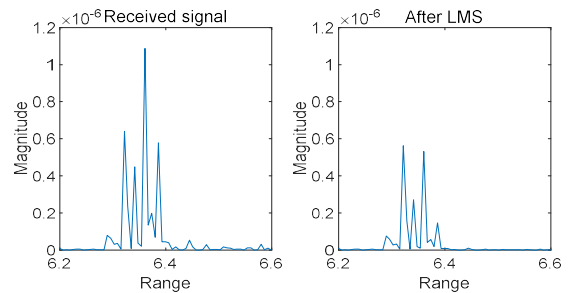


그림 4. LMS처리 전후 전력신호 비교
Fig 4. Comparison of power signals before and after LMS processing

3.3 압축센싱 기반 CFAR 적용 결과

3.3.1 클러터 제거 결과 분석

CFAR를 기반으로 임계 기준치를 설정해서 선택적 영역에 대해서 LMS를 처리한 결과가 그림 5에 주어진다. 후반부 클러터 수집 신호에서 LMS 적응 필터보다 클러터 제거가 비교적 명확하지 않지만 그림 6에서 전력신호의 피크 펄스가 눈에 띄게 좁아진 것을 확인 할 수 있다. 피크 펄스를 이용해 드론이 위치한 탐지 거리를 추출할 수 있음으로써 거리방향 탐지 정확도를 개선하였다.

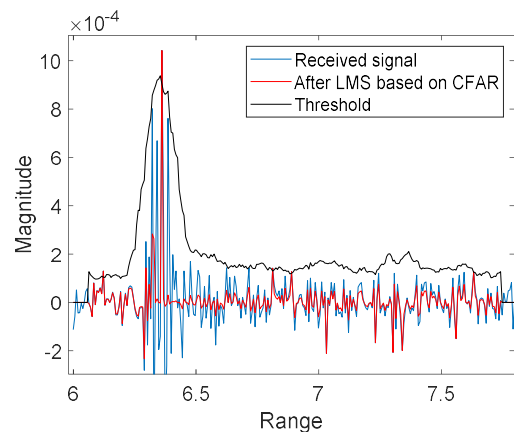


그림 5. 원시신호와 제안된 기법을 적용한 신호의 비교

Fig 5. Comparison of raw signals and signals processed by proposed algorithm

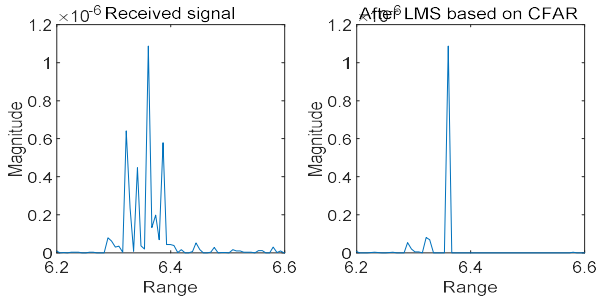


그림 6. 제안된 기법 처리 전후 전력 신호 비교

Fig 6. Comparison of power signals before and after processing the proposed algorithm

UWB 펄스 수집 구간이 증가함에 따라 데이터 처리량이 증가하고 클러터에 따른 오차가 증가하여 탐지 능력이 저하된다. 이를 개선하기 위해 탐지 신호 중 특정 레벨 이상 및 이하 구간의 값을 제거하여 선택적으로 추출한 후 압축센싱 알고리즘을 적용하였다. 이를 통해 신호 처리량을 줄이면서도 오차를 감소시키는 효과를 얻을 수 있었다.

LMS 적응 필터와 제안된 기법을 적용해 각각 클러터를 제거한 후 평균 잡음을 수치적으로 분석한 결과를 표 3에 보인다. 각 항은 전력 공간에서 클러터 제거 전후의 평균 잡음 신호를 보여준다. 기존 LMS 적응 필터를 이용했을 때보다 제안된 기법을 적용했을 때 클러터 제거율이 27% 증가한 것을 확인할 수 있다.

표 3. 평균 잡음 전력 비교

Table 3. Comparison of average Noise Power

	Received Signal	Signal After Clutter Rejection	Removal Rate
LMS	3.9082e-06	1.7514e-06	55%
압축센싱 적용CFAR	3.9082e-06	0.7185e-06	82%

4. 결론

드론 탐지 정확도를 개선하기 위해 특정 송신파와 수신파를 상관 분석하여 배경 잡음으로부터 표적 신호를 상대적으로 강조하였다. 또한, 기존 LMS 적응 필터에 CFAR 기법을 적용하여 신호 잡음으로부터 표적신호를 구분하고, 검출된 신호 잡음에 선택적으로 LMS 적응 필터를 적용하여 클러터를 제거하는 알고리즘을 제안하였다. 그 결과 배경 잡음 신호를 효율적으로 제거하고 드론 표적 신호의 피크 펄스를 좁혀 거리방향 탐지 정확도를 개선하는데 성공하였다.

또한, 다방향으로 이동하는 드론의 도플러 특성을 분석하였다. 방위 방향에 따라 이동하는 드론의 탐지 신호가 정지한 드론의 신호와 유사한 것을 통해 펄스 신호를 이용한 도플러 분석에 한계가 있음을 확인하였다. 그러나 거리의 변화에 따라 이동하는 드론 신호를 도플러 영역에서 분석한 결과 이동하는 드론에 대한 속도 정보의 정확도를 개선할 수 있었다.

현재 UWB 광대역 펄스 신호를 이용하여 표적을 탐지하고 수

집 신호의 탐지 정확도를 개선하기 위한 연구가 활발히 진행 중이다. 본 논문에서의 분석한 연구를 기반으로 이동하는 표적의 거리 및 속도 정보의 정확도를 개선하기 위해 시간 또는 주파수 영역에서 클러터를 효과적으로 제거하는 연구가 수행되어야 할 것이다. 나아가 다량의 모의실험을 통한 드론 탐지 신호의 빅데이터를 인공지능에 학습시킨다면 드론의 종류를 식별하는 시스템 구현도 가능할 것으로 보인다.

사 사

본 연구는 민·군기술협력사업의 지원을 통해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- [1] Á. D. de Quevedo, F. I. Urzaiz, J. G. Menoyo and A. A. López, "Drone detection and radar-cross-section measurements by RAD-DAR," in IET Radar, Sonar & Navigation, vol. 13, no. 9, pp. 1437-1447, 9 2019
- [2] J. Drozdowicz et al, "35 GHz FMCW drone detection system," 2016 17th International Radar Symposium (IRS), Krakow, 2016, pp. 1-4.
- [3] Ryohei Nakamura et al, "Ultra-wideband radar reflectivity of a drone in millimeter wave band", IEICE Communications Express, 2018, Vol.7, No.9, p.341
- [4] Y. Yoon, S. Lee, B. Lee, S. Kim and C. Lee, "Enhanced clutter removal and peak detection methods for localization using IR-UWB radar," 2017 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC), Jeju, 2017, pp. 313-317.
- [5] 이슬기, 강서리, 이우경 "LMS 적응 필터를 이용한 레이더 영상 간섭신호 제거", 한국전자파학회 전자파기술 25(2), 3-9(7 pages), 2014
- [6] M. A. Attalah, T. Laroussi, F. Gini and M. S. Greco, "Fast block LMS algorithm for interference cancellation in DVB-T based passive bistatic radar," 2017 5th International Conference on Electrical Engineering - Boumerdes (ICEE-B), Boumerdes, 2017, pp. 1-5.
- [7] Shiyuan Chen and Xiaojiang LiSignal, "A new CFAR algorithm based on variable window for ship target detection in SAR images", Signal, Image and Video Processing, Springer Nature, June 2019, Volume 13, Issue 4, pp 779-786
- [8] M. Ezuma, O. Ozdemir, C. K. Anjinappa, W. A. Gulzar and I. Guvenc, "Micro-UAV Detection with a Low-Grazing Angle Millimeter Wave Radar," 2019 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS), Orlando, FL, USA, 2019, pp. 1-4.