

DTV 방송 신호를 사용한 드론 탐지 수동형 레이더의 구현

Drone Detection Using DTV-Based Passive Radar System

천형일 · 이새미 · 이상민 · 문민정 · 이우경 · 이훈*

Hyung-Il Chun · Sae-Mi Lee · Min-Jeong Moon · Woo-Kyung Lee · Hoon Lee*

요 약

최근 도심에 출현하는 드론을 탐지하자는 요구가 높아지고 있으나, 고출력의 레이더를 사용하는 것은 현실적인 장벽이 높다. DVB-T(digital video broadcasting-terrestrial) 신호는 와이파이나 라디오 신호에 비해 상대적으로 출력이 강하고, 대역폭이 넓은 장점이 있어 도심에서의 이동 표적 탐지를 위한 수동형 레이더 구현이 가능하다. 본 논문에서는 DVB-T기반의 수동형 레이더를 구축하여 항공기 및 드론의 탐지 가능성을 실험적으로 검증한다. 구현된 수동형 레이더는 방송 신호를 사용하여 표적을 탐지하므로 별도의 송신단 구현 없이 저비용으로 광역감시가 가능함을 보인다. 이를 위해 국내 방송 신호를 분석하고, 실제 이동 표적에 대한 탐지 성능을 실험적으로 측정하여 도심에서의 드론 탐지 활용에 대한 타당성을 제시한다.

Abstract

Despite increasing threats from hostile drones, the conventional active radar system remains inappropriate for urban surveillance purposes. The digital video broadcasting-terrestrial (DVB-T) signal exhibits a wide bandwidth and high transmit power compared with FM or WiFi signals, and hence enables the design of simple, low-cost passive radar with wide coverage areas. In this paper, a DVB-T system is employed to construct a passive radar surveillance system, and its performance is assessed experimentally in terms of detecting airplanes and small drones. For this purpose, a simple passive radar is implemented using high-gain antennas and low-cost RF receivers. After the DVB-T signals received through passive channels are processed, target-detection scenarios are carried out for flying airplanes and drones.

Key words: Passive Radar, DTV, Drone, Target Detection

I. 서 론

드론의 대중화 시대에 접어들면서 드론 보급이 민/군에 걸쳐서 빠르게 증가하고 있다. 그와 동시에 드론에 의한 보안, 안전사고, 치안 안보 문제 발생

가능성도 증가하고 있으며, 실제로 드론을 이용한 국가시설에 대한 공격도 발생하고 있다^[1]. 이에 따라 드론 규제 정책 및 통제가 효용성을 갖고 유지되기 위해서는 드론 탐지기술과 함께 드론 감시망 구축이 필수적이다^[2].

「이 연구는 2019년도 국가보안기술연구소 연구비의 지원으로 연구되었음.」

한국항공대학교 항공전자정보공학과(Department of Electronic and Information Engineering, Korea Aerospace University)

*한국전자통신연구원 부설연구소 (The Attached Institute of ETRI)

· Manuscript received December 14, 2020 ; Revised January 13, 2021 ; Accepted March 10, 2021. (ID No. 20201214-109)

· Corresponding Author: Woo-Kyung Lee (e-mail: wklee@kau.ac.kr)

현재 알려진 전파 기반의 드론 탐지기술은 대부분 모노스테틱 레이더를 사용한다. 능동형 모노스테틱 레이더는 출력이 높더라도 드론과 같은 초소형 표적에 대한 장거리 탐지가 어렵다. 특히 드론이 도심 지역 및 LOS(line of sight) 확보가 어려운 지역에 산재하는 경우, 전파 간섭이 생겨 탐지에 한계가 있다^[3].

최근에는 능동형 레이더의 탐지 한계를 극복하는 대안으로 저전력 광역 감시망 기반의 멀티스테틱 레이더를 구축하여 드론을 탐지하는 방안이 제시되고 있다. 초기에는 라디오나 와이파이 같은 협대역 신호를 이용하였으나, 출력이 낮고 해상도가 낮아 효용성이 낮은 것으로 알려졌다. 반면 상대적으로 출력이 높고 대역폭이 넓은 DTV(digital television) 신호를 적용하면서 우수한 표적 탐지 성능을 기대할 수 있게 되었다^[4]. DTV 기반 멀티스테틱 시스템은 송출되는 전파의 출력이 매우 높고 음영지역이 적어서 넓은 지역에 분포하는 소형의 무인기 표적을 추적할 수 있는 환경을 제공한다. 간단한 구조의 협대역 수신기만 추가하면 넓은 영역에서의 표적 감시가 가능하게 되어, 능동형 레이더에 비해 획기적인 비용 절감을 기대할 수 있다^[5].

국내외 TV 송신 전력은 드론을 탐지하기에 충분한 신호 세기를 갖고 있으며, 무지향성의 방사를 하므로, 저고도의 표적 검출에 유리하다.

수동형 레이더는 기존의 전파 자원을 활용하여 송신기 없이 수동 센서만으로 사물을 탐지할 수 있는 원리를 활용하는 탐지 시스템이다. 송신기와 수신기를 분리하여 표적 신호를 탐지하는 방식이며, 통신 기기의 활용이 고도화되는 정보 사회에서 그 효용 가치가 더욱 높아지고 있다^[6]. 수신기를 분리함으로써 기존 모노스테틱 레이더에서 지적되는 제한된 탐지 영역 및 음영 발생 문제를 해결하고, 표적 탐지 확률을 높일 수 있다. 기존 송출 전파를 활용하는 과정에 기존 송신기와 간섭 문제가 없고, 소형 수신 장치를 넓은 지역에 배치하는 게 용이하여 저비용으로 표적 감시 영역을 확장하는 효용성이 매우 높다^[7]. 특히 도심의 고층 빌딩에 가려져

발생하는 전파 음영 영역 문제를 해결할 수 있는 대안으로 거론된다.

수동형 레이더는 광범위한 영역에 분포하는 표적을 탐지하는 체계에 적합하지만, 이를 위해서는 저전력 신호 감지를 위한 다중 페이딩 신호 처리나, 표적의 위치 및 식별을 위한 신호 판독 알고리즘을 구현하는 것이 필요하다^[8]. 또한, 수신기 간의 정밀한 동기화가 충족돼야 한다. 다만 저고도 공중을 이동하는 드론으로 한정하는 시나리오에서는 주변 반사파의 간섭이 미약하므로 단일 표적 추적에 유리하다.

모노스테틱 레이더 시스템은 가용 송신기 수가 제한되고, 탐지 거리가 짧아 표적이 송신기의 탐지 영역을 벗어날 경우 위치 추적이 어려워진다. 반면, DTV 기반의 멀티스테틱 레이더는 다중 수신기의 설치 및 운용 자유도가 높아 복잡한 도심에서도 표적을 다각도로 측정하여, 반사도가 낮은 표적의 탐지 성능을 향상시킬 수 있다^[9].

본 논문에서는 이론적으로 분석한 드론의 탐지 가능 범위를 실험적으로 검증하기 위해 국내 DTV 기반의 수동형 레이더 시스템 실험 환경을 구축하였다. 구현된 수동형 레이더 시스템과 신호처리 알고리즘의 표적 탐지 성능을 확인하기 위해 실제 비행기를 대상으로 원거리 탐지 실험을 수행하였다. 검증된 수동형 레이더를 활용하여 상업용 드론에 대한 탐지 실험을 수행하고 타당성을 분석하였다. 마지막으로 국내 방송 환경에서 광역 드론 탐지망을 구축할 수 있는 가능성을 제시한다.

II. DTV 기반 수동형 레이더 구현

2-1 DTV 신호

국내에서는 DTV 방송 표준으로 ATSC(advanced television systems committee) 방송규격을 이용한다. ATSC는 VSB(vestigial sideband) 방식으로 변조하며, 주파수 대역은 VHF/UHF 대역을 이용한다. 1개의 채널당 대역폭은 6 MHz이며, 620 kHz는 보호 영역으로 사용되어 실제 점유 대역폭은 5.38 MHz가 된

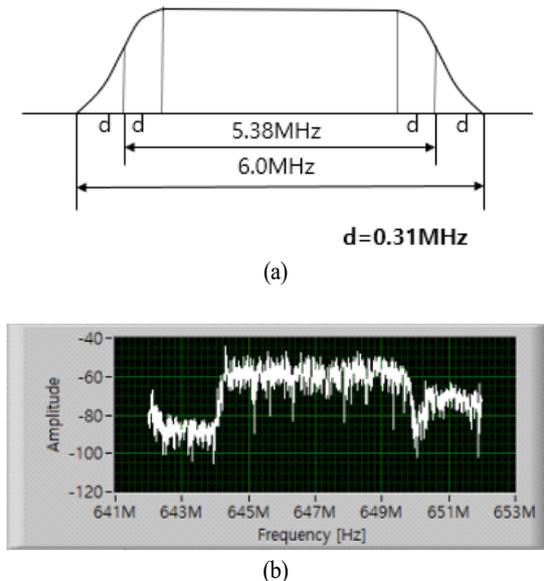


그림 1. (a) VSB 채널 대역, (b) 실제 수신된 계양산 중계기 MBC 방송 대역
 Fig. 1. (a) VSB channel spectrum example, (b) Measured spectrum of MBC channel transmitted from Gyeongang tower.

다^[10].

그림 1(a)는 ATSC의 VSB 채널 대역의 보호 영역에 대한 이론적 점유 대역폭을 보여준다. 국내에서는 방송국마다 동일한 대역의 채널을 사용하는 데, 본 연구에서는 범용 전파 수신기를 통해 신호를 수신하였다. 그림 1(b)는 계양산에 위치한 중계기에서 송출한 MBC 방송 채널을 수신한 결과이며, 647 MHz의 반송파를 중심으로 그림 1(a)와 유사한 형태의 대역 신호가 사용됨을 확인할 수 있다. 이를 다른 방송국 대역 신호와 융합할 경우, 더욱 확장된 대역 신호를 사용할 수 있고, 이는 거리 해상도의 향상 효과로 이어질 것이다.

2-2 수동형 레이더 시스템 구조

수동형 레이더를 구성할 때 각 채널 간의 신호 분리를 위해 지향성 배열 안테나를 사용할 경우, 시스템 구성이 복잡하고 운용이 어려워진다. 본 논문에서는 드론과 같은 표적이 DTV 방송국과 겹치지

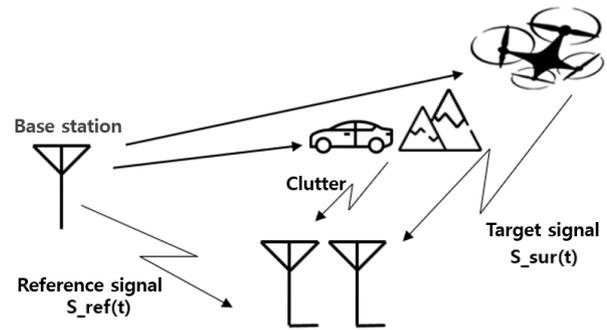


그림 2. 수동형 레이더 드론 탐지 구성도
 Fig. 2. Passive radar drone detection diagram.

않는 방향에 존재한다는 제한된 시나리오를 가정하여 실험을 수행하였다. 이를 바탕으로 방송국 중계기와 이동 표적으로부터 반사된 신호를 수신하고, 수동형 레이더 탐지 알고리즘을 설계하였다. 그림 2는 구축된 수동형 레이더 시스템의 운용 환경을 보인다. 방송국 중계기로부터 전송되는 기준 신호와 표적에서 반사된 신호를 각각 서로 다른 채널로 분리하여 수신하고, 이를 PC 기반의 신호처리 알고리즘에 입력하여 표적을 탐지한다^[11].

각 수신기는 고지향성의 야기안테나, LNA(low noise amplifier), 아날로그-디지털 변환기 및 데이터 저장 장치로 구성된다. 드론과 같은 저피탐 표적의 경우 반사파 강도가 미약하기 때문에 추가적인 LNA를 장착하여 수신 감도를 개선한다. DTV 송신파를 직접 수신하는 채널과 표적 반사파를 수신하는 채널 간의 동기화를 유지하기 위해 별도의 동기 신호를 사용한다.

2-3 표적 탐지 성능 분석

송신소의 송출 신호는 다양한 경로를 통해 레이더의 수신기에 도달한다. 실제 수동형 레이더 모델에서는 두 개의 채널 경로만을 고려한다. 첫째는 송신탑에서 레이더로의 기준 신호이고, 둘째는 표적에서 반사되어 수신되는 표적 신호이다. 직접 경로에서 오는 기준 신호의 시간 지연 t_r 과 표적 신호의 시간 지연 t_d 의 차이 $\tau = t_r - t_d$ 에 의해 표적의 거리

를 유추할 수 있다. 이때 시간 지연 차 τ 에 의해 발생하는 거리값 $\tau \times c$ 를 바이스태틱 거리라고 한다.

수동형 레이더의 수신기에 도달하는 채널의 전체 신호 $r(t)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$r(t) = \sum_{i=1}^M s_r(t - \tau_i) + \sum_{k=1}^N s_t(t - \tau_k) e^{j2\pi ft} + \eta(t) \quad (1)$$

여기서 $s_r(t)$ 는 송신기에서 오는 직접 신호로서 시스템의 기준(reference)이 되고, $s_t(t - \tau)$ 는 표적(target)에서 반사된 신호이며, τ_i 는 i 번째의 전파 경로를 갖는 다중 반사 신호의 전파 지연 시간이다. 본 실험에서는 비도심의 열린 공간에서 비행하는 표적만을 고려하므로 편의상 다중 반사 신호를 무시하고, 직접 신호만을 고려하여 $M=1$ 로 가정한다. N 은 표적의 개수이며 τ_k 는 k 번째 표적의 시간 지연이다. $\eta(t)$ 는 열잡음을 포함한 클러터 신호이다.

레이더 신호에 적용하는 모호성 함수는 두 펄스 간의 유사도를 분석하여 시간 및 주파수 영역에서 해상도를 파악하고, 레이더 파형의 고유 특성을 측정하는 척도로 사용된다. 식 (1)에서의 기준 신호와 표적 신호를 각각 분리하여 저장한 후 상호 상관함수 $X(\tau, f)$ 를 생성하여 표적 탐지를 수행할 수 있다. 수동형 레이더 시스템에서는 수신파에서의 표적 탐지를 위해 식 (1)에서의 기준 신호와 표적 신호의 상호 유사도를 다음과 같은 모호성 함수로 분석한다^[12].

$$\sum_{k=1}^N X(\tau_k, f) = \int_{-\infty}^{\infty} s_r(t) \sum_{k=1}^N s_t^*(t - \tau_k) e^{j2\pi ft} dt \quad (2)$$

모호성 함수는 표적과 기준신호의 상호 상관도만을 평가하므로 잡음 함수인 $\eta(t)$ 는 생략하였다. 단일 표적을 대상으로 하는 실험에서는 $N=1$ 로 단순화된다.

모호성 함수는 두 신호 간의 유사도를 보여주면서 동시에 표적이 탐지되는 거리와 도플러 정보를 제공한다. 이때 거리 해상도는 신호의 대역폭에 의

해 결정되며, 다음 식 (3)과 같이 결정된다.

$$\Delta R = \frac{c}{2B} \quad (3)$$

여기서 c 는 빛의 속도이고, B 는 수신 채널의 대역폭이다. 본 논문에서는 국내 방송국의 단일 채널에 대한 DTV 신호를 사용하였으며, 이때 거리 해상도는 약 50 m가 된다.

표적의 도플러 편이인 Δf 는 신호의 주파수 f_c 와 표적과의 상대 속도 v 에 따라 달라지며, 다음과 같이 표시된다.

$$\Delta f = \frac{2v}{c} * f_c \quad (4)$$

모호성 함수에 의한 표적 식별 성능은 표적 신호 대비 기저 부엽 신호의 최대 상호비(PSLR: peak-to-sidelobe ratio)로 판별할 수 있다^[13].

그림 3은 수동형 레이더 시스템의 신호처리 과정을 보여주며, 중계기의 기준 신호와 표적에서 반사된 표적 신호를 수신하여 상호상관을 통한 표적의 데이터를 얻는다.

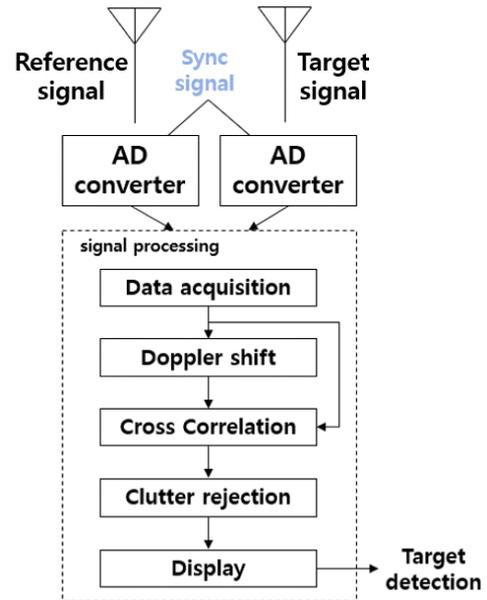


그림 3. DTV 수동형 레이더 표적 탐지 과정
Fig. 3. Target detection flow of DTV passive radar.

RF 수신기로는 기준 신호와 표적 신호의 디지털 저장을 위해 National Instrument사의 SDR(software defined radio) 기반 USRP-2920 기기를 사용하였다. 수신기에 2개의 수신 채널에서 자체적인 동기화를 통해 디지털로 변환 후 PC로 전송한다. 전송된 데이터는 PC에서 Labview를 통해 저장후 매트랩 기반의 시간-도플러 분석 소프트웨어를 구현하여 이동 표적을 추출하였다. 기준 신호인 방송국 TV 신호와 표적 반사 신호와의 패턴에 의한 유사성만을 판별하므로 수신단에서는 TV 신호 정보를 추출할 필요 없이 오직 크기와 위상 정보만을 활용한다.

그림 4는 실제로 측정된 DTV 신호로부터 모호성 함수를 추출한 것으로, 표적이 이동하지 않는 일반적인 상황에서 대부분의 표적인 도플러가 없는 속도 0의 영역에서 거리에서 따라 분포되어 나타난다. 이러한 방식으로 표적의 거리와 속도에 따른 구분이 가능하여 표적 탐지와 식별을 수행할 수 있다^[14].

일반적으로 드론에서 반사되는 신호는 매우 미약하나, 본 논문에서 가정한 비도심의 열린 공간에서는 공중에서의 클러터 잡음이 매우 낮아지므로 탐지 확률은 지상 표적에 비해 높아진다. 표적에서 반사된 신호는 송신기 및 수신기의 상호 배치 및 동작 주파수 등으로 결정되는 특성 함수이다. 수신단에서 검출되는 표적 신호의 강도는 다음과 같은 레이더 방정식에 의해 주어진다^[15].

$$r(t) = \left| \frac{P_t G_t \sigma G_r \lambda^2}{(4\pi)^3 R_t^2 R_r^2} \right| \quad (5)$$

여기서 P_t 는 송신출력, G_t 는 송신안테나의 이득, G_r 는 수신 안테나의 이득, σ 는 대상의 RCS(radar cross section), R_t 는 송신기와 표적 사이의 거리이며, R_r 은 표적과 레이더 사이의 거리이다. 이와 같은 상호 관계식을 이용하여 표적의 RCS에 따른 최대 탐지거리를 유추할 수 있다.

2-4 이동 표적 탐지 모의실험

DTV 신호를 기반으로 한 수동형 레이더의 성능을 예측할 수 있는 모의실험을 수행하였다. 알려진 반사도를 갖는 항공기를 가정하였으며, 시나리오에 사용된 변수는 표 1과 같다. 레이더와 방송 기지국 사이의 상공에서 속도 450 km/h로 이동하는 항공기에 대해 DTV 신호를 사용할 경우를 가정하여 모의 실험을 수행하였다. 항공기는 표적 반사도가 15 dBsm인 A320을 가정하였고, DTV 신호는 그림 4와 같다.

바이스태틱 거리는 기준 신호와 표적 반사 신호 경로의 차이이며, 그림 5(a)와 같은 구조에서 $b+c-a$ 로 계산된다. 표적은 방송국의 출력 범위 안에 있다고 가정하고, 도플러 효과를 최대화하기 위해 표적, 안테나, 송신소가 일직선상에 되도록 표적-기지국-레이더 경로의 사이각 θ 를 0으로 설정하였다. 표적과 실험 안테나 사이의 거리 c 가 6 km가 되는 지점에서의 바이스태틱 거리는 12 km이다. 이 지점에서 비행기가 이륙하여 멀어지는 10초 동안의 전파를 수신하는 모의 실험을 수행하였으며, 그림 5(b)는 그 결과를 거리-도플러 맵 영상으로 보인다. DTV 신호의 대역폭을 6 MHz로 가정하면 거리 해

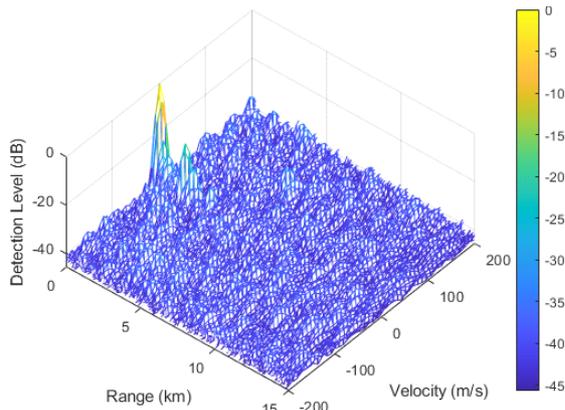


그림 4. DTV 신호를 이용한 모호성
Fig. 4. Ambiguity function of DTV signal.

표 1. 항공기 표적 탐지 모의 실험 환경

Table 1. Simulation model for aircraft target detection.

Distance to target	6 km
Target speed	450 km/h
RCS	15 dBsm

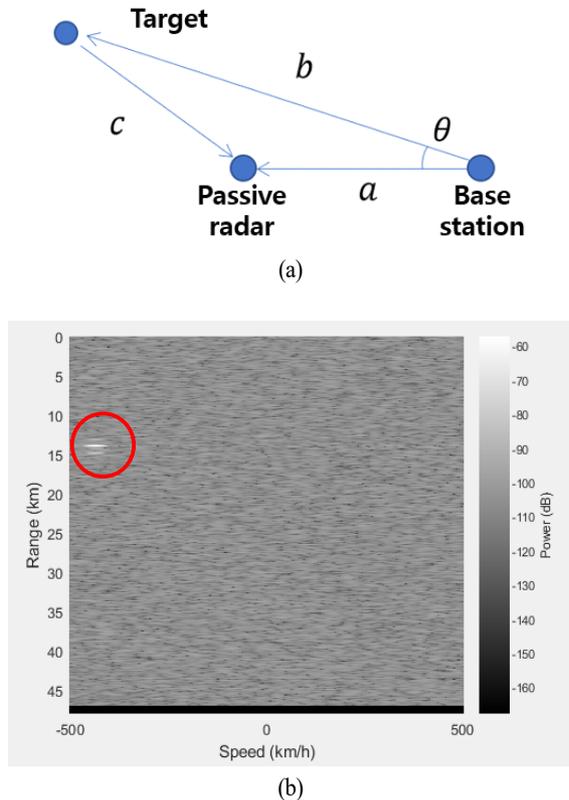


그림 5. (a) 모의실험 시나리오, (b)거리-도플러 맵 영상에서 항공기 표적 검출 모의실험
 Fig. 5. (a) Simulation geometry scenario, (b) Range-Doppler map simulation for airborne target detection.

상도는 50 m이다. 속도는 수신 신호의 도플러 편이에서 추출되는데, 수신 안테나와 표적 비행기의 상대 각도에 따라 변한다. 수행된 모의 실험에서는 편의상 비행기와 수신기가 일직선에 있다고 가정하였으므로 450 km/h의 속도값이 정확하게 추출되었다. 바이스태틱 거리는 표적 속도 450 km인 y축을 따라 수집된다. 초기 관찰 시점인 12 km에서 10초 동안 비행기는 1.25 km만큼 이동하여 $2 \times 1.25 = 2.5$ km만큼의 바이스태틱 거리 증가로 나타난다. 그림 5(b)를 보면 $12 + 2.5 = 14.5$ km 지점에서 표적 신호가 정확하게 검출됨을 볼 수 있다.

영상에서 잡음의 평균은 -110.6 dB가 나오며, 표적의 신호는 -55 dB가 나왔다. 이는 실제 경로 손실 및 안테나 빔 조향 손실 등을 제외한 이상적인

결과이며, 실제로는 시스템 손실 및 클러터 잡음에 의해 잡음이 증가되어 표적 탐지 성능은 저하될 수 있으나, 비행기 표적 탐지에는 충분한 마진이 있음을 알 수 있다.

III. 표적 탐지 실험 및 분석

3-1 실험 개요

그림 3에서 표현된 하드웨어 블록을 실제 시스템으로 구성한 후, 항공기 표적을 대상으로 실험을 수행하였다. 앞서 수행한 DTV 기반 표적 탐지 모의실험 결과를 검증하기 위해 김포공항 부근에서 운행하는 대형 비행기를 대상 표적으로 선정하였다. 기준 신호와 표적 신호 간의 상호 간섭을 최소화하기 위해 기준 신호는 남산 중계기에서 송출되는 신호를 사용하였고, 표적 비행기는 반대 방향에 위치하도록 실험장소를 선정하였다. 이에 따른 실험장소와 방송 중계기와의 상호 지형을 그림 6에서 보인다. 수동형 수신기는 기준 신호를 송출하는 남산 송신소로부터 20 km 떨어져 있다. 실험에서 사용된 기준 신호는 남산 송신소에서 송출되는 KBS1(659 MHz) 채널 대역에 위치한다. 표적 항공기, 송신기 및 수신기의 위치는 모의실험에서와 유사하도록 배치하였다.

그림 7은 김포공항에 착륙하는 항공기를 대상으로 실험을 수행하는 과정을 포착한 것이다. 표 2는 실험에 사용된 변수를 보여주는데, 남산에서 송출



그림 6. 실험장소 및 송수신기 위치
 Fig. 6. Experiment site and transceiver location.



그림 7. DTV 기반 수동형 레이더 시스템 구현
Fig. 7. DTV based passive radar system implement.

표 2. 실험 환경

Table 2. Experimental parameters.

Parameter	Value
Sampling frequency	8 MHz
Carrier frequency	659 MHz
Transmit power	4 kW
Distance to transmitter	20 km
Receiver antenna gain	15 dBi

된 신호의 출력은 4 kW이고, 신호 수집을 위한 수신단 안테나의 이득은 15 dBi이다. 사용된 데이터의 수집 구간은 1.25초이고, 해당 구간에서의 데이터 샘플 수는 10^7 개이다. 범용 수신기에서 수집된 아날로그 신호는 A/D 변환 샘플링 후 기가 비트 이더넷을 통해 PC로 전송된다. PC에서 구동되는 신호 수집 소프트웨어는 각각의 신호 샘플을 저장하고, 상호상관 식에 기반한 모호성 함수를 계산하여 그림 5와 같은 표적 탐지 결과를 추출한다.

김포공항에서의 이착륙 비행기들의 항로는 비교적 일정하여 일관된 실험 시나리오를 반복할 수 있다. 이륙하는 비행기의 경우 육안상으로 비행기가 역마산을 넘어가기 전 신호를 수집하였다. 그림 8은 실제 이륙하는 항공기의 사진을 보인다. 실험 장소와 역마산까지의 거리는 1.25 km로 바이스태틱 거리로는 약 2.5km에 해당된다. 비행기의 경로와

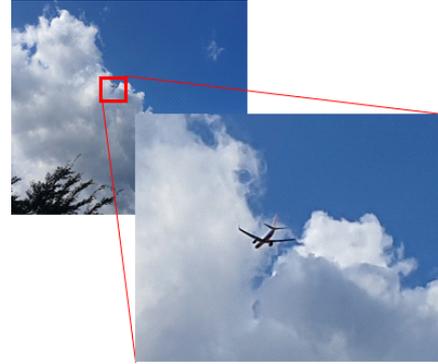


그림 8. 김포공항에서 이륙하는 항공기 표적 촬영 사진
Fig. 8. Target airplane flying away from Gimpo airport.

기종 및 속도와 고도는 flight radar 24 사이트 정보를 활용하였는데, 실험 대상 항공기의 경우, 고도 500~700 m에서 280~320 km/h의 속도로 비행하는 것으로 예측되었다.

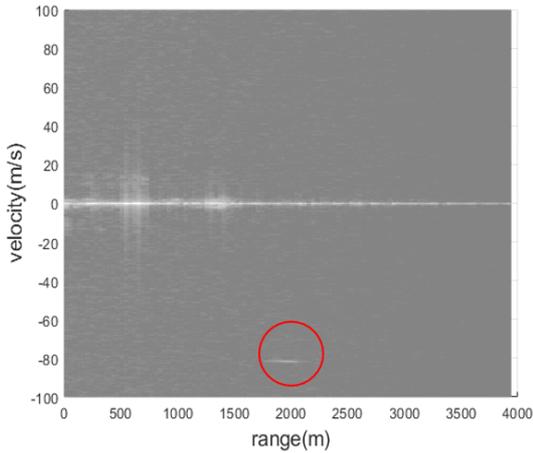
3-2 거리-도플러 정보 추출

거리-도플러 맵 영상은 수동형 레이더에서의 표적과의 거리와 도플러 편이 정보를 2차원으로 보여준다. 앞 절에서 실제 비행기 표적에 대해 수집한 수동형 레이더 수신 신호를 취합 분석한 후, 거리-도플러 영상을 생성하여 표적 추출을 수행하였다.

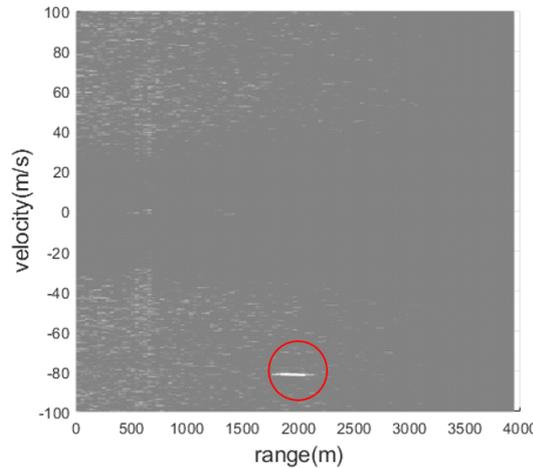
그림 9는 착륙하면서 가까워지는 비행기에 대한 실험 결과이며, 그림 10은 반대로 이륙하면서 멀어지는 비행기에 대해 수행한 결과이다.

그림 9에서 원 내부에 검출된 표적은 세로축에서 70 m/s의 속도로 접근하고 있는 비행기가 포착됨을 보여준다. 가로축으로 보여지는 탐지 거리 2 km는 표적 신호와 기준 신호와의 경로 지연으로 계산된다. 그림 6에서 보이듯 레이더 수신기와 중계기 및 표적 비행기가 일직선으로 놓여 있지 않기 때문에 상호 각도에 의한 지연 거리 및 추정 속도가 감소하였다.

그림 10은 동일한 실험을 김포공항으로 이륙하며 멀어지는 비행기에 대해서 수행한 결과이다. 3 km의 지연 거리에서 약 60 m/s로 속도의 다가오는 표적이 명확하게 탐지되어 보여진다. 착륙하는 비행



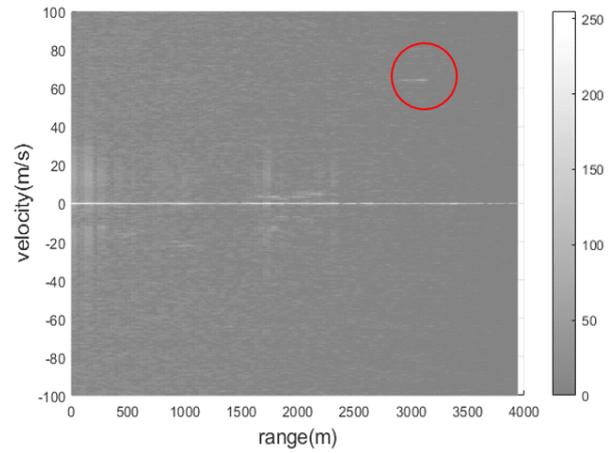
(a) 클러터 영향 포함
(a) With clutter



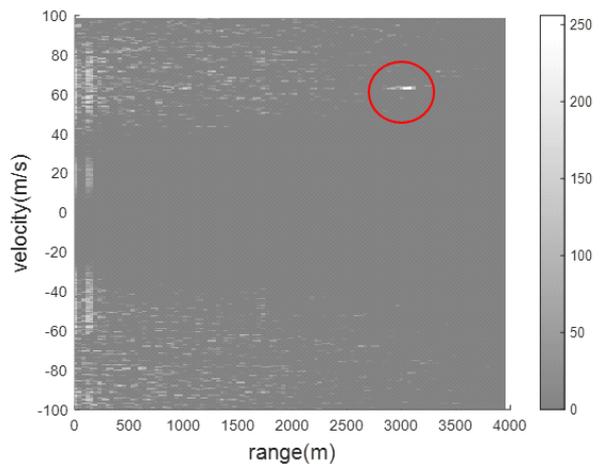
(b) 클러터 제거 후
(b) After clutter rejection

그림 9. 접근하는 비행기에 대한 거리-도플러 함수
Fig. 9. Range-Doppler function for approaching aircraft target.

기는 이륙하는 비행기에 비해 수신기와 상대 각이 더욱 넓어져서 실제보다 더 낮은 속도로 검출된다. 비행기의 고도가 비교적 낮아 지상 클러터 성분이 DC 주파수 영역에서 강하게 탐지된다. 특히 해당 위치에 고속도로가 있어 이동하는 자동차들에 의한 반사 신호가 유입된 것으로 추정된다. 그림 9(a)와 그림 10(a)를 보면 근거리에서 속도 10 m/s (36 km/h)로 이동하는 표적들이 포착되는데, 중계기



(a) 클러터 영향 포함
(a) With clutter



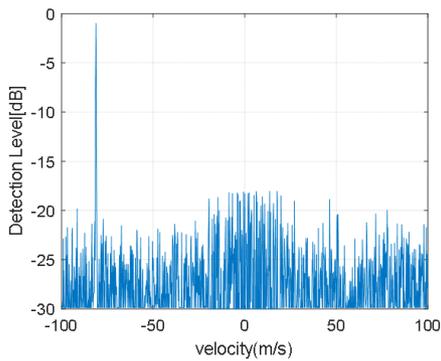
(b) 클러터 제거 후
(b) After clutter rejection

그림 10. 멀어지는 비행기에 대한 거리-도플러 함수
Fig. 10. Range-Doppler function for outbounding aircraft target.

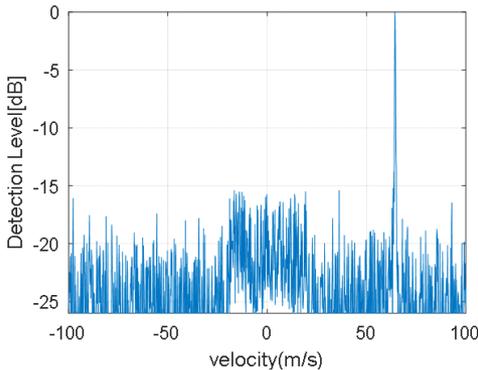
와의 상호 각도를 반영하면 실제 속도는 20 m/s 이상일 것으로 예측되며 이는 일반 도로의 자동차들에서 반사된 것으로 추정할 수 있다. 같은 방식을 적용하면 항공기는 약 80 m/s의 속도로 이착륙하고 있음을 알 수 있고, 이는 실제 항공기의 속도와 일치한다. 따라서 본 논문의 DTV 수동형 레이다가 성공적으로 실제 표적 정보를 추출하였음을 알 수 있다.

앞서 설명한 대로 세로축으로 속도 0인 부근의 신호들은 지상에서 낮은 속도로 이동하거나 고정 지형물들에서 반사된 신호이며, 고속으로 이동하는 표적을 추적하는 본 실험에서는 클러터에 해당된다. 따라서 탐지 성능을 개선하기 위해 낮은 도플러 주파수 영역에 대해 저대역 억제 필터를 적용하여 클러터 제거 알고리즘을 구현할 수 있다. 추가적으로 표적 검출 신호의 역치를 조절하여 잡음 신호를 제거하면 그림 9(b) 및 그림 10(b)과 같이 비행기 표적 정보만을 검출할 수 있다.

본 수동형 레이더 시스템의 표적 탐지 성능을 분석하기 위해 비행기 표적 검출 신호의 도플러 정보를 속도로 환산하여 그림 11에 1차원으로 도시하였다.



(a) 착륙 비행기
(a) Landing airplane



(b) 이륙 비행기
(b) Flying away airplane

그림 11. 표적의 상대 속도에 따른 표적 검출 레벨
Fig. 11. Target detection level along Doppler velocity.

다. 그림 11(a)와 그림 11(b)는 각각 착륙과 이륙하는 비행기의 탐지 신호 레벨을 속도 축으로 보인다. 클러터 대비 표적 신호 레벨이 약 16 dB 이상으로 강하게 검출되어 상대적으로 높은 신호 대 클러터 비로 보인다. 이를 식 (5)에서 제시한 수동형 레이더 방정식에 대입하면, 동일한 항공기 표적에 대해 최대 탐지 거리가 약 15 km로 얻어진다. 실제로는 DTV 안테나의 고도 지향각이 제한되어 이보다는 탐지 거리가 짧아질 것이다.

3-3 드론 탐지 측정

항공기를 대상으로 한 실험을 확장하여 실제 드론을 비행시킨 후 수동형 레이더 방식으로 표적 탐지 실험을 수행하였다. 매우 낮은 반사도를 갖는 실제 상업용 드론을 실제 이동시키면서 수동형 레이더를 운용하였다. 안전한 실험을 위해 실험장소는 한국항공대학교 활주로로 제한하였다. 일관된 결과를 얻기 위해 드론 경로에 대한 웨이포인트(waypoint)를 설정하여 드론을 이동시키는 방식으로 실험을 진행하였다. 그림 12는 한국항공대학교에서 수행하는 실험 장면을 보여준다. 실제 비행하는 드론을 향하는 탐지 안테나와 방송 중계기를 지향하는 안테나가 서로 반대 방향이 되도록 설치되었고, 실시간으로 수신 데이터를 분석할 수 있도록 PC를 연결하였다.



그림 12. 비행하는 드론을 탐지하기 위한 DTV 기반 수동형 레이더 실험
Fig. 12. Experiment setup for flying drone detection based on DTV passive radar system.

기준 신호는 항공기 실험과 동일하게 남산 중계기에서 송출되는 DTV 신호를 사용하였다. 드론의 이동 속도는 초속 5 m로 설정하였고 표적 신호에 대한 데이터 수집 구간은 1.5초였다.

그림 13(a)는 실험적으로 획득된 드론 탐지 신호에 대한 거리-도플러 영상을 보여준다. 약 100 m 거리에서 표적이 5 m/s로 이동하고 있는 정보가 도시됨을 알 수 있다. 그림 13(b)는 드론의 실제 이동 속도를 정밀 분석하기 위해 드론에 반사된 DTV 탐지 신호에 대한 도플러 속도 분석 결과를 보인다.

드론 표적 신호가 5 m/s인 위치에서 13.5 dB의 신호 대 클러터 비로 검출됨을 보여준다. 이를 수동형 레이더 시스템 적용 시나리오에 적용하면 본 논문에서 구현된 DTV 기반의 수동형 레이더 시스템은 이상적인 조건에서 약 1 km의 바이스테틱 거리에 있는 상업용 드론을 탐지하면서 동시에 속도 정보

를 확보하여 검출 정확도를 높일 수 있을 것으로 예측된다.

IV. 결 론

본 논문에서는 DTV 신호를 이용한 수동형 멀티스태틱 레이더 시스템 구현 및 드론 탐지 가능성을 실험적으로 제시하였다.

최근 드론에 의한 사회 간접 시설의 피해가 늘어나는 문제에 대응하기 위해, 국제적 드론 탐지 연구가 수동형 레이더로 확장되고 있는 상황에서, 본 연구는 실제 실험을 통해 DTV 기반의 수동형 레이더 시스템의 구축 가능성을 제시하고, 성능을 예측할 수 있는 결과를 제시하였다.

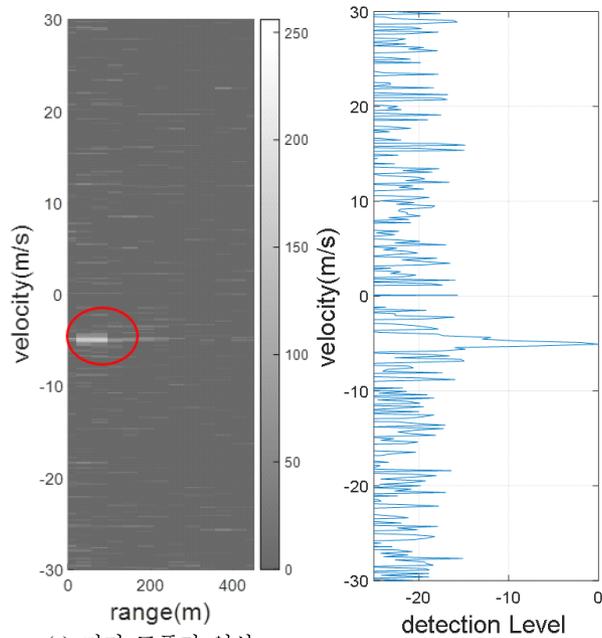
모의실험을 통해 수동형 레이더 알고리즘을 구현하고, 실제 실험을 통해 기존 국내 DTV 신호의 수신만으로 실제 비행하는 표적을 탐지하고, 이동 속도 정보를 추출할 수 있음을 보였다. 비교적 반사도가 높은 항공기에 대한 실험을 통해 알고리즘을 검증한 후, 동일 실험을 드론에 대해 반복적으로 수행하여 신뢰도를 확보하였다.

공공 자원인 디지털 방송 신호만을 사용하는 저비용의 수동형 레이더를 활용하면 실제 비행하는 드론을 수백m 이상의 거리에서 포착할 수 있음을 검증하였다. 이를 확장하면 기존 고비용의 능동 레이더 시스템 적용이 어려운 도심에서도 드론 출현에 대응할 수 있는 광범위한 감시망을 구축할 수 있을 것으로 기대된다.

향후 수신기의 대역폭을 증가시켜 단일 채널이 아닌 DTV 다채널을 모두 활용할 경우, 높은 해상도와 정밀도를 갖는 수동형 레이더가 구현되어 광역 표적 감시망을 구축할 수 있을 것으로 기대된다.

References

[1] X. Zhang, K. Chandramouli, "Critical infrastructure security against drone attacks using visual analytics," in *International Conference on Computer Vision Systems*, Thessaloniki, Nov. 2019, pp. 713-722.



(a) 거리 도플러 영상
(a) Range-Doppler map
(b) 드론 표적의 속도 추출
(b) Velocity estimation of flying drone target

그림 13. DTV 수동형 레이더에서 추출된 드론 표적의 거리 도플러 영상
Fig. 13. Range-Doppler map for flying drone target from DTV passive radar.

- [2] G. Ding, Q. Wu, L. Zhang, Y. Lin, T. A. Tsiftsis, and Y. Yao, "An amateur drone surveillance system based on the cognitive internet of things," *IEEE Communications Magazine*, vol. 56, no. 1, pp. 29-35, Jan. 2018.
- [3] G. Fang, J. Yi, X. Wan, Y. Liu, and H. Ke, "Experimental research of multistatic passive radar with a single antenna for drone detection," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 33542-33551, Jun. 2018.
- [4] T. Petó, L. Dudás, and R. Seller, "DVB-T based passive radar," in *2014 24th International Conference Radioelektronika*, Bratislava, Apr. 2014, pp. 1-4.
- [5] H. D. Griffiths, C. J. Baker, "Passive coherent location radar systems. Part 1: Performance prediction," *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, vol. 152, no. 3, pp. 153-159, Jun. 2005.
- [6] T. Petó, L. Dudás, R. Seller, and P. Renner, "Digital television broadcast-based passive radar research and development," in *2014 20th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications(MIKON)*, Gdansk, Jun. 2014, pp. 1-4.
- [7] J. L. Garry, G. E. Smith, and C. J. Baker, "Wideband DTV passive ISAR system design," in *2015 IEEE Radar Conference(RadarCon)*, Arlington, VA, May 2015, pp. 834-839.
- [8] G. Fang, J. Yi, X. Wan, Y. Liu, and H. Ke, "Experimental research of multistatic passive radar with a single antenna for drone detection," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 33542-33551, Jun. 2018.
- [9] G. H. Park, S. Y. Son, and H. N. Kim, "Implementation of FM-broadcasting-based passive radar and analysis of target detection results," *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences*, vol. 44, no. 6, pp. 1201-1209, Apr. 2019.
- [10] J. L. Garry, C. J. Baker, and G. E. Smith, "Evaluation of direct signal suppression for passive radar," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 55, no. 7, pp. 3786-3799, Jul. 2017.
- [11] T. Martelli, F. Colone, E. Tilli, and A. Di Lallo, "Multi-frequency target detection techniques for DVB-T based passive radar sensors," *Sensors*, vol. 16, no. 10, p. 1594, Jul. 2016.
- [12] D. Gromek, K. Kulpa, and P. Sameczyński, "Experimental results of passive SAR imaging using DVB-T illuminators of opportunity," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 13, no. 8, pp. 1124-1128, Aug. 2016.
- [13] F. Canini, A. Di Lallo, L. Timmoneri, and D. Vigilante, "Use of digital-television terrestrial(DTV) signals for passive radars," in *11-th International Radar Symposium*, Vilnius, Jun. 2010, pp. 1-4.
- [14] R. Saini, M. Cherniakov, "DTV signal ambiguity function analysis for radar application," *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, vol. 152, no. 3 pp. 133-142, Jun. 2005.
- [15] M. Radmard, F. Behnia, and M. Bastani, "Cross ambiguity function analysis of the '8k-mode' DVB-T for passive radar application," in *2010 IEEE Radar Conference*, Washington, DC, May 2010, pp. 242-246.

천 형 일 [한국항공대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0000-0003-4134-4144>



2019년 2월: 목원대학교 정보통신공학과 (공학사)
2019년 3월 ~ 현재: 한국항공대학교 전자 및 항공전자공학과 석사과정
[주 관심분야] 레이더 신호처리

문 민 정 [한국항공대학교/석사]

<https://orcid.org/0000-0002-3234-6191>



2016년 2월: 한서대학교 항공전자공학과 (공학사)
2019년 2월: 한국항공대학교 항공전자정보공학과 (공학석사)
[주 관심분야] SAR 신호처리, SAR 원격 탐사, 위성전자 레이더 탑재체

이 새 미 [한국항공대학교/학사과정]

<https://orcid.org/0000-0003-0110-3039>



2020년 08월: 한국항공대학교 전자 및 항공 전자공학과 학사과정
[주 관심분야] 위성전자 레이더 탑재체, SAR 신호처리

이 우 경 [한국항공대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0003-2092-2048>



1994년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자 공학과(공학사)
1996년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자 공학과(공학석사)
1999년 12월: 런던대학교(UCL) 전기전자 공학과(공학박사)
한국과학기술원 인공위성센터 연구교수, 삼성중합기술원 책임연구원
2004년 9월 ~ 현재: 한국항공대학교 항공전자정보공학과 교수
[주 관심분야] 위성탑재체, SAR 영상, 레이더 시스템 및 신호 처리

이 상 민 [한국항공대학교/학사과정]

<https://orcid.org/0000-0001-6915-9683>



2020년 02월: 한국항공대학교 전자 및 항공 전자공학과 학사과정
[주 관심분야] 위성전자 레이더 탑재체, SAR 신호처리

이 훈 [한국전자통신연구원/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-3597-0501>



2000년 8월: 연세대학교 전파공학과(공학사)
2002년 8월: 광주과학기술원 기전공학부 (공학석사)
2011년 2월: 광주과학기술원 정보기전공학부(공학박사)
삼성중합기술원, 밀리시스, 삼성탈레스 연구원
2011년 12월 ~ 현재: 한국전자통신연구원 부설연구소 책임연구원
[주 관심분야] 전자파 보안, 센서 시스템, 레이더 시스템