

근거리 이동 표적 Video SAR 영상 생성을 위한 압축센싱 기반 지상 이동 표적 탐지 기법

Compressive Sensing-Based Ground Moving Target Detection Technique for Near-Field Moving Target Video SAR

반인모 · 문민정 · 천형일 · 조휘정 · 이석원 · 이명진 · 이우경

In-Mo Ban · Min-Jeong Moon · Hyun-Il Chun · Hwi-jeong Jo ·
Seok Won Lee · Myeong-jin Lee · Woo-Kyung Lee

요 약

Video SAR는 날씨 및 주·야간에 구애받지 않고 관심 지역 및 표적에 대한 지속적인 관측을 통해 관심 지역의 변화 및 표적의 이동 경로를 파악할 수 있다. 최근 도심지와 같이 관심 지역의 복잡도가 증가함에 따라 드론을 Video SAR의 탑재체로 활용하는 연구가 이루어지고 있다. 기존 플랫폼인 위성은 다중 안테나를 통한 정보를 이용하며, 표적과 플랫폼 사이의 거리가 충분히 멀어 표적의 속도를 근사화해 이동 표적을 탐지할 수 있었다. 그러나 드론은 표적과의 거리가 가까워 속도를 근사화할 수 없을 뿐 아니라, 탑재 무게의 한계가 있어 다중 안테나 사용에도 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 단일 안테나를 탑재한 근거리 플랫폼에서 압축 센싱 기법을 통해 이동 표적을 탐지하는 과정을 연구한다. 최종적으로 모의 실험과 실제 데이터를 통해 압축 센싱을 통한 이동 표적의 Video SAR 영상 처리가 가능함을 검증한다.

Abstract

Video SAR can identify changes in the region of interest and the path of targets through continuous observation of the region of interest and targets irrespective of the weather and day or night. Recently, as the complexity of the region of interest, such as urban areas, has increased, research is being conducted to use drones as payloads for video SAR. The satellite, an existing platform, uses information through multiple antennas, and the distance between the target and the platform is sufficiently far to approximate the speed of the target to detect the moving target. However, the drones cannot approximate the target speed owing to the close distance to the target, and there is a limitation in the payload weight; hence, it is difficult to use multiple antennas. Therefore, this study investigates the process of detecting a moving target using a compressive sensing technique on a short-range platform equipped with a single antenna. Finally, through simulation and real data, it was verified that the video SAR image processing of a moving target based on compression sensing was possible.

Key words: Video SAR, Compressive Sensing, Near-Field Platform, GMTI

「이 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 ‘차세대 SAR 특화실’ 사업의 지원으로 수행되었음.」

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

· Manuscript received October 27, 2021 ; Revised November 12, 2021 ; Accepted December 6, 2021. (ID No. 20211027-098)

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

I. 서 론

최근 드론은 이동성, 배치 및 고도의 자율성의 이유로 감시, 국방, 재난 방지 등 다양한 용도로 광범위하게 사용된다. 특히, 국방, 감시, 재난 방지의 용도로 드론은 합성 개구 레이더(synthetic aperture radar : SAR)의 탑재체로 활용되며, 연구가 활발히 이루어지고 있다^{[1]~[3]}. SAR는 주·야간, 날씨 등에 영향을 받지 않고, 레이더와 장면 간의 상대적인 움직임을 통해 영상을 구현할 수 있는 전파 기술이다. SAR 시스템은 탐지 거리와 파수 등의 요인으로 합성 개구 관측 구간 동안 정보를 축적해야 하므로 영상을 형성하는데 많은 시간이 필요하다. 이에 따라 관심 지역 및 물체에 대한 지속적인 관찰이 어렵고 순간적인 영상 정보만을 제공하므로 표적의 변화 및 이동 경로 등을 파악하는데 한계가 있다. 비디오 SAR는 이러한 SAR의 한계점을 극복하고 연속된 영상을 획득하여 이동 표적을 관측할 수 있는 기술로서 최근 관련 연구가 활발해지고 있다^{[4]~[7]}.

기존의 정지 표적에 대한 SAR 영상은 거리 및 방위 방향에 해당하는 펄스 압축만을 수행했기 때문에 이동하는 표적을 관측할 경우, 영상 형성에서 오차가 발생하여 번짐(blurring) 현상을 야기하고, 표적 식별을 어렵게 하는 문제를 유발하게 된다. 비디오 SAR는 관심 지역·표적에 대한 지속적인 관측을 통해 연속적인 다중 SAR 프레임들을 형성하고, 각 프레임을 비디오 형식으로 나타내는 기술이다. 연속적인 영상을 통한 비디오 SAR는 장면의 변화 및 표적의 이동 경로 등을 실시간 파악하여 기존 SAR 영상의 한계점을 극복할 수 있다.

지상의 이동 표적을 탐지하는 SAR 플랫폼은 주로 표적의 이동에 따라 수신 신호에서 발생하는 도플러 정보를 활용한다. 기존 위성 플랫폼의 경우, 다중 안테나를 이용한 다중 채널 위상차를 이용해 표적의 이동 경로를 추적한다. 이러한 방법은 표적의 속도 크기나 이동 방향에 따라 정확도가 달라지고, 신호 처리가 복잡해지는 경향이 있다.

플랫폼과 표적 사이의 거리가 멀고, 표적의 속도가 낮은 시나리오에서는 원시 데이터를 처리할 때 표적 속도를 상수로 근사화해 적용할 수 있다. 그러나 항공기, 드론

과 같이 플랫폼이 근거리일 경우, 시간에 따른 표적의 이동 속도 변화량이 비교적 크기 때문에 근사화할 수 없고, 샘플링 간격 또한 불규칙한 문제를 발생시킨다. 따라서 근거리 플랫폼 비디오 SAR에서 이동하는 표적 관측을 위해서는 플랫폼 특성에 맞는 이동 표적 초점(focusing) 알고리즘 개발이 필요하다.

기존의 SAR는 이동하는 표적에 대한 초점을 맞추기 위해 지상 이동 표적 탐지(ground moving target indication : GMTI) 기법을 적용한다. 대표적인 GMTI 기법으로는 Displaced Phase Center Antenna(DPCA), Along Track Interferometry(ATI), Space-Time Adaptive Processing (STAP) 알고리즘이 존재한다. DPCA와 ATI는 다중 송수신 채널에서 얻어진 복수의 SAR 영상을 통해 2개의 안테나를 통해 SAR 영상을 형성하고, 클러터 억제 기술을 적용해 이동 표적과 정지 표적을 분리하는 기법이다. DPCA 기법은 각 채널로부터 얻어진 SAR 영상의 위상 차를 통해 이동 표적을 탐지하고, ATI는 각 채널로부터 얻어진 SAR 영상에서 위상차 분포를 분석한 후 이동 표적을 탐지한다. STAP는 신호 스펙트럼의 특성을 시계열화 한 후 가중치 벡터를 이용해 클러터를 제거하고, 이동하는 표적을 탐지하는 알고리즘이다^{[8]~[12]}.

위와 같이 기존의 GMTI는 두 개 이상의 다중 안테나를 통해 얻은 영상 사이의 관계를 통해 이동 표적을 탐지하기 때문에 탑재체 무게의 제한이 있는 드론과 같은 소형 단일 플랫폼에서 적용하기 부적합하다. 또한 대용량의 데이터를 수집하고 처리하기 위한 전력 및 메모리 용량이 증가하므로 향후 비디오 SAR와 같은 첨단 기술을 소형 단일 플랫폼에 적용하기 어렵게 된다.

단일 플랫폼을 이용하여 다중 프레임 SAR 영상을 획득하기 위해서는 주파수와 대역폭이 크게 증가하게 되어 일반적인 소형 단일 플랫폼에서는 구현이 어렵다. 본 논문에서는 소형 드론 장착된 SAR 플랫폼을 이용하여 이동 표적을 추적하는 비디오 SAR를 생성한다. X-band 이하에서 운용되는 비디오 SAR 영상에서 이동하는 표적을 분리해 냈을 때 이동 표적은 전체 영상에 비해 희소한 데이터이기 때문에 SAR 영상 신호 복구가 어렵다. 본 논문에서는 압축 센싱 기법을 도입하여 X-band 급의 소형 SAR에서 높은 확률로 SAR 영상을 복원하여 이동 표적의 추적

이 가능함을 보인다. 이를 위해 압축 센싱 기법에 기반하여 단일 안테나를 통한 이동 표적을 탐지하고 이동하는 표적에 대한 고해상도 SAR 영상을 형성하는 기법을 제시한다. 압축 센싱 기법은 신호가 희소할 때 기존 정보의 일부만을 사용하여 신호 및 표적을 복원하는 기법이다^[13]. 본 논문에서는 압축 센싱 기반으로 이동 표적 탐지를 수행할 수 있음을 시뮬레이션을 통해 보이고, 실제 소형 SAR 플랫폼을 사용한 비디오 SAR 운용 실험을 통해 근거리 플랫폼에서 압축 센싱을 이용해 이동 표적 탐지가 가능함을 검증한다.

II. 압축 센싱 기반 이동 표적 탐지

속도 V 로 이동하는 플랫폼과 방위 방향으로 y 지점에 위치한 이동 표적 사이의 거리 $d^n(y)$ 은 다음과 같은 수식으로 나타낼 수 있다^[14].

$$d^n(y) = \sqrt{\left(r_n - v_r^n \frac{y}{V}\right)^2 + \left(y - y_n - v_y^n \frac{y}{V}\right)^2} \quad (1)$$

여기서 v_r^n 는 n 번째 프레임에서 표적의 거리 방향 속도를 나타내고 v_y^n 는 방위 방향 속도를 나타낸다. 상대적으로 V 가 v_r^n , v_y^n 보다 클 경우 다음과 같이 근사화될 수 있다.

$$d^n(y) \approx r_n - \frac{v_r^n}{V}(y - y_n) + \frac{\left(1 - \frac{v_y^n}{V}\right)^2 (y - y_n)^2}{2r_n} \quad (2)$$

위 식은 플랫폼과 이동 표적의 거리가 멀어 거리, 방위 방향 속도를 상수로 근사화한 값이 적용된다. 그러나 저고도에서 비행하는 플랫폼에서는 표적과의 거리가 가까워 속도 변화량을 근사화할 수 없고, 안테나 빔내에서 표적의 상대 속도 변화폭이 크므로 다음 식과 같이 속도가 시간 함수로 표현되어야 한다.

$$d_n(t, y) = \sqrt{\left(r_n - v_r^n(t) \frac{y(t)}{V}\right)^2 + \left(y(t) - y_n(t) - v_y^n(t) \frac{y(t)}{V}\right)^2} \quad (3)$$

거리 방향 속도는 $2k_c \frac{v_r^n}{V}$ 만큼의 방위 파수 편이로 인한 방위 위치 편이를 야기하고 방위 방향 속도는 퍼짐(blurring)

현상을 야기한다. 퍼짐 현상은 안테나 빔에 포착된 이동 표적의 속도가 시간에 따라 변경되기 때문에 발생하며, 이는 표적의 속도에 비례해 증가하게 된다. 비디오 SAR를 생성하기 위해서는 시간에 따른 속도 변화 함수를 정확하게 추정해야 한다. 그러나 위 식과 같이 비디오 SAR의 매 프레임마다 시간에 따른 이동 표적의 속도 변화량을 계산하는 것은 복잡도가 상당히 높으며, 계산 오차로 인한 위치 편이 및 퍼짐 현상을 해결하는데 한계가 있다. 따라서 본 논문에서는 비균일하게 수집되는 표적 정보를 인위적으로 늘려서 속도 편차를 해결하며, 이 과정에서 손실 정보를 보상하기 위해 압축 센싱에 기반한 근사화를 수행한다.

지속적으로 영상을 생성하는 비디오 SAR 시스템에서 n 번째 프레임에 해당되는 원시 데이터는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_n(t, y) = \sum_{m=1}^M \sigma_m(r_m, y_m) p_n^m \left(t - \frac{2d_n^m(t, y)}{c} \right) \quad (4)$$

위 수식에서 M 은 영상 내의 표적 수, σ_m 는 m 번째 표적의 반사도를 나타내고 $p_n^m(t)$ 는 해당 위치에서 방출되는 칩 펄스로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) \exp(2\pi f_c t + \pi K t^2) \quad (5)$$

여기서 T_p 는 펄스 길이, K 는 chirprate, f_c 는 중심 주파수를 나타낸다.

n 번째 프레임에서 M 개의 이동 표적을 통해 수신되는 신호를 $p_n^m(t)$ 와 기저 벡터 Ψ_n 를 표현하면 다음과 같다. Ψ_n 는 이동 표적의 속도로 인하여 데이터 손실이 발생한 비균일 샘플링으로 표현된다.

$$p_n^m = \exp \left\{ -j \frac{4\pi f_c d_n^m(t, y)}{c} + j\pi K \left(t - \frac{2d_n^m(t, y)}{c} \right)^2 \right\} \quad (6)$$

$$\Psi_n = [p_n^1, p_n^2, \dots, p_n^M] \quad (7)$$

$p_n^m(t)$ 가 근거리 표적으로부터 반사되는 경우, 수신 신호의 방위 방향으로의 샘플링 구간은 비균일한 간격을 띄고 있으며, 속도가 커질수록 샘플 간격이 넓어져 SAR 영상 생성에 충분한 데이터 군집을 이루지 못하는 산재

성을 갖게 된다. 특히 표적의 이동 방향은 플랫폼 기준으로 무작위성을 갖게 되므로 ψ_n 는 랜덤 샘플 성향을 갖는다. 이를 기반으로 n 번째 프레임 영상의 표적 위치 벡터 x_n 과 수신 데이터 S_n 의 관계식을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$s_n = \Theta_n x_n + \eta \quad (8)$$

위 압축 센싱 수식에서 $\Theta = \Phi \cdot \Psi$ 으로 Ψ 는 식(7)에 나타난 비균일 샘플링 데이터이며, Φ_n 는 플랫폼과 이동 표적의 상호 이동에 의해 결정되는 산재 신호 생성 행렬식이다. 속도가 증가할수록 산재도는 높아지고 샘플 구간의 비균질성도 높아지므로 랜덤 샘플 행렬식과 유사하게 표현될 수 있다. 따라서 Φ 를 플랫폼과 표적 속도 및 레이더의 펄스 생성율(PRF)에 의해 결정되는 $M \times N (M \ll N)$ 측정 행렬식이며, 일반적으로 가우시안 분포를 갖는 난수 배열을 이용한다. 이 외에 x 는 임의로 수집되는 표적 위치의 산재 벡터라고 할 수 있으며, η 는 클러터를 포함한 잡음을 나타낸다.

플랫폼과 표적이 가까운 근거리에서는 표적의 이동 속도가 상수가 아닌 불균일 분포를 보이며, 이에 따라 샘플링 구간도 시간 축에서 불균일하다. 이는 정지 표적과 비교할 때 비균일 샘플링 방식으로 수집된 것으로 다뤄지며, 균일 수집 데이터에 비해 데이터의 손실이 발생한 것으로 취급할 수 있다. 따라서 손실 데이터를 복원할 경우, 정지 표적과 같은 영상 형성을 수행할 수 있다. 압축 센싱은 이러한 손실 데이터를 복원하는 알고리즘에 활용될 수 있으며, 특히 이동 표적의 숫자가 한정된 시나리오에서는 우수한 복원 성능을 기대할 수 있다.

식 (8)에서 n 번째 프레임의 수신 데이터 s_n 이 주어질 때 산재 변환 행렬식이 RIP(restricted isometry property) 조건을 만족할 경우, 원 신호 데이터 x 를 복원할 수 있다. 일반적으로 $M < N$ 인 식의 해가 무수히 많으므로 l_0 최적화 문제를 통해 해를 도출하기에는 계산이 복잡하다. 본 논문에서는 l_1 최적화 알고리즘을 적용하여 해를 구한다. $\Theta = \Phi \cdot \Psi$ 일 때 RIP 조건은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$(1 - \delta_K) \leq \frac{\|\Theta x\|_2^2}{\|x\|_2^2} \leq (1 + \delta_K), \quad \delta_K \in (0, 1) \quad (9)$$

식 (9)에서 δ_K 는 restricted isometry constant(RIC)를 나타낸다.

RIP를 만족할 때 l_0 최적화 문제를 l_1 최적화 문제로 근사화하여 해를 구할 수 있으며, l_1 최적화 문제는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$(l_1) \arg \min_{x'_0} \|x'_0\|_1 \text{ s.t. } \|y - \Theta x'_0\|_2 \leq \eta \quad (10)$$

이 때 η 는 클러터를 포함한 잡음을 나타낸다.

산재성을 지닌 해를 구하는 l_1 -norm 최소화 방식의 대표적인 기법으로는 OMP(orthogonal matching pursuit)와 BPDN(basis pursuit de-nosing) 알고리즘이 있다. OMP 기법은 BPDN에 비교해 연산 복잡도가 낮아 복원 시간이 짧지만, 연산량이 많아질수록 복원 속도가 느려진다. BPDN은 RIP조건을 만족하면 복원 능력이 우수하고 산재 신호 분해능이 우수하나 연산량이 높아 비교적 복원 속도가 느리다. 그러나 적절한 잡음 크기를 설정해 복원 속도를 높일 수 있다. 본 논문에서 모의실험은 간단한 점표적을 대상으로 수행하였으며 반복 연산량을 줄여 연산 시간을 단축하기 위해 OMP 알고리즘을 사용한다. 실제 데이터는 데이터 크기 및 복원 능력을 고려해 BPDN 알고리즘을 사용하였으며 연산 시간 단축을 위해 영상의 크기를 최소화하여 검증을 수행한다^{[15],[16]}.

스트립 모드 기반의 비디오 SAR에서는 이동 표적의 위치 및 경로가 지속적으로 변화고 이를 추적하기 위해서는 매 프레임마다 가변적 영상 형성을 수행해야 한다. 이 과정에서 비균일 샘플링 및 도플러 변수의 왜곡이 발생하고 처리 속도에 지연이 발생한다. 본 논문에서는 증가되는 프레임 구간의 신속한 처리를 위해 비균일 샘플링 압축 센싱을 수행하여 이동 표적의 SAR 영상을 복원한다.

그림 1은 제안 기법의 순서도를 나타내며 이동 표적 유무 확인, 빔 분할, 각 서브 빔 프레임의 도플러 중심(Doppler centroid) 추정 및 적용, 압축 센싱 적용 순으로 이어진다. 빔 분할을 수행할 때 일반적으로 서브 빔의 크기는 표적과의 거리, 안테나 빔폭 등을 고려해 결정하게 되며 이동 표적이 있는 경우 표적의 퍼짐 현상 정도에 반비례하여 빔폭의 크기를 결정하게 된다. 그림 2는 희소 영역에서의 랜덤 샘플링 후 신호 복원을 수행하는 압축

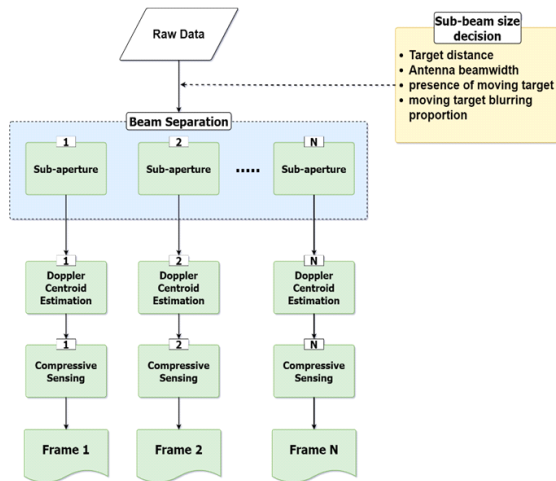


그림 1. 근거리 비디오 SAR 영상 처리 순서도

Fig 1. Flowchart of near field video SAR image processing.

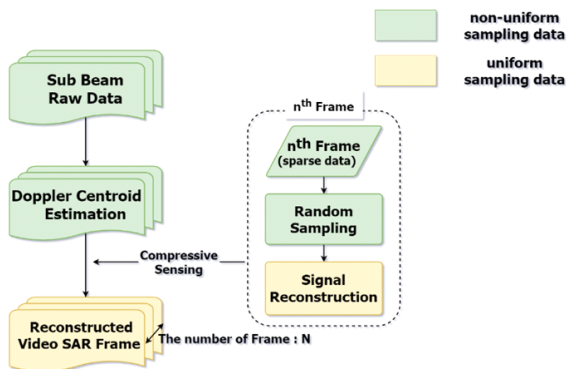


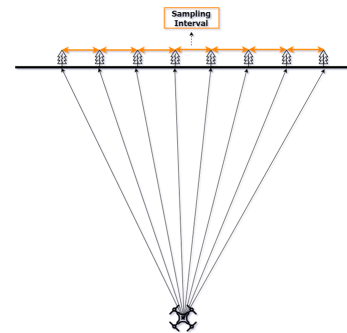
그림 2. 압축센싱 기반 이동 표적 탐지 순서도

Fig 2. Moving target detection based on compressive sensing flowchart.

센싱 과정을 나타낸 이동 표적 영상 처리 순서도이다. 해당 과정에서는 sub aperture 데이터는 이동 표적의 비균일 샘플링으로 인하여 랜덤 샘플링 경향을 보이는 산재 신호이다. 이 때 랜덤 샘플링 경향은 표적의 속도 및 방향에 따라 변화할 수 있어 RIP 조건을 만족시키지 못할 수 있다. 따라서 확실한 RIP 만족을 보장하여 정확한 해를 구하기 위해 랜덤 샘플링 과정을 수행한다. 랜덤 샘플링은 가우시안 분포를 갖는 난수 행렬과의 연산을 통해 수행된다.

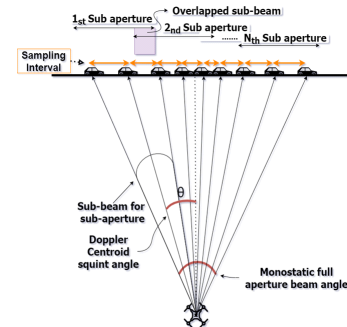
기존 항공기나 인공 위성의 경우, 빔폭이 작기 때문에 스폿 모드를 채택하여 인위적으로 빔폭을 늘린 후 프레임을 증가시킨다. 드론에 탑재되는 SAR 시스템은 안테나 최대 크기가 제한되어 비교적 넓은 빔폭을 사용하게 된다. 따라서 근거리에서 운용되는 지상 관측에서는 표준 모드에서도 다중 프레임 확보가 가능하다.

넓은 빔폭은 다중 서브 빔으로 분할할 수 있으며, 표적의 속도 변화량이 큰 경우, 서브 빔 분할을 확장하여 표적에서 반사되는 신호를 분할된 시간 영역에서 연속적으로 수집한다. 이때 각 서브 빔에서의 샘플링은 비균일 분포를 가지며, 각 서브 빔간의 표적 이동의 연속성이 상실된다. 따라서 분할된 서브 빔 영역이 중첩되도록 하여 연속성을 유지해야 한다. 이상적인 경우, 그림 3(a)와 같이 균일한 샘플링이 수행될 때 기존 SAR 알고리즘을 적용할 수 있으나, 그림 3(b)처럼 표적 샘플링이 시간 축에서 불



(a) 정지 표적의 균일 샘플링

(a) Uniform sampling of static target



(b) 이동 표적의 비균일 샘플링

(b) Non-uniform sampling of moving target

그림 3. 이동 표적 샘플링

Fig 3. Sampling of moving target.

균일 배열로 수행될 경우, 각 서브 빔에서의 표적 영상은 퍼짐 형태로 표현된다. 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 비균일 샘플링 데이터에 압축 센싱 기법을 적용한다.

서브 빔의 중첩을 통한 산출 프레임 비율은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_{ps} = \frac{2V_s \rho_a f_0}{R_m c(1-\alpha)} \quad (11)$$

이때 R_m, ρ_a, V_s, f_0 는 각각 slant 거리, 방위 해상도, 플랫폼 속도, 중심 주파수를 나타낸다^[17].

드론과 같이 저고도에서 운용되는 SAR 시스템은 광폭의 빔을 사용하여 다중 서브 빔 분할로도 충분한 프레임의 영상을 복원할 수 있다. 압축 센싱 알고리즘은 불균일 샘플링에 의한 데이터 손실 및 해상도 저하를 극복하기 위한 목적을 달성할 수 있는 방법으로 제시된다. 압축 센싱은 전체 데이터의 일부분을 사용해 신호를 복원해 내는 과정을 거치면서 샘플링을 수행하지 못했던 구간에 대한 선형적 복원을 수행한다. 따라서 이동 표적에 대한 비균일한 샘플링을 균일한 샘플링을 수행한 것과 같은 효과를 얻을 수 있으며, 동시에 속도 근사화를 수행하는 효과를 얻을 수 있다.

다중 안테나를 이용해 이동 표적을 탐지하는 기법은 다중 채널을 통해 획득한 데이터간의 위상차를 이용한다. 그러나 단일 안테나의 경우 기존의 기법처럼 다중 채널을 이용할 수 없다. 압축 센싱은 상관도가 높은 데이터를 해로 가정하는 과정을 통해 복원을 수행한다. 복원 과정은 추정 표적 수 만큼 복원을 수행하거나 지정 임계값보다 큰 값들에 대한 복원을 수행하기 때문에 클러터 및 퍼짐 현상을 제거할 수 있다.

III. 모의 실험

본 연구에서는 제안한 기법을 통해 비디오 SAR에서 방위 방향으로 이동하는 표적을 추적하는 알고리즘을 이동 UAV SARR에서의 모의 실험을 통해 검증을 수행한다. 그림 4는 UAV SAR 시스템의 경로 및 모의 실험 표적 시나리오를 나타낸다. 표 1은 시뮬레이터에 사용된 시뮬레이터의 주파수 및 펄스 발생율(PRF)에 대한 정보를 나타내고 이동 표적의 속도를 나타낸다.

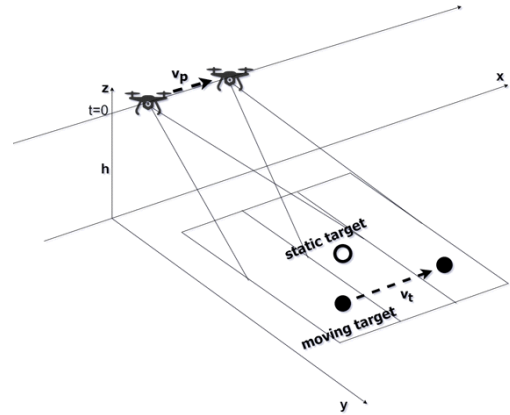


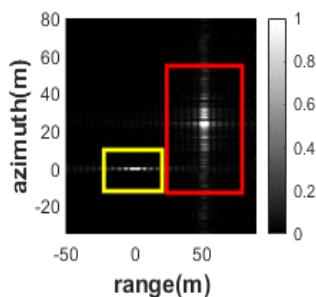
그림 4. 비디오 SAR 시뮬레이터 시나리오
Fig. 4. Video SAR simulator scenario.

표 1. SAR 시뮬레이터 시스템 및 이동 표적 변수
Table 1. SAR simulator system & moving target parameter.

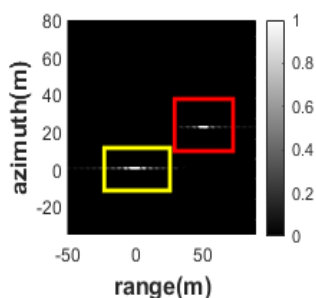
Parameter	Value
Carrier frequency	10 GHz
Signal bandwidth	800 MHz
PRF	20 Hz
Moving target velocity(azimuth)	0~6 m/s

이동 표적 탐지를 위한 압축 센싱은 OMP 기법을 적용한다. OMP 기법은 greedy한 특성을 기반으로 해를 도출하는 대표적인 압축 센싱 기법으로 빠른 연산 처리를 통해 해를 산출할 수 있다. 이를 위해 0~6 m/s의 랜덤한 속도로 방위 방향으로 이동하는 표적에 대한 시나리오를 설정하고, 본 논문에서 제시한 알고리즘을 통한 성능 변화를 모의 실험하였다. 모의 실험에서는 데이터를 80 % 손실로 가정하였으며 이는 압축률 20 %에 해당한다.

그림 5(a)는 RDA(range Doppler algorithm) 기반의 일반적인 SAR 영상 처리 알고리즘만을 사용한 결과이다. 노란색 박스 안 점 표적은 정지 표적을 나타내며 빨간색 박스 안 점 표적은 0~6 m/s의 랜덤한 속도로 가변하는 이동 표적을 나타낸다. 이동 표적이 정지 표적과 비교하여 방위 방향으로 퍼짐 현상이 발생한 것을 확인할 수 있다. 그림 5(b)는 동일한 시나리오에 본 논문에서 제안한 기법을 적용한 결과를 보인다. 도플러 부정합에 의한 퍼짐(블러링) 현상이 사라지고 이동 표적에 대한 초점을 맞추는



(a) RDA 알고리즘을 적용한 이동 표적 영상
(a) Moving target image with applying RDA algorithm



(b) 압축 센싱을 적용한 이동 표적 영상
(b) Moving target image with applying compressive sensing

Fig 5. 압축 센싱 적용 전 · 후 이동 표적

Fig 5. Moving target before & after compressive sensing.

것이 가능한 것을 확인할 수 있다. 또한 이동 표적 영상의 블러링이 억제되고, 정지 표적과 유사한 수준으로 위치 정보가 복원됨을 확인할 수 있다.

IV. 실제 데이터 검증

본 장에서는 제안한 기법을 실제 획득 데이터 적용을 통해 비디오 SAR의 각 프레임에서 이동 표적 탐지를 수행하여 검증한다.

실측 데이터는 그림 6과 같이 차량이 이동하는 도로 위에서 관측하는 방식으로 수집되었으며, 차량은 방위 방향으로 이동하는 시나리오 설정을 통해 거리 방향 도플러 편이가 발생하지 않는다. 드론은 일정 고도와 속도를 유지하며 FMCW 레이다를 탑재해 실험을 수행했으며, 세부적인 SAR 시스템의 파라미터는 표 2와 같다. 충분히 긴 안테나 빔을 사용하여 인위적으로 데이터 수집 구간을 늘리고, 일반적인 표준 모드에서도 광역 빔폭을 이용



(a) 드론 SAR
(a) Drone equipped SAR



(b) 드론 SAR 실험 장소
(b) Drone SAR test site

그림 6. 이동 표적 탐지 드론 SAR 실험 시나리오

Fig. 6. Drone SAR test for moving target detection

표 2. SAR 시스템 변수

Table 2. SAR system parameter.

Parameter	Value
SAR operational mode	Stripmap
Platform path	Fly-by
Carrier frequency	5.6 GHz
Signal bandwidth	800 MHz
PRF	40 Hz
Beamwidth	16°

하여 고해상도의 표적 SAR 영상을 지속적으로 획득할 수 있도록 설계하였다.

그림 7은 앞서 설계한 시나리오를 통해 얻은 데이터를 SAR 영상 형성 알고리즘을 통해 나타낸 영상이다. 영상 속 거리 40 m의 지점에 차량 표적이 탐지되었으나, 이동 속도로 인해 퍼짐 현상이 발생한 것을 확인할 수 있다.

상대적으로 빔폭이 큰 구간에서 수집되었으므로 인위적으로 빔 분할을 수행한 후 분할된 각 서브 빔에서 프레

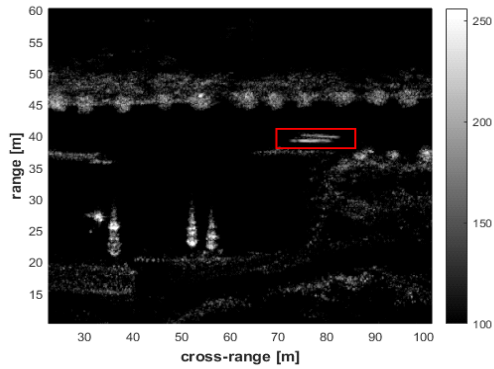


그림 7. 드론 비디오 SAR 실험 영상
Fig. 7. Drone video SAR.

임을 복원 생성한 후 취합하면 시간순으로 비디오 프레임 획득하게 된다. 이를 위해 각 서브 빔의 도플러 파라미터를 차별적으로 적용한 후 각 프레임에 대한 분할 처리를 수행한다.

그림 8은 각 서브 빔에 대해 각각의 RDA 입력 변수를 적용하여 프레임을 3개로 분할한 결과를 나타낸다. 그림 7에서 물체 속도로 인해 1개의 늘어난 형태로 식별이 어려웠던 표적이 83 m, 79 m, 74 m 부근에서 검출된 것을 볼 수 있다.

그림 8의 프레임 영상에서는 거리 방향으로 약 40 m 지점에 이동 표적이 검출되었으나, 표적의 이동으로 인하여 정합필터의 부정합이 발생하였고, 이에 따라 이동 표

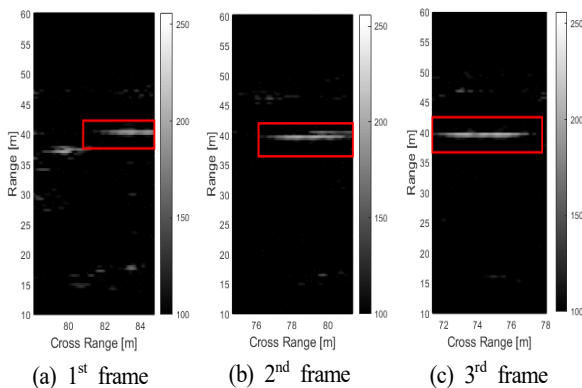


그림 8. 서브 빔 분할을 통한 이동 표적 영상 프레임 생성

Fig. 8. Multiple SAR frames generation of moving target through sub-beam overlap.

적의 퍼짐 현상은 해결되지 않아 이동 표적의 위치 및 속도 파악에는 어려움이 있다. 이에 반해, 압축 센싱을 통한 SAR 영상 복원은 도플러 기반의 정합필터를 사용하지 않아 퍼짐 현상을 효과적으로 제거할 수 있다. 본 논문에서는 압축 센싱을 통해 이동 표적의 속도로 인한 비균일 샘플링을 해결하여 이동 표적을 탐지한다.

이를 위해 근거리에서의 표적의 이동에 따라 균질 수집 데이터에 비해 손실이 발생한 것으로 시나리오를 설정하고, 이를 복원하기 위한 압축센싱을 수행한다. 본 실험에서는 데이터 손실율을 70 %, 50 %로 가정하였다. 이는 30 %, 50 %의 압축율에 해당된다. 일반적으로 압축센싱 복원은 복잡한 연산을 수행하는 과정에 오랜 시간이 소요되어 실용적이지 못한 문제가 있으나, 본 논문에서는 연산 가속화를 위해 영상 대상을 표적을 중심으로 최소화하여 서브 빔 영상 크기를 200×50 이하로 축소하였다.

그림 9는 압축 센싱을 적용한 그림을 나타내며, 30 % 압축율을 사용하여 복원한 결과이다. 적은 데이터를 통한 복원으로 인해 약간의 잡음이 보이나, 이동 표적이 거리

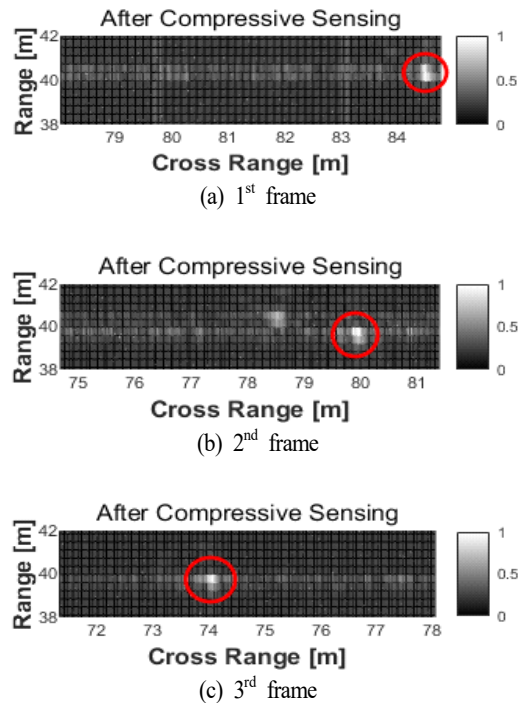


그림 9. 압축 센싱 적용 후 이동 표적(압축률 30 %)

Fig. 9. After compressive sensing(compression ratio 30 %).

방향으로 약 40 m, 방위 방향으로는 각 프레임마다 다른 위치인 약 84.7 m, 80 m, 74 m에서 표적이 집중되어 나타난 것을 볼 수 있다. 그림 10은 압축율 50 %를 적용하여 복원한 결과이다. 압축 센싱이 적용되어 복원한 결과, 영상은 부엽 신호가 억제되고, 신호대 잡음비가 증가하여 표적의 선명도가 향상된 표적을 보인다. 따라서 각 프레임에서 추출되는 표적간의 거리와 프레임 생성 시간을 이용해 속도를 측정할 수 있다. 그림 10의 비디오 SAR 영상 프레임 사이의 시간 차가 0.65초이므로 추정된 차량 표적의 평균 이동 속도는 약 30 km/h이고, 실제 사용된 실험 차량의 진행 속도인 36 km/h에 근사하게 측정되었다. 서브 빔 폭의 축소로 인해 방위 방향의 해상도가 감소하여 이에 따른 속도 추정의 정확도는 저하된다. 획득된 영상의 방위 해상도는 1 m 이하이나, 드론 안테나의 지향 각 및 플랫폼 속도 변화 등이 표적 속도 오차에 반영된다.

압축 센싱을 포함한 각 SAR 프레임 영상 생성을 위한 처리 시간은 1.6초가 소요되었으며, 사용된 컴퓨터 사양은 i7-10700에 32 GB였다. RDA 기반의 Matlab R2021a

S/W에서 처리되었다.

그림 9 및 그림 10에 사용된 압축 센싱 기반 이동 표적 탐지 알고리즘은 C-band 대역의 단일 SAR 플랫폼에서도 서브 빔 분할을 통해 이동 표적에 대한 다중 프레임 영상 확보가 가능함을 보인다. 이는 기존의 다중 채널 이동 표적 탐지 기법에서 벗어나 모노스테틱 구조의 단일 시스템으로도 지상 이동 표적을 탐지하고 추적까지 수행할 수 있음을 보여준다. 또한 높은 해상도의 표적을 고품질 영상으로 확보함으로써 일정한 시간 간격으로 연속적으로 확보되는 프레임에서의 이동 표적을 추적하고, 높은 정확도로 속도 측정이 가능함을 알 수 있다.

V. 결 론

일반적으로 표준 모드에서 비디오 SAR를 생성하기 위해서는 고비용 초광대역 시스템을 사용해야 하는 기술적 장벽이 있다. 본 논문에서는 단일 안테나를 탑재한 드론과 같은 근거리 탑재체에서 이동 표적을 탐지할 수 있는 알고리즘을 제시하고, 모의실험 및 실제 획득 데이터를 통한 검증을 수행하였다. 제시한 알고리즘은 서브 빔 중첩을 통해 이동 표적을 연속적으로 탐지하여 다중 프레임을 형성한다. 실제 실험을 통해 저비용의 모노스테틱 소형 SAR 시스템으로도 이동하는 표적에 대한 다중 비디오 프레임을 형성하고, 이를 통해 정확한 표적 속도를 추정할 수 있음을 보였다. 향후 FPGA 기반으로 구현될 경우, 실시간 비디오 SAR 영상 처리도 가능할 것으로 예상된다. 본 연구는 근거리 탑재체를 통해 군사적 위협 요소의 이동 여부 및 경로를 실시간으로 파악하는 목적으로 활용될 수 있을 것이다. 나아가 향후 활성화될 것으로 기대되는 소형 UAV나 드론 기반의 SAR를 이용하여 주·야 날씨에 상관없이 차량이나 트럭과 같은 지상 표적을 추적하고 흐름을 파악하는데 활용될 수 있을 것이다.

References

- [1] M. G. Fernández, Y. Á. López, A. A. Arboleya, B. G. Valdés, Y. R. Vaquero, and F. L. H. Andrés, et al., "Synthetic aperture radar imaging system for landmine detection using a ground penetrating radar on board a

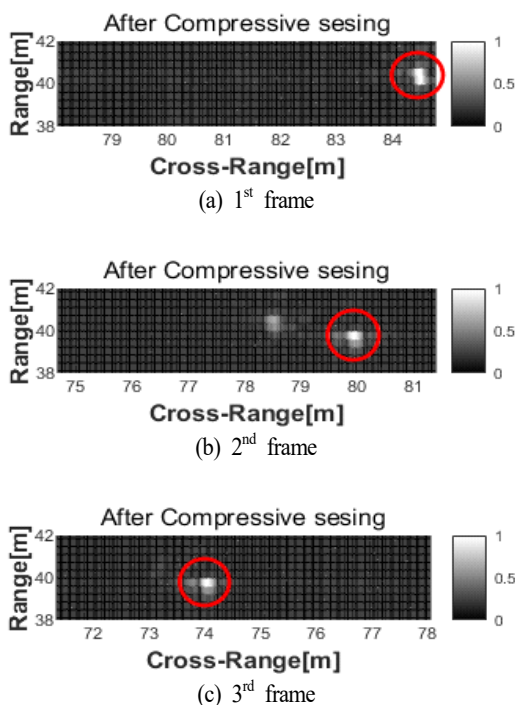


그림 10. 압축 센싱 적용 후 이동 표적(압축률 50 %)
Fig. 10. After compressive sensing (compression ratio 50 %).

- unmanned aerial vehicle," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 45100-45112, Aug. 2018.
- [2] E. Schreiber, A. Heinzl, M. Peichl, M. Engel, and W. Wiesbeck, "Advanced buried object detection by multichannel, UAV/drone carried synthetic aperture radar," in *2019 13th European Conference on Antennas and Propagation(EuCAP)*, Mar. 2019, pp. 1-5.
- [3] A. Bekar, M. Antoniou, and C. J. Baker, "High-resolution drone-borne sar using off-the-shelf high-frequency radars," in *2021 IEEE Radar Conference*, Atlanta, GA, May 2021, pp. 1-6.
- [4] Y. Jin, L. Fang, "Comparison of RD algorithm and BP algorithm in video-SAR," in *2019 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT)*, Guangzhou, May 2019, pp. 1-3.
- [5] S. Zhao, J. Chen, W. Yang, B. Sun, and Y. Wang, "Image formation method for spaceborne video SAR," in *2015 IEEE 5th Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar(APSAR)*, Singapore, pp. 148-151, Sep. 2015.
- [6] X. Song, W. Yu, "Processing video-SAR data with the fast backprojection method," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 52, no. 6, pp. 2838-2848, Dec. 2016.
- [7] B. Liu, X. Zhang, K. Tang, M. Liu, and L. Liu, "Spaceborne video-SAR moving target surveillance system," in *2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium(IGARSS)*, Jul. 2016, pp. 2348-2351.
- [8] Y. Hou, J. Wang, X. Liu, K. Wang, and Y. Gao, "An automatic SAR-GMTI algorithm based on DPCA," in *2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Beijing, Jul. 2014, pp. 592-595.
- [9] B. Dawidowicz, K. S. Kulpa, M. Malanowski, J. Misiurewicz, P. Samczynski, and M. Smolarczyk, "DPCA detection of moving targets in airborne passive radar," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 48, no. 2, pp. 1347-1357, Apr. 2012.
- [10] E. Chapin, and C. W. Chen, "Along-track interferometry for ground moving target indication," *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 23, no. 6, pp. 19-24, Jul. 2008.
- [11] C. W. Chen, "Performance assessment of along-track interferometry for detecting ground moving targets," in *Proceedings of the 2004 IEEE Radar Conference*, Philadelphia, PA, pp. 99-104, Apr. 2004.
- [12] M. C. Wicks, M. Rangaswamy, R. Adve, and T. B. Hale, "Space-time adaptive processing: A knowledge-based perspective for airborne radar," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 23, no. 1, pp. 51-65, Feb. 2006.
- [13] J. Yang, T. Jin, C. Xiao, and X. Huang, "Compressed sensing radar imaging: Fundamentals, challenges, and advances," *Sensors*, vol. 19, no. 14, p. 3100, Jan. 2019.
- [14] A. De Maio, Y. C. Eldar, and A. M. Haimovich, *Compressed Sensing in Radar Signal Processing*, Cambridge, Cambridge University Press, pp. 333-335, 2020.
- [15] Tropp, J. A, A. C. Gilbert, "Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 53, no. 12, pp. 4655-4666, Dec. 2007.
- [16] P. R. Gill, A. Wang, and A. Molnar, "The in-crowd algorithm for fast basis pursuit denoising," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 59, no. 10, pp. 4595-4605, Jul. 2011.
- [17] H. Yan, X. Mao, J. Zhang, and D. Zhu, "Frame rate analysis of video synthetic aperture radar(ViSAR)," in *2016 International Symposium on Antennas and Propagation(ISAP)*, Okinawa, Oct. 2016, pp. 446-447.

반 인 모 [한국항공대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0000-0001-9459-7511>



2020년 2월: 한국항공대학교 항공전자정
보공학과 (공학사)
2021년 3월~현재: 한국항공대학교 항공
전자정보공학과 석사과정
[주 관심분야] SAR 신호처리, 비디오 SAR

이 석 원 [한국항공대학교/석사과정]

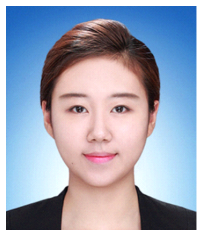
<https://orcid.org/0000-0002-1319-0857>



2021년 8월: 한국항공대학교 항공전자정
보공학과 (공학사)
2021년 9월~현재: 한국항공대학교 스마
트항공모빌리티학과 석사과정
[주 관심분야] 영상레이다 신호처리, 비디
오 SAR

문 민 정 [한국항공대학교/연구원]

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



2016년 2월: 한서대학교 항공전자공학과
(공학사)
2019년 2월: 한국항공대학교 항공전자정
보공학과 (공학석사)
2020년 3월: 한국항공대학교 항공전자연
구소
2021년 6월~현재: 한국항공대학교 항공
전자연구소 연구원

[주 관심분야] SAR 신호처리, SAR 원격탐사, 위성전자 레이다
탐재체

이 명 진 [한국항공대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-3136-2819>



1994년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자
공학과(공학사)
1996년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자
공학과(공학석사)
2001년 8월: 한국과학기술원 전자전산학
부(공학박사)
2001년 3월~2004년 2월: 삼성전자 System
LSI Biz 책임

2004년 3월~2007년 2월: 경성대학교 전기전자공학전공 조교수
2007년 3월~현재 한국항공대학교 항공전자정보공학과 교수
2020년 9월~현재 한국항공대학교 스마트항공모빌리티학과 겸
임교수

[주 관심분야] 영상통신, 임베디드시스템, 영상레이다 신호처리

천 형 일 [한국항공대학교/석사과정]

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



2019년 2월: 목원대학교 정보통신공학과
(공학사)
2019년 3월~현재: 한국항공대학교 항공
전자정보공학과 석사과정
[주 관심분야] 레이다 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)
1999년 10월~2002년 12월: 한국과학기술
원 인공위성센터 연구교수, 삼성종합기술원 책임연구원

2004년 9월~현재: 한국항공대학교 항공전자정보공학과 교수
[주 관심분야] 위성탐재체, SAR 영상, 레이다 시스템 및 신호
처리

조 휘 정 [한국항공대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-2468-983X>



2020년 2월: 경상대학교 기계항공정보융
합공학부 (공학사)
2020년 3월~현재: 한국항공대학교 항공
전자정보공학과 석사과정
[주 관심분야] SAR 영상처리