

Letter

## 위성 레이더 영상을 활용한 강도 기반 변화탐지기술 활용 사례연구

홍성재<sup>1)</sup> · 채성호<sup>2)</sup> · 오관영<sup>2)</sup> · 양희인<sup>3)\*</sup>

### A Case Study of Amplitude-Based Change Detection Methods Using Synthetic Aperture Radar Images

Seongjae Hong<sup>1)</sup> · Sungho Chae<sup>2)</sup> · Kwanyoung Oh<sup>2)</sup> · Heein Yang<sup>3)\*</sup>

**Abstract:** The Korea Aerospace Research Institute is responsible for supplying and supporting the utilization of imagery data from the Arirang satellite series for organizations affiliated with the Government Satellite Information Application Consultation. Most of them primarily utilize optical imagery, and there is a relative lack of utilization of Synthetic Aperture Radar (SAR) imagery. In this paper, as part of supporting the use of SAR images, we investigated SAR intensity-based change detection algorithms and their use cases that have been researched to determine SAR intensity-based change detection algorithms to be developed in the future. As a result of the research, we found that various algorithms utilizing intensity difference, correlation coefficients, histograms, or polarimetric information have been researched by numerous researchers to detect and analyze change pixels and the applications of change detection algorithms have been studied in various fields such as a city, flood, forest fire, and vegetation. This study will serve as a reference for the development of SAR change detection algorithms, intended for utilization in the Government Satellite Information Application Consultation.

**Keywords:** Synthetic aperture radar, Change detection, Government Satellite Information Application Consultation

**요약:** 한국항공우주연구원은 위성정보활용협의체 소속기관을 대상으로 아리랑위성 시리즈 영상자료 보급 및 활용지원을 담당하고 있다. 협의체 소속기관 사용자들은 대부분 광학 영상 중심으로 위성영상을 활용하고 있으며, 상대적으로 Synthetic Aperture Radar (SAR) 영상에 대한 활용 방안은 미흡한 실정이다. 본 논문에서는 SAR 영상자료 활용을 지원하기 위한 일환으로 향후 개발할 SAR 강도 기반 변화탐지 기술의 결정을 위해 현재 까지 연구되어진 SAR 강도 기반 변화탐지 기술과 그 활용사례들을 조사했다. 조사 결과 많은 연구자로부터 강

Received November 24, 2023; Revised December 1, 2023; Accepted December 5, 2023; Published online December 31, 2023

<sup>1)</sup> (주)컨텍 스페이스스튜디오 주임연구원(Assistant Research Engineer, Team Space Studio, CONTEC Co., Ltd., Daejeon, Republic of Korea)

<sup>2)</sup> 한국항공우주연구원 위성활용부 선임연구원(Senior Researcher, National Satellite Operation & Application Center, Korea Aerospace Research Institute, Daejeon, Republic of Korea)

<sup>3)</sup> (주)컨텍 스페이스스튜디오 책임연구원(Principal Research Engineer, Team Space Studio, CONTEC Co., Ltd., Daejeon, Republic of Korea)

\* Corresponding author: Heein Yang (heein.yang@contec.kr)

Copyright © 2023 by The Korean Society of Remote Sensing. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

도 차분, 상관계수, 히스토그램(Histogram) 또는 편파 정보를 활용하여 변화 픽셀을 탐지하고 분석하기 위한 다양한 알고리즘들과 도시, 홍수, 산불, 식생과 같은 다양한 분야에서 변화탐지 알고리즘의 활용방안이 연구되었음을 확인할 수 있었다. 본 연구는 위성정보활용협의체에 활용할 SAR 변화탐지 기술 개발에 활용될 예정이다.

**주요어:** Synthetic aperture radar, 변화탐지, 위성정보활용협의체

## 1. 서론

Synthetic Aperture Radar (SAR) 위성영상의 활용 방안이 대두됨에 따라 많은 SAR 위성들이 개발되고 운용될 계획에 있다. 한국에서는 국가적 수요를 목적으로 위성 정보를 활용하기 위해 위성정보활용협의체를 구성하고 있으며, 협의체 내에는 다양한 정부 기관들이 소속되어 있다. 한국항공우주연구원은 위성정보활용협의체에 대한 위성정보 지원을 맡고 있으며, 그 일환으로 광학 및 SAR 영상 활용 프로그램을 제공하고 있다(Chae et al., 2022). 하지만 현재 위성정보활용협의체에서는 대부분 광학 영상 위주로 활용을 하고 있으며, SAR 영상에 대한 활용 사례가 상대적으로 미진한 상황이다(Chae et al., 2022). 현재 운용 중인 아리랑 5호를 포함하여 아리랑 6호 그리고 소형 SAR 군집위성 등이 발사될 예정이므로 이러한 상황에 발맞추어 SAR 영상을 활용할 수 있는 다양한 프로그램을 개발하는 것이 필요한 시점이다.

현재 국내의 다양한 연구자들에 의해 SAR 위성 활용 사례들이 조사되고 정리된 바가 있다(Baek and Jung, 2019; Lee, 2006; Lee et al., 2021; Yang, 2018; Yoon et al., 2010). 앞선 연구들에서는 SAR 시스템의 소개와 SAR를 활용해 구현할 수 있는 기술 요소들의 특징을 정리하는데 초점이 맞추어져 있다. 이로 인해 활용 기술들을 이용한 실제 활용사례에 대한 소개보다는 해당 활용사례에서의 변화탐지 기술의 기술적 의의에 중점을 두어 정리가 되어있어 SAR 활용기술이 실제 어떤 사례에서 활용되고 있는지를 알기가 어렵다는 한계가 존재한다. 본 논문에서는 SAR를 이용한 강도 기반 변화탐지 기술들과 더불어 각 변화탐지 기술을 활용하여 실제 변화를 탐지한 사례를 조사하여 정리했다는 점에서 기존 연구들과 차별점이 있다. 본 논문의 조사 결과는 향후 위성활용협의체의 SAR 영상활용 지원을 위한 SAR 변화탐지 기술 개발에 활용될 예정이다.

## 2. SAR 강도 기반 변화탐지 기술

### 2.1. 상관계수 기반 변화탐지

SAR 강도 정보를 활용한 변화탐지 기술은 국내외 많은 연구자들에 의해 연구되어 왔으며, 강도 차분 및 상관계수 정보를 활용해 변화를 탐지하는 경우를 자주 볼 수 있다(Carreño Conde and De Mata Muñoz, 2019; Liu and Yamazaki, 2011; Long et al., 2014; Rignot and van Zyl, 1993). 홍수처럼 변화 전후의 후방산란 강도가 명확하게 달라지는 사례에서 변화를 탐지하는 경우에는 상관계수를 이용하지 않고 차분정보만 활용하여 홍수 피해를 입은 영역을 탐지하는 경우도 존재한다(Long et al., 2014).

하지만 도시나 산간 지역에서는 많은 개체들이 비슷한 후방산란 강도를 나타내거나, 자동차나 벌목된 나무 몸통과 같은 작은 개체로부터 오는 강한 후방산란 또는 노이즈 등에 의해 오탐지가 발생하기도 한다. 이러한 오탐지를 줄이기 위해 특정 크기 이하의 변화 픽셀을 제거하거나 인접한 작은 변화 픽셀들을 한 개의 폴리곤(Polygon)으로 처리하는 경우도 존재한다(Lasaponara and Tucci, 2019; Liu and Yamazaki, 2011; Long et al., 2014). 강도 상관계수 기반 변화탐지 알고리즘들은 강도 정보를 이용하므로 영상들의 획득 간격이 길거나 위성의 자세가 불안정하더라도 어느 정도의 적용이 가능하며, 상대적으로 쉬운 구현 난이도에 비하여 변화가 발생한 지역들을 인지할 수 있는 수준의 변화탐지 성능을 나타낸다는 장점이 있다.

### 2.2. 히스토그램(Histogram) 기반 변화탐지

일부 사례에서는 다중시기 영상들로부터 생성한 차분 영상의 히스토그램을 기반으로 변화탐지를 수행하였으며, Generalized Kittler and Illingworth Thresholding (GKIT), Expectation-Maximization (EM) 등의 변화탐지 알고리즘과 그 변형 알고리즘을 활용하였다(Bruzzone

and Prieto, 2000; Hu and Ban, 2014; Lopez and Stilla, 2022). 해당 알고리즘의 기본 가정과 원리는 영상에서 변화가 있는 픽셀과 없는 픽셀들의 쌍봉분포 또는 다봉분포를 이룰 것이므로 적절한 값을 임계치로 설정하여 변화가 존재하는 픽셀들을 구분하는 것이다. 하지만 영상에 존재하는 노이즈들로 인해 변화 영역을 선명하게 구분하기 어려운 경우가 존재한다.

이로 인해 많은 연구들에서는 노이즈를 줄이기 위하여 Gamma MAP 필터, Kuan 필터, Lee 필터 등 다양한 노이즈 저감 필터를 적용하였다(Kim et al., 2016; Hu and Ban, 2014; Lopez and Stilla, 2022). 만약 영상 내 변화 영역의 비율이 너무 적은 경우 전체 히스토그램이 단봉 분포의 형태를 나타내게 되는데, 이러한 분포 형태에서 변화 픽셀을 분류하기 위하여 Between-Class Variance (BCV), Generalized Gaussian Model (GG)-GKIT와 같은 알고리즘이 개발되고 적용되었다(Demirkaya and Asyali, 2004; Hu and Ban, 2014).

### 2.3. 편파 기반 변화탐지

SAR 영상에서는 레이더 신호의 송신과 수신 편파를 기록하며, 수평(Horizontal) 편파는 H, 수직(Vertical) 편파는 V로 표시한다. 위성마다 제공하는 편파 정보가 다르며 편파 정보는 HH, VV, HV, VH 4개로 구성되어 있다. 이 중 동시에 한 개 편파 정보만 제공하면 단일 편파라고 부르며, 동시에 두 개 편파 정보를 제공하면 이중 편파, 4개 편파 모드를 제공하면 완전 편파라고 부른다.

지상 물체의 구조에 따라 레이더 신호의 후방산란 편파 정보가 서로 다르게 나타나는 특성을 이용하여 SAR 편파 정보를 활용한 식생 분류, 유류유출 탐지 등 다양한 연구가 수행되었다(Brisco et al., 2013; Kim and Jung, 2018; Xu et al., 2018; McNairn and Brisco, 2004). 일반적으로 식생의 경우 유의미한 변화가 존재하지 않더라도 서로 다른 시기에 촬영한 영상에서의 후방산란 강도가 서로 다르게 나타나 단순한 강도 차분과 같은 기법을 쓰는 경우 변화 오탐지가 발생할 수 있다.

식생에서의 변화를 관측하기 위한 방법 중 하나로 후방산란된 편파 정보를 편파 분해를 통해 체적 산란, 이중 산란, 표면 산란으로 분류할 수 있다(Hong et al., 2015). 체적 산란은 다양한 방향으로 무성하게 뻗어 있는 식생으로부터 발생하고, 이중 산란은 지표면과 식생 줄기와

같은 직교하는 두 평면에서 발생하며, 표면 산란은 Bragg 표면 산란에 의해 수면에서 주로 발생한다(Brisco et al., 2013). 이러한 성질을 이용하여 식생에서 어떠한 변화가 발생했는지 파악하는 연구가 다수 수행되었다(Brisco et al., 2013; Silva-Perez et al., 2021; Ye et al., 2022; Zhang et al., 2014).

## 3. SAR 강도 기반 변화탐지 활용사례

### 3.1. 도시 변화탐지

도시에서 발생하는 변화는 주로 건물이나 교량과 같은 인공구조물의 신설, 증축 또는 해체로 인한 특정 개체의 변화와 태풍, 홍수, 지진과 같은 자연재해로 인해 도시 전역에서 발생하는 변화가 있다. 일반적으로 강도 기반 변화탐지 기법을 적용한 도시 변화탐지 연구들에서는 해당 변화가 신설과 증축 등으로 인해 새롭게 생겨난 변화인지 해체 또는 파괴로 인해 사라진 변화인지 파악할 수가 있다(Bruzzzone and Prieto, 2000; Hu and Ban, 2014; Liu and Yamazaki, 2011; Lopez and Stilla, 2022).

하지만 해당 변화가 건물과 같은 인공구조물의 변화인지 숲이나 강에서 발생한 변화인지 분류할 수 없다는 한계점이 존재한다. SAR 영상을 거리방향으로 서로 다른 중심 주파수를 가진 Sublook 영상을 만들었을 때 인공구조물과 같이 강하고 안정적으로 후방산란을 발생시키는 픽셀의 위상 정보는 서로 다른 Sublook 영상 내에서 선형적으로 변화하게 된다(Sanjuan-Ferrer et al., 2015; Schneider and Papathanassiou, 2009). 이러한 특징을 이용하여 Lopez and Stilla (2022)는 강도 기반 변화탐지 기법



Fig. 1. Example of change detection on man-made structures (Lopez and Stilla, 2022).

을 적용해 얻은 변화탐지 결과로부터 인공구조물에서 발생한 변화만을 추출하였다(Fig. 1).

Washaya et al. (2018)은 지진, 태풍, 전쟁으로 인해 도시 전역에서 발생한 피해를 확인하기 위하여 긴밀도(Coherence) 영상을 이용한 변화탐지를 수행했다. 도시 지역에서 변화가 발생하면 다중 시기 영상에서의 긴밀도가 낮아지는 점에서 착안하여 긴밀도를 기준으로 변화 유무를 분류하였다. 이후 변화 픽셀을 그대로 사용하는 것이 아니라 행정구와 같이 도시 구획을 나누어 폴리곤을 생성하여 각 폴리곤 내에 존재하는 모든 픽셀들의 긴밀도 평균과 표준편차를 구함으로써 각 구역마다의 변화 정도를 파악하였다. 이를 통해 도시 내 변화가 많이 발생한 지역을 더 직관적으로 확인할 수 있었다.

### 3.2. 홍수 변화탐지

잔잔한 수면은 후방산란 강도가 약해 지상에 비해 SAR 영상 내에서 어렵게 보인다. 이러한 특징을 이용하여 홍수로 인해 물이 잠긴 지역을 파악하기 위한 다양한 연구들이 수행되었다(Carreño Conde and De Mata Muñoz, 2019; Long et al., 2014; Reksten et al., 2019).

홍수에 있어 지형의 경사는 물의 유속과 배수에 영향을 미치며, 경사가 가파를수록 아래 지역에 더 많은 홍수가 발생할 수 있지만 경사가 높은 해당 지역에는 홍수가 날 경향이 적다(Al-Juaidi, 2023; Moharrami et al., 2021; Nguyen et al., 2020). 또한 일반적으로 높은 고도에 있을수록 실제 홍수가 날 가능성이 적다(Degiorgis et al., 2012). 이러한 점을 이용해 일부 홍수 탐지 연구에서는 지형 고도를 고려하여 홍수가 날 확률이 적은 곳을 미리 제거하는 과정을 거쳐 홍수 오탐지 확률을 줄였다(Reksten et al., 2019; Schlaffer et al., 2015).

전처리를 통해 실제 홍수 탐지를 수행할 후보 영역을 줄였다고 하더라도 침수 지역 구분을 위한 히스토그램 임계값을 설정하는 데 있어서 SAR 영상에 존재하는 스펙클(Speckle) 노이즈로 인해 영향을 받게 된다. 따라서 노이즈 저감을 위해 노이즈 필터를 적용하여야 하는데 필터의 크기가 너무 크다면 오히려 수체 탐지 성능이 저조해지는 부작용이 나타나므로 적절한 크기의 노이즈 필터 크기를 선정하는 것이 중요하다(Carreño Conde and De Mata Muñoz, 2019; Long et al., 2014; Park, 2016).

Long et al. (2014)은 영상 차분 히스토그램으로부터 홍

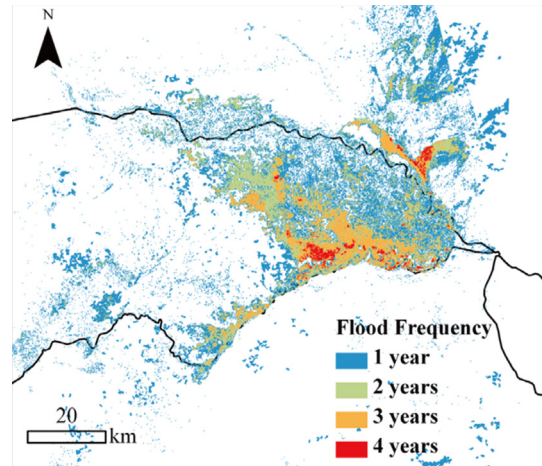


Fig. 2. Example of 4 years of flood detection (Long et al., 2014).

수 침수 지역을 탐지한 뒤 홍수 픽셀들을 그룹화함으로써 노이즈로 인해 산발적으로 발생한 오탐지 영향을 줄였으며, 수년 동안의 홍수 침수 영역을 탐지하여 그려냄으로써 효과적으로 홍수 취약 지역을 나타냈다(Fig. 2).

### 3.3. 식생 변화탐지

SAR 영상을 이용한 식생의 변화탐지는 산불이나 홍수와 같은 자연재해로 인해 식생에 생긴 변화를 탐지하는 사례(Abdikan et al., 2022; Brisco et al., 2013; Lasaponara and Tucci, 2019; Ruiz-Ramos et al., 2018; Tanase et al., 2015)와 작물의 분류나 성장 과정에서 생긴 변화를 관측하는 사례(Silva-Perez et al., 2021; Xu et al., 2018; Ye et al., 2022; Zhang et al., 2014)로 나눌 수 있다.

Ruiz-Ramos et al. (2018)은 SAR 영상에서 산불 피해를 입은 지역을 관측할 수 있는지 알아보기 위해 단순히 후방산란 강도의 차이를 비교하였다. 그 결과 산불이 발생한 이후부터 화재 피해 지역에서의 후방산란 강도가 아주 오랜기간 계속해서 낮아짐을 발견했다. Tanase et al. (2015)은 후방산란된 강도 정보로부터 Radar Burn Ratio (RBR) 지수맵을 생성하여 산불 피해를 입은 식생 영역을 추출했다. 하지만 고정된 임계값을 이용해 산불 피해 영역을 추출하므로 식생 군락의 종류가 달라지거나 지형이 달라짐에 따라 산불 피해 탐지 성능이 변하게 되는 단점이 존재했다. 이를 보완하기 위해 Lasaponara and Tucci (2019)는 RBR 지수맵에 무감독 분류(unsupervised classification)를 적용하여 특정 지형이나 군락과 관계없



이 산불 피해의 심각 정도를 추출해낼 수 있었다.

SAR 영상을 이용해 작물의 분류와 성장 과정을 관찰하기 위한 연구들은 작물의 형상에 따라 달라지게 되는 후방산란 특성을 이용하기 위해 이중 편파 이상의 영상을 사용하여 연구를 수행했다(Silva-Perez et al., 2021; Xu et al., 2018; Ye et al., 2022; Zhang et al., 2014). Silva-Perez et al. (2021)과 Xu et al. (2018)은 이중 편파를 이용해 작물 성장 과정에서 발생하는 후방산란 특성을 이용해 작물 분류를 수행했다(Fig. 3). 하지만 입사각이나 궤도 등 후방산란되는 편파 정보에 영향을 끼치는 요소들에 의해 작물 분류 성능이 낮아질 수 있으므로 해당 요소들을 잘 고려해주어야 한다(Silva-Perez et al., 2021).

Brisco et al. (2013)은 홍수피해를 입은 지역에서 식생의 침수 정도를 관측하는 연구를 수행했다. 이를 위하여 식생에서부터 돌아오는 후방산란 편파 정보를 Freeman-Durden 분해(Freeman and Durden, 1998)를 통해 체적 산란, 이중 산란, 표면 산란으로 분류하였다. 이중 산란과 체적 산란은 식생이 무성한 곳에서 주로 발생하게 되므로 두 산란이 확연히 증가하는 곳은 큰 침수 피해를 받은 후 물이 배수되면서 식생이 수면 밖으로 들어나게된 곳을 의미한다(Brisco et al., 2013). 표면 산란은 수면에서부터 주로 발생하게 되므로 표면 산란이 감소하는 것은 침수되었던 지역에서 물이 배수됨을 의미하며 반대로 표면 산란이 증가하는 지역은 제방을 쌓는 등의 인위적인 수위 관리 활동에 의해 수위가 높아진 지역을 의미한다(Brisco et al., 2013). 해당 결과로부터 직접적인 수위 관측을 수행할 수는 없었지만 침수피

해 지역의 식생을 통해 간접적으로 침수피해 높이와 영역을 파악할 수 있었다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 SAR 강도 정보를 활용한 변화탐지 기술과 해당 기술들의 활용사례를 조사 및 정리하였다. 강도 기반의 변화탐지 기술만으로도 도시, 홍수, 산불, 식생 분야에서의 다양한 활용이 가능하다는 것을 확인했다. 하지만 통계적으로 각 분야마다의 활용사례 연구를 정량적으로 분석하지 못하여 어느 분야에서 얼마나 활발히 연구가 수행되고 있는지는 파악하지 못하였다. 그리고 본 논문에서 조사한 개 분야 이외에도 선박과 유류 유출 탐지(Abou El-Magd et al., 2020; Kim and Jung, 2017; Baek and Jung, 2021), 해안선 변화탐지(Chen et al., 2011; Liu et al., 2016; Vandebroek et al., 2017), 표적 탐지(Cui et al., 2011), 토지피복 변화탐지(Braun and Hochschild, 2017), 유적 탐지(Tapete et al., 2013) 등 다양한 활용사례가 존재하므로 위성정보융합협의체 소속기관의 SAR 영상 활용방안 수요에 맞춘 추가 조사가 필요하다.

현재 시점에서 한국항공우주연구원 국가위성정보 활용지원센터에서 운영 중인 유일한 SAR 위성인 아리랑 5호는 단일 편파만을 제공하여(Lee, 2010) 본 논문에서 소개한 편파를 활용한 변화탐지 기법을 적용하기에는 어려움이 있다. 하지만 향후 발사 예정인 아리랑 6호의 경우 완전 편파를 제공할 계획에 있으므로(Yang,

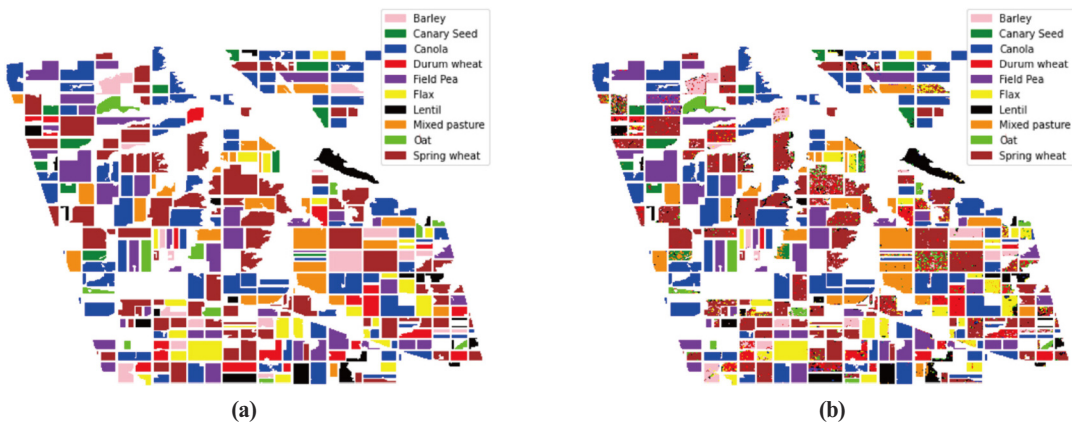


Fig. 3. Example of Quad-pol based crop classification (Silva-Perez et al., 2021). (a) Ground-Truth. (b) Result of the crop classification.

2018) 아리랑 6호 활용 지원을 위해서는 편파 기반 변화 탐지 기술개발이 요구될 것으로 전망된다. 한국항공우주연구원을 주도로 위성정보활용협의체 소속기관에서 필요한 SAR 변화탐지 활용방안을 조사하고 이를 바탕으로 기술 개발계획을 수립하고 활용기술을 개발한다면 미래 SAR 위성정보 활용에 관한 국가적 수요가 발생한 때에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 사사

이 연구는 한국항공우주연구원 “정부위성정보활용 협의체 지원(FR23K00)” 주요사업의 일환으로 수행되었습니다.

## Conflict of Interest

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

## References

- Abdikan, S., Bayik, C., Sekertekin, A., Bektas Balcik, F., Karimzadeh, S., Matsuoka, M., and Balik Sanli, F., 2022. Burned area detection using multi-sensor SAR, optical, and thermal data in Mediterranean pine forest. *Forests*, 13(2), 347. <https://doi.org/10.3390/f13020347>
- Abou El-Magd, I., Zakzouk, M., Abdulaziz, A. M., and Ali, E. M., 2020. The potentiality of operational mapping of oil pollution in the mediterranean sea near the entrance of the Suez Canal using sentinel-1 SAR data. *Remote Sensing*, 12(8), 1352. <https://doi.org/10.3390/rs12081352>
- Al-Juaidi, A. E., 2023. The interaction of topographic slope with various geo-environmental flood-causing factors on flood prediction and susceptibility mapping. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(21), 59327–59348. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26616-y>
- Baek, W. K., and Jung, H. S., 2019. A review of change detection techniques using multi-temporal synthetic aperture radar images. *Korean Journal of Remote Sensing*, 35(5–1), 737–750. <https://doi.org/10.7780/kjrs.2019.35.5.1.10>
- Baek, W. K., and Jung, H. S., 2021. Performance comparison of oil spill and ship classification from x-band dual-and single-polarized sar image using support vector machine, random forest, and deep neural network. *Remote Sensing*, 13(16), 3203. <https://doi.org/10.3390/rs13163203>
- Braun, A., and Hochschild, V., 2017. A SAR-based index for landscape changes in African Savannas. *Remote Sensing*, 9(4), 359. <https://doi.org/10.3390/rs9040359>
- Brisco, B., Schmitt, A., Murnaghan, K., Kaya, S., and Roth, A., 2013. SAR polarimetric change detection for flooded vegetation. *International Journal of Digital Earth*, 6(2), 103–114. <https://doi.org/10.1080/17538947.2011.608813>
- Bruzzone, L., and Prieto, D. F., 2000. Automatic analysis of the difference image for unsupervised change detection. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(3), 1171–1182. <https://doi.org/10.1109/36.843009>
- Carreño Conde, F., and De Mata Muñoz, M., 2019. Flood monitoring based on the study of Sentinel-1 SAR images: The Ebro River case study. *Water*, 11(12), 2454. <https://doi.org/10.3390/w11122454>
- Chae, S. H., Oh, K. Y., and Lee, S. G., 2022. Development of proto-type program for automatic change detection and cueing of multi-temporal KOMPSAT-5 SAR imagery. *Korean Journal of Remote Sensing*, 38(6–4), 1955–1969. <https://doi.org/10.7780/kjrs.2022.38.6.4.9>
- Chen, K. S., Wang, H. W., Wang, C. T., and Chang, W. Y., 2011. A study of decadal coastal changes on western Taiwan using a time series of ERS

- satellite SAR images. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 4(4), 826–835. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2011.2131635>
- Cui, Y., Zhou, G., Yang, J., and Yamaguchi, Y., 2011. On the iterative censoring for target detection in SAR images. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 8(4), 641–645. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2010.2098434>
- Degiorgis, M., Gnecco, G., Gomi, S., Roth, G., Sanguineti, M., and Taramasso, A. C., 2012. Classifiers for the detection of flood-prone areas using remote sensed elevation data. *Journal of Hydrology*, 470–471, 302–315. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.09.006>
- Demirkaya, O., and Asyali, M. H., 2004. Determination of image bimodality thresholds for different intensity distributions. *Signal Processing: Image Communication*, 19(6), 507–516. <https://doi.org/10.1016/j.image.2004.04.002>
- Freeman, A., and Durden, S. L., 1998. A three-component scattering model for polarimetric SAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(3), 963–973. <https://doi.org/10.1109/36.673687>
- Hong, S. H., Kim, H. O., Wdowinski, S., and Feliciano, E., 2015. Evaluation of polarimetric SAR decomposition for classifying wetland vegetation types. *Remote Sensing*, 7(7), 8563–8585. <https://doi.org/10.3390/rs70708563>
- Hu, H., and Ban, Y., 2014. Unsupervised change detection in multitemporal SAR images over large urban areas. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7(8), 3248–3261. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2014.2344017>
- Kim, D., and Jung, H. S., 2017. Oil spill detection from RADARSAT-2 SAR image using non-local means filter. *Korean Journal of Remote Sensing*, 33(1), 61–67. <https://doi.org/10.7780/kjrs.2017.33.1.6>
- Kim, D., and Jung, H. S., 2018. Mapping oil spills from dual-polarized SAR images using an artificial neural network: Application to oil spill in the Kerch Strait in November 2007. *Sensors*, 18(7), 2237. <https://doi.org/10.3390/s18072237>
- Kim, D., Jung, H. S., and Baek, W., 2016. Comparative analysis among radar image filters for flood mapping. *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, 34(1), 43–52. <https://doi.org/10.7848/ksgpc.2016.34.1.43>
- Lasaponara, R., and Tucci, B., 2019. Identification of burned areas and severity using SAR Sentinel-1. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 16(6), 917–921. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2018.2888641>
- Lee, C., Yun, Y., Bae, S., Eo, Y. D., Kim, C., Shin, S. et al., 2021. Analysis of deep learning research trends applied to remote sensing through paper review of Korean domestic journals. *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, 39(6), 437–456. <https://doi.org/10.7848/ksgpc.2021.39.6.437>
- Lee, H., 2006. Investigation of SAR systems, technologies and application fields by a statistical analysis of SAR-related journal papers. *Korean Journal of Remote Sensing*, 22(2), 153–174. <https://doi.org/10.7780/kjrs.2006.22.2.153>
- Lee, S. R., 2010. Overview of KOMPSAT-5 program, mission, and system. In *Proceedings of the 2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Honolulu, HI, USA, July 25–30, pp. 797–800. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2010.5652759>
- Liu, W., and Yamazaki, F., 2011. Urban monitoring and change detection of central Tokyo using high-resolution X-band SAR images. In *Proceedings of the 2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Vancouver, BC, Canada, July 24–29, pp. 2133–2136. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2011.6055275>

- org/10.1109/IGARSS.2011.6049587
- Liu, Z., Li, F., Li, N., Wang, R., and Zhang, H., 2016. A novel region-merging approach for coastline extraction from Sentinel-1A IW mode SAR imagery. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 13(3), 324–328. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2015.2510745>
- Long, S., Fatoyinbo, T. E., and Policelli, F., 2014. Flood extent mapping for Namibia using change detection and thresholding with SAR. *Environmental Research Letters*, 9(3), 035002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/3/035002>
- Lopez, C. V., and Stilla, U., 2022. Monitoring of construction activity by change detection on SAR time series using coherent scatterers. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 15, 7499–7514. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2022.3201480>
- McNairn, H., and Brisco, B., 2004. The application of C-band polarimetric SAR for agriculture: A review. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 30(3), 525–542. <https://doi.org/10.5589/m03-069>
- Moharrami, M., Javanbakht, M., and Attarchi, S., 2021. Automatic flood detection using sentinel-1 images on the Google Earth engine. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193, 1–17. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09037-7>
- Nguyen, B. D., Minh, D. T., Ahmad, A., and Nguyen, Q. L., 2020. The role of relative slope length in flood hazard mapping using AHP and GIS (case study: Lam River Basin, Vietnam). *Geography, Environment, Sustainability*, 13(2), 115–123. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2020-48>
- Park, S. E., 2016. Detection of water bodies from Kompsat-5 SAR data. *Korean Journal of Remote Sensing*, 32(5), 539–550. <https://doi.org/10.7780/kjrs.2016.32.5.11>
- Reksten, J. H., Salberg, A. B., and Solberg, R., 2019. Flood detection in Norway based on Sentinel-1 SAR Imagery. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 349–355. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-W8-349-2019>
- Rignot, E. J. M., and van Zyl, J. J., 1993. Change detection techniques for ERS-1 SAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 31(4), 896–906. <https://doi.org/10.1109/36.239913>
- Ruiz-Ramos, J., Marino, A., and Boardman, C. P., 2018. Using sentinel 1-SAR for monitoring long term variation in burnt forest areas. In *Proceedings of the 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Valencia, Spain, July 22–27, pp. 4901–4904. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2018.8518960>
- Sanjuan-Ferrer, M. J., Hajnsek, I., Papathanassiou, K. P., and Moreira, A., 2015. A new detection algorithm for coherent scatterers in SAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(11), 6293–6307. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2015.2438173>
- Schlaffer, S., Matgen, P., Hollaus, M., and Wagner, W., 2015. Flood detection from multi-temporal SAR data using harmonic analysis and change detection. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 38, 15–24. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.12.001>
- Schneider, R. Z., and Papathanassiou, K., 2009. Estimation and correction of ionospheric induced phase errors in SAR images using coherent scatterers. In *Proceedings of the 2009 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Cape Town, South Africa, July 12–17, pp. 165–168. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2009.5417348>
- Silva-Perez, C., Marino, A., Lopez-Sanchez, J. M., and Cameron, I., 2021. Multitemporal polarimetric SAR change detection for crop monitoring and crop type classification. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14, 12361–12374. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2021.3130186>



- Tanase, M. A., Kennedy, R., and Aponte, C., 2015. Radar Burn Ratio for fire severity estimation at canopy level: An example for temperate forests. *Remote Sensing of Environment*, 170, 14–31. <http://doi.org/10.1016/j.rse.2015.08.025>
- Tapete, D., Cigna, F., Masini, N., and Lasaponara, R., 2013. Prospection and monitoring of the archaeological heritage of Nasca, Peru, with ENVISAT ASAR. *Archaeological Prospection*, 20(2), 133–147. <https://doi.org/10.1002/arp.1449>
- Vandebroek, E., Lindenbergh, R., Van Leijen, F., De Schipper, M., De Vries, S., and Hanssen, R., 2017. Semi-automated monitoring of a mega-scale beach nourishment using high-resolution TerraSAR-X satellite data. *Remote Sensing*, 9(7), 653. <https://doi.org/10.3390/rs9070653>
- Washaya, P., Balz, T., and Mohamadi, B., 2018. Coherence change-detection with sentinel-1 for natural and anthropogenic disaster monitoring in urban areas. *Remote Sensing*, 10(7), 1026. <https://doi.org/10.3390/rs10071026>
- Xu, L., Zhang, H., Wang, C., Zhang, B., and Liu, M., 2018. Crop classification based on temporal information using sentinel-1 SAR time-series data. *Remote Sensing*, 11(1), 53. <https://doi.org/10.3390/rs11010053>
- Yang, D. C., 2018. Recent trends in synthetic aperture radar (SAR) applications and technology. *Current Industrial and Technological Trends in Aerospace*, 16(1), 127–135.
- Ye, J., Wang, C., Gao, H., Fan, H., Song, T., and Ding, L., 2022. A novel unsupervised object-level crop rotation detection with time-series dual-polarimetric SAR data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 19, 1–5. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2022.3195809>
- Yoon, G. W., Koh, J. W., and Lee, Y. W., 2010. Investigation of applications technology for high resolution SAR images. *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, 13(1), 105–113.
- Zhang, L., Sun, L., Zou, B., and Moon, W. M., 2014. Fully polarimetric SAR image classification via sparse representation and polarimetric features. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8(8), 3923–3932. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2014.2359459>