

Nghiên cứu khôi phục dữ liệu sạt lở đất dùng dữ liệu ảnh vệ tinh Sentinel 2 và thuật toán phân loại Support Vector Machine

Đoàn Viết Long¹, Nguyễn Chí Công¹, Phạm Thành Hưng¹, Nguyễn Tiến Cường²

¹Trường Đại học Bách Khoa- Đại Học Đà Nẵng

²Trường Đại học Phenikaa

E-mail: dvlong@dut.udn.vn

Tóm tắt: Sạt lở đất là loại hình thiên tai khá phổ biến ở miền núi Việt Nam, xảy ra chủ yếu vào mùa mưa bão và gây nhiều thiệt hại nghiêm trọng. Công tác cập nhật dữ liệu các điểm sạt lở là một khâu quan trọng, cung cấp các thông tin cần thiết trong nghiên cứu sạt lở đất. Tuy nhiên, nguồn dữ liệu này ở Việt Nam hiện nay chưa được thu thập một cách đầy đủ do nhiều nguyên nhân khác nhau. Với mục đích khôi phục lại dữ liệu các điểm sạt lở đất trong quá khứ, nghiên cứu này đã sử dụng kỹ thuật phân tích ảnh viễn thám Sentinel 2 kết hợp với thuật toán phân loại Support Vector Machine. Hai ảnh vệ tinh Sentinel 2 ở các thời điểm trước và sau các vụ sạt lở được lựa chọn để phân tích. Vị trí các điểm sạt lở được xác định dựa trên phân tích chỉ số NDVI. Kết quả bước đầu cho thấy khả năng phát hiện các điểm sạt lở của phương pháp này nhằm cung cấp dữ liệu cần thiết để xây dựng bản đồ hiện trạng sạt lở.

Từ khóa: Sạt lở đất, Sentinel 2, Support Vector Machine, NDVI

Study on reconstruction of landslide database using optical imagery Sentinel 2 and Support Vector Machine classification algorithm

Abstract: Landslide is one of natural disasters in mountainous areas, occurring mainly in the rainy season and causing many serious damages. Landslide inventory database is an important source, providing necessary information for landslide assessment. However, in Vietnam this database has not been collected sufficiently due to various reasons. This study used optical imagery Sentinel 2 to derive Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and the Support Vector Machine classification algorithm for landslide detection and mapping. The pre-event and post-event Sentinel 2 images acquired at the same study area were selected for the analysis. Location of landslide is determined based on the changes of the classified NDVI. The result indicates the applicability of this method for landslide detection and hence for landslide inventory mapping.

1. Đặt vấn đề

Sạt lở đất là một trong những loại thiên tai khá phổ biến ở Việt Nam. Hiện tượng này hầu như xảy ra hàng năm vào mùa mưa ở vùng miền núi gây ra nhiều thiệt hại về tính mạng và tài sản. Trong công tác quản lý sạt lở đất, bản đồ hiện trạng sạt lở là công cụ quan trọng, cung cấp thông tin về vị trí, thời gian các vụ sạt lở đã xảy ra. Nguồn dữ liệu này là cơ sở quan trọng để triển khai các nghiên cứu tiếp theo như thiết lập bản đồ nguy cơ và rủi ro sạt lở đất [1].

Dữ liệu các điểm sạt lở hiện nay được thu thập dựa trên các nguồn sau: khảo sát thực tế, kế thừa từ các công trình nghiên cứu trước (bài báo, dự án, ...) và dữ liệu ảnh vệ tinh.

2 Nghiên cứu khôi phục dữ liệu sạt lở đất bằng kỹ thuật phân tích ảnh vệ tinh Sentinel 2 và thuật toán phân loại Support Vector Machine

Trong số đó, nguồn dữ liệu khảo sát, thu thập và lưu trữ từ các cơ quan quản lý là rất quan trọng, có chất lượng tốt và độ tin cậy cao. Ở Việt Nam, công tác quản lý loại hình thiên tai này mới được quan tâm trong thời gian gần đây, do đó dữ liệu về các vụ sạt lở được ghi nhận còn thiếu và chưa đầy đủ về thông tin (thời gian, vị trí, mức độ ...). Một số nguyên nhân chính có thể kể đến như: thiếu kinh phí khảo sát - cập nhật dữ liệu; không thể tiếp cận được điểm sạt lở do khó khăn về địa hình; bỏ sót thông tin các điểm sạt lở nhỏ. Ngày nay, với sự phát triển vượt bậc của ngành khoa học quan sát Trái đất, kỹ thuật phân tích ảnh vệ tinh được ứng dụng trong nhiều lĩnh vực, trong đó có sạt lở đất. Kỹ thuật này cho phép nhận diện được các điểm sạt lở dựa trên sự phân tích hình ảnh chụp từ vệ tinh. Hiện nay, có nhiều nguồn ảnh vệ tinh được sử dụng trong lĩnh vực nghiên cứu sạt lở đất và có thể phân chia làm 2 nhóm: ảnh quang học và ảnh radar. Nguồn ảnh quang học có thể thu thập được từ các vệ tinh như: Landsat 4, 5, 7 và 8, Sentinel-2A/B ... [1], [2]. Trong khi đó, ảnh radar được thu thập từ vệ tinh radar khẩu độ tổng hợp (Synthetic Aperture Radar - SAR) như Sentinel-1A/B, ERS-1/2, ENVISAT, ALOS PALSAR, RADASAT-2 ... [3]

Hiện nay, có nhiều nghiên cứu đã áp dụng kỹ thuật phân tích ảnh quang học để phục hồi dữ liệu sạt lở đất dựa trên các kỹ thuật phân tích khác nhau. Nghiên cứu [4] đã sử dụng phương pháp dựa trên sự thay đổi của ảnh vệ tinh trước và sau sự kiện theo từng ô lưới để thiết lập bản đồ sạt lở đất sau vụ động đất từ dữ liệu ảnh vệ tinh Landsat 8. Kết quả so sánh với hình ảnh có độ phân giải cao từ Google Earth cho thấy rằng phương pháp này cho độ chính xác cao và có thể áp dụng cho việc khôi phục thông tin liên quan đến sạt lở đất. [5] đã sử dụng phương pháp CDMRF (Change Detection-based Markov Random Field) với kỹ thuật phân tích CVA (Change Vector Analysis) để phân tích vị trí sạt lở đất dựa trên ảnh không gian có độ phân giải 0.5m ở đảo Lantau, Hồng Kông. Kết quả thu được khá chính xác vì phương pháp này tận dụng được cả thông tin về bối cảnh không gian và quang phổ của các vụ sạt lở đất. Tuy nhiên phương pháp này tỏ ra không hiệu quả đối với các vụ sạt lở tạo ra khác biệt quá nhỏ hoặc không thể nhìn thấy dưới ảnh quang học. [1] đã đưa ra phương pháp CDMRF mới dựa trên dữ liệu ảnh vệ tinh Sentinel 2 có độ phân giải 10x10m để xây dựng bản đồ sạt lở đất. Các kỹ thuật phân tích được sử dụng bao gồm sự thay đổi trước và sau sự kiện sạt lở của các ảnh tạo bởi NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) và PCA (Principal Component Analysis). Kết quả cho thấy rằng kỹ thuật phân tích sự thay đổi ảnh từ chỉ số NDVI cho độ chính xác cao hơn kỹ thuật PCA nhưng lại bỏ qua nhiều lỗi hơn. Cũng trong chuỗi nghiên cứu này, [6] cũng đã sử dụng phương pháp CDMRF để phân tích nhanh vị trí sạt lở dựa trên các kỹ thuật phân tích CVA, NDVI, PCA, ICA (Independent Component Analysis). Dữ liệu ảnh trước và sau sạt lở được lấy từ nguồn ảnh có độ phân giải rất cao QuickBird, nguồn ảnh có độ phân giải cao FORMOSAT-2 và nguồn ảnh có độ phân giải trung bình Sentinel 2 và Landsat 8. Kết quả cho thấy rằng phương pháp phân tích NDVI, PCA và ICA dựa trên CDMRF cho kết quả tốt hơn phương pháp CVA.

Với sự phát triển của ngành khoa học máy tính, kỹ thuật học máy ngày càng được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực nghiên cứu. Đối với nghiên cứu về sạt lở đất, kỹ thuật học máy đã được ứng dụng phổ biến trong các bài toán phân loại các khu vực sạt lở và không sạt lở. Nhiều thuật toán học máy đã được áp dụng và được đánh giá cao, có thể kể đến một số thuật toán được sử dụng phổ biến như: SVM (Support Vector Machine), LR (Logistic Regression), RF (Random Forest) ... [7]–[9].

Trên cơ sở đánh giá khả năng ứng dụng của ảnh vệ tinh trong nghiên cứu khôi phục dữ liệu sạt lở đất của các nghiên cứu trước đây, nghiên cứu này được thực hiện nhằm mục đích đánh giá khả năng phục hồi dữ liệu các điểm sạt lở đất bằng phương pháp phân tích sự thay đổi của chỉ số NDVI và kỹ thuật phân loại SVM. Nguồn dữ liệu ảnh quang học có độ

phân giải trung bình được truy xuất từ vệ tinh Sentinel 2. Khu vực được ứng dụng để nghiên cứu là vùng núi tỉnh Quảng Ngãi.

2. Khu vực nghiên cứu

Nghiên cứu này thực hiện khôi phục các điểm sạt lở trên địa bàn các huyện vùng núi tỉnh Quảng Ngãi. Khu vực này có đặc điểm địa hình khá dốc, độ dốc có xu hướng giảm dần từ Tây sang Đông. Phía Tây tiếp giáp với dãy Trường Sơn, phía Đông tiếp giáp vùng đồng bằng ven biển, độ cao địa hình lớn nhất là 1694m. Do chịu ảnh hưởng trực tiếp bởi hình thái khí hậu nhiệt đới gió mùa, hàng năm khu vực này xuất hiện khoảng 3 đến 17 cơn bão nhiệt đới kèm theo mưa lớn. Đây được xem là nguyên nhân chính dẫn đến sạt lở đất ở khu vực này [10]. Đầu tháng 11 năm 2017, do ảnh hưởng của hoàn lưu cơn bão số 12, trên địa bàn các huyện vùng núi tỉnh Quảng Ngãi có mưa lớn dẫn đến sạt lở nhiều nơi. Thống kê từ địa phương cho thấy có khoảng hơn 300 vụ sạt lở trong đợt này. Dựa trên cơ sở đó, nghiên cứu này đã lựa chọn khu vực vùng núi xã Ba Lê, huyện Ba Tơ, tỉnh Quảng Ngãi, một trong những khu vực chịu thiệt hại nặng nề bởi sạt lở đất để đánh giá. Vị trí khu vực nghiên cứu xem tại Hình 1.

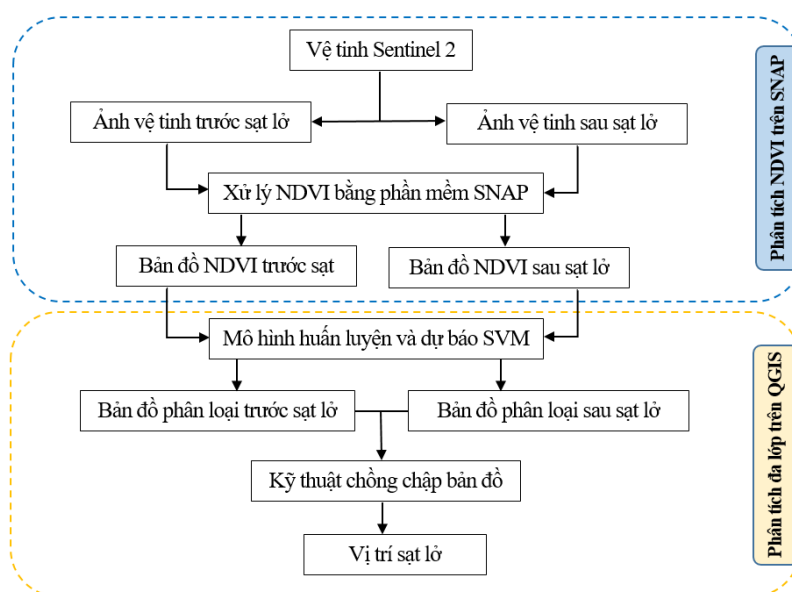


Hình 1: Khu vực nghiên cứu-xã Ba Lê, huyện Ba Tơ, tỉnh Quảng Ngãi

3. Phương pháp nghiên cứu

Bài báo này sử dụng phương pháp phân tích sự thay đổi của chỉ số NDVI và thuật toán phân loại SVM để xác định vị trí điểm sạt lở dựa vào nguồn dữ liệu ảnh vệ tinh Sentinel 2. Vết sạt lở được nhận dạng dựa vào sự thay đổi thảm phủ của các hình ảnh được ghi nhận trước và sau sạt lở. Quá trình thực hiện gồm 2 bước chính: (i) Xử lý ảnh và phân tích NDVI bằng phần mềm SNAP và (ii) Phân tích đa lớp để xác định vị trí sạt lở bằng phần mềm QGIS. Sơ đồ phương pháp nghiên cứu được thể hiện trong Hình 2.

4 Nghiên cứu khôi phục dữ liệu sạt lở đất bằng kỹ thuật phân tích ảnh vệ tinh Sentinel 2 và thuật toán phân loại Support Vector Machine



Hình 2: Sơ đồ phương pháp nghiên cứu

3.1. Thu thập ảnh vệ tinh Sentinel 2

Vệ tinh Sentinel-2 là một hệ thống quan sát Trái đất đa quang phổ được thực hiện bởi tổ chức Giám sát Môi trường và An ninh toàn cầu (GMES) và được đồng tổ chức bởi Ủy ban Châu Âu (EC) và Cơ quan Vũ trụ Châu Âu (ESA) [1]. Hệ thống này bao gồm hai vệ tinh quay quanh cực (tức là Sentinel-2A và Sentinel-2B) trên cùng một quỹ đạo nhưng lệch pha nhau 180°. Các vệ tinh mang thiết bị đa quang phổ (MSI) tạo mẫu gồm 13 dải phổ (dải 10 m, 20 m, 60 m) từ dải nhìn thấy và hồng ngoại gần (VNIR) đến dải hồng ngoại sóng ngắn (SWIR). Độ phân giải về thời gian là 5 ngày nếu kết hợp cả hai vệ tinh. Các cấp sản phẩm Cấp-1C và Cấp-2A được cung cấp miễn phí cho người dùng để giám sát đất đai, quản lý khẩn cấp và lập bản đồ rủi ro.

Đối với khu vực nghiên cứu này, dữ liệu ảnh Cấp-1C được thu thập từ web-site của Cơ quan Vũ trụ Châu Âu (ESA) <https://scihub.copernicus.eu/>. Dữ liệu ảnh vệ tinh Sentinel-2B với độ phân giải 20mx20m và chu kỳ lặp lại là 10 ngày sẽ được thu thập để phân tích. Ảnh vệ tinh Sentinel 2 là loại ảnh quang phổ, do đó sẽ bị ảnh hưởng bởi mây, đây là một nhược điểm lớn của vệ tinh ảnh quang học so với vệ tinh radar. Để đảm bảo chất lượng trong quá trình phân tích, nghiên cứu chỉ lựa chọn những bức ảnh có tỷ lệ mây che phủ dưới 20%. Thời điểm các vụ sạt lở đất xảy ra tại khu vực nghiên cứu tập trung vào ngày 05/11/2017. Trên cơ sở đó, bài báo đã lựa chọn 2 ảnh vệ tinh có chất lượng tốt được chụp vào thời điểm trước sạt lở (ngày 05/10/2017) và sau thời điểm sạt lở (ngày 14/11/2017) để đánh giá.

3.2. Xử lý ảnh bằng phần mềm SNAP

Dữ liệu ảnh sau khi thu thập sẽ được xử lý qua các quá trình: hiệu chỉnh khí quyển (Atmospheric correction) và xử lý NDVI. Để thực hiện quá trình hiệu chỉnh khí quyển thì dữ liệu ảnh Cấp-1C phải được chuyển về dữ liệu ảnh Cấp-2A. Tất cả các bước xử lý ảnh được thực hiện bằng phần mềm SNAP.

Tiếp theo, các ảnh vệ tinh được xử lý để thiết lập bản đồ chỉ số NDVI. Chỉ số này cho biết chất lượng thảm thực vật, giúp phân biệt thảm thực vật với đất. Tại vị trí sạt lở, thảm phủ thực vật sẽ bị phá hoại, đây là cơ sở để đánh giá sự thay đổi thảm phủ của hình ảnh trước và sau sạt lở, giúp nhận diện vết sạt. Giá trị NDVI được tính theo công thức:

$$NDVI = \frac{NIR-Red}{NIR+Red} = \frac{B8-B4}{B8+B4} \quad (1)$$

Trong đó: NIR và Red lần lượt là phổ phản xạ của bước sóng cận hồng ngoại và bước sóng màu đỏ.

Quá trình xử lý NDVI trong phần mềm SNAP được thực hiện theo các bước ở Hình 3. Cụ thể:

Read: đọc dữ liệu từ ảnh Sentinel-2 Level 2A (sau khi chuyển từ Level-1C).

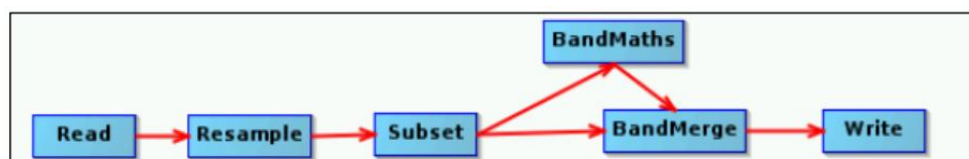
Resample: vì 13 bands của Sentinel-2 là không cùng độ phân giải (10, 20, 60m) nên khó có thể tính toán các chỉ số sử dụng các band có kích thước khác nhau. Do đó cần phải resample để tạo ra các bands cùng kích thước.

Subset: chọn vùng nghiên cứu dựa vào region of interest ROI.

BandMaths: Tính toán chỉ số NDVI.

BandMerge: ghép các bands vào thành một tệp dữ liệu.

Write: xuất kết quả của quá trình xử lý.



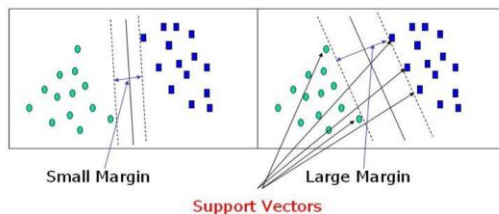
Hình 3: Các bước thực hiện xử lý NDVI trong phần mềm SNAP

3.3. Thuật toán phân loại SVM

Dựa vào bản đồ NDVI đã được tạo ra ở bước 3.2, bài báo đã sử dụng thuật toán phân loại SVM để phân chia các ô lưới trên bản đồ làm 2 loại: (i) có thảm phủ thực vật (nhận giá trị bằng 1) và không có thảm phủ thực vật (nhận giá trị bằng 2). Các quá trình huấn luyện và phân loại được thực hiện trên công cụ dzetsaka của phần mềm QGIS (<https://github.com/lennekade/dzetsaka>).

Thuật toán SVM được đề xuất lần đầu tiên bởi Vapnik vào năm 1995. Mục tiêu của thuật toán SVM là tìm một siêu mặt phẳng trong không gian n chiều này (n - là số lượng các đặc trưng đầu vào) mà có thể phân loại các điểm dữ liệu thành hai lớp. Để tách các lớp điểm dữ liệu, có nhiều siêu mặt phẳng có thể được lựa chọn. Mục tiêu của phương pháp này là tìm ra một mặt phẳng có lề lớn nhất, tức là có khoảng cách lớn nhất đến các điểm dữ liệu của cả hai lớp [11]. Các vector hỗ trợ là các điểm dữ liệu gần với siêu mặt phẳng có ảnh hưởng đến vị trí của nó. Hiện nay, thuật toán SVM được ứng dụng khá phổ biến trong nghiên cứu sạt lở đất. Các nghiên cứu [1], [7], [8] đã chỉ ra rằng SVM là phương pháp hữu hiệu trong đánh giá sạt lở đất.

6 Nghiên cứu khôi phục dữ liệu sạt lở đất bằng kỹ thuật phân tích ảnh vệ tinh Sentinel 2 và thuật toán phân loại Support Vector Machine



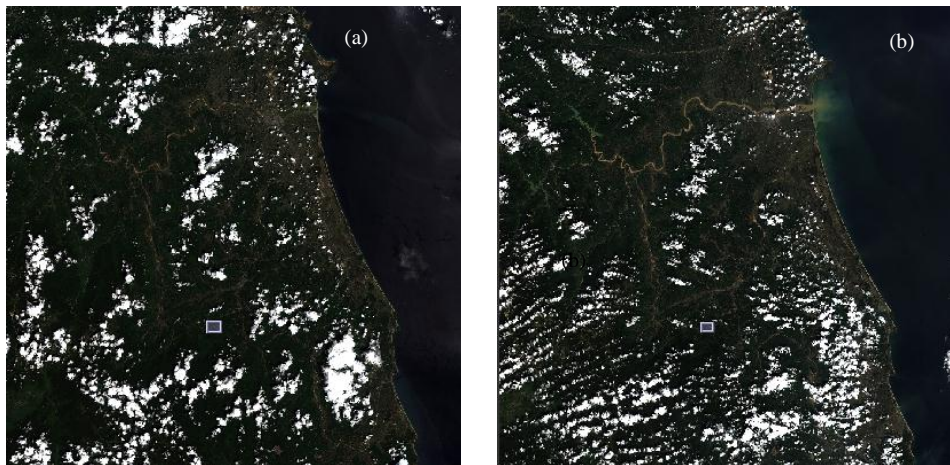
Hình 4: Phương pháp phân loại của thuật toán SVM

3.4. Xử lý đa lớp trên QGIS

Quá trình phân loại bản đồ NDVI bằng thuật toán SVM sẽ phân chia mỗi bản đồ NDVI thành 2 loại: (i) có thảm phủ và (ii) không có thảm phủ. Vị trí sạt lở sẽ được nhận dạng khi so sánh 2 bản đồ này ở thời điểm trước và sau sạt lở. Công việc này được thực hiện bằng kỹ thuật phân tích chồng lớp bản đồ (overlay) trong phần mềm QGIS. Vết sạt lở sẽ được nhận dạng khi bản đồ phân loại sau sạt lở bị mất đi thảm phủ so với bản đồ trước đó.

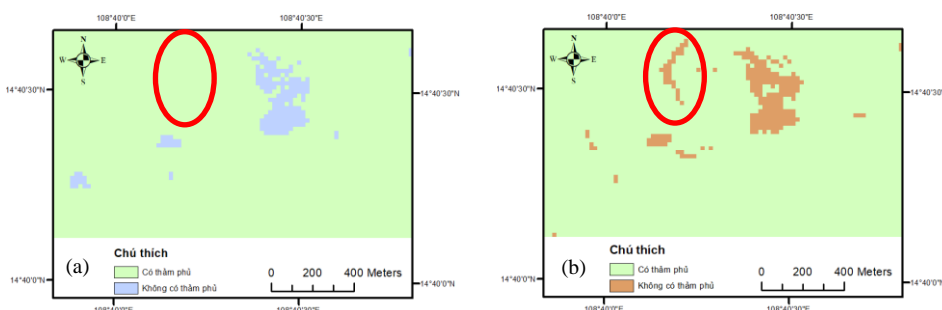
4. Kết quả và thảo luận[12]

Trên cơ sở báo cáo về tình hình sạt lở đất do ảnh hưởng của hoàn lưu bão số 12 kèm mưa lớn vào đầu tháng 11 năm 2017. Nghiên cứu này đã thu thập được 2 ảnh vệ tinh có chất lượng phù hợp ở thời điểm trước (ngày 05/10/2017) và sau giai đoạn sạt lở (ngày 14/11/2017) (Hình 5).



Hình 5: Ảnh vệ tinh Sentinel 2: (a) trước sạt lở_05/10/2017, (b) sau sạt lở_14/11/2017

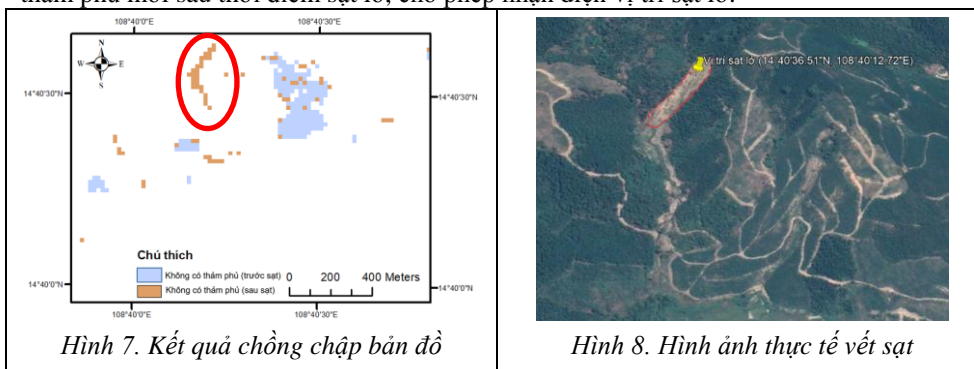
Các hình ảnh này sau đó sẽ được xử lý và chuyển về bản đồ chỉ số NDVI. Khu vực nghiên cứu ở xã Ba Lễ, huyện Ba Tơ, tỉnh Quảng Ngãi sẽ được trích xuất để thực hiện đánh giá. Thuật toán SVM sẽ được sử dụng để phân chia bản đồ NDVI làm 2 loại: (1) có thảm phủ và (2) không có thảm phủ. Kết quả bản đồ phân loại bằng thuật toán SVM được thể hiện trong Hình 6.



Hình 6: Bản đồ phân loại thảm phủ: (a) trước sạt lở, (b) sau sạt lở

Từ Hình 6 có thể thấy rằng, thảm phủ thực vật của khu vực nghiên cứu trước và sau sạt lở đã có sự thay đổi. Hình 6.b xuất hiện những vết mất thảm phủ so với Hình 6.a, dấu hiệu để nhận diện vị trí sạt lở, đặc biệt là vết không có thảm phủ ở tọa độ (14°40'36.51" Bắc, 108°40'12.72" Đông).

Kết quả chồng chập 2 bản đồ này để xét sự thay đổi của vùng không có thảm phủ trước và sau sạt lở được thể hiện ở Hình 7. Từ đó có thể thấy rõ sự xuất hiện vết không có thảm phủ mới sau thời điểm sạt lở, cho phép nhận diện vị trí sạt lở.



Hình 7. Kết quả chồng chập bản đồ

Hình 8. Hình ảnh thực tế vết sạt

Đối chiếu với hình ảnh thực tế vết sạt ở hình 8 ở vị trí vết sạt được ghi nhận tại tọa độ (14°40'36.51" Bắc, 108°40'12.72" Đông), có thể thấy rằng kết quả phân tích ở trên là phù hợp. Qua đó đánh giá được khả năng phát hiện vết sạt lở bằng kỹ thuật xử lý ảnh vệ tinh Sentinel 2 và thuật toán phân loại SVM.

5. Kết luận

Công tác thu thập dữ liệu các điểm sạt lở đất là hết sức quan trọng, đây là dữ liệu đầu vào để thực hiện các nghiên cứu dự báo, đánh giá nguy cơ và rủi ro sạt lở đất. Sự phát triển của khoa học quan sát Trái đất đã hỗ trợ rất lớn cho công tác khôi phục dữ liệu, trong đó có dữ liệu sạt lở đất. Nghiên cứu này được thực hiện nhằm đánh giá khả năng nhận dạng vết sạt lở bằng kỹ thuật phân tích NDVI dựa trên thuật toán phân loại SVM đối với hình ảnh vệ tinh Sentinel 2. Với độ phân giải 20x20m và chu kỳ lặp lại 10 ngày, ảnh Sentinel 2 được đánh giá là tốt hơn so với ảnh Landsat 8 (độ phân giải 30x30m và chu kỳ lặp lại 16 ngày) đã được sử dụng phổ biến trong các nghiên cứu trước đây. Khu vực được lựa chọn để đánh giá là xã miền núi Ba Lế, huyện Ba Tơ, tỉnh Quảng Ngãi. Đây là địa phương chịu ảnh hưởng nặng nề bởi sạt lở đất xảy ra vào đầu tháng 11 năm 2017. Hai bức ảnh có chất lượng phù hợp được thu thập ở thời điểm trước và sau sạt lở. Thuật toán SVM được sử dụng để phân

chia mỗi hình ảnh thành 2 loại: có thảm phủ và không có thảm phủ dựa trên chỉ số NDVI. Vết sạt lở được nhận dạng dựa trên sự thay đổi về thảm phủ, sự xuất hiện của vết không có thảm phủ ở ảnh sau so với trước sạt lở là cơ sở để đánh giá. Kết quả quá trình phân tích chồng chấp bản đồ đã ghi nhận được một vết sạt lở xuất hiện, đối chiếu với hình ảnh thực tế thì hoàn toàn trùng khớp với tọa độ điểm sạt lở đã xảy ra.

Kết quả này cho thấy khả năng áp dụng của phương pháp này trong nghiên cứu khôi phục dữ liệu các điểm sạt lở đất. Tuy nhiên, bài báo cũng nhận ra một số khó khăn trong quá trình thực hiện nghiên cứu, bao gồm: chất lượng ảnh quang học bị ảnh hưởng bởi mây, yếu tố thường xuyên xuất hiện trong khoảng thời gian sạt lở; chỉ số NDVI có thể bị tác động bởi các yếu tố khác, trong đó có yếu tố con người; độ phân giải của ảnh Sentinel 2 là khá tốt, tuy nhiên vẫn còn khá thô để nhận diện các vết sạt lở nhỏ. Bài báo cũng đề xuất các hướng nghiên cứu tiếp theo như: cần kết hợp các nguồn ảnh khác nhau để tăng số lượng và chất lượng ảnh; sử dụng ảnh radar có đặc điểm không bị ảnh hưởng bởi mây và có độ phân giải tốt hơn để đánh giá.

Lời cảm ơn: Bài báo này được tài trợ bởi Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng với đề tài có mã số: T2020-02-19.

Tài liệu tham khảo

- [1] Y. Qin, P. Lu, and Z. Li, "LANDSLIDE INVENTORY MAPPING FROM BITEMPORAL 10 m SENTINEL-2 IMAGES USING CHANGE DETECTION BASED MARKOV RANDOM FIELD.," *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, vol. 42, no. 3, 2018.
- [2] M. W. Mwaniki, D. N. Kuria, M. K. Boitt, and T. G. Ngigi, "Image enhancements of Landsat 8 (OLI) and SAR data for preliminary landslide identification and mapping applied to the central region of Kenya," *Geomorphology*, vol. 282, pp. 162–175, 2017.
- [3] A. Barra, O. Monserrat, P. Mazzanti, C. Esposito, M. Crosetto, and G. Scarascia Mugnozza, "First insights on the potential of Sentinel-1 for landslides detection," *Geomatics, Nat. Hazards Risk*, vol. 7, no. 6, pp. 1874–1883, 2016.
- [4] W. Zhao, A. Li, X. Nan, Z. Zhang, and G. Lei, "Postearthquake landslides mapping from Landsat-8 data for the 2015 Nepal earthquake using a pixel-based change detection method," *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.*, vol. 10, no. 5, pp. 1758–1768, 2017.
- [5] Z. Li, W. Shi, P. Lu, L. Yan, Q. Wang, and Z. Miao, "Landslide mapping from aerial photographs using change detection-based Markov random field," *Remote Sens. Environ.*, vol. 187, pp. 76–90, 2016.
- [6] P. Lu, Y. Qin, Z. Li, A. C. Mondini, and N. Casagli, "Landslide mapping from multi-sensor data through improved change detection-based Markov random field," *Remote Sens. Environ.*, vol. 231, p. 111235, 2019.
- [7] B. T. Pham *et al.*, "A comparison of Support Vector Machines and Bayesian algorithms for landslide susceptibility modelling," *Geocarto Int.*, vol. 34, no. 13, pp. 1385–1407, 2019.
- [8] D. Tien Bui *et al.*, "Landslide detection and susceptibility mapping by airsar data using support vector machine and index of entropy models in cameron highlands, malaysia," *Remote Sens.*, vol. 10, no. 10, p. 1527, 2018.
- [9] Y. Huang and L. Zhao, "Review on landslide susceptibility mapping using support vector machines," *Catena*, vol. 165, pp. 520–529, 2018.
- [10] V. N. D. Phuoc, N. Q. Binh, P. D. Hung, D. V. Long, and N. C. Cong, "Studies on the causes of landslides for mountainous regions in central region of Vietnam," *Univ. Danang, J. Sci. Technol.*, vol. 17, pp. 29–32, 2019.
- [11] V. N. Vapnik, "Statistical learning theory. New York: A Wiley-Interscience Publication John

Wiley & Sons.” Inc, 1998.

- [12] L. Breiman, “Random forests,” *Mach. Learn.*, vol. 45, no. 1, pp. 5–32, 2001.