



Original Article

Determination of Ground Subsidence by Sentinel-1 SAR Data (2018-2020) over Binh Duong Quarries, Vietnam

Nguyen Quoc Long*, Tran Van Anh, Bui Khac Luyen

Hanoi University of Mining and Geology, N0 18 Vien Street, Bac Tu Liem, Hanoi, Vietnam

Received 22 May 2020

Revised 14 September 2020; Accepted 03 October 2020

Abstract: Mining-induced subsidence is often determined by field survey methods, e.g., using total station or global navigation satellite system (GNSS) technology. The advantage of these methods is high accuracy, but they are usually employed in a small-scale areas. Radar technology has been developed and applied to determine surface subsidence over a large area at a few millimeters accuracy. In this paper, 24 Sentinel-1B SAR images are used with the Permanent Scatter Interferometry (PSInSAR) method to determine the land subsidence of the Tan My-Thuong Tan quarries and surrounding areas in Binh Duong province, Vietnam. The results are compared with the average annual subsidence of 20 GNSS surveying points from January, 2018 to March, 2020. The correlation coefficient of annual average land subsidence of the two methods is 0.83, indicating the feasibility of applying the InSAR Sentinel-1 data processed by the PSInSAR method to determine mining-induced surface deformation and surrounding area in Vietnam.

Keywords: GNSS, PSInSAR, radar time series, Sentinel-1, subsidence.

* Corresponding author.

E-mail address: nguyenquoclong@hmg.edu.vn

<https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.4605>

Xác định lún bề mặt khu vực khai thác đá tỉnh Bình Dương giai đoạn 2018-2020 bằng chuỗi ảnh Sentinel-1

Nguyễn Quốc Long*, Trần Văn Anh, Bùi Khắc Luyên

Trường Đại học Mỏ-Địa chất, 18 phố Viên, Bắc Từ Liêm, Hà Nội, Việt Nam

Nhận ngày 12 tháng 5 năm 2020

Chỉnh sửa ngày 03 tháng 6 năm 2020; Chấp nhận đăng ngày 20 tháng 6 năm 2020

Tóm tắt: Nghiên cứu về lún do khai thác mỏ thường được thực hiện bằng các phương pháp đo đạc thực địa, ví dụ như toàn đạc điện tử, định vị vệ tinh (GNSS). Ưu điểm của các phương pháp này là độ chính xác cao, tuy vậy, thường chỉ được áp dụng trong phạm vi nhỏ. Công nghệ ra-đa giao thoa đã được phát triển và áp dụng công nghệ trong xác định lún bề mặt đất trên phạm vi rộng, với độ chính xác lên đến vài mm một năm. Trong bài báo này, 24 ảnh Sentinel-1B được sử dụng với phương pháp giao thoa tán xạ cố định (persistent scatterer, PS) áp dụng để xác định lún bề mặt ở cụm mỏ đá Tân Mỹ-Thường Tân (tỉnh Bình Dương) và các khu vực lân cận. Kết quả tính toán được so sánh với độ lún trung bình năm của 20 điểm quan trắc bằng công nghệ GNSS trong khoảng thời gian từ tháng 1 năm 2018 đến tháng 3 năm 2020. Tương quan độ lún trung bình năm của hai phương pháp là 0,83 cho thấy tính khả thi khi ứng dụng dữ liệu InSAR Sentinel-1 xử lý bằng phương pháp PSInSAR trong việc xác định lún bề mặt mỏ và khu vực lân cận.

Từ khóa: Chuỗi ảnh radar, GNSS, lún đất, PSInSAR, Sentinel-1.

1. Mở đầu

Lún bề mặt đất do khai thác tài nguyên như nước ngầm và mỏ khá phổ biến ở nhiều nơi trên thế giới như: ở bang Texas [1], California (Hoa Kỳ) [2], Bangkok (Thái Lan) [3] và Jakarta (Indonesia) [4]. Hiện tượng này gây nên những tác động bất lợi làm lún và hư hỏng các công trình xây dựng [5, 6]. Việc nghiên cứu lún mặt đất bằng viễn thám vệ tinh đã được nghiên cứu từ khoảng 20 năm gần đây [7, 8], trong đó công nghệ ra-đa chủ động đã trở thành một công cụ hữu ích trong xác định lún mặt đất.

Công nghệ ra-đa giao thoa vi phân (DInSAR – Differential interferometric synthetic aperture radar) lần đầu tiên được ứng dụng với ảnh vệ tinh Seasat để nghiên cứu những thay đổi nhỏ về độ cao trên một vùng rộng 50 km² ở thung lũng

Imperial, California, Mỹ [9]. Phương pháp DInSAR sử dụng ít nhất hai ảnh được chụp ở hai thời điểm khác nhau của cùng một vị trí trước và sau khi có sự thay đổi về địa hình để tìm ra sự dịch chuyển bằng cách đo độ lệch pha của hai chu kỳ thu ảnh. Tuy nhiên, phương pháp này có nhiều hạn chế do không loại bỏ được một số nguồn sai số và nhiễu như nhiễu khí quyển, sai số quỹ đạo, sai số của mô hình số độ cao được sử dụng [10]. Để khắc phục hạn chế này, Ferretti đã đề xuất phương pháp PSInSAR (Permanent Scatter SAR Interferometry) [11]. Nguyên lý cơ bản của phương pháp này là dựa trên việc sử dụng một chuỗi ảnh SAR (Synthetic Aperture Radar) đa thời gian cùng một vị trí để chiết tách ra một số điểm có tán xạ phản hồi cố định và từ đó xác định biến động địa hình. Phương pháp PSInSAR ngày càng được phát triển và ứng dụng

* Tác giả liên hệ.

Địa chỉ email: nguyennquoclong@humg.edu.vn

<https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuces.4605>

và rộng rãi, đã đem lại kết quả khá tốt với độ chính xác cho xác định lún địa hình lên tới vài mm. Các ứng dụng tiêu biểu như của [12] đã ứng dụng thành công sê-ri 38 ảnh Envisat ASAR để xác định lún cho thủ đô Mexico city. Ở khu vực châu Á, nghiên cứu của Liu và nnk (2008) đã sử dụng 26 ảnh ERS1/2 để tính toán lún tại thành phố Thượng Hải [13]. Tại Indonesia, vào năm 2001, công nghệ ra-đa giao thoa cũng được áp dụng lần đầu tiên vào nghiên cứu lún mặt đất của thành phố Jakarta, đó là nghiên cứu của Hirose [14]. Trong nghiên cứu này, 17 ảnh JERS-1/SAR trong khoảng thời gian tháng 2 năm 1993 tới tháng 9 năm 1998 đã được sử dụng để tạo ra 41 cặp giao thoa với đường cơ sở (base line) nhỏ hơn 1000 m. Nghiên cứu đã chỉ ra trong khoảng thời gian 1993-1995, thủ đô Jakarta bị lún 10 cm và từ năm 1995÷1998 bị lún 6 cm. Tại Việt Nam, nghiên cứu xác định lún đô thị chủ yếu tập trung tại Hà Nội và TP Hồ Chí Minh. Tran và nnk (2016) đã sử dụng 27 ảnh Cosmo Skymed để xác định lún khu vực nội thành Hà Nội do khai thác nước ngầm [15]. Le Van Trung và nnk (2018) nghiên cứu xác định lún tại TP Hồ Chí Minh bằng ảnh ALOS PalSAR đa thời gian áp dụng phương pháp PSInSAR cải tiến [16]. Ngoài ra, sử dụng radar giao thoa Sentinel-1 trong nghiên cứu sụt lún bề mặt khu vực khai thác mỏ cũng đã được tiến hành, ví dụ tại cụm mỏ Phú Giáo, Bình Dương [17].

Tháng 4 năm 2014 Cơ quan Hàng không và Vũ trụ Châu Âu đã phóng thành công vệ tinh Sentinel-1A và sau đó đến tháng 1 năm 2018 là vệ tinh Sentinel-1B, đã mở ra cho các nhà khoa học một cơ hội được sử dụng ảnh vệ tinh ra-đa miễn phí trong các nghiên cứu biến dạng bề mặt đất, mà điển hình là lún đất. Một số nghiên cứu đại diện về sử dụng ảnh Sentinel-1 để xác định lún đất là Stow và cộng sự [18] đã sử dụng phương pháp đường đáy ngắn SBAS (small baseline subset) trong giai đoạn 2014 và 2015 cho xác định lún bề mặt đất khu vực thủ đô Mexico city. Nghiên cứu khác của [19] đã kết hợp ảnh Sentinel-1/2 và ALOS PalSAR để xác định lún khu vực Bandung Indonesia. Nghiên cứu này đã đánh giá được mối quan hệ giữa sử dụng đất và lún mặt đất với kết quả khá tốt.

Những nghiên cứu kể trên chủ yếu ứng dụng ảnh ra-đa cho xác định lún bề mặt đất ở khu vực đô thị. Trong khi đó, các ứng dụng ảnh ra-đa đa thời gian cho xác định lún bề mặt khu vực khai thác mỏ trên thế giới không nhiều. Một số nghiên cứu điển hình như Baek và nnk (2008) đã ứng dụng ảnh JERS-1 với phương pháp giao thoa ra-đa đường đáy ngắn SBAS để xác định lún bề mặt khu vực mỏ than Gangwon-do (Hàn Quốc). Với việc sử dụng 22 ảnh JERS-1, độ lệch chuẩn xác định xác định lún trong nghiên cứu này là 7,8 mm [20]. Tại Trung Quốc, Jianguo He (2009) xác định lún cho khu vực Hebei theo phương pháp ra-đa giao thoa DInSAR [21]. Nghiên cứu của Xinpeng Diao và nnk (2016) ứng dụng chuỗi ảnh ra-đa để xác định lún các khu mỏ than của Huainan [22]. Mỗi công trình sử dụng các phương pháp ra-đa giao thoa khác nhau đều nhằm mục đích tăng độ chính xác xác định lún. Với Xinpeng Diao và nnk (2016), các tác giả đã sử dụng phương pháp DInSAR cải tiến kết hợp với tích phân xác suất để xác định lún trên diện rộng, trong khi đó, Ma và nnk (2016) sử dụng chuỗi ảnh với phương pháp ra-đa tán xạ cố định PSInSAR để xác định lún bề mặt khu mỏ và vùng lân cận [23]. Qua những phân tích này có thể nhận thấy tính hiệu quả khi sử dụng ảnh ra-đa đa thời gian cho nghiên cứu lún bề mặt đất nói chung và khu mỏ nói riêng. Nghiên cứu này sẽ tập trung xác định lún mặt đất tại khu mỏ khai thác đá lộ thiên và khu vực lân cận bằng phương pháp PSInSAR với sê-ri ảnh Sentinel-1B thời gian từ 2018 đến 2020. Việc lựa chọn loại ảnh này là do ảnh miễn phí, do vậy nó chính là nguồn dữ liệu hữu ích cho giám sát bề mặt mỏ. Ngoài ra, các điểm đo ngoại nghiệp bằng công nghệ GNSS (Global Navigation Satellite System) xung quanh mỏ cũng được thực hiện đồng thời với khoảng thời gian thu ảnh để kiểm chứng kết quả xác định lún bề mặt mỏ và khu vực lân cận bằng ảnh vệ tinh ra-đa.

2. Khu vực nghiên cứu

Bình Dương là một tỉnh thuộc vùng Đông Nam Bộ của Việt Nam. Địa hình Bình Dương tương đối bằng phẳng, hệ thống sông ngòi và tài

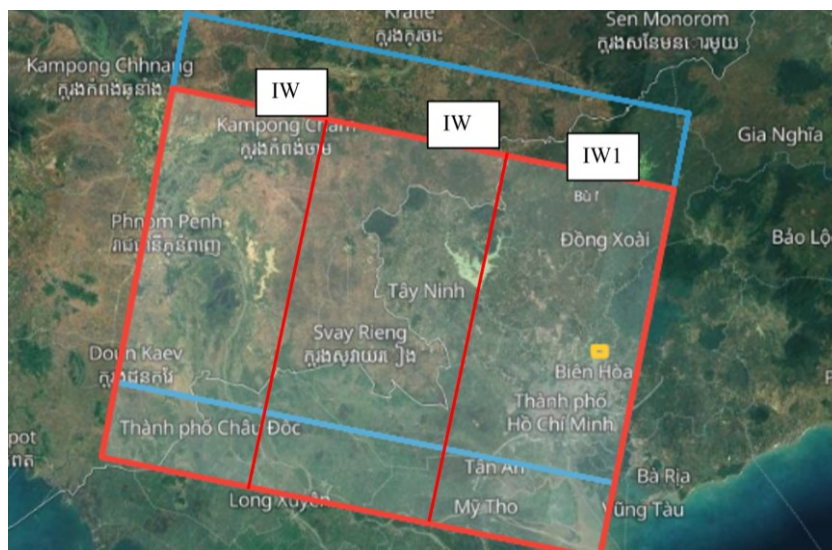
nguyên thiên nhiên phong phú. Khai thác đá tại tỉnh Bình Dương tập trung chủ yếu ở hai khu vực Phú Giáo và Tân Mỹ-Thường Tân. Trong nghiên cứu này, cụm mỏ đá Tân Mỹ-Thường Tân nằm tại xã Thường Tân, huyện Bắc Tân Uyên, tỉnh Bình Dương được lựa chọn làm khu vực nghiên cứu. Khu vực này hiện có 17 mỏ đang tiến hành khai thác ở các mức khác nhau, khai thác sâu nhất hiện tại là các mỏ Thường Tân III và Thường Tân IV, ở mức -90 m. Theo định hướng quy hoạch khoáng sản của tỉnh Bình Dương, các mỏ sẽ được nghiên cứu đánh giá khả năng khai thác xuống mức -150 m. Địa hình của khu vực có độ cao trung bình từ 7 đến 40 m, hạ thấp từ Bắc xuống Nam, với khu vực trung tâm là Núi Lò Ô có độ cao tuyệt đối là 54 m. Toàn bộ khu vực mỏ và các vùng lân cận trong nghiên cứu này nằm ở vị trí tọa độ vào khoảng $11^{\circ}01'$ đến $11^{\circ}04'$ độ vĩ bắc, và $106^{\circ}51'$ đến $106^{\circ}54'$ độ kinh đông. Khu vực nghiên cứu và khung ảnh Sentinel-1B (ảnh chính) được thể hiện trên Hình 1. Trong đó khung màu đỏ là Sentinel-1B phân cực đôi (VV+VH), khung màu xanh lam là Sentinel-1B phân cực đơn (VV), ô màu vàng nhỏ nằm trên vết quét IW1 là khu vực nghiên cứu.

3. Phương pháp nghiên cứu

Các phương pháp PSInSAR sử dụng chuỗi ảnh đa thời gian dựa trên nguyên lý của phương pháp ra-đa vi phân DInSAR. Giả sử có 1 điểm P trên mặt đất và hai ảnh SAR được chụp ở hai thời điểm khác nhau là S_1 và S_2 (Hình 2), hiệu pha giữa hai ảnh chụp phản ánh sự biến động của bề mặt địa hình. Công thức (1) biểu diễn nguyên lý của DInSAR, cho phép xác định các dịch chuyển của địa hình được tạo ra từ hai ảnh SAR phức.

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_{Int} &= \varphi_S - \varphi_M \\ &= \frac{SP' - MP}{\frac{\lambda}{4\pi}} + \varphi_{scatt_S} - \varphi_{scatt_M} \end{aligned} \quad (1)$$

Trong đó, M và S là hai vị trí thu ảnh chính (Master) và phụ (Slave), B là khoảng cách đường đi ảnh, MP và SP là khoảng cách từ vệ tinh tại thời điểm thu ảnh thứ nhất và thứ hai tới vị trí quan trắc P , tương ứng, $\Delta\varphi_{Int}$ là pha giao thoa được xác định bằng độ lệch pha giữa hai pha của ảnh chính và ảnh phụ, φ_M và φ_S là pha đo được tại thời điểm thu ảnh thứ nhất và thứ hai, tương ứng, φ_{scatt_M} và φ_{scatt_S} là sự thay đổi pha được tạo ra trong quá trình tương tác giữa sóng ra-đa của thời điểm ra-đa thứ nhất M và thứ hai S với mục tiêu P .

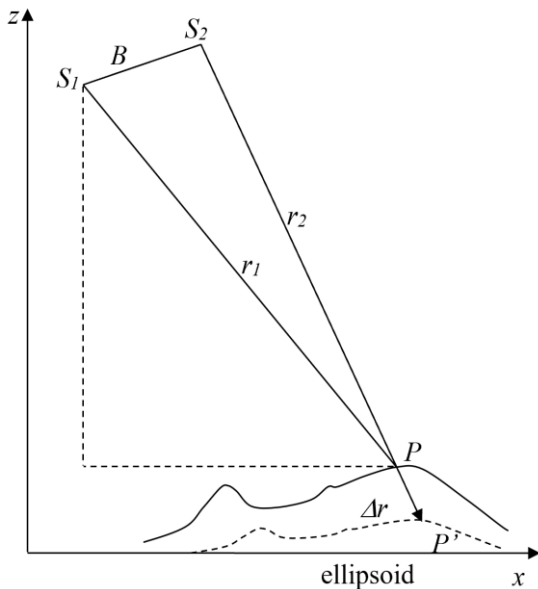


Hình 1. Khu vực nghiên cứu và khung ảnh Sentinel-1B.

Pha giao thoa thể hiện trong công thức (1) bao gồm phần giao thoa liên quan đến yếu tố địa hình và giao thoa của các lún địa hình, cùng với các nguồn sai số và nhiễu, bao gồm nhiễu của khí quyển, sai số quỹ đạo vệ tinh, sai số mô hình số độ cao (DEM). Do vậy, để xác định được lún địa hình cần phải loại bỏ yếu tố pha địa hình. Công thức xác định lún địa hình được biểu diễn như dưới đây:

$$\begin{aligned}\Delta\varphi_{DInt} &= \Delta\varphi_{Int} - \varphi_{Topo_simu} \\ &= \varphi_{Displ} + \varphi_{Topo_res} \\ &\quad + \varphi_{Atm_S} - \varphi_{Atm_M} \\ &\quad + \varphi_{Orb_S} - \varphi_{Orb_M} \\ &\quad + \varphi_{noise} + 2 \cdot k \cdot \pi\end{aligned}\quad (2)$$

Trong đó, φ_{Topo_res} là phần ảnh hưởng gây ra bởi sai số của mô hình số độ cao (RTE), φ_{Atm} là thành phần pha khí quyển tại thời điểm thu nhận của mỗi hình ảnh; φ_{Orb} là thành phần pha do sai số quỹ đạo của mỗi hình ảnh (sai số ảnh hưởng đến vị trí của M và S trong Hình 2, φ_{noise} là pha nhiễu, k là một giá trị nguyên được gọi là độ mơ hồ pha, là kết quả của tính chất đóng của $\Delta\varphi_{DInt}$, tức là thực tế là các pha DInSAR bị giới hạn trong phạm vi $(-\pi, \pi]$.



Hình 2. Nguyên lý của DInSAR.

Mục tiêu của kỹ thuật DInSAR là xác định φ_{Displ} từ $\Delta\varphi_{DInt}$. Điều này có nghĩa là tách

φ_{Displ} từ các thành phần pha khác của công thức (2). Một điều kiện thiết yếu để thực hiện việc phân tách này là phân tích các pixel có φ_{noise} nhỏ, mà những điểm này thường liên quan đến hai loại đối tượng: những đối tượng có tán xạ mạnh và không đổi theo thời gian (tán xạ cố định PS) và những đối tượng cũng có tán xạ không đổi theo thời gian, nhưng lại từ các đối tượng tán xạ nhỏ (tán xạ phân tán, DS). Hạn chế lớn nhất của phương pháp DInSAR là sự suy giảm tương quan khi khoảng cách về thời gian tăng lên và pha nhiễu φ_{noise} do ảnh hưởng của khí quyển.

Phương pháp PSInSAR đại diện cho một phương pháp cải tiến từ DInSAR, trong đó sử dụng nhiều hình ảnh SAR thu được trên cùng một khu vực và quy trình xử lý và phân tích dữ liệu phù hợp để phân tách φ_{Displ} từ các thành phần pha khác nhau được biểu thị trong công thức (2).

4. Dữ liệu và xử lý ảnh

4.1. Dữ liệu ảnh

Dữ liệu sử dụng là ảnh Sentinel-1, băng tần C (bước sóng 5.6 cm). Vệ tinh Sentinel-1 hoạt động ở bốn chế độ hình ảnh chọn lọc với độ phân giải khác nhau và có hai thể hệ là Sentinel-1A (phóng vào tháng 4/2014) và Sentinel-1B (phóng vào tháng 4/2016). Đối với nghiên cứu lún địa hình sử dụng phương pháp ra-đa giao thoa PSInSAR, ảnh sử dụng phải là ảnh được xử lý ở chế độ ảnh phức đơn nhìn (single look complex image, SLC) nên ảnh Sentinel-1 được lựa chọn sẽ là ảnh có dạng (IW). Ảnh của khu vực nghiên cứu được download tại trang WEB Alaska Satellite Facilities (ASF) của NASA (<https://search.asf.alaska.edu/>).

Tại khu vực nghiên cứu, 24 ảnh Sentinel-1B phân cực đôi (VV+VH), với quỹ đạo đi xuống, tại đường quét (Path) là 18 và hàng (Row) 554 đã được tải về. Dữ liệu được xử lý để tách riêng phân cực VV. Thông tin cơ bản của dữ liệu ảnh sử dụng như Bảng 1.

Bảng 1. Dữ liệu của khu vực nghiên cứu

STT	Thời gian thu ảnh (ngày-tháng-năm)	Đường đáy ảnh không gian (m)	STT	Thời gian thu ảnh (ngày-tháng-năm)	Đường đáy ảnh không gian (m)
1	12-01 -2018	64	13	13-4-2019	49
2	05-02-2018	52	14	19-5-2019	96
3	25-3-2018	-45	15	12-6-2019	7
4	30-4-2018	76	16	18-7-2019	34
5	05-6-2018	-64	17	23-8-2019	65
6	04-8-2018	38	18	28-9-2019	138
7	09-9-2018	42	19	22-10-2019	44
8	03-10-2018	90	20	15-11-2019	118
9	08-11-2018	26	21	21-12-2019	40
10	14-12-2018	0	22	26-01-2020	107
11	07-01-2019	102	23	19-02-2020	73
12	08-3-2019	106	24	26-3-2020	82

4.2. Phần mềm xử lý ảnh và quy trình thực hiện

4.2.1. Phần mềm SNAP và StaMPS

SNAP là phần mềm được phát triển bởi Cơ quan hàng không và vũ trụ châu Âu ESA (European Space Agency). Các mô-đun chính của SNAP bao gồm bộ công cụ xử lý, trình đọc và ghi sản phẩm dữ liệu và ứng dụng hiển thị và phân tích dữ liệu lớn từ các vệ tinh của ESA SAR bao gồm SENTINEL-1, ERS-1 & 2, ENVISAT, và dữ liệu SAR của các hãng khác như ALOS PALSAR, TerraSAR-X, COSMO-SkyMed và RADARSAT-2. Các công cụ xử lý có thể chạy độc lập với dòng lệnh hoặc tích hợp trong giao diện người dùng đồ họa. Hộp công cụ bao gồm các công cụ để hiệu chỉnh, lọc nhiễu đốm, phân tích, hiệu chỉnh hình học, ghép, chuyển đổi dữ liệu, phân cực và dữ liệu giao thoa.

StaMPS (Stanford Method for Persistent Scatterers) là phần mềm được xây dựng để xử lý chuỗi ảnh bằng phương pháp PSInSAR và SBAS cho các loại ảnh ra-đa hiện nay. Phần mềm StaMPS được phát triển lần đầu tiên tại Đại học Stanford (Hoa Kỳ), nhưng các phiên bản tiếp theo của StaMPS và StaMPS/MTI được phát triển bởi các nhóm nghiên cứu tại Đại học Leeds (Vương Quốc Anh), Đại học Iceland và Đại học Công nghệ Delft (Hà Lan) [24].

Quá trình xử lý ảnh bằng phương pháp PSInSAR với hai phần mềm nêu trên bao gồm

hai phần công việc độc lập: (i) xử lý DInSAR cho ảnh chính và chuẩn bị dữ liệu phụ thuộc bằng ESA SNAP; và (ii) xử lý PSInSAR bằng StaMPS.

4.2.2. Quy trình xử lý ảnh

i) Chuẩn bị ảnh chính

Đầu tiên, ảnh chính (master) được chọn từ chuỗi dữ liệu, sau đó sẽ được nhập vào SNAP và tiến hành chọn ra vết quét chứa khu vực nghiên cứu và chính xác hóa cho quỹ đạo của ảnh Sentinel-1 bằng chức năng tạo biểu đồ chạy tự động trong SNAP. Các bước này rất quan trọng vì sẽ giúp tối ưu hóa thời gian và tài nguyên cho phần còn lại của quá trình xử lý [25]. Đối với khu vực nghiên cứu Tân Mỹ và Thường Tân, vết quét dọc IW1 đã được lựa chọn;

ii) Chuẩn bị các ảnh phụ thuộc

Trong bước này, dữ liệu Sentinel-1 Single Look Complex (SLC) được sắp xếp theo ngày thu ảnh đồng thời cũng kiểm tra và giảm lược tên cho file ảnh gốc;

iii) Chia dữ liệu ảnh phụ thuộc theo vết quét phù hợp với ảnh chính

Để cho phép xử lý ở chế độ hàng loạt, công cụ xử lý dưới dạng biểu đồ SNAP (Graph Processing Tool-GPT) được sử dụng, chạy các chuỗi xử lý đã được định nghĩa (biểu đồ ở định dạng xml). Trong bước này việc chính xác hóa quỹ đạo và lựa chọn vết quét dọc phù hợp với

ảnh chính sẽ được làm. Các quỹ đạo này được SNAP tự động tải xuống;

iv) Đăng ký ảnh và tính toán giao thoa

Đây là bước đòi hỏi tính toán nhiều nhất, nó sẽ tiến hành đồng đăng ký ảnh của ảnh chính và từng ảnh phụ thuộc mà đã được chuẩn bị sẵn ở bước trước với nhau. Trong bước này cũng đồng thời cắt ra vùng nghiên cứu mà chúng ta đã đặt trước để giảm bớt khối lượng tính toán. Tiếp theo sẽ tính toán giao thoa cho từng cặp ảnh và tiến hành loại bỏ yếu tố pha phẳng (là pha liên quan đến elipxoid);

v) Xuất các dữ liệu sang STaMPS

Đây là bước cuối cùng của chuỗi xử lý DInSAR trên SNAP. Việc xuất dữ liệu này sẽ tạo ra các thư mục có chứa các ảnh đơn nhìn SLC của tất cả các files ảnh, thư mục chứa các cặp giao thoa của ảnh chính và các ảnh phụ thuộc, thư mục chứa tọa độ của ảnh chính và thư mục chứa mô hình số độ cao của khu vực nghiên cứu;

vi) Nhập dữ liệu vào StaMPS

Bước sau đây liên quan đến việc nhập dữ liệu đã xuất ra từ SNAP vào StaMPS bằng cách sử dụng tập lệnh được viết bằng python trên Github. Sau đó, chuỗi xử lý StaMPS PSI được chạy từ bước 1 đến 7 [24]. Các bước cần lưu ý được trình bày trong sơ đồ:

vii) Xác định tương quan cặp ảnh

Coherence hay còn gọi là độ tương quan của cặp ảnh là một bước quan trọng trong quy trình xử lý ảnh ra-đa giao thoa. Việc tính toán độ tương quan giữa hai ảnh nhằm xác định mức độ tương quan của các đối tượng địa hình giữa hai thời điểm và xác định xem các đối tượng trên hai ảnh có bị thay đổi trong khoảng thời gian nhất định nào đó hay không. Từ đó đưa ra giới hạn độ tương quan giữa 2 ảnh để đảm bảo độ chính xác cho việc giải mở pha sau này. Độ tương quan biến thiên từ 0 đến 1 trong đó 1 tương ứng với giá trị tương quan cao nhất và 0 tương ứng với mất tương quan cặp ảnh;

viii) Loại bỏ các giá trị tương quan kém

Bước này bao gồm 3 bước nhỏ chạy trong StaMPS đó là “ước tính nhiễu, lựa chọn các điểm PS và loại bỏ những điểm có chất lượng kém”;

- Ước tính nhiễu: Đây là bước lập ước tính giá trị nhiễu pha cho từng pixel là ứng cử viên trong mỗi giao thoa;

- Lựa chọn điểm PS: Điểm ảnh được chọn trên cơ sở đặc tính nhiễu của chúng. Bước này cũng ước tính tỷ lệ phần trăm pixel ngẫu nhiên (không phải PS) trong một cảnh mà từ đó mật độ trên km² có thể thu được;

- Loại bỏ điểm: Các pixel không được chọn trong bước trước được loại bỏ, loại bỏ các pixel do sự đóng góp tín hiệu từ các thành phần phân giải mặt đất lân cận và những điểm ảnh có quá nhiều nhiễu. Dữ liệu cho các pixel đã chọn được lưu trữ trong các không gian làm việc mới;

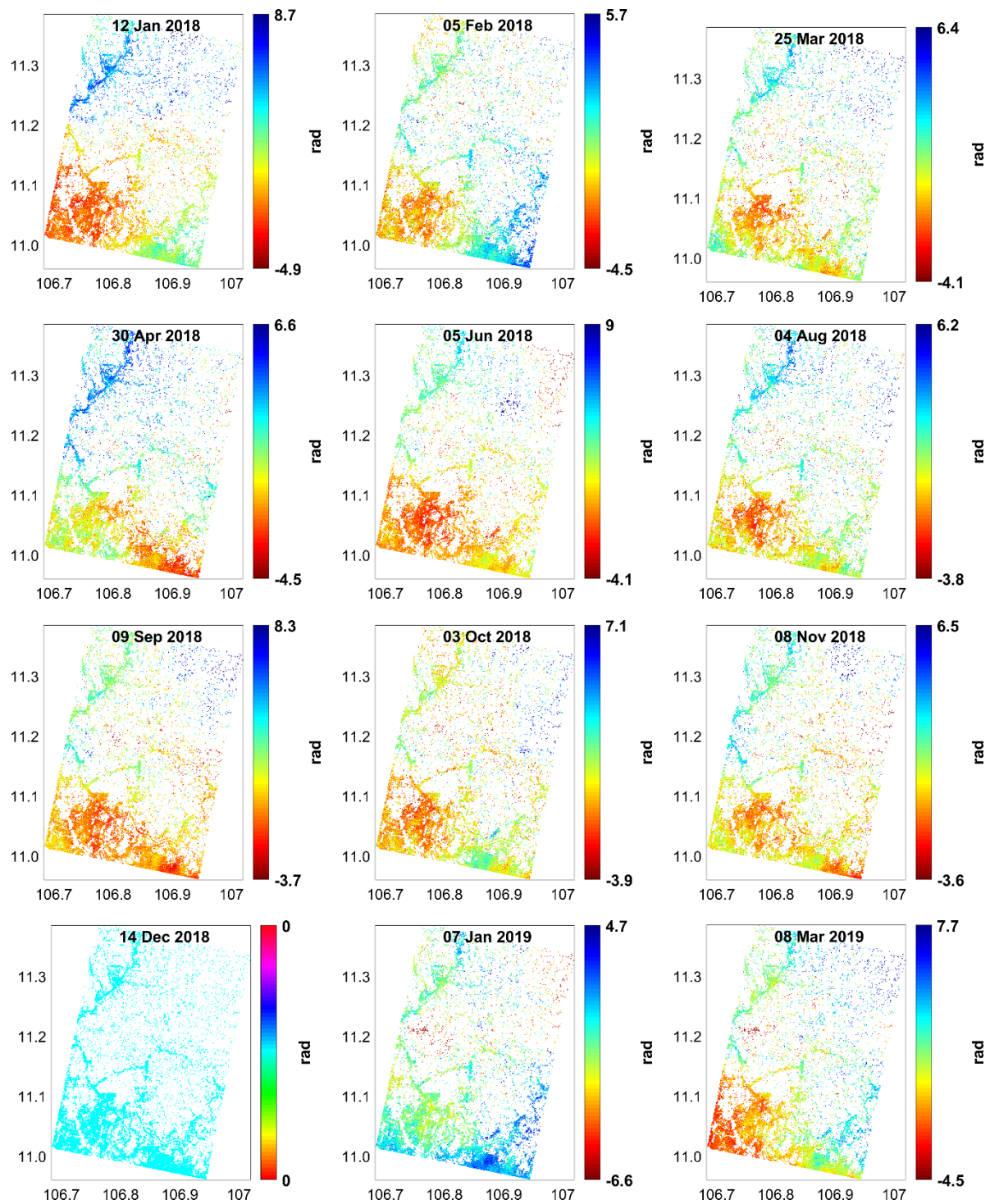
ix) Giải mở pha cho tất cả các cặp ảnh

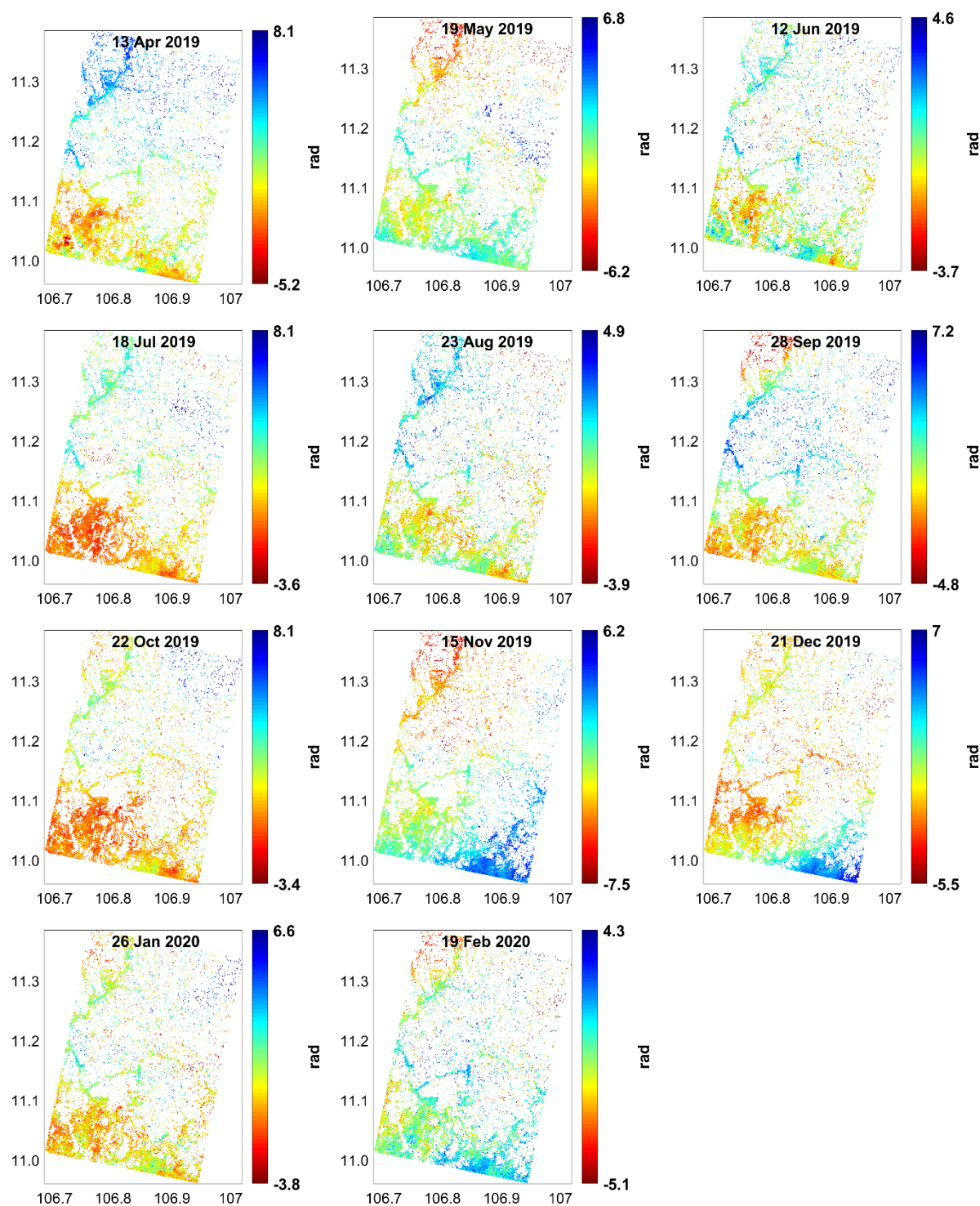
Pha giao thoa khi thu nhận là những pha đóng có giá trị biến thiên trong khoảng từ $-\pi$ đến π , Do vậy, để có thể lấy được pha thực phản ánh sụt lún địa hình, chúng ta phải giải mở pha. Kỹ thuật giải pha (phase unwrapping) là bước khó khăn nhất và cũng là bước mang tính quyết định đến độ chính xác của kết quả xác định biến động địa hình được làm bằng phương pháp InSAR. StaMPS có một số thuật toán thường được áp dụng để tính giá trị phần nguyên của pha cho các điểm ảnh, đó là thuật toán Minimum Cost flow 2D (MCF) [24], hoặc phương pháp MCF 3D [24]. Phương pháp MCF 3D được lựa chọn để giải mở pha cho tập hợp dữ liệu vì phương pháp này đã chứng minh được độ chính xác cao [24];

Hình 3 thể hiện kết quả các ảnh giao thoa sau khi đã mở pha;

x) Tính toán giá trị lún theo thời gian và loại bỏ ảnh hưởng của khí quyển

Sự không đồng nhất của khí quyển (tầng điện ly và tầng đối lưu) và sự biến đổi của nó theo thời gian và không gian, gây ra sự thay đổi tốc độ tín hiệu trên đường hình học giữa ăng-ten và bề mặt địa hình, và đó là nguyên nhân ảnh hưởng trực tiếp đến giá trị pha giao thoa, và gọi là độ trễ khí quyển (Atmospheric Phase Screen - APS). Trong bước này, chúng ta sẽ phải loại bỏ APS trước tiên và tính tốc độ biến động địa hình;





Hình 3. Ảnh giao thoa sau khi đã mở pha.

Tốc độ biến động được tính từ chuỗi biến động theo thời gian của các thời kỳ khác nhau. Giả sử lún của từng mục tiêu là $\mathbf{d} = [d_1, d_2, \dots, d_n]$ (n là số lượng ảnh thu được) và đường đáy ảnh theo thời gian tương ứng là $\mathbf{T} = [T_1, T_2, \dots, T_n]$. Trọng số được sử dụng để tính tốc độ sụt lún, với điều kiện là sai số bình phương trung bình của pha giao thoa sẽ được lấy làm trọng số sụt lún. Công thức (3) dưới đây do Jiang,

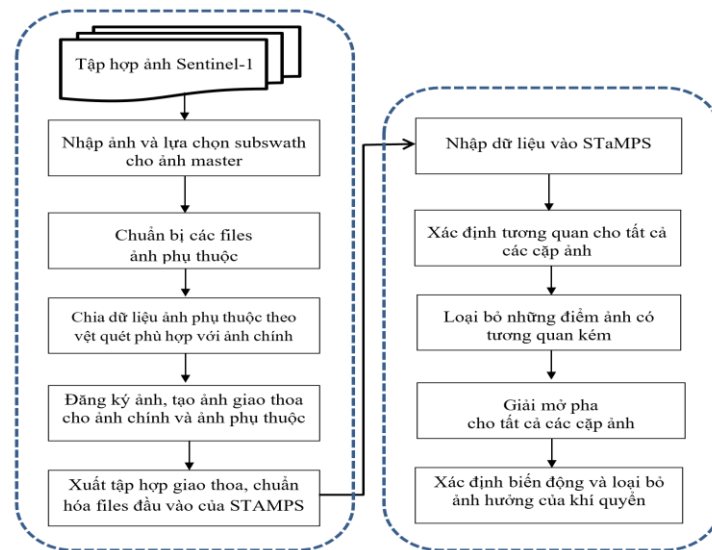
Y và các cộng sự đề xuất được sử dụng để xác định lún trung bình theo thời gian;

$$\mathbf{v} = (\mathbf{T}^T \mathbf{P} \mathbf{T})^{-1} \mathbf{T}^T \mathbf{P} \mathbf{d} \quad (3)$$

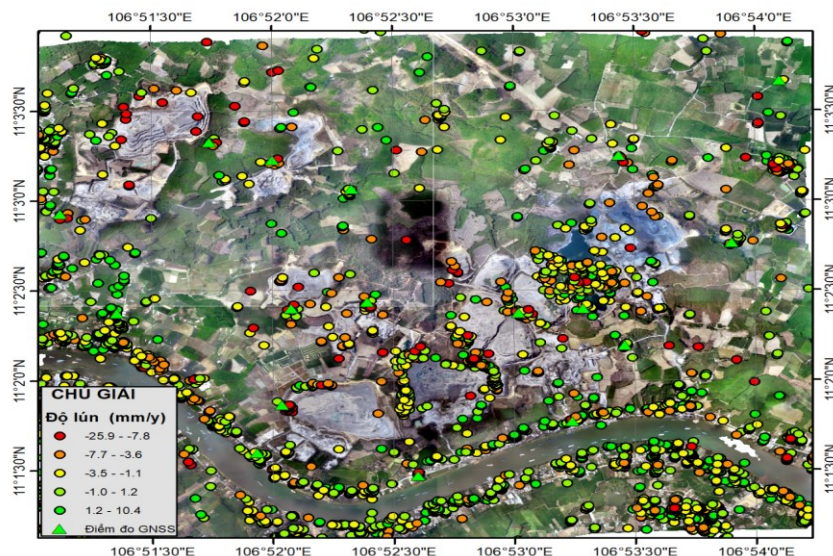
Trong đó, \mathbf{v} là vận tốc sụt lún, \mathbf{P} là ma trận trọng số và được định nghĩa là:

$$\mathbf{P} = \text{diag}(\sigma^1, \sigma^2, \dots, \sigma^M) \sigma^k \quad (4)$$

Sơ đồ quy trình xử lý ảnh PSInSAR bằng SNAP và STaMPS được tóm tắt lại như Hình 4.



Hình 4. Sơ đồ quy trình xử lý ảnh PSI bằng SNAP và STaMPS.



Hình 5. Bản đồ ảnh viễn thám biểu diễn các vị trí lún quanh khu mỏ Tân Mỹ - Thường Tân.

5. Kết quả và thảo luận

5.1. Kết quả xác định lún bề mặt từ ảnh Sentinel-1

Kết quả xử lý chuỗi ảnh Sentinel-1B cho khu vực Tân Mỹ - Thường Tân cho thấy, tại khu vực có một số điểm có biểu hiện biến dạng theo trục đứng (độ lún) với giá trị biến dạng trung bình khoảng 15 mm/năm. Trong số đó, một số điểm có độ lún lớn vào khoảng 15 mm/năm, còn đa số các điểm có độ lún nhỏ hơn 10 mm/năm. Tuy nhiên các điểm xung quanh khu vực mỏ nằm trên đường giao thông hoặc nhà dân được quan tâm hơn bởi vì những điểm này sẽ ảnh hưởng trực tiếp đến đời sống dân sinh. Bản đồ ảnh biểu diễn các vị trí lún quanh khu vực mỏ lộ thiên Tân Mỹ - Thường Tân được thể hiện trên Hình 5.

5.2. Kiểm chứng kết quả lún

Để kiểm chứng kết quả xác định lún bề mặt từ ảnh vệ tinh, 20 điểm mốc quan trắc dịch chuyển được thiết kế và đo đạc trên toàn bộ khu vực tại các vị trí có thể phản ánh được sự dịch chuyển biến dạng của khu vực Tân Mỹ - Thường Tân. Do diện tích lớn nên phương pháp đo cao được chọn là đo cao GNSS. Các mốc quan trắc được đo nối độ cao với 01 mốc độ nhà nước hạng I. Mốc độ cao nhà nước này được đo chênh cao so với 2 mốc độ cao hạng I khác để đánh giá độ ổn định trước mỗi chu kỳ quan trắc. Hai mốc

dùng để đánh giá này không dịch chuyển trong cả hai chu kỳ đo năm 2018 và 2020. Phương pháp đo là đo tĩnh (static) với các thiết bị sử dụng là 5 máy đo GNSS CHC X91B. Số lượng ca đo mỗi chu kỳ là 8 với các ca đo được thực hiện trong khoảng thời gian 180 phút. Ăng-ten được đo cao 5 lần bằng thước thép. Bình sai tính toán được thực hiện trên phần mềm Trimble Business Centrer (TBC 3.5).

Sai số độ cao điểm yếu nhất của lưới năm 2018 là 5 mm và năm 2020 là 4 mm. Kết quả xác định lún từ ảnh được so sánh với số liệu lún đo bằng công nghệ GNSS tại thời điểm tương ứng. Dữ liệu đo GNSS tại các điểm quan trắc vào thời điểm 1/2018 và 3/2020 được sử dụng để tính biến dạng đứng trung bình 1 năm. Giá trị đo bằng GNSS được đo trong khoảng thời gian là 2 năm, trong khi giá trị lún xác định được từ chuỗi ảnh Sentinel-1 đã được tính trung bình theo năm, do vậy, để tính được giá trị độ lệch giữa hai phương pháp thì giá trị lún đo bằng GNSS phải được chia cho 2. Đây được coi là các giá trị chuẩn để so sánh với kết quả lún trung tính từ ảnh giai đoạn 1/2018-3/2020. Giá trị độ lún và độ lệch giữa 2 phương pháp được tính theo công thức (5) và được trình bày trên Bảng 2.

$$\Delta = \frac{\Delta_{GNSS}}{2} - \Delta_{InSAR} \quad (5)$$

Trong đó, Δ_{GNSS} - giá trị độ lún đo bằng công nghệ GNSS (mm) được đo tại hai thời điểm là tháng 1/2018 và tháng 3/2020, Δ_{InSAR} - giá trị độ lún xác định từ ảnh Sentinel-1 (mm/y).

Bảng 2. Giá trị lún xác định bằng GNSS và bằng ảnh Sentinel-1

STT	Mã điểm đo	Giá trị lún đo bằng công nghệ GNSS Δ_{GNSS} (mm)	Giá trị độ lún xác định từ ảnh Sentinel-1 Δ_{InSAR} (mm/y)	Độ lệch Δ (mm/y)
1	A19	-10.6	-8.2	2.9
2	A22	-12.2	-9.1	3
3	A23	-11.6	-9.3	3.5
4	A58	-9.6	-7.5	2.7
5	A98	-13.5	-7.6	0.85
6	A114	-10.4	-7.7	2.5
7	A117	-10.4	-7.7	2.5
8	A122	-6.2	-3.1	0
9	A124	-11.5	-6.3	0.55
10	A126	-8.3	-5.2	1.05

11	A136	-7.1	-5.3	1.75
12	B2	-18.2	-13.1	4
13	B9	-5.2	-1.3	1.3
14	B29	-6.1	-3.5	0.45
15	B53	-18.2	-10.3	1.2
16	B61	-15.6	-8.1	0.3
17	B68	-10.6	-7.3	2
18	B72	-5.1	-1.3	1.25
19	B81	-21.3	-12.3	1.65
20	B105	-9.2	-5.2	0.6

5.3. Thảo luận

i) Tại các khu vực khai thác mỏ

Từ kết quả so sánh ở Bảng 2 có thể thấy rằng, giá trị lún tính từ ảnh khá tương đồng với kết quả từ phép đo GNSS, với độ lệch giữa hai phương pháp cỡ mm. Do vậy, mặc dù không có số liệu đo GNSS để kiểm chứng lún tại đúng vị trí mỏ, các kết quả tính lún tại đây được coi là chính xác. Kết quả InSAR phụ thuộc vào nhiều nguồn sai số như đã trình bày ở Công thức (2). Với các giá trị xác định được lún trong khu vực mỏ, có thể lưu ý các điểm lún tập trung trên các bờ mỏ và các đường vận tải như tại các khu vực A, B và C (Hình 6);

Đối với khu vực A, giá trị lún lớn nhất là vào khoảng 13 mm/năm với các điểm chấm màu đỏ, và những điểm màu cam có giá trị lún nhỏ hơn 10 mm/năm. Tại vị trí B, số lượng điểm phân bố lún nhiều hơn khu vực A nhưng các giá trị lún không lớn như ở khu vực A (xem biểu đồ). Các giá trị lún phần lớn là nhỏ hơn -5 mm/năm, một số có giá trị lún nhỏ hơn -10 mm/năm, chỉ có 4 điểm là nhỏ hơn -15 mm/năm, và một số điểm có giá trị dương. Tại khu vực C thì số lượng các điểm lún trung bình cũng vào khoảng -10mm/năm với một số điểm có mức độ lún gần -20mm/năm. Nhìn vào biểu đồ phân bố các điểm lún cũng có thể nhận thấy rằng, trong vùng này, các điểm lún đa số là nằm trong khoảng từ -5 mm đến -10 mm/năm;

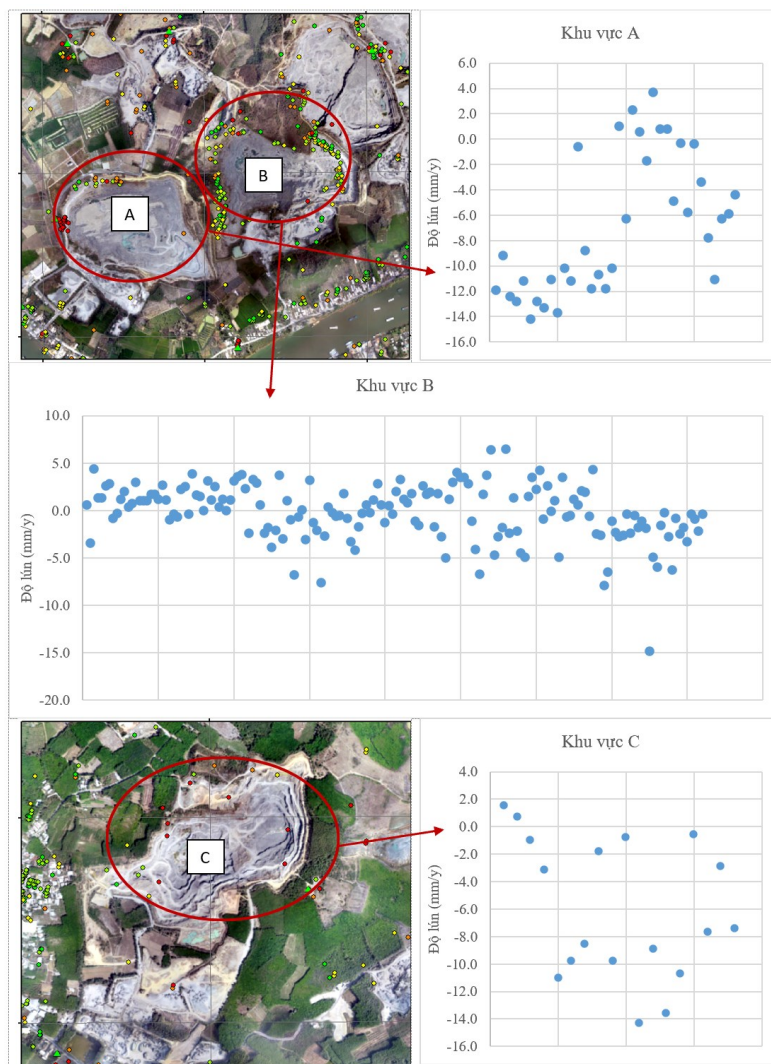
Lý do của việc xuất hiện nhiều điểm PS mang cả giá trị dương và âm trong bờ mỏ một phần là do hoạt động khoan và nổ mìn và hoạt

động của các xe tải nặng cũng là một nguyên nhân gây nên các hiện tượng trôi này;

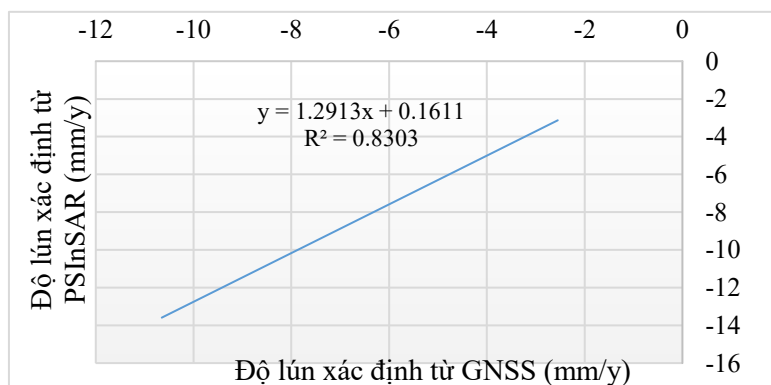
ii) Tại khu vực lân cận với khu vực khai thác mỏ

Tại các điểm lún nằm trên đường giao thông hoặc khu vực nhà dân xung quanh các mỏ, 20 vị trí tập trung các điểm PS có phân bố trùng với những điểm đo ngoại nghiệp hoặc gần các điểm đo ngoại nghiệp trong bán kính khoảng 20 m được sử dụng để đánh giá. Các điểm này đã được liệt kê tại Bảng 2. Lý do lựa chọn các điểm trong bán kính 20 m này là do đặc tính tán xạ của ảnh ra-đa, khi sóng ra-đa đến được bề mặt đối tượng thì các tia tán xạ phản hồi có thể không quay trở lại ngay mà nó có thể có các tán xạ góc hoặc tán xạ khối rồi mới quay trở lại, do vậy các điểm kiểm tra thể hiện trên ảnh có thể bị xê dịch so với vị trí thực của nó;

Dựa trên các kết quả thể hiện trên Bảng 2, các giá trị đo GNSS có thời gian giãn cách là 2 năm, trong khi, các giá trị đo từ việc xử lý 24 cảnh ảnh Sentinel-1 được lấy trung bình trong khoảng thời gian là từ tháng 1/2018 đến tháng 3 năm 2020. Vì vậy, các giá trị đo biến dạng theo trục đứng bằng GNSS sẽ phải được chia trung bình cho 2 năm. Chúng tôi tiến hành đánh giá mức độ tương quan tại 20 điểm này nhằm mục đích đánh giá một cách sơ bộ xem các điểm lún đo bằng phương pháp ảnh ra-đa giao thoa tán xạ có định đạt được như thế nào so với phương pháp đo GNSS độ chính xác cao. Dưới đây là biểu đồ phân bố của giá trị lún mặt đất của các vị trí ở Bảng 2;



Hình 6. Lún tại các khu vực mở A, B, C và các biểu đồ giá trị sụt



Hình 7. Biểu đồ đánh giá mức độ tương quan của kết quả xác định lún làm từ ra-đa Sentinel-1 và các điểm đo GNSS.

Dựa vào Hình 7, chúng ta cũng có thể thấy được rằng các giá trị lún xác định từ ảnh ra-đa cũng có xu thế cao hơn các giá trị lún đo được từ GNSS. Tuy nhiên, các giá trị này có tương quan khá tốt với nhau với giá trị R^2 là 0.83. Điều này cũng có thể giải thích được là vì số lượng các điểm khảo sát không nhiều và các điểm đo GNSS và điểm PS từ ảnh không hoàn toàn trùng nhau về vị trí. Mặc dù số lượng của các điểm kiểm tra không nhiều (20 điểm), các giá trị đo cũng đã phản ánh được tình trạng lún quanh khu vực mỏ lộ thiên Tân Mỹ - Thường Tân trong giai đoạn 1/2018 đến 3/2020.

6. Kết luận

Với tập hợp dữ liệu gồm 24 ảnh Sentinel-1B được thu trong khoảng thời gian 1/2018 đến tháng 3/2020, phương pháp PSInSAR đã được ứng dụng với việc kết hợp hai phần mềm ESA SNAP và StaMPS để xác định lún địa hình quanh khu vực cụm mỏ Tân Mỹ - Thường Tân. Kết quả cho thấy:

Ảnh Sentinel-1 với độ phủ trùm lớn và tần suất lặp liên tục (12 ngày) là nguồn tư liệu miễn phí rất phù hợp với những nghiên cứu liên quan đến lún mặt đất nói chung và lún tại các khu mỏ khai thác nói riêng.

Lần đầu tiên vấn đề lún bề mặt khu vực khai thác mỏ ở Việt Nam được nghiên cứu bằng việc kết hợp phương pháp ra-đa giao thoa tán xạ cố định PSInSAR và GNSS. Tại khu vực các mỏ đá có rất nhiều điểm biến động, nhưng những điểm biến động này phần lớn nằm ở trên các tuyến đường vận tải, moong hoặc sườn dốc của mỏ. Tốc độ biến động lớn nhất tại các cụm mỏ nhỏ hơn -20 mm/năm. Tại khu vực xung quanh mỏ như đường giao thông, bờ mỏ hay nhà dân gần các cụm mỏ đã được đưa vào khảo sát bằng GNSS.

Tốc độ lún trung bình năm của các điểm xác định bằng PSInSAR quanh khu vực mỏ đã được so sánh với các điểm đo GNSS trong khoảng thời gian từ tháng 1/2018 đến tháng 3/2020. Do số lượng điểm đo GNSS và các điểm PS từ ảnh ra-đa không hoàn toàn trùng khớp nên các điểm đo bằng GNSS có khoảng cách tới các điểm lún PS

nhỏ hơn 20 m đã được chọn để so sánh. Tương quan độ lún trung bình năm xác định từ hai loại dữ liệu này đạt 0.83 đã chứng minh khả năng xác định lún khu vực khai thác mỏ bằng chuỗi ảnh Sentinel-1.

Tài liệu tham khảo

- [1] G.W. Bawden, M.R. Johnson, M.C. Kasmarek, J.T. Brandt, C.S. Middleton, Investigation of Land Subsidence in The Houston-Galveston Region of Texas by Using The Global Positioning System and Interferometric Synthetic Aperture Radar, 1993-2000, Scientific Investigations Report, 2012, US Geological Survey, <https://doi.org/10.3133/sir20125211>.
- [2] P. Tizzani, P. Berardino, F. Casu, P. Euillades, M. Manzo, G.P. Ricciardi, G. Zeni, R. Lanari, Surface Deformation of Long Valley Caldera and Mono Basin, California, Investigated with The SBAS-InSAR Approach, Remote Sensing of Environment, Vol. 108, No. 3, 2007, pp. 277-289, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.11.015>.
- [3] A. Aobpaet, M.C. Cuenca, A. Hooper, I. Trisirisatayawong, InSAR Time-Series Analysis of Land Subsidence in Bangkok, Thailand, International Journal of Remote Sensing, Vol. 34, No. 8, 2013, pp. 2969-2982, <https://doi.org/10.1080/01431161.2012.756596>.
- [4] A. H. M. Ng, L. Ge, X. Li, H. Z. Abidin, H. Andreas, K. Zhang, Mapping Land Subsidence in Jakarta, Indonesia Using Persistent Scatterer Interferometry (PSI) Technique with ALOS PALSAR, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Vol. 1, No. 12, 2012, p. 232-242, <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.01.018>.
- [5] K. Yang, L. Yan, G. Huang, C. Chen, Z. Wu, Monitoring Building Deformation with InSAR: Experiments and Validation, Sensors, Vol. 16, No. 12, pp. 1-16, 2016, <https://doi.org/10.3390/s16122182>.
- [6] H. Akcin, H. Kutoglu, T. Deguchi, E. Koksall, Monitoring Subsidence Effects in The Urban Area of Zonguldak Hardcoal Basin of Turkey by InSAR-GIS Integration, Natural Hazards and Earth System Sciences, Vol. 10, No. 9, 2010, pp. 1807-1814, <https://doi.org/10.5194/nhess-10-1807-2010>.
- [7] E. Chaussard, S. Wdowinski, E. Cabral-Cano, F. Amelung, Land Subsidence in Central Mexico Detected by ALOS InSAR Time-Series, Remote

- Sensing of Environment, Vol. 140, 2014, pp. 94-106, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.038>.
- [8] Y. Chen, G. Zhang, X. Ding, Z. Li, Monitoring Earth Surface Deformations with InSAR Technology: Principles and Some Critical Issues. *Journal of Geospatial Engineering*, Vol. 2, No. 1, 2000, pp. 3-22.
- [9] L. C. Graham, Synthetic Interferometer Radar for Topographic Mapping, *Proceedings of The IEEE*, Vol. 62, No. 6, 1974, pp. 763-768. <https://doi.org/10.1109/PROC.1974.9516>.
- [10] T.V. Anh, S. Masumoto, V. Raghavan, K. Shiono, Spatial Distribution of Subsidence in Hanoi Detected by JERS-1 SAR Interferometry, *Geoinformatics*, Vol. 18, No. 1, 2007, pp. 3-13, <https://doi.org/10.6010/geoinformatics.18.3>.
- [11] A. Ferretti, C. Prati, F. Rocca, Permanent Scatterers in SAR Interferometry, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, Vol. 39, No. 1, pp. 8-20, <http://doi.org/10.1109/36.898661>.
- [12] P. López-Quiroz, M.P. Doin, F. Tupin, P. Briole, J.M. Nicolas, Time Series Analysis of Mexico City Subsidence Constrained by Radar Interferometry, *Journal of Applied Geophysics*, 2009, Vol. 69, No. 1, pp. 1-15, <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2009.02.006>.
- [13] G. Liu, X. Luo, Q. Chen, D. Huang, X. Ding, Detecting Land Subsidence in Shanghai by PS-Networking SAR Interferometry, *Sensors*, Vol. 8, No. 8, 2008, pp. 4725-4741, <https://doi.org/10.3390/s8084725>.
- [14] K. Hirose, Y. Maruyama, D. Murdohardono, A. Effendi, H.Z. Abidin, Land Subsidence Detection Using JERS-1 SAR Interferometry, *The 22nd Asian Conference on Remote Sensing*, 2001.
- [15] T.V. Anh, T. Q. Cuong, N.D. Anh, H.T.M. Dinh, T.T. Anh, N.N. Hung, L.T.T. Linh, Application of PSInSAR Method for Determining of Land Subsidence in Hanoi City by Cosmo-Skymed Imagery, *Proceedings of GIS IDEAS 2016*, 2016, Hanoi, Vietnam,
- [16] L.V. Trung, N.C. Tang, Assessment of Capacity of Using Sentinel-1 Images in Monitoring Land Subsidence in Ho Chi Minh City. *Science & Technology Development Journal-Science of The Earth & Environment*, 2018, Vol. 2, No. 2, pp. 19-25, <https://doi.org/10.32508/stdjsee.v2i2.490>.
- [17] B.X. Nam, T.V. Anh, B.K. Luyen, N.Q. Long, L. T.T. Ha, G. Ropesh. Mining-Induced Land Subsidence Detection by Persistent Scatterer InSAR and Sentinel-1: Application to Phugiao Quarries, Vietnam. *Lecture Notes in Civil Engineering Book Series*, Vol. 108, 2021, pp. 18-, Springer International Publishing, https://doi.org/10.1007/978-3-030-60269-7_2.
- [18] A. Sowter, M.B.C. Amat, F. Cigna, S. Marsh, A. Athab, L. Alshammari, Mexico City Land Subsidence in 2014-2015 with Sentinel-1 IW TOPS: Results Using The Intermittent SBAS (ISBAS) Technique. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol. 52, 2016, pp. 230-242, <https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.06.015>.
- [19] Z. Du, L. Ge, A.H.-M. Ng, Q. Zhu, X. Yang, L. Li, Correlating The Subsidence Pattern and Land Use in Bandung, Indonesia with Both Sentinel-1/2 and ALOS-2 Satellite Images. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol. 67, 2018, pp. 54-68, <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.01.001>.
- [20] J. Baek, S-W. Kim, H-J. Park, H-S. Jung, K-D. Kim, J. W. Kim, Analysis of Ground Subsidence in Coal Mining Area Using SAR Interferometry, *Geosciences Journal*, Vol. 12, No. 3, 2008, pp. 277-284, <https://doi.org/10.1007/s12303-008-0028-3>.
- [21] J. He, G. Liu, H. Yue, Monitoring Ground Subsidence in Mining Area Using Spaceborne InSAR Technology, 2009 Joint Urban Remote Sensing Event, IEEE, 2009, pp. 1-6, <https://doi.org/10.1109/URS.2009.5137668>.
- [22] X. Diao, K. Wu, D. Hu, L. Li, D. Zhou, Combining Differential SAR Interferometry and The Probability Integral Method for Three-Dimensional Deformation Monitoring of Mining Areas. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 37, No. 21, 2016, pp. 5196-5212, <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1230284>.
- [23] C. Ma, X. Cheng, Y. Yang, X. Zhang, Z. Guo, Y. Zou, Investigation on Mining Subsidence Based on Multi-Temporal InSAR and Time-Series Analysis of The Small Baseline Subset - Case Study of Working Faces 22201-1/2 in Bu'ertai Mine, Shendong Coalfield, China. *Remote Sensing*, Vol. 8, No. 11, 2016, pp. 951, <https://doi.org/10.3390/rs8110951>.
- [24] A. Hooper, K. Spaans, D. Bekaert, M. C. Cuenca, M. Arian, A. Oyen, StaMPS/MTI Manual, Delft Institute of Earth Observation and Space Systems Delft University of Technology, Kluuyverweg, Vol. 1, 2010, pp 1-17, Holland.
- [25] Delgado Blasco, J.M., M. Foumelis, C. Stewart, A. Hooper, Measuring Urban Subsidence in The Rome Metropolitan Area (Italy) with Sentinel-1 Snap-Stamps Persistent Scatterer Interferometry, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11, No. 2, pp. 129, <https://doi.org/10.3390/rs11020129>.