

QUAN TRẮC LÚN BẰNG PHƯƠNG PHÁP GIAO THOA CẠNH NGẮN SBAS INSAR TẠI KHU VỰC ĐÔNG TRIỀU, QUẢNG NINH

Nguyễn Thị Mai Anh^{1,*}, Lê Minh Hằng², Đặng Diệu Huệ³

¹Trường Đại học Công nghiệp Quảng Ninh

²Học viện Kỹ thuật quân sự

³Trường Đại học Xây dựng Hà Nội

*Email: nguyenvanducmct@qui.edu.vn

TÓM TẮT

Phương pháp giao thoa cạnh đáy ngắn SBASInSAR (The small baseline subset Interferometric SAR) đang được nghiên cứu ứng dụng để giám sát dịch chuyển bề mặt nhiều nơi trên thế giới. Phương pháp SBASInSAR cho phép quan sát dịch chuyển trên diện rộng và trong chu kỳ liên tục dựa trên phân tích dữ liệu ảnh SAR (Synthetic aperture radar) đa thời gian. Trong nội dung bài báo, các tác giả trình bày kết quả nghiên cứu thử nghiệm ứng dụng phương pháp giao thoa SBASInSAR và ảnh Sentinel-1A đa thời gian để giám sát quá trình lún tại khu vực thử nghiệm Đông Triều, Quảng Ninh. Kết quả đo bằng phương pháp SBASInSAR được so sánh, đánh giá với dữ liệu đo thủy chuẩn thông qua 14 điểm kiểm tra. Hệ số xác định (R^2) của hai tập dữ liệu đo bằng SBAS và bằng thủy chuẩn đạt lớn hơn 0.66.

Từ khóa: SBASInSAR, Sentinel-1A, quan trắc lún bề mặt.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Dịch chuyển bề mặt gây ảnh hưởng lớn đến đời sống con người và thiên nhiên như sụt lún bề mặt, động đất, trượt lở... Phương pháp quan trắc truyền thống bao gồm đo đạc trắc địa trực tiếp, đo GPS theo chu kỳ để phát hiện các dịch chuyển của bề mặt Trái đất. Phương pháp truyền thống cho độ chính xác cao, tuy nhiên đòi hỏi chi phí cao và nhân công lớn, đặc biệt đối với việc giám sát trên diện rộng. Phương pháp giao thoa radar (InSAR-Interferometric SAR) cho phép quan sát Trái đất cả ngày và đêm, trong mọi điều kiện thời tiết và quan trắc dịch chuyển bề mặt đất trên diện rộng. Mục đích ban đầu của việc áp dụng kỹ thuật InSAR là phải đồng thời thu được độ cao bề mặt dựa vào sự khác biệt về pha của hai ảnh SAR [1]. Cùng với sự phát triển của công nghệ, tác giả Gabriel và cộng sự [2] đã đề xuất phương pháp giao thoa radar vi phân (D-InSAR - Differential InSAR), thực hiện việc phân tách xác định độ cao mặt đất và tín hiệu biến dạng. Kể từ đó, phương pháp D-InSAR đã được sử dụng rộng rãi để đo các biến dạng gây ra bởi các hiện tượng tự nhiên như động đất, núi lửa và sông băng [3-5], cũng như

giám sát sự dịch chuyển mặt đất do các hoạt động của con người gây ra [6,7]. Tuy nhiên, kỹ thuật D-InSAR thường bị ảnh hưởng bởi hiệu ứng khí quyển và mất tương quan về không gian và thời gian [8, 9]. Tác giả Ferretti và cộng sự [10,11] nhận thấy rằng khi độ lệch biên độ của một pixel nằm trong một phạm vi cụ thể thì độ ổn định pha của pixel sẽ tốt hơn. Những pixel này được gọi là các điểm tán xạ liên tục (PS) và hình thành phương pháp giao thoa tán xạ liên tục (PSInSAR - Permanent Scatterer Interferometry SAR). Bên cạnh đó, tác giả Usai và cộng sự [12] đã xây dựng một loạt các giao thoa đồ có đặc điểm là đường cơ sở theo không gian và thời gian nhỏ. Kết quả biến dạng tích lũy theo chuỗi thời gian được xác định bằng phương pháp bình phương nhỏ nhất. So với phương pháp PSInSAR thì phương pháp SBASInSAR sẽ tránh ảnh hưởng của giải tương quan không gian-thời gian. Tuy nhiên, khi nhiều tập con cơ sở được hình thành, các vấn đề thiếu hụt thứ hạng xảy ra trong quá trình giải bình phương tối thiểu. Tác giả Berardino và cộng sự [13] đã giới thiệu thuật toán phân rã giá trị số ít (SVD-Singular Value Decomposition)

trong quá trình tính toán biến dạng để giải bài toán thiếu hụt thứ hạng và phát triển nó thành phương pháp SBAS cổ điển.

Trong phương pháp SBASInSAR yêu cầu có nhiều ảnh SAR trong cùng một khu vực vào những thời điểm khác nhau và phương pháp chỉ trích xuất tín hiệu từ các điểm có tính chất tán xạ ổn định [14]. Phương pháp SBAS đã trở thành một phương pháp đáng tin cậy để theo dõi sự dịch chuyển chậm của mặt đất như hiện tượng lún [15]. Hiện nay, phương pháp SBAS được ứng dụng rộng rãi và phát triển liên tục do (1) Sự tiến bộ của dữ liệu ảnh SAR với nhiều dạng độ phân giải, đa phân cực, đa chế độ và khả năng xử lý dữ liệu; (2) Các nhu cầu về dự án giám sát biến dạng mặt đất trên diện rộng khu vực đã giúp cho sự phát triển xử lý chuỗi thời gian InSAR. Khả năng đo lường và độ chính xác cao của phương pháp SBAS thuận tiện cho việc tiếp tục khám phá mối tương quan giữa các yếu tố khác nhau và hiện tượng biến dạng để tìm hiểu về cơ chế bên trong của quá trình biến dạng.

Trong nội dung bài báo, các tác giả trình bày kết quả quan trắc lún khu vực Đông Triều, Quảng Ninh sử dụng phương pháp giao thoa cạnh ngắn SBASInSAR với chuỗi dữ liệu ảnh Sentinel-1 đa thời gian.

2. VỊ TRÍ VÀ DỮ LIỆU NGHIÊN CỨU

2.1. Vị trí nghiên cứu

Đông Triều là một thành phố nằm ở phía tây tỉnh Quảng Ninh, Việt Nam (Hình 1a). Thành phố Đông Triều là vùng đất có tài nguyên khoáng sản phong phú chủ yếu là than đá, đất sét, cát giúp phát triển các ngành công nghiệp. Địa hình gồm núi, đồi và đồng bằng [16]. Khu vực nghiên cứu được thể hiện trên Hình 1b.

Khai thác than là ngành công nghiệp lớn nhất trên địa bàn thành phố Đông Triều, phân bố trên địa bàn các xã Hồng Thái Tây, Hồng Thái Đông, Hoàng Quế, Yên Thọ, Tràng Lương, Bình Khê, Mạo Khê. Ngoài ra, trong khu vực Đông Triều có hệ thống tài nguyên nước mặt với hệ thống sông Cẩm, sông Đá Bạc, 44 hồ chứa lớn nhỏ. Hiện có 5 giếng khoan khai thác nước ngầm để cung cấp cho khu vực, trong đó hai công trình khai thác

nước sinh hoạt cho người dân tập trung tại phường Đức Chính và Mạo Khê. Các hoạt động khai thác khoáng sản và hoạt động khai thác nước ngầm có thể gây ảnh hưởng đến dịch chuyển bề mặt trong khu vực.

Trong khu vực nghiên cứu, diện tích đất nông nghiệp và lâm nghiệp chiếm 67,2% trên tổng diện tích đất tự nhiên của toàn vùng. Lượng mưa trung bình tương đối thấp và phân bố theo mùa. Mùa mưa thường kéo dài từ tháng 5 đến tháng 10. Trong đó, lượng mưa tập trung vào tháng 7,8 và 9 [16]. Những điều kiện địa hình và khí hậu cũng có ảnh hưởng đến quá trình xác định lún bằng phương pháp giao thoa SBASInSAR.

2.2. Dữ liệu nghiên cứu

Dữ liệu nghiên cứu là ảnh vệ tinh siêu cao tần Sentinel-1A đa thời gian với các thông số được thể hiện trong Bảng 1.

Bảng 1. Dữ liệu nghiên cứu

	Ảnh Sentinel-1A
Ngày chụp	03/11/2023 – 28/10/2024
Mức xử lý	SLC (Single Look Complex)
Phân cực	VV
Chu kỳ chụp	12 ngày

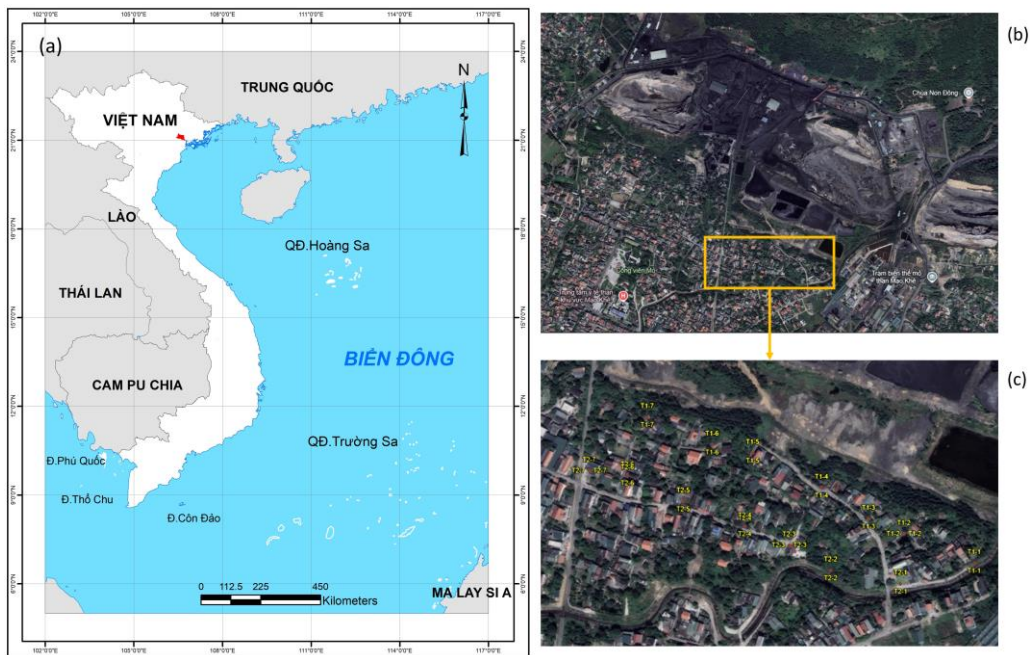
Dữ liệu nghiên cứu Sentinel-1A được xử lý và tính toán xác định dịch chuyển bề mặt bằng phần mềm pyGMTSAR trên Google Colab.

Ngoài ra, dữ liệu dịch chuyển bề mặt được xác định từ dữ liệu ảnh Sentinel-1A sẽ được so sánh với kết quả đo lún bằng phương pháp đo thủy chuẩn. Vị trí các điểm đo thủy chuẩn được thể hiện trên Hình 1c. Dữ liệu đo được thực hiện theo chu kỳ tháng 10/2023, tháng 03/2024 và tháng 06/2024.

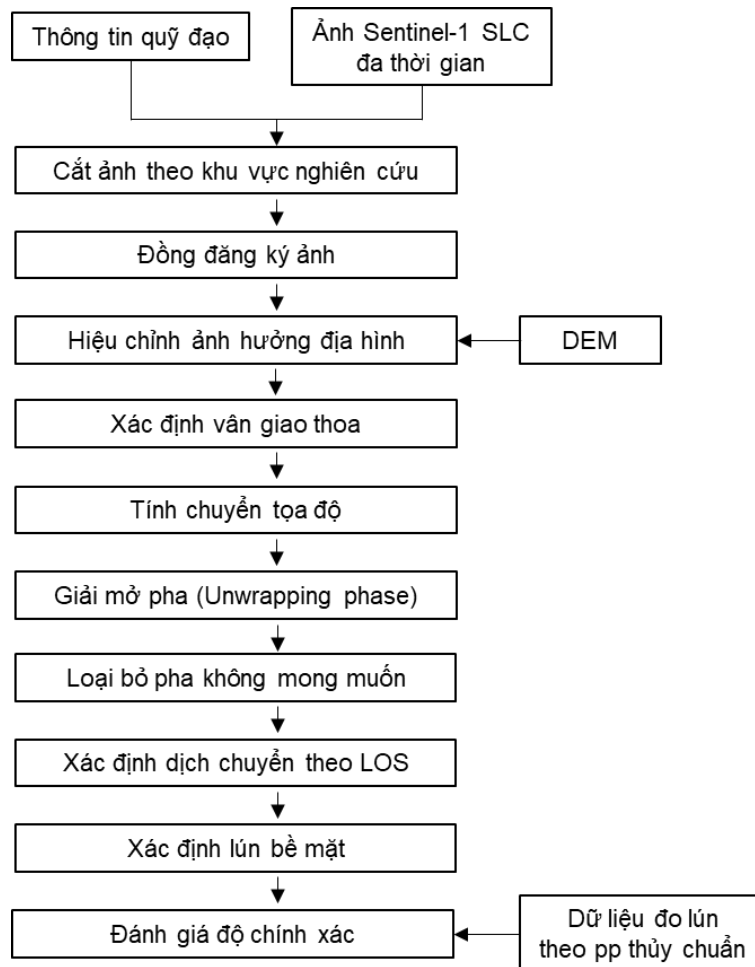
3. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Phương pháp sử dụng trong bài báo là phương pháp giao thoa cạnh ngắn SBASInSAR với dữ liệu ảnh Sentinel-1 đa thời gian nhằm xác định thông tin về dịch chuyển bề mặt tại khu vực Đông Triều, tỉnh Quảng Ninh. Quy trình thực hiện được thể hiện trên Hình 2 và sử dụng phần mềm pyGMTSAR trên Google

Colab [17]. Quy trình thực hiện gồm những bước chính sau:



Hình 1. Vị trí khu vực nghiên cứu. (a) Khu vực Đông Triều, Quảng Ninh; (b) Phạm vi khu vực nghiên cứu; (c) Vị trí các điểm đo thủy chuẩn



Hình 2. Quy trình xác định lún bề mặt bằng phương pháp giao thoa SBASInSAR

1. Bước tiền xử lý ảnh

- Dữ liệu ảnh đa thời gian Sentinel-1
- Thông tin quỹ đạo để cắt ảnh theo khu vực và thực hiện đồng đăng ký ảnh.
- Dựa vào thông tin DEM thực hiện xác định và loại bỏ ảnh hưởng địa hình trong kỹ thuật giao thoa radar

2. Giao thoa radar

- Xác định vân giao thoa
- Tính chuyển tọa độ
- Giải mở pha
- Loại bỏ các xu hướng tuyến tính hoặc phi tuyến tính trong pha để làm nổi bật các tín hiệu có ý nghĩa.

3. Xác định dịch chuyển lún bề mặt

- Xác định dịch chuyển bề mặt theo hướng LOS (Line of sight).
- Xác định dịch chuyển bề mặt theo hướng thẳng đứng theo công thức (1) như sau:

$$h = \frac{d_{LOS}}{\cos \theta} \quad (1)$$

Trong đó: d_{LOS} - Dịch chuyển bề mặt theo hướng LOS; θ - Góc tới của tín hiệu.

- Phân tích dịch chuyển đa thời gian.
- Xuất kết quả sang định dạng NetCDF và VTK (Visualization Toolkit).
- Đánh giá độ chính xác.

4. KẾT QUẢ THỬ NGHIỆM

Sử dụng phần mềm pyGMTSAR trên Google Colab và dữ liệu ảnh Sentinel-1 đa thời gian, các tác giả xác định giá trị lún bề mặt tại khu vực nghiên cứu thuộc thị xã Đông Triều, tỉnh Quảng Ninh. Trong quá trình thử nghiệm, ảnh chụp ngày 10/10/2023 làm ảnh chính và các ảnh còn lại làm ảnh phụ. Phương pháp SBAS là phương pháp giao thoa radar vi phân. Sau quá trình tính, phương pháp SBAS sẽ chọn các cặp tối ưu theo đường đáy không gian và thời gian ngắn. Trên Hình 3 thể hiện kết quả xác định dịch chuyển bề mặt theo hướng LOS của các ảnh giao thoa radar theo phương pháp SBASInSAR có giá trị tối ưu về không gian và thời gian.

Dựa trên công thức (1) với góc tới tín hiệu của ảnh vệ tinh Sentinel-1A là 43.5 độ, các tác giả tính chuyển từ giá trị dịch chuyển bề mặt theo hướng LOS về giá trị dịch chuyển lún bề mặt theo phương thẳng đứng. Kết quả dịch chuyển lún của khu vực nghiên cứu theo phương pháp SBAS sẽ được so sánh với kết quả đo lún tại các điểm đo thủy chuẩn (Hình 1c). Trong Bảng 2 thể hiện giá trị đo lún tại các điểm kiểm tra được xác định bằng phương pháp đo SBAS và phương pháp đo thủy chuẩn. Kết quả cho thấy có những sai lệch lớn giữa giá trị đo bằng SBAS và đo thủy chuẩn tại các điểm có giá trị lún lớn. Trên Hình 4 là kết quả đánh giá tương quan giữa hai tập dữ liệu đo bằng SBAS và đo thủy chuẩn. Các điểm chấm đen trên Hình 4 là các điểm đo lún tương ứng bằng phương pháp SBASInSAR và so với đường hồi quy tuyến tính ở giữa. Hình 4a thể hiện kết quả đánh giá tương quan giữa dữ liệu đo bằng SBAS và đo thủy chuẩn của chu kỳ tháng 06/2024 và tháng 10/2023. Hệ số xác định (R^2) [18] đạt 0.6686. Giá trị R^2 là thước đo sự phù hợp của mô hình hồi quy tuyến tính. Nếu dữ liệu tập trung sát với đường hồi quy thì giá trị R^2 sẽ cao, tương ứng với các điểm đo lún bằng phương pháp SBASInSAR gần tiến đến giá trị thực tế và độ chính xác xác định lún bằng phương pháp SBASInSAR đạt yêu cầu. Nếu R^2 thấp tương ứng với dữ liệu phân bố rời rạc, cách xa đường hồi quy và phương pháp SBASInSAR không đạt yêu cầu. Hình 4b thể hiện kết quả đánh giá của hai tập dữ liệu đo ở chu kỳ tháng 08/2024 và tháng 10/2023 với hệ số xác định (R^2) đạt 0.6965.

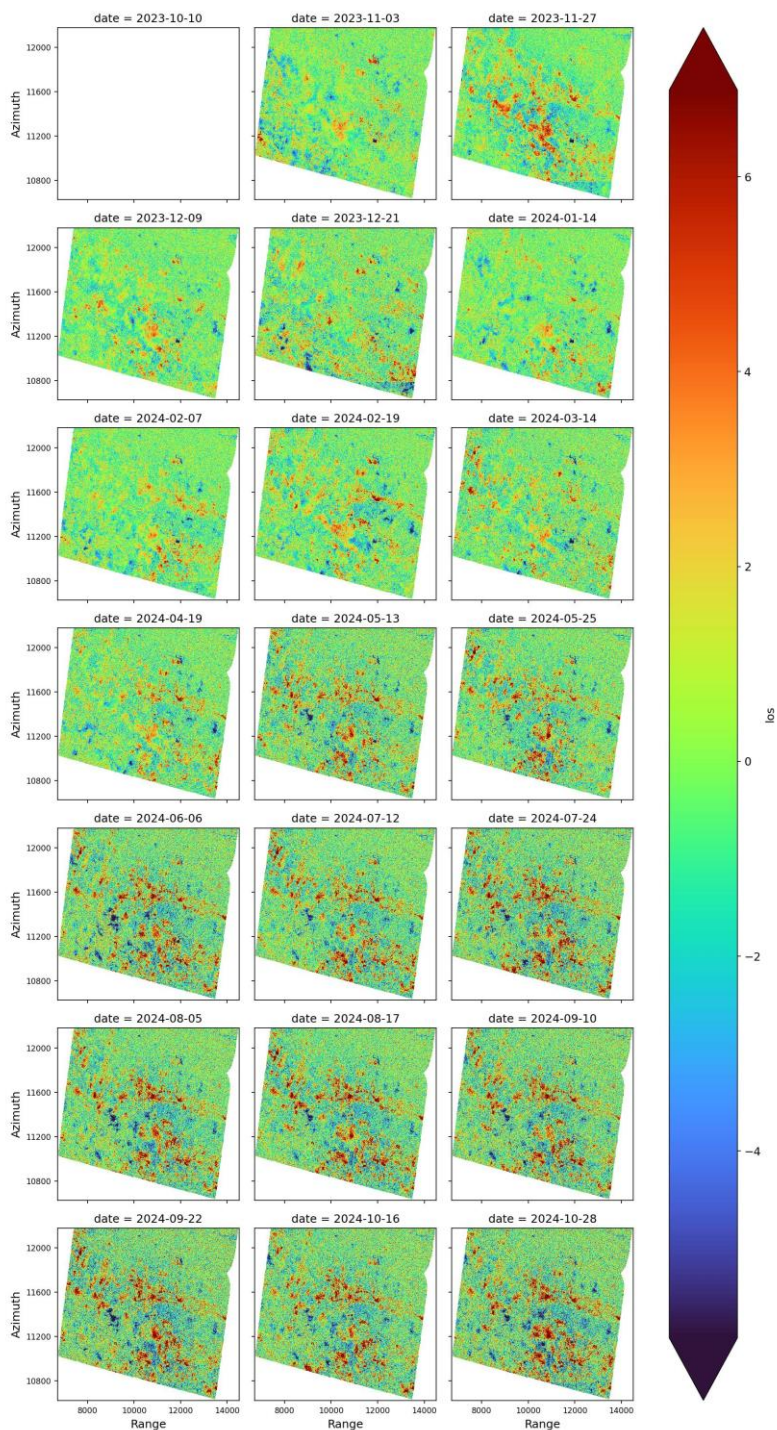
Khu vực thử nghiệm gần khu vực khai thác của mỏ than Mạo Khê nên có ảnh hưởng lún lớn. Giá trị lún đo được bằng phương pháp thủy chuẩn là - 11.7mm. Trên ảnh xác định dịch chuyển bề mặt bằng phương pháp giao thoa cạnh ngắn SBAS (Hình 3) cũng cho thấy khu vực có hiện tượng lún không đều, có hiện tượng trời lên và hiện tượng lún xuống. Việc dịch chuyển không đều sẽ gây ảnh hưởng lớn đến khu vực.

5. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

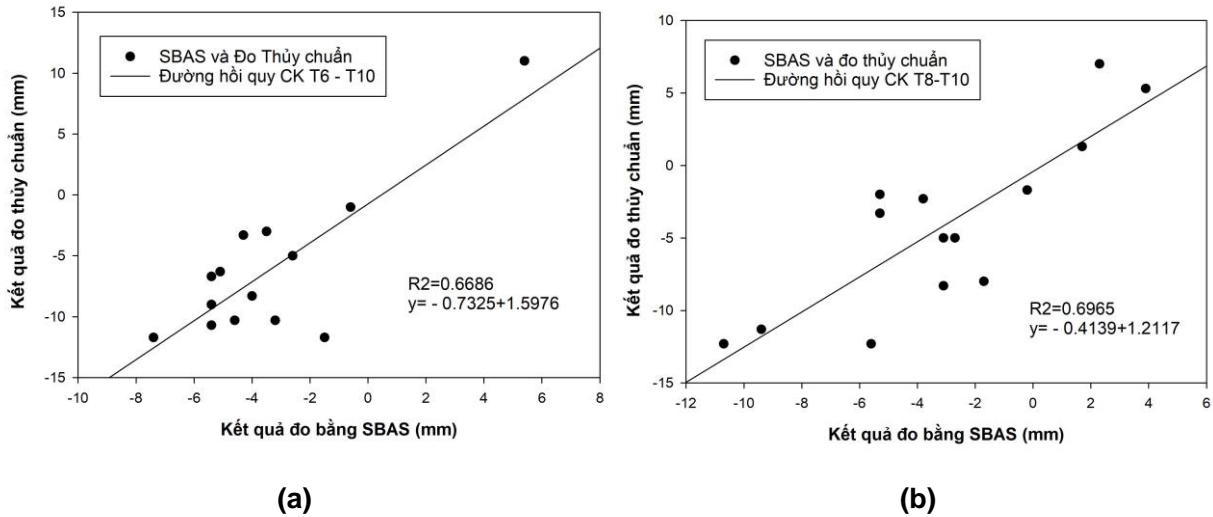
5.1. Kết luận

Qua kết quả nghiên cứu thử nghiệm cho thấy phương pháp giao thoa cạnh ngắn SBASInSAR sử dụng tư liệu ảnh Sentinel-1A cho phép quan trắc dịch chuyển lún tại khu vực với độ chính xác đảm bảo. Kết quả thử nghiệm đã được so sánh với kết quả đo thủy chuẩn tại một số điểm kiểm tra được đo bằng phương

pháp thủy chuẩn. Hệ số xác định R2 trong cả hai chu kỳ thử nghiệm đạt trên 0.66. Tuy nhiên, tại một số điểm kiểm tra có sự sai lệch khá lớn giữa kết quả đo trên ảnh và đo thủy chuẩn do ảnh hưởng của điều kiện khí hậu và khu vực thử nghiệm có khá nhiều thực vật che phủ ảnh hưởng đến giá trị tương quan (coherence) trong giao thoa ảnh radar.



Hình 3. Kết quả xác định dịch chuyển bề mặt theo LOS bằng phương pháp SBAS



Hình 4. So sánh kết quả đo lún bằng phương pháp SBAS và đo thủy chuẩn. (a) Chu kỳ Tháng 6/2024 – Tháng 10/2023; (b) Chu kỳ Tháng 8/2024 – Tháng 10/2023

Bảng 2. Dữ liệu đo lún tại các điểm kiểm tra

Tên điểm	Chu kỳ Tháng 6/2024-10/2023		Chu kỳ tháng 08/2024-10/2023	
	Đo thủy chuẩn	Đo SBAS	Đo thủy chuẩn	Đo SBAS
T1-1	-10.3	-3.2	-5.0	-3.1
T1-2	-3.0	-3.5	1.3	0.0
T1-3	-11.7	-1.5	-12.3	-10.7
T1-4	-10.3	-4.6	7.0	2.3
T1-5	-6.3	-5.1	-1.7	-0.2
T1-6	11.0	5.4	-2.3	0.0
T1-7	-8.3	-4.0	-12.3	-5.6
T2-1	-5.0	-2.6	5.3	3.9
T2-2	-9.0	-5.4	-8.3	-3.1
T2-3	-10.7	-5.4	-8.0	-1.7
T2-4	-11.7	-7.4	-11.3	-9.4
T2-5	-3.3	-4.3	-5.0	-2.7
T2-6	-1.0	-0.6	-3.3	-5.3
T2-7	-6.7	-5.4	-2.0	-5.3

5.2. Kiến nghị

Đề nghị cần có những kết quả đo thủy chuẩn và đo bằng phương pháp SBAS trên phạm vi rộng hơn thuộc khu vực thử nghiệm để có những đánh giá toàn diện về dịch chuyển của

khu vực và quan sát những dịch chuyển liên tục dựa trên phương pháp giao thoa radar cạnh ngắn SBASInSAR.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Zebker, H. A., & Goldstein, R. M. (1986). "Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations". *J. Geophys. Res. Solid Earth* 91 (pp. 4993-4999).
- Gabriel, A. K., Goldstein, R.M., & Zebker, H.A. (1989). "Mapping small elevation changes over

- large areas: differential radar interferometry*". *J. Geophys. Res. Solid Earth* 94 (1989) (pp. 9183-9191).
3. Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Peltzer, G., Feigl, K., & Rabaute, T. (1993). "The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry". *Nature* 364 (pp. 138-142)
 4. Lu, Z., Masterlark, T., & Dzurisin, D. (2005). "Interferometric synthetic aperture radar study of Okmok volcano, Alaska, 1992-2003: magma supply dynamics and postemplacement lava flow deformation". *J. Geophys. Res. Solid Earth* 110.
 5. Goldstein, R. M., Engelhardt, H., Kamb, B., & Frolich, R. M. (1993). "Satellite radar interferometry for monitoring ice sheet motion: application to an Antarctic ice stream". *Science* 262 (pp. 1525-1530).
 6. Carnec, C., & Delacourt, C. (2000). "Three years of mining subsidence monitored by SAR interferometry, near Gardanne". *France, J. Appl. Geophys.* 43 (pp. 43-54).
 7. Ding, X., Liu, G., Li, Z., Li, Z., & Chen, Y. (2004). "Ground subsidence monitoring in Hong Kong with satellite SAR interferometry". *Photogramm. Eng. Rem. Sens.* 70 (pp. 1151-1156).
 8. Zebker, H. A., & Villasenor, J. (1992). "Decorrelation in interferometric radar echoes". *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* 30 (pp. 950-959).
 9. Hanssen, R.F. (2001). "Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis". Vol. 2, Springer Science & Business Media.
 10. Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F. (2000). "Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry, *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* 38 (pp. 2202-2212).
 11. Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2001). "Permanent scatterers in SAR interferometry". *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* 39 (2001) (pp. 8-20).
 12. Usai, S.A. (2001). *New Approach for Longterm Monitoring of Deformations by Differential SAR Interferometry* (Doctoral thesis). TU Delft.
 13. Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., & Sansosti, E. (2002). "A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms", *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* 40 (pp. 2375-2383)
 14. Xue, F., Lv, X., Dou, F., & Yun, Y. (2020). "A review of time-series interferometric SAR techniques: a tutorial for surface deformation analysis". *IEEE Geosci. Rem.Sens. Mag.* 8 (pp. 22-42).
 15. Casu, F., Manzo, M., Lanari, R. (2006). "A quantitative assessment of the SBAS algorithm performance for surface deformation retrieval from DInSAR data". *Remote Sens. Environ.* 102 (pp. 195-210).
 16. <https://dongtrieu.quangninh.gov.vn/>
 17. Pechnikov, A. (2023). *PyGMTSAR: Sentinel-1 Python InSAR An Introduction*.
 18. https://en-m-wikipedia-org.translate.goog/wiki/Coefficient_of_determination/

Thông tin của tác giả:**ThS. Nguyễn Thị Mai Anh**

Trường Đại học Công nghiệp Quảng Ninh

Điện thoại: +(84).0936.898.115- Email: phuonganhtung@gmail.com

TS. Lê Minh Hằng

Học viện Kỹ thuật quân sự.

Điện thoại: +(84).983.228.452 - Email: leminhhang81@lqdtu.edu.vn

ThS. Đặng Diệu Huệ

Trường Đại học Xây dựng Hà Nội

Điện thoại: +(84).0983.118.784 - Email: huedd@huce.edu.vn

SUBSIDENCE MONITORING USING THE SMALL BASELINE SUBSET (SBAS) INSAR IN DONG TRIEU AREA, QUANG NINH

Information about authors:

Nguyen Thi Mai Anh, Quang Ninh University of Industry, email: phuonganhtung@gmail.com

Le Minh Hang, Military Technical Academy, email: leminhhang81@lqdtu.edu.vn

Dang Dieu Hue, Hanoi University of Civil Engineering, email: huedd@huce.edu.vn

ABSTRACT

The small baseline subset interferometric SAR (SBAS InSAR) method is now being studied and implemented in numerous locations worldwide to monitor surface displacement. The SBAS InSAR method enables the continuous and large-scale observation of displacements through the multi-temporal analysis of SAR (synthetic aperture radar) image data. In the article, the authors present the findings of experimental research that utilized the SBAS InSAR interferometry method and multi-temporal Sentinel-1A images to monitor the subsidence process at the Dong Trieu test area in Quang Ninh. Through 14 test sites, the SBAS InSAR method is employed to compare and evaluate the measurement results with the leveling measurement data. The coefficient of determination (R^2) of the two data sets, as determined by SBAS and normalization, exceeds 0.66.

Keywords: SBAS InSAR, Sentinel-1A, subsidence monitoring.

REFERENCES

1. Zebker, H. A., & Goldstein, R. M. (1986). "Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations". *J. Geophys. Res. Solid Earth* 91 (pp. 4993-4999).
2. Gabriel, A. K., Goldstein, R.M., & Zebker, H.A. (1989). "Mapping small elevation changes over large areas: differential radar interferometry". *J. Geophys. Res. Solid Earth* 94 (1989) (pp. 9183-9191).
3. Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Peltzer, G., Feigl, K., & Rabaute, T. (1993). "The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry". *Nature* 364 (pp. 138-142)
4. Lu, Z., Masterlark, T., & Dzurisin, D. (2005). "Interferometric synthetic aperture radar study of Okmok volcano, Alaska, 1992-2003: magma supply dynamics and postemplacement lava flow deformation". *J. Geophys. Res. Solid Earth* 110.
5. Goldstein, R. M., Engelhardt, H., Kamb, B., & Frolich, R. M. (1993). "Satellite radar interferometry for monitoring ice sheet motion: application to an Antarctic ice stream". *Science* 262 (pp. 1525-1530).
6. Carnec, C., & Delacourt, C. (2000). "Three years of mining subsidence monitored by SAR

- interferometry, near Gardanne". France, J. Appl. Geophys. 43 (pp. 43-54).
7. Ding, X., Liu, G., Li, Z., Li, Z., & Chen, Y. (2004). "Ground subsidence monitoring in Hong Kong with satellite SAR interferometry". Photogramm. Eng. Rem. Sens. 70 (pp. 1151-1156).
 8. Zebker, H. A., & Villasenor, J. (1992). "Decorrelation in interferometric radar echoes". IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 30 (pp. 950-959).
 9. Hanssen, R.F. (2001). "Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis". Vol. 2, Springer Science & Business Media.
 10. Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F. (2000). "Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry, IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 38 (pp. 2202-2212).
 11. Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2001). "Permanent scatterers in SAR interferometry". IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 39 (2001) (pp. 8-20).
 12. Usai, S.A. (2001). New Approach for Longterm Monitoring of Deformations by Differential SAR Interferometry (Doctoral thesis). TU Delft.
 13. Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., & Sansosti, E. (2002). "A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms", IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 40 (pp. 2375-2383)
 14. Xue, F., Lv, X., Dou, F., & Yun, Y. (2020). "A review of time-series interferometric SAR techniques: a tutorial for surface deformation analysis". IEEE Geosci. Rem.Sens. Mag. 8 (pp. 22-42).
 15. Casu, F., Manzo, M., Lanari, R. (2006). "A quantitative assessment of the SBAS algorithm performance for surface deformation retrieval from DInSAR data". Remote Sens. Environ. 102 (pp. 195-210).
 16. <https://dongtrieu.quangninh.gov.vn/>
 17. Pechnikov, A. (2023). PyGMTSAR: Sentinel-1 Python InSAR An Introduction.
 18. https://en-m-wikipedia-org.translate.goog/wiki/Coefficient_of_determination/

Ngày nhận bài: 13/03/2025;

Ngày gửi phản biện: 14/03/2025;

Ngày nhận phản biện: 03/04/2025;

Ngày chấp nhận đăng: 13/04/2025.