Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng, ĐHXDHN, 2026, 20 (5V): 234–243

XÁC ĐỊNH TỐC ĐỘ LÚN BỀ MẶT ĐẤT KHU VỰC ĐỒNG BẰNG SÔNG CỬU LONG GIAI ĐOẠN 2019–2024 TỪ CHUỖI THỜI GIAN TỌA ĐỘ GNSS CORS

Trần Đình Trọng[a,*], Nguyễn Đình Huy[a], Lương Anh Đài[a], Nguyễn Tùng Dương[a], Touch Hok[a], Đinh Khánh Toàn[a]

[a]*Khoa Cầu Đường, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, số 55 đường Giải Phóng, phường Bạch Mai, Hà Nội, Việt Nam*

Nhận ngày 03/9/2026, Sửa xong 28/9/2026, Chấp nhận đăng 23/10/2026

Tóm tắt

Đồng bằng Sông Cửu Long đang phải đối mặt với rủi ro lún do tác động kép của nước biển dâng và sụt lún mặt đất. Nghiên cứu này xác định vận tốc lún bề mặt khu vực giai đoạn 2019–2024 thông qua một quy trình xử lý dữ liệu từ mạng lưới 13 trạm CORS. Từ dữ liệu vệ tinh thô định dạng T02 ban đầu, tọa độ các trạm được trích xuất bằng giải pháp Định vị điểm chính xác (PPP). Chuỗi tọa độ sau đó được chuyển đổi sang hệ tọa độ địa phương (NEU) để thực hiện phân tích chuỗi thời gian đối với thành phần thẳng đứng (Up – *u*). Kết quả chỉ ra khu vực nghiên cứu đang lún với tốc độ lớn tại hai tâm lún: (1) vùng lõi đô thị lục địa Cần Thơ với tốc độ cực đại −54,47 mm/năm và (2) dải duyên hải ven biển từ Sóc Trăng đến Cà Mau với tốc độ −25,84 đến −49,12 mm/năm, trái ngược với trạng thái ổn định ở vùng thượng châu thổ (Cao Lãnh, +1,74 mm/năm). Kết quả này khẳng định khả năng ứng dụng hiệu quả của mạng lưới trạm CORS trong công tác cảnh báo và giám sát sụt lún định kỳ tại Việt Nam.

Từ khoá: lún bề mặt đất; chuỗi thời gian; CORS; Rinex; GNSS; Đồng bằng Sông Cửu Long.

DETERMINING LAND SURFACE SUBSIDENCE VELOCITY OF THE MEKONG DELTA REGION FROM 2019 TO 2024 BASED ON GNSS CORS COORDINATE TIME SERIES

Abstract

The Mekong Delta is facing subsidence risks due to the dual impacts of sea-level rise and land subsidence. This study determines the regional surface subsidence rates for the 2019–2024 period through a data processing workflow from a network of 13 CORS stations. From the initial raw T02 format satellite data, the station coordinates are extracted using the Precise Point Positioning (PPP) solution. The coordinate series are then converted to the local coordinate system (NEU) to perform time series analysis on the vertical component (Up – u). The results indicate that the study area is subsiding at high rates at two subsidence hotspots: (1) the inland urban core of Can Tho with a maximum rate of −54,47 mm/year and (2) the coastal strip from Soc Trang to Ca Mau with rates ranging from −25,84 to −49,12 mm/year, which contrasts with the stable state in the upper delta region (Cao Lanh, +1,74 mm/year). These results confirm the effective applicability of the CORS station network for periodic subsidence warning and monitoring in Vietnam.

Keywords: Land surface subsidence; Time series; CORS; Rinex; GNSS; Mekong Delta.

https://doi.org/10.31814/stce.huce2026-20(5V)-17 © 2026 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

1. Mở đầu

Đồng bằng sông Cửu Long (ĐBSCL) là đồng bằng lớn thứ ba trên thế giới, đóng vai trò là trung tâm kinh tế và an ninh lương thực quan trọng của Việt Nam. Khu vực này là nơi sinh sống của khoảng 18 đến 20 triệu người, đóng góp 50% sản lượng lương thực và 90% lượng gạo xuất khẩu của cả nước. Tuy nhiên, với độ cao địa hình trung bình rất thấp so với mực nước biển, ĐBSCL đang được đánh giá là một trong những vùng lãnh thổ dễ bị tổn thương nhất trên toàn cầu. Hiện nay, ĐBSCL đang phải đối mặt với "gánh nặng kép" từ nước biển dâng do biến đổi khí hậu và hiện tượng sụt lún bề mặt đất diễn ra trên diện rộng [1, 2].

*Tác giả đại diện. *Địa chỉ e-mail:* trongtd@huce.edu.vn (Trọng, T. Đ.)

Trong những thập kỷ gần đây, tốc độ sụt lún đất tại ĐBSCL đang diễn ra ở mức báo động, vượt xa tốc độ nước biển dâng tuyệt đối toàn cầu 4 mm/năm [3, 4]. Các nghiên cứu chỉ ra rằng, tại một số khu vực đô thị và vùng ven biển, tốc độ lún có thể lên tới cỡ centimet mỗi năm, như Cần Thơ là −46,5 mm/năm, Cà Mau là −51,3 mm/năm [5]. Hệ quả của quá trình này là sự gia tăng các sự cố môi trường [2, 3] như làm tăng độ sâu và thời gian ngập lụt đô thị, khuếch đại tác động của triều cường, và thúc đẩy xâm nhập mặn tiến sâu vào nội đồng [3, 6]. Thêm vào đó, sự sụt lún kết hợp với việc suy giảm nguồn cung cấp trầm tích (do các đập thủy điện ở thượng nguồn và tình trạng khai thác cát lòng sông) đã gây ra hiện tượng xói lở bờ biển thêm nghiêm trọng, làm ĐBSCL mất đi trung bình hơn 5 km^2 diện tích đất ven biển mỗi năm trong giai đoạn 2003–2012 [1]. Sự biến dạng bề mặt đất không đồng đều cũng trực tiếp đe dọa đến hệ thống cơ sở hạ tầng như gây nứt gãy các tuyến giao thông và công trình xây dựng, buộc nhiều cộng đồng dân cư phải di dời [7].

Nguyên nhân của lún bề mặt đất tại ĐBSCL được xác định chủ yếu là do các hoạt động nhân sinh như hoạt động khai thác nước ngầm [2, 3, 6]. Việc khai thác nước ngầm liên tục làm sụt giảm mực nước và áp lực lỗ rỗng trong các tầng chứa nước Pleistocene và Holocene, dẫn đến sự nén chặt của các lớp trầm tích mềm, làm cho bề mặt đất bị lún xuống. Đứng trước nguy cơ này, việc giám sát, định lượng và lập bản đồ tốc độ lún là yêu cầu cấp thiết nhằm cung cấp cơ sở khoa học cho các chiến lược quy hoạch không gian, quản lý tài nguyên và thích ứng với biến đổi khí hậu [2, 4]. Hiện nay, để xác định chuyển dịch thẳng đứng của vỏ Trái đất, các phương pháp truyền thống như đo thủy chuẩn hình học hoặc công nghệ viễn thám radar giao thoa InSAR (Interferometric synthetic aperture radar) thường được sử dụng [7, 8]. Tuy nhiên, đo thủy chuẩn có chi phí cao và chu kỳ đo thưa, nên khó cung cấp dữ liệu liên tục. Trong khi đó, InSAR gặp hạn chế ở các khu vực nông thôn, thảm thực vật dày đặc do thiếu các điểm phản xạ cố định và chỉ đo được giá trị tương đối. Để khắc phục những hạn chế này, mạng lưới trạm tham chiếu hoạt động liên tục CORS (Continuously Operating Reference System) đang trở thành như một công cụ mạnh mẽ, cho phép cung cấp dữ liệu vị trí 3D tuyệt đối, liên tục với độ chính xác đạt mức milimet [5]. Chuỗi thời gian tọa độ GNSS (Global Navigation Sattellite System) của trạm CORS cho phép xác định được cả những nhiễu động phức tạp, như xu hướng tuyến tính, dao động chu kỳ (do tải trọng khối lượng môi trường hoặc nước ngầm), và các bước nhảy do thay đổi thiết bị hoặc dị thường địa chất, bằng các mô hình hồi quy từ đó cho phép xác định độ lún thực tế một cách chính xác [5, 9–11].

Bài báo nghiên cứu xác định độ lún bề mặt đất tại ĐBSCL dựa trên chuỗi thời gian tọa độ GNSS CORS liên tục trong giai đoạn 2019–2024. Cụ thể, dữ liệu thô T02 từ 13 trạm CORS được xử lý bằng kỹ thuật định vị điểm chính xác PPP (Precise Point Positioning) bằng dịch vụ CSRS-PPP trực tuyến để xác định tọa độ tuyệt đối trong hệ quy chiếu ITRF (International Terrestrial Reference Frame). Sau khi chuyển đổi từ tọa độ địa tâm (X, Y, Z) sang tọa độ địa phương (n, e, u) của chuỗi thời gian, mô hình toán học tổng hợp được áp dụng để bóc tách chính xác vận tốc lún khỏi các nhiễu động chu kỳ và sai số tại các trạm CORS. Cuối cùng, độ lún của khu vực được nội suy không gian và trực quan hóa dưới dạng bản đồ vector và bản đồ nhiệt. Nghiên cứu này giới thiệu phương pháp xử lý chuỗi thời gian GNSS độ chính xác cao, đồng thời đóng góp các dữ liệu định lượng cập nhật, trực quan về tình trạng sụt lún đang diễn biến phức tạp tại ĐBSCL.

2. Khu vực nghiên cứu và dữ liệu

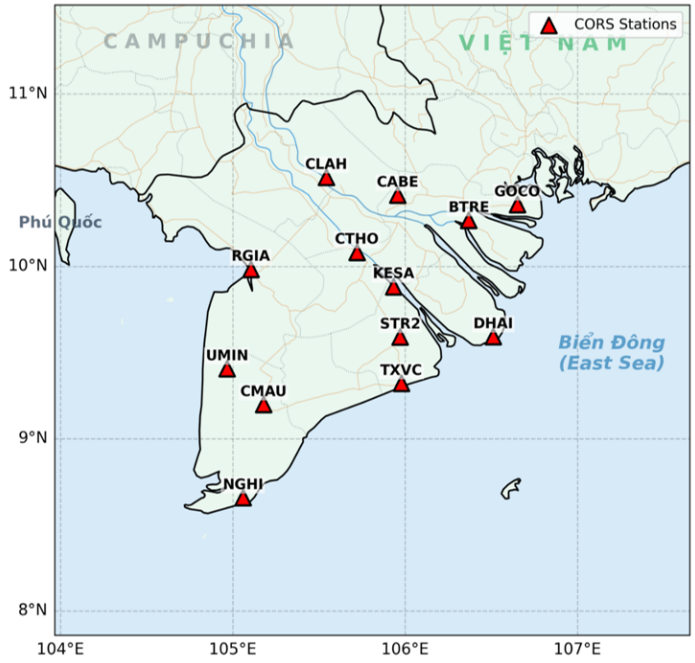
Nghiên cứu này sử dụng dữ liệu từ mạng lưới gồm 13 trạm tham chiếu hoạt động liên tục CORS phân bố rộng khắp tại các tỉnh thành thuộc Đồng bằng Sông Cửu Long (Bảng 1).

Mạng lưới 13 trạm này bao phủ khá đều trên khu vực ĐBSCL, từ vùng thượng châu thổ (Cái Bè, Cao Lãnh), trung tâm châu thổ (Cần Thơ, Kế Sách), dải ven biển Đông (Gò Công, Duyên Hải, Vĩnh Châu) cho đến ven vịnh Thái Lan và vùng bán đảo cực Nam (Rạch Giá, Cà Mau, Ngọc Hiển,

U Minh), cho phép đánh giá chi tiết sự phân hóa không gian của tốc độ chuyển dịch thẳng đứng trên toàn khu vực (Hình 1).

Bảng 1. 13 trạm CORS sử dụng trong nghiên cứu

Tên trạm	Vĩ độ (°N)	Kinh độ (°E)	Vị trí hành chính (cũ)
BTRE	10,268	106,369	Trung tâm tỉnh Bến Tre
CABE	10,414	105,958	Huyện Cái Bè, tỉnh Tiền Giang
CLAH	10,517	105,543	Thành phố Cao Lãnh, tỉnh Đồng Tháp
CMAU	9,198	105,179	Thành phố Cà Mau, tỉnh Cà Mau
CTHO	10,083	105,721	Thành phố Cần Thơ
DHAI	9,592	106,512	Huyện Duyên Hải, tỉnh Trà Vinh
GOCO	10,359	106,652	Thị xã Gò Công, tỉnh Tiền Giang
KESA	9,883	105,933	Huyện Kế Sách, tỉnh Sóc Trăng
NGHI	8,658	105,059	Huyện Ngọc Hiển, tỉnh Cà Mau
RGIA	9,983	105,105	Thành phố Rạch Giá, tỉnh Kiên Giang
STR2	9,591	105,971	Trung tâm tỉnh Sóc Trăng
TXVC	9,321	105,978	Thị xã Vĩnh Châu, tỉnh Sóc Trăng
UMIN	9,408	104,968	U Minh, tỉnh Kiên Giang



Hình 1. Vị trí các trạm CORS trên ĐBSCL

Dữ liệu GNSS liên tục được thu thập trong giai đoạn từ năm 2019 đến năm 2024 của 13 trạm CORS trên khu vực ĐBSCL. 13 trạm CORS này nằm trong hệ thống mạng lưới 140 trạm CORS của Công ty Cổ phần Thiết bị Khoa học và Công nghệ Tường Anh (Tuong Anh Science and Technology Equipment Joint Stock Company – TAST). Mạng lưới CORS TAST có mục đích chính là cung cấp dịch vụ định vị, khảo sát và thành lập bản đồ. Đồng thời, TAST cũng chia sẻ dữ liệu quan trắc GNSS của mạng lưới cho các nghiên cứu khoa học, như phân tích và xác định chuyển dịch của vỏ Trái

đất [10, 12].

Dữ liệu nghiên cứu của 13 trạm CORS có tần suất thu thập dữ liệu 30 giây/lần, trong khoảng thời gian 2019–2024, được lưu trữ dưới định dạng T02 với dung lượng khoảng 320 Gb. Toàn bộ các trạm CORS của TAST được trang bị đồng bộ hệ thống máy thu tín hiệu GNSS tham chiếu độ chính xác cao Trimble NetR9 cùng với ăng-ten chuyên dụng TRM 41249.00 có khả năng thu nhận dữ liệu đa hệ thống vệ tinh bao gồm GPS, GLONASS, Galileo, Beidou và QZSS [10].

3. Phương pháp

Độ lún mặt đất tại trạm CORS là dịch chuyển thẳng đứng được xác định thông qua thành phần tọa độ Up (u) trong tọa độ địa diện địa phương của trạm CORS đó. Dữ liệu đo liên tục GNSS cho phép xác định chuỗi thời gian tọa độ theo 3 thành phần Bắc (North – n), Đông (East – e) và Độ cao (Up – u) trong hệ quy chiếu quốc tế ITRF. Để nhận được chuỗi thời gian tọa độ GNSS của trạm CORS từ dữ liệu đo định dạng T02, nghiên cứu đã thực hiện qua các bước: (1) Tiền xử lý dữ liệu; (2) xử lý định vị điểm chính xác PPP; và cuối cùng, từ chuỗi thời gian tọa độ u, thực hiện (3) phân tích tính toán để xác định tốc độ lún của trạm CORS trong suốt thời gian đo từ 2019 – 2024.

3.1. Tiền xử lý dữ liệu

Dữ liệu thô thu nhận của 13 trạm CORS của mạng lưới TAST được hệ thống máy thu lưu trữ dưới định dạng mã hóa T02 của Trimble. Để tương thích với các công cụ xử lý khoa học chuyên dụng, toàn bộ tập dữ liệu thô này cần được chuyển đổi sang định dạng RINEX (Receiver Independent Exchange Format). RINEX là định dạng văn bản ASCII tiêu chuẩn toàn cầu chung, chuẩn hóa trị đo từ các dòng máy thu GNSS khác nhau. Định dạng dữ liệu RINEX gồm tệp dữ liệu quan trắc (định dạng tệp *.o) chứa các trị đo mã, pha sóng mang, tỷ số tín hiệu trên nhiễu, và tệp dữ liệu dẫn đường (định dạng tệp *.n) chứa thông tin quỹ đạo vệ tinh [13].

Quá trình chuyển đổi được thực hiện bằng phần mềm Convert to RINEX của Trimble. Sau đó dữ liệu quan trắc được đóng gói thành các file nén theo yêu cầu định dạng của dịch vụ xử lý PPP trực tuyến.

3.2. Xử lý định vị điểm chính xác PPP

Các tệp dữ liệu quan trắc định dạng RINEX được xử lý bằng kỹ thuật định vị điểm chính xác PPP thông qua dịch vụ trực tuyến CSRS-PPP do Bộ Tài nguyên thiên nhiên Canada (NRCan) vận hành trên trang web https://webapp.csrs-scrs.nrcan-rncan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php. Dịch vụ CSRS-PPP có nhiều ưu điểm như khả năng xử lý nhanh chóng, hỗ trợ đa hệ thống vệ tinh và cung cấp giải pháp tọa độ có độ chính xác đạt mức milimet đến centimet [10, 14].

Quá trình xử lý PPP của CSRS-PPP [14] sử dụng các sản phẩm quỹ đạo và đồng hồ vệ tinh chính xác cao (Precise Ephemeris/Clocks) được cung cấp bởi Dịch vụ GNSS Quốc tế IGS (International GNSS Service). Thuật toán áp dụng tổ hợp phi tầng điện ly trên dữ liệu mã và pha sóng mang tần số kép để loại bỏ trễ tầng điện ly bậc một, đồng thời mô hình hóa và ước tính trễ tầng đối lưu thiên đỉnh ZTD (Zenith Tropospheric Delay). Các hiệu ứng dịch chuyển địa vật lý khác như thủy triều rắn của Trái đất và tải trọng đại dương cũng được tính toán và loại trừ. Kết quả xử lý nhận được là các tệp kết quả, trong đó có tập báo cáo định dạng *.sum cung cấp tọa độ địa tâm XYZ trong hệ quy chiếu ITRF2014 cùng với ma trận hiệp phương sai tương ứng cho từng ngày đo.

Từ kết quả xử lý PPP, tiến hành trích xuất tọa độ địa tâm XYZ cùng ma trận hiệp phương sai theo từng ngày của mỗi trạm CORS.

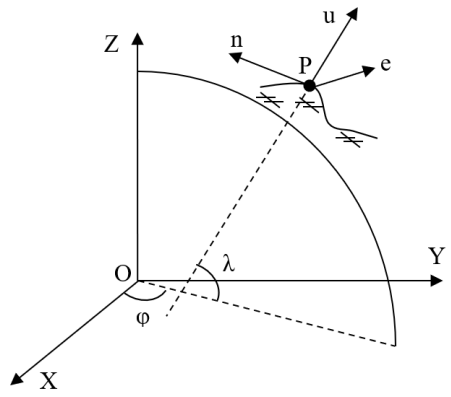
3.3. Phân tích chuỗi thời gian GNSS

a. Chuyển đổi hệ tọa độ

Để phân tích cụ thể biến dạng bề mặt theo chiều thẳng đứng (sụt lún) và phương ngang, các thành phần tọa độ địa tâm (X, Y, Z) được chuyển đổi sang hệ tọa độ địa diện (n, e, u). Trong hệ tọa độ địa diện, các thành phần tọa độ được tách thành mặt bằng (n, e) và độ cao (u) riêng rẽ, cho phép tách riêng thành phần độ cao u để xác định độ lún (Hình 2).

Chuyển đổi tọa độ được thực hiện bằng cách nhân ma trận xoay với vector độ lệch tọa độ so với tọa độ tham chiếu ban đầu [15]:

$$\begin{bmatrix} n \\ e \\ u \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} \tag{1}$$



Hình 2. Hệ tọa độ địa tâm XYZ và hệ tọa độ địa diện neu

Ma trận phương sai của các thành phần tọa độ được tính chuyển như sau:

$$C_{enu} = RC_{xyz}R^T \tag{2}$$

trong đó ma trận xoay R là

$$R = \begin{bmatrix} -\sin\lambda_0 & \cos\lambda_0 & 0 \\ -\sin\varphi_0\cos\lambda_0 & \sin\varphi_0\sin\lambda_0 & \cos\varphi_0 \\ \cos\varphi_0\cos\lambda_0 & \cos\varphi_0\sin\lambda_0 & \sin\varphi_0 \end{bmatrix} \tag{3}$$

và $\begin{bmatrix} X_0 & Y_0 & Z_0 \end{bmatrix}^T$, (φ_0, λ_0) là tọa độ vuông góc không gian địa tâm và tọa độ địa lý trung bình trong suốt thời gian đo của trạm CORS.

Toàn bộ chuỗi thời gian tọa độ (X, Y, Z) và sai số tương ứng được tính chuyển sang tọa độ (n, e, u) theo từng trạm. Để phân tích độ lún của từng trạm CORS, chỉ thành phần tọa độ u được sử dụng.

b. Mô hình toán học

Chuỗi thời gian tọa độ GNSS (đặc biệt là thành phần độ cao – u) thu nhận được từ mạng lưới trạm CORS không chỉ phản ánh xu hướng sụt lún dài hạn mà còn là sự tổng hợp của nhiều hiệu ứng vật lý khác nhau. Các hiệu ứng này bao gồm biến dạng đàn hồi của vỏ Trái đất do sự thay đổi tải trọng môi trường (như tải trọng thủy văn, áp suất khí quyển), các bước nhảy đột ngột do thay đổi thiết bị hoặc hoạt động kiến tạo, cùng với các nhiễu động ngẫu nhiên.

Để định lượng chính xác tốc độ lún bề mặt, mô hình toán học tổng quát phân tích chuỗi thời gian được sử dụng cần phải bóc tách các thành phần này. Đối với tọa độ $y(t_i)$ tại thời điểm t_i (tính bằng năm), mô hình hồi quy phi tuyến tính được biểu diễn qua phương trình sau [9]:

$$\begin{aligned} y(t_i) = {} & a + bt_i + c\sin(2\pi t_i) + d\cos(2\pi t_i) \\ & + e\sin(4\pi t_i) + f\cos(4\pi t_i) + \sum_{j=1}^{n_g} g_j H(t_i - T_{gj}) + v_i \end{aligned} \tag{4}$$

trong đó các tham số và thành phần cấu trúc của phương trình (4) như sau:

- Thành phần xu hướng tuyến tính: a là hằng số biểu thị vị trí ban đầu của trạm quan trắc, b là vận tốc dịch chuyển tuyến tính dài hạn.

Đối với thành phần độ cao u, tham số b là tốc độ lún (hoặc trồi) trung bình của bề mặt đất.

- Thành phần dao động chu kỳ: c, d là các hệ số tương ứng với dao động chu kỳ năm. Biên độ của chu kỳ năm được tính bằng $\sqrt{c^2 + d^2}$, e, f là các hệ số tương ứng với dao động chu kỳ nửa năm. Biên độ của chu kỳ nửa năm được tính bằng $\sqrt{e^2 + f^2}$.

Sự dao động tuần hoàn của bề mặt Trái đất chủ yếu bởi chu trình thủy văn theo mùa (đặc trưng của vùng ĐBSCL với hai mùa mưa – khô rõ rệt), dẫn đến sự biến đổi tải trọng nước mặt và nước ngầm.

- Thành phần bước nhảy: n_g là tổng số lượng bước nhảy xuất hiện trong toàn bộ chuỗi quan trắc của trạm, g_j là biên độ dịch chuyển của bước nhảy thứ j, T_{gj} là thời điểm xảy ra bước nhảy thứ j, $H(t_i - T_{gj})$ là hàm bước nhảy Heaviside, $H(t_i - T_{gj}) = 0$ nếu $t_i \leq T_{gj}$ và $H(t_i - T_{gj}) = 0$ nếu $t_i > T_{gj}$.

Chuỗi thời gian GNSS thường xuất hiện các bước nhảy do việc thay thế antenna, cập nhật phần mềm máy thu hoặc ảnh hưởng từ các trận động đất [11].

c. Xác định các độ lún mặt đất

Mỗi giá trị độ cao u_i tại thời điểm t_i bất kỳ sẽ lập được một phương trình dạng (4). Từ đó lập được hệ phương trình tuyến tính tổng quát dưới dạng ma trận:

$$L = AX + V \tag{5}$$

trong đó L là vector số hạng tự do, cỡ $n \times 1$, chứa các giá trị tọa độ thành phần u sau khi đã trừ đi tọa độ điểm gốc tham chiếu, X là vector tham số chưa biết, cỡ $m \times 1$:

$$X = [a, b, c, d, e, f, g_1, \ldots, g_{n_g}]^T$$

A là ma trận hệ số, cỡ $n \times m$, được xây dựng từ các hệ số tương ứng của phương trình. Hàng thứ i của ma trận A chứa các hệ số của phương trình tại thời điểm t_i:

$$\begin{aligned} A_i = [&1, t_i, \sin(2\pi t_i), \cos(2\pi t_i), \sin(4\pi t_i), \\ &\cos(4\pi t_i), H(t_i - T_{g1}), \ldots, H(t_i - T_{gn_g})] \end{aligned}$$

V là vector sai số kích thước $(n \times 1)$.

Hệ phương trình (5) được giải theo phương pháp bình phương tối thiểu có trọng số. Ma trận trọng số P được xây dựng dựa trên nghịch đảo phương sai của từng trị đo u_i. Việc gán trọng số này đảm bảo rằng các trị đo GNSS có độ chính xác cao sẽ đóng góp tỷ trọng lớn hơn vào kết quả cuối cùng.

Vector tham số X được xác định thông qua phương trình chuẩn:

$$X = (A^T PA)^{-1} A^T PL \tag{6}$$

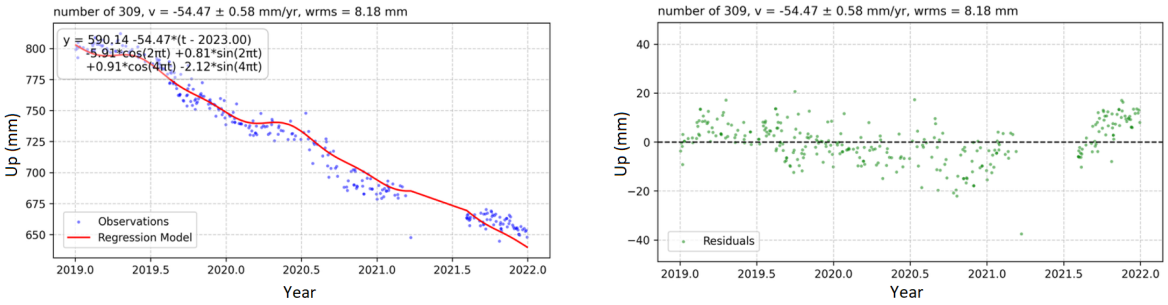
Vận tốc lún dài hạn của mặt đất được trích xuất trực tiếp là giá trị b của vector X.

4. Kết quả và thảo luận

Toàn bộ quá trình xử lý dữ liệu GNSS trong giai đoạn từ năm 2019 – 2024 của 13 trạm CORS khu vực ĐBSCL được thực hiện tự động bằng các chương trình lập trình bằng ngôn ngữ Python. Từ kết quả giải hệ phương trình (6), tốc độ lún và các tham số mô tả thành phần dao động chu kỳ được trích xuất và trình bày trong Bảng 2.

Bảng 2. Tốc độ lún và các chuyển động chu kỳ

Tên trạm	Tốc độ lún (mm/năm)	Biên độ chu kỳ năm (mm)	Biên độ chu kỳ nửa năm (mm)
BTRE	−6,213 ± 0,529	2,186 ± 0,602	3,274 ± 0,318
CABE	−8,764 ± 0,680	5,597 ± 0,778	1,965 ± 0,484
CLAH	+1,743 ± 0,777	5,927 ± 0,796	2,244 ± 0,660
CMAU	−13,948 ± 0,516	4,069 ± 1,846	0,528 ± 1,045
CTHO	−54,472 ± 0,584	5,960 ± 0,766	2,307 ± 0,696
DHAI	−0,652 ± 0,813	4,815 ± 0,620	2,105 ± 0,370
GOCO	−8,354 ± 0,382	8,550 ± 0,987	1,191 ± 0,443
KESA	−10,195 ± 0,914	6,146 ± 0,808	1,139 ± 0,419
NGHI	−25,845 ± 2,230	3,675 ± 0,755	1,995 ± 0,486
RGIA	−7,501 ± 0,837	7,540 ± 0,837	1,656 ± 0,406
STR2	−29,654 ± 0,967	8,848 ± 2,915	2,807 ± 1,119
TXVC	−49,125 ± 1,468	3,067 ± 1,987	3,966 ± 0,444
UMIN	−9,882 ± 1,391	5,975 ± 0,820	2,012 ± 0,544



(a) Chuỗi thời gian tọa độ (Observations) và mô hình xác định được (Regression Model)

(b) Chuỗi thời gian phần dư (Residuals)

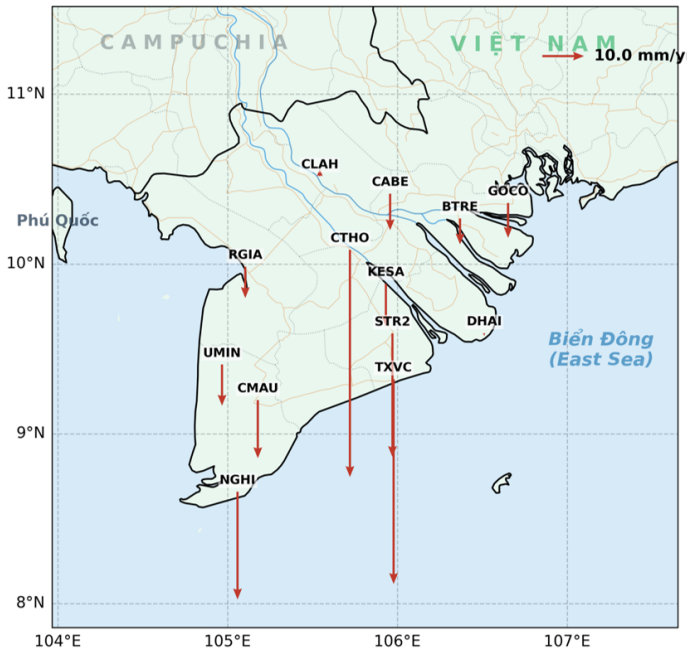
Hình 3. Xử lý chuỗi thời gian tọa độ *u* của trạm CTHO

Hình 3 minh họa kết quả phân tích chuỗi thời gian tọa độ *u* của điểm CTHO (trong đó thiếu dữ liệu trong hai năm 2023 và 2024 do trạm đo này dừng hoạt động), một điển hình của 13 chuỗi thời gian tọa độ của toàn bộ các điểm trong nghiên cứu.

Hình 3(a) biểu diễn chuỗi thời gian tọa độ đo GNSS (màu xanh dương), đường mô hình xác định được (màu đỏ) với các tham số của mô hình (bên trên trái). Đường mô hình màu đỏ không chỉ bám sát xu hướng sụt lún tuyến tính cực đoan với vận tốc 54,472 ± 0,584 mm/năm, mà còn mô phỏng chuyển dịch chu kỳ theo hàm lượng giác sin và cosin.

Sự phù hợp của mô hình toán học được kiểm chứng rõ nét qua đồ thị chuỗi thời gian phần dư ở Hình 3(b). Các điểm phần dư màu xanh lá cây (phần sai số còn lại sau khi lấy trị đo trừ đi giá trị dự báo từ mô hình màu đỏ) phân bố dao động ngẫu nhiên và tương đối đối xứng quanh trục. Sự triệt tiêu các tín hiệu có tính quy luật trong chuỗi phần dư chứng tỏ hàm hồi quy đã xác định chính xác xu hướng lún dài hạn lẫn các chuyển động chu kỳ.

Các giá trị vận tốc lún được trích xuất đã cung cấp một bức tranh toàn cảnh về thực trạng lún bề mặt tại ĐBSCL. Chi tiết hướng và độ lớn của độ lún được biểu diễn trên bản đồ Hình 4.



Hình 4. Bản đồ vector độ lún

Ngoại trừ khu vực Cao Lãnh (trạm CLAH) nằm ở thượng châu thổ ghi nhận trạng thái nâng nhẹ với vận tốc +1,743 ± 0,777 mm/năm và dải ven biển Đông Hải (trạm DHAI) duy trì tính ổn định cao ở mức −0,652 ± 0,813 mm/năm, toàn bộ 11 trạm còn lại đều ghi nhận sự sụt lún liên tục. Các vector hướng xuống trên bản đồ chỉ ra rằng tốc độ lún cực đại là tại trung tâm thành phố Cần Thơ (trạm CTHO) với mức lớn −54,472 ± 0,584 mm/năm. Tốc độ lún cao cũng được ghi nhận dọc theo dải duyên hải, điển hình là thị xã Vĩnh Châu (trạm TXVC) ở mức −49,125 ± 1,468 mm/năm, trung tâm Sóc Trăng (trạm STR2) ở mức −29,654 ± 0,967 mm/năm và khu vực Mũi Cà Mau (trạm NGHI) ở mức −25,845 ± 2,230 mm/năm.

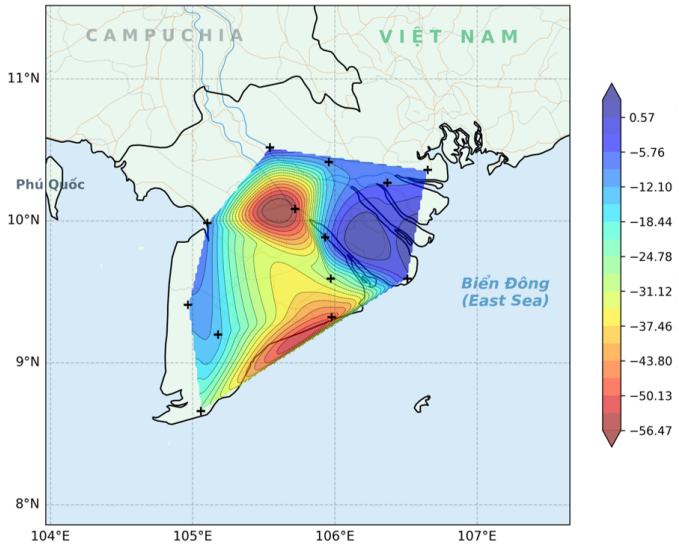
Bên cạnh đó, dao động chu kỳ theo mùa của bề mặt đất cũng được xác định (cột 3 và 4 ở Bảng 2). Biên độ dao động chu kỳ mùa (1 năm) thể hiện sự phân hóa rõ rệt, thấp nhất tại khu vực Bến Tre (trạm BTRE đạt 2,186 mm) và lên mức cực đại tại Sóc Trăng (trạm STR2 đạt 8,848 mm) cùng Gò Công (trạm GOCO đạt 8,550 mm). Việc bóc tách thành phần dao động chu kỳ đảm bảo tham số tốc độ lún được tính toán chính xác cao, cỡ milimet.

Dựa trên dữ liệu tốc độ lún của 13 trạm CORS, bề mặt biến dạng liên tục của toàn vùng đã được nội suy không gian theo phương pháp spline, kết hợp với hệ thống đường đồng mức gradient thể hiện trên Hình 5, nổi bật hai tâm lún của khu vực:

- Tâm lục địa: Tập trung bao trùm khu vực Cần Thơ (CTHO). Bản đồ nội suy cho thấy từ tâm sụt lún này, tốc độ hạ thấp bề mặt phát triển theo dạng chảo lún cục bộ, với gradient giảm dần ra các vùng ngoại vi lân cận.

- Tâm dải ven biển: Kéo dài từ hạ lưu sông Hậu tại Sóc Trăng (bao trùm vùng ảnh hưởng của trạm STR2 và TXVC) đi men theo bờ Biển Đông xuống dải ven biển cực Nam (trạm NGHI).

Nghiên cứu còn hạn chế ở việc mạng lưới CORS có độ phân giải không gian thưa (13 điểm), mô hình nội suy ở các vùng rìa thiếu trạm kiểm soát.



Hình 5. Bản đồ nội suy độ lún

6. Kết luận

Nghiên cứu đã thực hiện xử lý dữ liệu GNSS trong giai đoạn 2019–2024 của 13 trạm CORS phân bố trên khu vực ĐBSCL, bắt đầu từ việc chuyển đổi sang định dạng RINEX của dữ liệu vệ tinh thô (định dạng T02), áp dụng giải pháp Định vị điểm chính xác (PPP) để trích xuất tọa độ không gian 3D, sau đó chuyển đổi sang hệ tọa độ địa phương (n, e, u) để tách thành phần thẳng đứng (u) và áp dụng mô hình toán học tổng hợp để xác định tốc độ lún, từ đó đánh giá phân bố không gian của hiện tượng sụt lún bề mặt tại ĐBSCL giai đoạn 2019–2024. Mô hình toán học đã bóc tách hiệu quả các bước nhảy và chuyển động chu kỳ theo mùa, cho phép trích xuất vận tốc lún với độ chính xác cao.

Kết quả nghiên cứu cho thấy phần lớn ĐBSCL đang lún với tốc độ lớn. Phân bố không gian của độ lún đã chỉ ra hai tâm lún: tâm lục địa bao trùm trung tâm Cần Thơ với tốc độ lún cực đại đạt $-54{,}472 \pm 0{,}584$ mm/năm và đới duyên hải ven biển kéo dài từ Sóc Trăng đến cực nam Cà Mau với tốc độ lún từ $-25{,}845$ mm/năm đến $-49{,}125$ mm/năm.

Những kết quả định lượng từ mạng lưới GNSS CORS này đóng vai trò cảnh báo cấp thiết về tốc độ lún tại khu vực. Để giám sát và quản lý rủi ro trên quy mô toàn vùng một cách toàn diện, các nghiên cứu cần hướng đến việc tích hợp dữ liệu GNSS với công nghệ InSAR nhằm xây dựng bản đồ sụt lún liên tục với độ phân giải siêu cao, làm cơ sở vững chắc cho công tác quy hoạch không gian và thích ứng biến đổi khí hậu tại ĐBSCL.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được thực hiện trong khuôn khổ đề tài NCKH sinh viên năm 2026 của Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, mã số CĐ-2026-10.

Nhóm tác giả xin trân trọng cảm ơn Công ty Cổ phần Thiết bị Khoa học và Công nghệ Tường Anh (Tuong Anh Science and Technology Equipment Joint Stock Company – TAST) đã cung cấp bộ dữ liệu quan trắc GNSS liên tục của 13 trạm CORS.

Tuyên bố về việc sử dụng trí tuệ nhân tạo tạo sinh và các công nghệ hỗ trợ bởi AI

Trong quá trình chuẩn bị bản thảo, các tác giả đã sử dụng Gemini để cải thiện khả năng diễn đạt, kiểm tra lỗi chính tả của bản thảo. Các tác giả đã kiểm tra và chỉnh sửa nội dung và chịu hoàn toàn trách nhiệm về tính chính xác, tính nguyên bản và tính toàn vẹn của bài báo.

Tài liệu tham khảo

[1] Anthony, E. J., Brunier, G., Besset, M., Goichot, M., Dussouillez, P., Nguyen, V. L. (2015). Linking rapid erosion of the Mekong River delta to human activities. *Scientific Reports*, 5(1):14745.

[2] Luu, T. T., Minderhoud, P. S. J., Ha, Q. K., Narain, V., Vo, T. M. H., De Ruijter, A., Posma, J., Huizer, T., Teatini, P., Nguyen, H. Q. (2026). Groundwater governance reforms to address land subsidence and saline intrusion in the Vietnamese Mekong Delta. *International Journal of Water Governance*, 13.

[3] Minderhoud, P. S. J., Erkens, G., Pham, V. H., Bui, V. T., Erban, L., Kooi, H., Stouthamer, E. (2017). Impacts of 25 years of groundwater extraction on subsidence in the Mekong delta, Vietnam. *Environmental Research Letters*, 12(6):064006.

[4] Trần, V. A., Hà, T. K., Khúc, T. Đ., Lê, T. N., Trần, H. H., Doãn, H. P. (2024). Nghiên cứu khả năng của mô hình học máy GB và SVR trong thành lập bản đồ nguy cơ lún đất khu vực bán đảo Cà Mau, Việt Nam. *Tạp chí Khí tượng Thủy văn*, 1(757):60–73.

[5] Nguyen, L. N., Trinh, V. D. (2025). Determining the displacement velocity of some continuously operating reference stations (CORS) in Vietnam in the period 2019 ÷ 2024 using the Precise Point Positioning method. *Journal of Mining and Earth Sciences*, 66(5):89–97.

[6] Sơn, N. T., Thu, V. T. H., Ngọc, T. Á., Huế, N. H. (2025). Mối liên hệ giữa mức độ khai thác nước ngầm và hiện tượng sụt lún đất tại khu vực Kiên Giang: Minh chứng định lượng từ dữ liệu quan trắc. *Tạp chí Khoa học Biến đổi khí hậu*, (36):60–67.

[7] Nguyễn, T. L., Võ, Q. T. (2022). Đánh giá khả năng ứng dụng ảnh viễn thám radar trong giám sát sụt lún mặt đất tại thành phố Cần Thơ từ năm 2015 đến năm 2020. *Tạp chí Khoa học Đại học Cần Thơ*, 58(3): 80–94.

[8] Tran, A. V., Brovelli, M. A., Ha, K. T., Khuc, D. T., Tran, D. N., Tran, H. H., Le, N. T. (2024). Land subsidence susceptibility mapping in Ca Mau Province, Vietnam, using boosting models. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 13(5):161.

[9] Tran, D. T., Nguyen, Q. L., Nguyen, D. H. (2021). General geometric model of GNSS position time series for crustal deformation studies – A case study of CORS stations in Vietnam. *Inżynieria Mineralna*, 1(2): 183–198.

[10] Tran Dinh, T., Nguyen, D. H., Vu, N. Q., Nguyen, Q. L. (2023). Crustal displacement in Vietnam using CORS data during 2018 – 2021. *Earth Sciences Research Journal*, 27(1):27–36.

[11] Trọng, T. Đ., Huy, N. Đ. (2023). Nghiên cứu xác định thời gian tắt dần sau động đất trong chuỗi tọa độ GNSS liên tục. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (TCKHCNXD) - ĐHXDHN*, 17(3V):35–46.

[12] Lau, N. N., Vu, T. D. (2024). Determining the tectonic velocity of some continuously operating reference stations (CORS) in Vietnam 2019–2022 using precise point positioning method. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1349(1):012001.

[13] Gurtner, W., Estey, L. (2009). *RINEX Version 3.01*.

[14] Song, F., Shi, S., Chen, Y., Yang, T. (2015). PPP technique evaluation based its all estimates utilizing CSRS-PPP online service. *IET International Radar Conference 2015*, Hangzhou, China, Institution of Engineering and Technology, 5 .–5 .

[15] Tran, D. T., Nocquet, J.-M., Luong, N. D., Nguyen, D. H. (2023). Determination of Helmert transformation parameters for continuous GNSS networks: A case study of the Géoazur GNSS network. *Geo-spatial Information Science*, 26(1):125–138.