

# NGHIÊN CỨU XÁC ĐỊNH THỜI GIAN TẮT DẦN SAU ĐỘNG ĐẤT TRONG CHUỖI TỌA ĐỘ GNSS LIÊN TỤC

Trần Đình Trọng<sup>a,\*</sup>, Nguyễn Đình Huy<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Khoa Cầu Đường, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội,  
55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam*

*Nhận ngày 12/12/2022, Sửa xong 22/02/2023, Chấp nhận đăng 27/02/2023*

## Tóm tắt

Quan trắc dịch chuyển bề mặt Trái đất bằng lưới các điểm đo GNSS liên tục là phương pháp phổ biến trên thế giới, cho phép xác định chính xác các tham số dịch chuyển của bề mặt đất như tốc độ dịch chuyển, bước nhảy do động đất, dịch chuyển hậu động đất. Để xác định chính xác dịch chuyển hậu động đất, cần có mô hình mô tả được hiện tượng này và cần biết được thời gian tắt dần hậu động đất. Trong bài báo này, chúng tôi đề xuất phương pháp xác định thời gian tắt dần sau động đất từ mô hình chuyển động tổng hợp của chuỗi tọa độ GNSS liên tục, từ đó cho phép xác định chính xác nhất các dịch chuyển của bề mặt đất ghi nhận được trong chuỗi tọa độ GNSS liên tục như vận tốc dịch chuyển, dịch chuyển theo mùa, bước nhảy, dịch chuyển sau động đất. Phương pháp được đã được chúng tôi tính toán kiểm tra trên số liệu thiết kế và số liệu thực tế chuỗi tọa độ GNSS liên tục. Kết quả cho thấy, với số liệu thiết kế, các tham số dịch chuyển cho trước được xác định gần như đúng hoàn toàn, còn với số liệu thực tế thì các tham số dịch chuyển được xác định với độ chính xác cao và tương đương khi so sánh với các nghiên cứu tương tự.

*Từ khóa:* chuỗi tọa độ GNSS liên tục; dịch chuyển bề mặt Trái đất bằng GNSS; dịch chuyển sau động đất; thời gian tắt dần sau động đất; mô hình dịch chuyển.

STUDY FOR DETERMINATION OF POST-SEISMIC RELAXATION TIME IN GNSS POSITION TIME SERIES

## Abstract

Monitoring the Earth's surface deformation using a continuous GNSS network is widely used throughout the world, allowing for the accurate determination of displacement velocity, seismic step, and post-seismic displacement. To determine the post-seismic displacement accurately, a synthetic model that describes this phenomenon, as well as the post-seismic relaxation time, is required. In this paper, we propose a method for determining the post-seismic relaxation time on the synthetic model of GNSS position time series, thereby allowing for the most accurate determination of the recorded motions of the Earth's surface. Our method was calculated and tested using both model data and actual data of GNSS position time series. The results of the study show that for model data, the design displacement parameters are almost correctly determined, whereas for the actual data, the displacement parameters are determined with high accuracy and are comparable to similar studies.

*Keywords:* GNSS time series; crustal Earth displacement monitoring by GNSS; post-seismic deformation; post-seismic relaxation time; synthetic model of GNSS time series.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce2023-17\(3V\)-03](https://doi.org/10.31814/stce.huce2023-17(3V)-03) © 2023 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

## 1. Giới thiệu

Chuỗi tọa độ GNSS liên tục của điểm quan trắc dịch chuyển bề mặt Trái đất là các tọa độ theo thời gian của một trạm đo GNSS trong hệ tọa độ không gian ba chiều, thể hiện sự biến đổi theo thời gian của tọa độ điểm đo GNSS liên tục. Các điểm đo GNSS liên tục này được xây dựng cố định trên bề mặt đất, do đó nó cũng bị ảnh hưởng bởi sự thay đổi của bề mặt đất như sự dịch chuyển, sự dao động

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

chu kỳ do thay đổi mực nước ngầm, địa triều, thời tiết,... và bởi các hoạt động địa kiến tạo như động đất, di chuyển theo hướng chuyển dịch của mảng kiến tạo. Với độ chính xác cao về không gian và sự liên tục theo thời gian, những sự ảnh hưởng đó được ghi nhận rõ rệt trong chuỗi tọa độ của điểm đo GNSS. Chuỗi tọa độ GNSS liên tục được ứng dụng rộng rãi và hiệu quả trong quan trắc dịch chuyển các mảng kiến tạo [1–3], biến dạng bề mặt Trái đất [4–6],... cho các nghiên cứu địa vật lý. Trong xử lý chuỗi tọa độ GNSS của điểm đo liên tục theo phương pháp trắc địa, mô hình chuyển động của chuỗi tọa độ được sử dụng là phương trình toán học biểu diễn theo các thành phần tọa độ 3 chiều [7]. Việc xác định mô hình chuyển động trong xử lý chuỗi tọa độ của các điểm GNSS là rất quan trọng nhằm xác định chính xác vận tốc chuyển dịch và các hiện tượng có trong chuỗi. Mô hình chuyển động của chuỗi càng đơn giản thì tính toán càng nhanh, nhưng độ chính xác xác định vận tốc dịch chuyển và các tham số chuyển dịch khác lại giảm đi, và không phản ánh rõ đặc trưng chuyển dịch của điểm, nhất là với các chuỗi tọa độ phức tạp. Do vậy, tùy theo các hiện tượng mà chuỗi tọa độ ghi nhận được mà chúng ta sử dụng các mô hình chuyển động khác nhau để đảm bảo hiệu năng tính toán nhanh và chính xác. Mô hình chuyển động tổng hợp gồm các chuyển dịch tuyến tính, dịch chuyển chu kỳ theo mùa, bước nhảy và biến dạng sau động đất được sử dụng trong các nghiên cứu [7–11] để xác định các hiện tượng phổ biến ghi nhận được trong chuỗi tọa độ hàng ngày của các trạm đo GNSS liên tục, từ đó xác định vận tốc dịch chuyển chính xác của các trạm đo này cho các nghiên cứu địa kiến tạo.

Biến dạng sau động đất (post-seismic deformation) là những dịch chuyển diễn ra chậm và kéo dài theo các hướng khác nhau sau động đất. Nguyên nhân là do cơ chế giải phóng ứng suất do dòng chảy nhớt trong phần mềm của vỏ Trái đất bắt đầu hoạt động ngay sau khi xảy ra động đất [12]. Các biến dạng này có thể diễn ra trong vài ngày, nhưng cũng có khi diễn ra tới 7 năm sau động đất [13] với sự thay đổi bề mặt Trái đất rất chậm không cảm nhận được, cũng không ghi nhận được bằng các thiết bị đo địa chấn. Trong các phương pháp xác định biến dạng sau động đất, chỉ có số liệu đo GNSS liên tục mới ghi nhận được các biến dạng này trong chuỗi. Thời gian diễn ra hiện tượng sau động đất được gọi là thời gian tắt dần sau động đất (decay time hoặc post-seismic relaxation time), thông thường được xác định dựa vào mô hình động đất [14], dựa vào quá trình vận động vật lý của động đất, hoặc bằng luật Omori [15, 16]. Việc xác định các tham số của biến dạng sau động đất nhằm giảm thiểu những rủi ro do bề mặt đất biến dạng, là các tham số quan trọng cho các mô hình địa vật lý dự báo động đất, và giúp cho chúng ta nghiên cứu kỹ hơn và hiểu biết tốt hơn về quy luật vận động kiến tạo mảng trên khu vực nghiên cứu.

Trong bài báo này, chúng tôi giới thiệu phương pháp xác định thời gian tắt dần sau động đất từ mô hình chuyển động tổng hợp của chuỗi tọa độ GNSS liên tục, tham số này cho phép xác định trị bình sai của các tọa độ trong chuỗi, từ đó tính được chính xác các tham số khác của chuỗi tọa độ như vận tốc, dịch theo mùa, bước nhảy, chuyển dịch sau động đất.

## 2. Phương pháp nghiên cứu

### 2.1. Mô hình chuyển dịch tuyến tính của chuỗi tọa độ GNSS

Chuỗi tọa độ GNSS liên tục là các tọa độ theo thời gian của một trạm đo GNSS trong tọa độ không gian 3 chiều địa tâm (X, Y, Z) hoặc trong hệ tọa độ vuông góc không gian 3 chiều địa diện (north - n, east - e, up - u) [17, 18]. Nói cách khác, chuỗi tọa độ GNSS thể hiện sự biến đổi theo thời gian của tọa độ điểm đo GNSS liên tục.

Các chuỗi tọa độ GNSS liên tục được thể hiện bằng đồ thị toán học, được dùng để phân tích, xác định các giá trị, các tham số,... trong chuỗi. Chuỗi tọa độ liên tục cho phép chúng ta hiểu được quá trình biến đổi vị trí của điểm đo và dự đoán được quá trình biến đổi của vị trí của nó trong tương lai. Mô hình chuyển động tổng hợp của chuỗi tọa độ theo từng thành phần tọa độ n, e, u gồm các chuyển dịch [7–11]: (1) dịch chuyển tuyến tính theo đường thẳng (trend line), (2) dịch chuyển chu kỳ theo

mùa (seasonal motion), (3) bước nhảy (step) và (4) dịch chuyển biến dạng sau động đất (post-seismic deformation) được mô tả lần lượt trong các dấu “[]” trong phương trình (1):

$$y(t_i) = [a + bt_i] + [c \sin(2\pi t_i) + d \cos(2\pi t_i) + e \sin(4\pi t_i) + f \cos(4\pi t_i)] + \left[ \sum_{j=1}^{n_g} g_j H(t_i - T_{gj}) \right] + \left[ \sum_{j=1}^{n_h} h_j H(t_i - T_{hj}) t_i \right] + \left[ \sum_{j=1}^{n_k} k_j e^{-\frac{t_i - T_{kj}}{\tau_j}} H(t_i - T_{kj}) \right] + v_i \quad (1)$$

trong đó:  $t$  là thời điểm của trị đo tọa độ  $y$ ;  $a$  là vị trí ban đầu tại thời điểm tham chiếu  $t_0$ ;  $b$  là vận tốc chuyển dịch;  $c, d$  và  $e, f$  là các tham số điều hòa của chuyển động chu kỳ theo mùa và theo nửa mùa,  $g_j$  là biên độ (độ lớn) bước nhảy tại thời điểm  $T_{gj}$ , ( $n_g$  là số bước nhảy trong chuỗi),  $H(t_i - T_{gj})$  là hàm Heaviside,  $H(t_i - T_{gj}) = 0$  nếu  $t_i \leq T_{gj}$  và  $H(t_i - T_{gj}) = 1$  nếu  $t_i > T_{gj}$ ,  $h_j$  là sự thay đổi vận tốc tại thời điểm  $T_{hj}$  ( $n_h$  là số lần vận tốc thay đổi),  $k_j$  là biên độ (độ lớn) chuyển dịch sau động đất tại thời điểm  $T_{kj}$  ( $n_k$  là số lần xảy ra chuyển dịch sau động đất);  $\tau_j$  thời gian kéo dài của chuyển động sau động đất;  $v_i$  là sai số.

Chuỗi tọa độ GNSS liên tục ghi nhận rất rõ nét bước nhảy do động đất [19] và sau đó thường là chuyển dịch sau động đất (post-seismic relaxation). Ngoài ra, sau động đất, tốc độ chuyển dịch của điểm đo có thể thay đổi cả về hướng và độ lớn. Bước nhảy động đất và chuyển dịch sau động đất phụ thuộc vào vị trí tâm chấn, cường độ động đất và khoảng cách từ tâm chấn tới trạm đo GNSS [7]. Trong phương trình (1), dịch chuyển sau động đất diễn ra sau bước nhảy động đất, được mô tả trong dấu “[]” cuối của phương trình, nó gồm sự thay đổi vận tốc (thay đổi cả hướng và giá trị vận tốc) và chuyển động sau động đất (được mô tả theo dạng hàm số mũ của số  $e$ ).

Như vậy, các tham số cần xác định của chuỗi tọa độ GNSS theo mô hình hình học tổng quát là  $a, b, c, d, e, f, g_j$  ( $j = 1 \div n_g$ ),  $h_j$  ( $j = 1 \div n_h$ ) và  $k_j$  ( $j = 1 \div n_k$ ) mô tả cho các dịch chuyển, các hiện tượng phổ biến ghi nhận được trong chuỗi. Tiếp theo, chúng tôi giới thiệu phương pháp xác định các tham số của chuỗi.

Với giả thiết là thời điểm  $T_{gj}$ , của bước nhảy, các thời điểm  $T_{hj}$ , của sự thay đổi vận tốc, thời điểm  $T_{kj}$ , của chuyển dịch sau động đất và thời gian tắt dần sau động đất (thời gian phân rã)  $\tau$  là đã biết. Với chuỗi tọa độ gồm  $n$  vị trí tương ứng với các thời điểm  $t_i$ , ta có hệ gồm  $n$  phương trình (1). Viết dưới dạng ma trận:

$$y = Ax + v \quad (2)$$

Công thức (2) gồm có ma trận vector ẩn  $x$  là các tham số mô tả chuyển dịch của chuỗi, ma trận hệ số  $A$  và ma trận vector số hiệu chỉnh  $v$ , được trình bày lần lượt theo các công thức từ (3) đến (5).

$$x = [a \quad b \quad c \quad d \quad e \quad f \quad g_1 \quad \dots \quad g_{n_g} \quad h_1 \quad \dots \quad g_{n_g} \quad h_1 \quad \dots \quad h_{n_h} \quad k_1 \quad \dots \quad k_{n_k}]^T \quad (3)$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \dots & 1 & \dots & 1 & \dots & 1 \\ t_1 & \dots & t_{ng} & \dots & t_{nh} & \dots & t_{nk} \\ \sin(2\pi t_1) & \dots & \sin(2\pi t_{ng}) & \dots & \sin(2\pi t_{nh}) & \dots & \sin(2\pi t_{nk}) \\ \cos(2\pi t_1) & \dots & \cos(2\pi t_{ng}) & \dots & \cos(2\pi t_{nh}) & \dots & \cos(2\pi t_{nk}) \\ \sin(4\pi t_1) & \dots & \sin(4\pi t_{ng}) & \dots & \sin(4\pi t_{nh}) & \dots & \sin(4\pi t_{nk}) \\ \cos(4\pi t_1) & \dots & \cos(4\pi t_{ng}) & \dots & \cos(4\pi t_{nh}) & \dots & \cos(4\pi t_{nk}) \\ 0 & \dots & 1 & \dots & t_{nh} & \dots & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & \dots & 1 & \dots & 1 \\ 0 & \dots & t_{ng} & \dots & t_{nh} & \dots & t_{nk} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & \dots & t_{nh} & \dots & t_{nk} \\ 0 & \dots & 1 & \dots & 1 & \dots & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & \dots & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix}^T \quad (4)$$

$$v = [v_1 \quad v_2 \quad \dots \quad v_n]^T \quad (5)$$

$$y = [y(t_1) \quad y(t_2) \quad \dots \quad y(t_n)]^T \quad (6)$$

Coi chuỗi chỉ bị ảnh hưởng của nhiễu trắng (white noise), ma trận phương sai – hiệp phương sai có dạng:

$$C = \text{diag}(\sigma_1^2 \quad \sigma_2^2 \quad \dots \quad \sigma_n^2) \quad (7)$$

trong đó  $\sigma_i$  là phương sai của tọa độ điểm.

Các tham số chuyển động của chuỗi được xác định theo phương pháp số bình phương nhỏ nhất:

$$x = (A^T C^{-1} A)^{-1} (A^T C^{-1} y) \quad (8)$$

Độ chính xác xác định các tham số của chuỗi được tính theo:

$$\sigma_{xi} = \mu \sqrt{\text{diag}(A^T C^{-1} A)} \quad (9)$$

trong đó  $\text{diag}$  là các phần tử trên đường chéo chính.

Độ chính xác xác định các tham số chuyển động của chuỗi được đặc trưng bởi sai số trung phương trọng số đơn vị :

$$\mu = \pm \sqrt{\frac{v^T C^{-1} v}{n - \dim(x)}} \quad (10)$$

trong đó  $\dim$  là chiều của vector.

Sau khi xác định được vector ẩn  $x$  chứa các tham số của mô hình tổng hợp của chuỗi, chuỗi tọa độ của điểm sau bình sai hay mô hình (predicted time series) được tính theo:

$$\hat{y} = Ax \quad (11)$$

Và số hiệu chỉnh của các tọa độ của chuỗi (residual time series) được tính theo:

$$v = -Ax + y \quad (12)$$

Chuỗi số hiệu chỉnh của tọa độ xác định theo công thức (12) thể hiện hai ý nghĩa, đó là nếu chuỗi số hiệu chỉnh xác định được sau bình sai càng gần đường “0” thì mô hình được xác định càng chính xác (các tham số chuyển động của chuỗi được xác định chính xác), và giá trị trung bình của chuỗi số hiệu chỉnh của tọa độ thể hiện độ chính xác của chuỗi tọa độ đo. Do vậy, khi xem xét đánh giá kết quả xử lý số liệu chuỗi GNSS liên tục, chuỗi số hiệu chỉnh của tọa độ được dùng để xem xét và tính các sai số của chuỗi tọa độ đo.

Biên độ  $A$  và pha  $\phi$  của chuyển động chu kỳ theo năm và nửa năm của chuỗi tọa độ điểm GNSS được tính từ các tham số  $c, d, e, d$  [20]:

$$A_{ann} = \sqrt{c^2 + d^2}; \quad \phi_{ann} = \frac{1}{2\pi} a \tan 2 \left( \frac{c}{d} \right) \quad (13)$$

$$A_{semi-ann} = \sqrt{e^2 + f^2}; \quad \phi_{semi-ann} = \frac{1}{4\pi} a \tan 2 \left( \frac{e}{f} \right) \quad (14)$$

## 2.2. Xác định thời gian của chuyển dịch sau động đất

Như đã nói ở phần Giới thiệu, thời gian tắt dần sau động đất thông thường được xác định dựa vào mô hình động đất [14], dựa vào quá trình vận động vật lý của động đất, hoặc bằng luật Omori [15, 16]. Các phương pháp xác định như vậy là phức tạp, hạn chế về độ chính xác do phụ thuộc vào các tham số của mô hình địa vật lý như thời điểm động đất, cường độ, tọa độ tâm chấn,... Từ đó, việc xác định vận tốc dịch chuyển của trạm đo GNSS liên tục và các tham số dịch chuyển khác không chính xác.

Ở đây, chúng tôi đề xuất phương pháp tính toán thời gian tắt dần sau động đất  $\tau$  trực tiếp từ chuỗi tọa độ điểm dựa vào phương trình của mô hình tổng hợp (1).  $\tau$  được tính lặp theo 2 bước như sau:

**Bước đầu tiên**, chọn giá trị khởi đầu  $\tau_0$ , chúng tôi chọn  $\tau_0 = 0,0027$  năm, tương đương với 01 ngày [8].

Giả thiết thời điểm các bước nhảy  $T_j$  đã biết. Thay  $\tau_0$  vào hệ các phương trình (1) và giải theo nguyên lý số bình phương nhỏ nhất, nhận được vector nghiệm:

$$x^0 = [a^0 \quad b^0 \quad c^0 \quad d^0 \quad e^0 \quad f^0 \quad g_1^0 \quad \dots \quad g_{ng}^0 \quad h_1^0 \quad \dots \quad h_{nh}^0 \quad k_1^0 \quad \dots \quad g_{nk}^0]^T \quad (15)$$

Khi đó, phân tích phương trình (1) thành 2 phần: một phần gồm bước nhảy do động đất, thay đổi vận tốc sau động đất và chuyển dịch sau động đất; một phần là các tham số còn lại. Hai phần này được phân biệt bởi dấu  $\{ \}$  trong phương trình (3).

$$y(t_i) = \{ a + bt_i + c \sin(2\pi t_i) + d \cos(2\pi t_i) + e \sin(4\pi t_i) + f \cos(4\pi t_i) + \sum_{j=1}^{n_g - n_k} g_j H(t_i - T_{gj}) \} \\ + \{ \sum_{j=1}^{n_k} [g_j H(t_i - T_{kj}) + h_j H(t_i - T_{kj}) t_i + k_j e^{-\frac{t_i - T_{kj}}{\tau_j}} H(t_i - T_{kj})] \} + v_i \quad (16)$$

Ở phương trình (16), coi các tham số  $g_j, h_j, k_j, \tau_j$  ( $j = 1 \div n_k$ ) là các ẩn số, tuyến tính hóa phương trình (16) bằng các đạo hàm riêng phần theo các ẩn số, chúng ta được:

$$y'(t_i) = \sum_{j=1}^{n_k} \left[ g_j^0 H(t_i - T_{kj}) \partial g_j + h_j^0 H(t_i - T_{kj}) t_i \partial h_j + k_j^0 e^{-\frac{t_i - T_{kj}}{\tau_j^0}} H(t_i - T_{kj}) \partial k_j \right. \\ \left. + k_j^0 \frac{t_i - T_{kj}}{(\tau_j^0)^2} e^{-\frac{t_i - T_{kj}}{\tau_j^0}} H(t_i - T_{kj}) \partial \tau_j^0 \right] \quad (17)$$

Với số hạng  $y'(t_i)$  được tính theo công thức:

$$y'(t_i) = y(t_i) - \left[ a^0 + b^0 t_i + c^0 \sin(2\pi t_i) + d^0 \cos(2\pi t_i) + e^0 \sin(4\pi t_i) + f^0 \cos(4\pi t_i) + \sum_{j=1}^{n_g} g_j^0 H(t_i - T_{gj}) + \sum_{j=1}^{n_h} h_j^0 H(t_i - T_{hj}) t_i + \sum_{j=1}^{n_k} k_j^0 e^{-\frac{t_i - T_{kj}}{\tau_j}} H(t_i - T_{kj}) \right] \quad (18)$$

Hệ các phương trình (17) được viết dưới dạng ma trận:

$$A\partial = y \quad (19)$$

trong đó vector ẩn số  $\partial$ , vector số hạng tự do  $y$ , ma trận hệ số  $A$  được thể hiện lần lượt theo các phương trình (20), (21) và (22):

$$\partial = [\partial g_1 \quad \dots \quad \partial g_{n_k} \quad \partial h_1 \quad \dots \quad \partial h_{n_k} \quad \partial k_1 \quad \dots \quad \partial k_{n_k} \quad \partial \tau_1 \quad \dots \quad \partial \tau_{n_k}]^T \quad (20)$$

$$y = [y'(t_1) \quad \dots \quad y'(t_n)]^T \quad (21)$$

$$A = \begin{bmatrix} g_1^0 & \dots & g_1^0 & \dots & g_1^0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & g_{n_k}^0 & \dots & g_{n_k}^0 \\ h_1^0 t_i & \dots & h_1^0 t_{i+j} & \dots & h_1^0 t_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & h_{n_k}^0 t_{i+j} & \dots & h_{n_k}^0 t_n \\ k_1^0 e^{-\frac{t_i - T_{k1}}{\tau_1^0}} & \dots & k_1^0 e^{-\frac{t_{i+j} - T_{k1}}{\tau_1^0}} & \dots & k_1^0 e^{-\frac{t_n - T_{k1}}{\tau_1^0}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & k_{n_k}^0 e^{-\frac{t_{i+j} - T_{kn_k}}{\tau_{n_k}^0}} & \dots & k_{n_k}^0 e^{-\frac{t_n - T_{kn_k}}{\tau_{n_k}^0}} \\ k_1^0 \frac{t_i - T_{k1}}{(\tau_1^0)^2} e^{-\frac{t_n - T_{k1}}{\tau_1^0}} & \dots & k_1^0 \frac{t_{i+j} - T_{k1}}{(\tau_1^0)^2} e^{-\frac{t_{i+j} - T_{kn_k}}{\tau_1^0}} & \dots & k_1^0 \frac{t_n - T_{k1}}{(\tau_1^0)^2} e^{-\frac{t_n - T_{kn_k}}{\tau_1^0}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & k_{n_k}^0 \frac{t_{i+j} - T_{kn_k}}{(\tau_{n_k}^0)^2} e^{-\frac{t_{i+j} - T_{kn_k}}{\tau_{n_k}^0}} & \dots & k_{n_k}^0 \frac{t_n - T_{kn_k}}{(\tau_{n_k}^0)^2} e^{-\frac{t_n - T_{kn_k}}{\tau_{n_k}^0}} \end{bmatrix} \quad (22)$$

Vector ẩn số  $\partial$  được xác định bằng cách giải hệ phương trình (19) theo nguyên lý số bình phương nhỏ nhất:

$$\partial = (A^T C^{-1} A)^{-1} (A^T C^{-1} y) \quad (23)$$

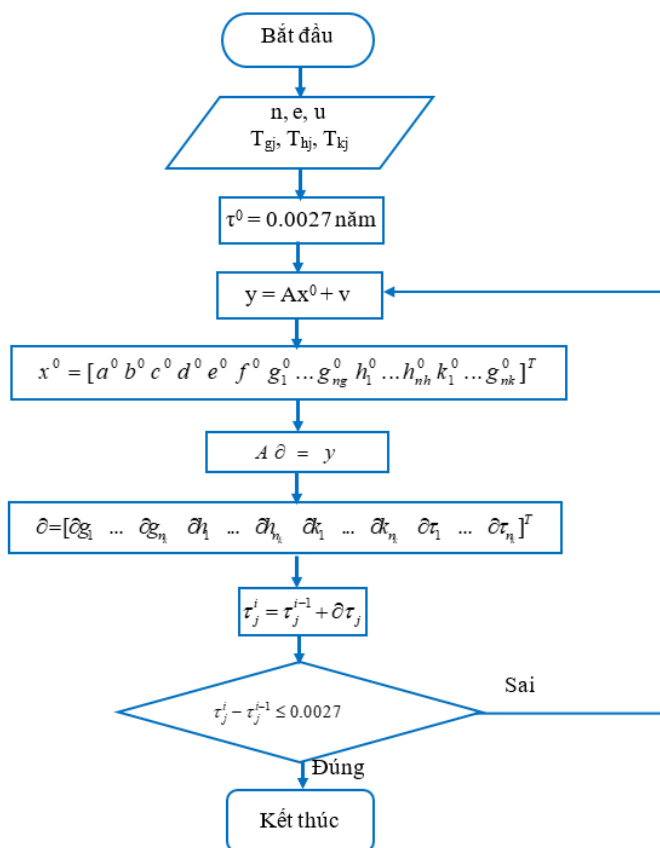
**Bước thứ 2**, thời gian tắt dần sau động đất  $\tau$  ở bước lặp tiếp theo  $i$  được tính:

$$\tau_j^i = \tau_j^{i-1} + \partial \tau_j \quad (24)$$

Cứ thực hiện tính lặp các bước như vậy cho tới khi sự khác nhau của  $\tau$  ở hai lần lặp liên kế nhỏ hơn một giới hạn, giới hạn có thể được chọn là 0,0027 năm là thời gian tương đương 1 ngày [8].

Quá trình tính toán thời gian tắt dần sau động đất được tóm tắt theo sơ đồ ở Hình 1.

Phương pháp tính toán thời gian tắt dần sau động đất đề xuất ở trên được chúng tôi lập trình thành một modul của chương trình Pygts bằng ngôn ngữ Python. Phương pháp này cho phép mô tả chính xác chuyển dịch sau động đất, nhanh chóng và không phụ thuộc các phương pháp mô hình địa vật lý, Omori.



Hình 1. Sơ đồ tính toán xác định thời gian tắt dần sau động đất từ chuỗi tọa độ

### 3. Số liệu, kết quả xử lý và thảo luận

#### 3.1. Số liệu thiết kế, kết quả xử lý và thảo luận

Đầu tiên, chương trình được kiểm tra với số liệu thiết kế là chuỗi tọa độ điểm GNSS của một điểm theo 3 thành phần tọa độ north (n), east (e) và up (u) liên tục hằng ngày từ 2020,0 đến 2022,0. Điểm GNSS này được đặt tên là EXAM. Chuỗi tọa độ thiết kế của điểm EXAM được tạo gồm các chuyển dịch: dịch chuyển tuyến tính theo đường thẳng, dịch chuyển chu kỳ theo mùa, bước nhảy do động đất tại thời điểm 2021,0 và dịch chuyển biến dạng sau động đất bằng các tham số cho trước. Các tham số cho trước của chuỗi được trình bày theo các hàng “Thiết kế” trong Bảng 1.

Sau đó, chuỗi tọa độ thiết kế này được làm nhiễu bằng sai số ngẫu nhiên  $\tau = 0,001$  m phân bố theo luật phân phối chuẩn để tạo thành chuỗi tọa độ đo ngẫu nhiên (chuỗi tọa độ “đo” của điểm EXAM được thể hiện trong Hình 2(a)).

Sử dụng chương trình Pygts để xử lý chuỗi tọa độ của điểm EXAM. Quá trình tính lặp xác định thời gian tắt dần sau động đất  $\tau$  cho chuỗi tọa độ của điểm EXAM là 4 lần tính lặp, thời gian xử lý chuỗi rất nhanh, chỉ cỡ giây. Các tham số của chuỗi nhận được từ kết quả tính toán, các tham số cho trước và độ lệch giữa chúng được trình bày theo các hàng “Tính toán” trong Bảng 1. Chuỗi số hiệu chỉnh của tọa độ sau bình sai được thể hiện ở Hình 2(b).

So sánh các tham số thiết kế và các tham số tính toán được trong Bảng 1 thấy rằng, sự sai lệch giữa chúng gần như bằng nhau, sự sai lệch là rất nhỏ cỡ phần nghìn (các hàng “Sai lệch” trong Bảng 1).

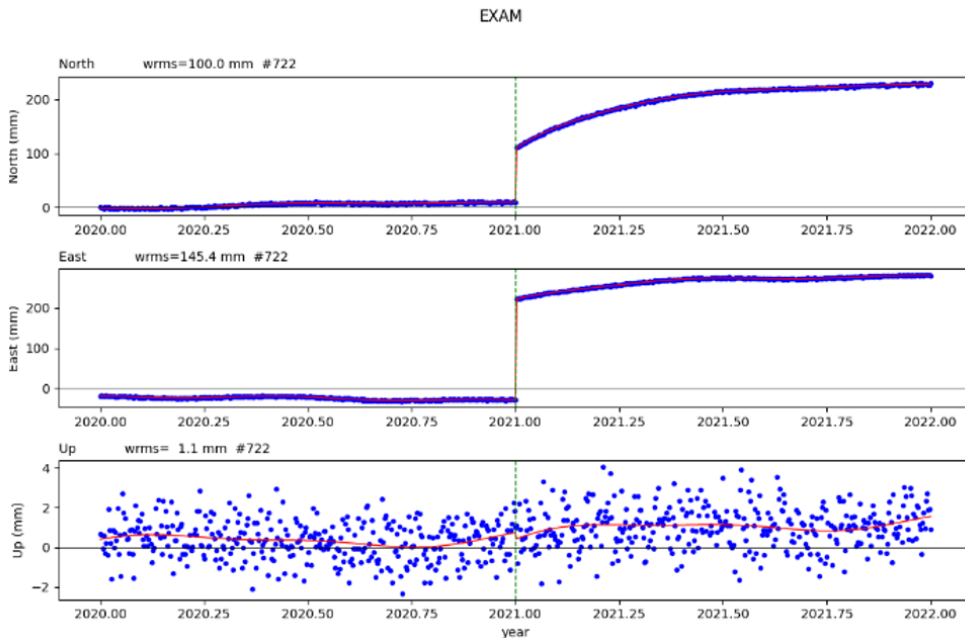
Hình 2(a), đường màu đỏ là giá trị bình sai của chuỗi tọa độ, các điểm màu xanh là tọa độ “đo” được thiết kế của điểm EXAM. Đường màu đỏ (đường mô hình sau bình sai) xác định được gần như

Bảng 1. So sánh các tham số thiết kế và các tham số tính toán được

Thành phần tọa độ	Tham số	Chuyển dịch theo mùa						Động đất			
		Vị trí ban đầu	Vận tốc	Chuyển dịch chu kỳ hàng năm		Chuyển dịch chu kỳ nửa năm		Bước nhảy do động đất 2021,0	Thay đổi vận tốc sau động đất	Biên độ sau động đất	Chuyển động sau động đất
		a	b	c	d	e	f	g	h	k	$\tau$
		(m)	(m/năm)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/năm)	(m)	(năm)
N	Thiết kế	0,0100	0,0100	-0,0010	0,0010	-0,0010	-0,0020	0,2000	0,0100	-0,1000	0,2000
	Tính toán	0,0103	0,0106	-0,0008	-0,0020	-0,0009	0,0011	0,1991	0,0104	-0,9930	0,2003
	Sai lệch	-0,0003	-0,0006	-0,0002	0,0030	-0,0001	-0,0031	0,0009	-0,0004	-0,0070	-0,0003
E	Thiết kế	-0,0300	-0,0100	-0,0020	0,0020	0,0010	-0,0010	0,3000	0,0200	-0,0500	0,2000
	Tính toán	-0,0301	-0,0103	0,0009	-0,0010	-0,0021	0,0020	0,2999	0,0205	-0,0493	0,2003
	Sai lệch	0,0001	0,0003	-0,0029	0,0030	0,0031	-0,0030	0,0001	-0,0005	-0,0007	-0,0003
U	Thiết kế	0,0004	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0004	0,0004	0,0004	0,0000
	Tính toán	0,0005	0,0003	0,0003	0,0001	0,0001	0,0001	0,0006	-0,0001	0,0009	0,0000
	Sai lệch	-0,0001	-0,0002	-0,0002	0,0000	0,0000	0,0000	-0,0002	0,0005	0,0005	0,0000

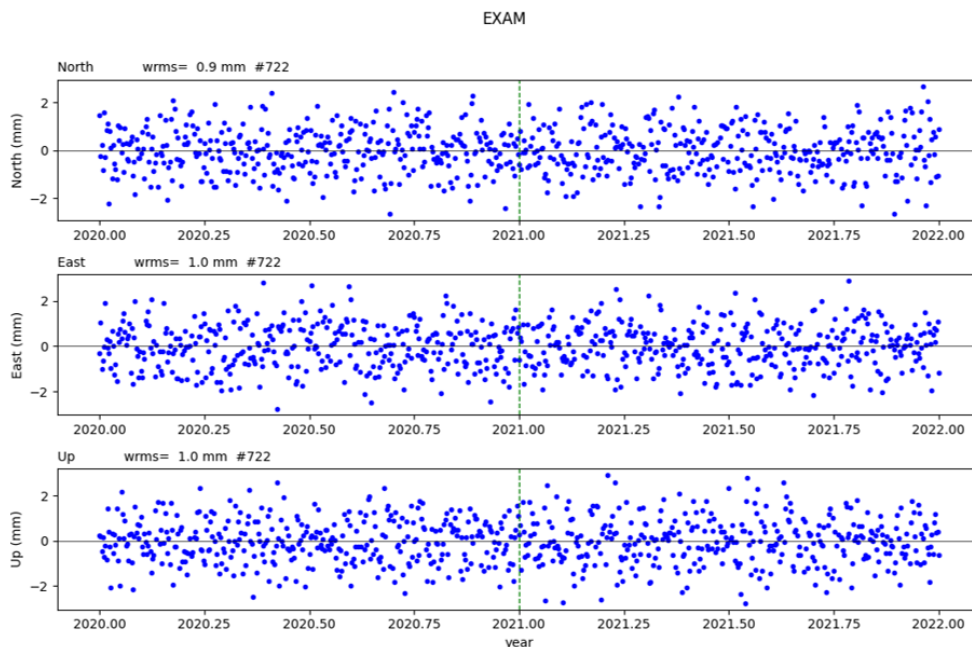
đúng hoàn toàn với mô hình số liệu cho trước, đường này đã mô tả chuyển dịch chu kỳ hình sin theo mùa; bước nhảy do động đất tại thời điểm 2021,0 và chuyển dịch sau động đất với thời gian tắt dần  $\tau = 0,2003$  năm ở thành phần tọa độ n và e,  $\tau = 0$  ở thành phần u; sự thay đổi vận tốc từ 0,0103 m/năm thành 0,0104 m/năm ở thành phần n, từ -0,0103 m/năm thành 0,0205 m/năm ở thành phần e và từ 0,0003 m/năm thành -0,0001 m/năm ở thành phần u. Các tham số chuyển dịch này bằng đúng các giá trị thiết kế cho trước, hoặc có độ lệch rất nhỏ (Bảng 1).

Hình 2(b) là chuỗi số hiệu chỉnh của tọa độ, tức là chuỗi tọa độ đo sau khi loại bỏ vận tốc, biến đổi theo mùa, bước nhảy và chuyển dịch sau động đất với sai số wrms (sai số trung phương) lần lượt là 0,9 mm, 1,0 mm, 1,0 mm tương ứng lần lượt ở các thành phần tọa độ n, e, u, bằng đúng hoặc lệch rất nhỏ với giá trị sai số được đưa vào mô hình số liệu.



(a) Chuỗi tọa độ đo và mô hình xác định được sau bình sai (nét liền đỏ)





(b) Chuỗi số hiệu chỉnh của tọa độ

Hình 2. Chuỗi tọa độ của điểm EXAM

Kết quả kiểm tra với số liệu thiết kế của chúng tôi, đã chứng tỏ mô hình chuyển dịch, phương pháp xác định thời gian tắt dần sau động đất, phương pháp xử lý chuỗi tọa độ GNSS là phù hợp và đảm bảo chính xác.

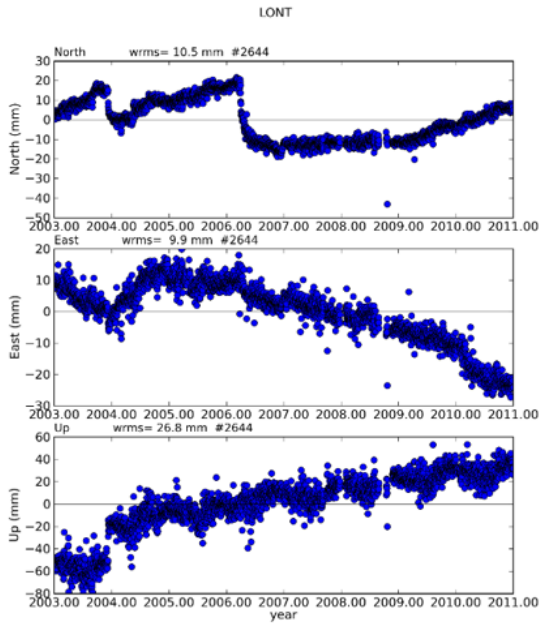
### 3.2. Số liệu thực tế, kết quả xử lý và thảo luận

Phương pháp xử lý số liệu chuỗi GNSS trên đã được chúng tôi áp dụng để xử lý nhiều số liệu chuỗi tọa độ GNSS liên tục của các lưới GNSS thực tế, trong đó có các mạng lưới GNSS phức tạp khác như GEONET (Nhật), RENAG (Pháp),... Chúng tôi thấy rằng hầu hết các chuỗi tọa độ đều được xử lý tốt, đặc biệt đối với các chuỗi tọa độ không có, hoặc chỉ có dị thường, bước nhảy. Dưới đây, chúng tôi giới thiệu một kết quả xử lý chuỗi GNSS của điểm đo LONT (mạng lưới GNSS Đài Loan), một chuỗi GNSS điển hình với các dịch chuyển phức tạp.

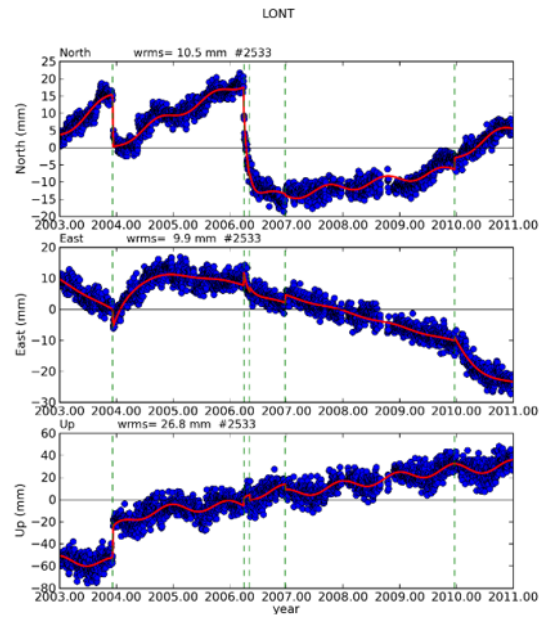
Kết quả xử lý chuỗi tọa độ liên tục của điểm LONT (Mạng lưới GNSS Đài Loan), có số liệu đo liên tục từ năm 2003,0 đến năm 2011,0, thể hiện trong Hình 3. Trong đó, Hình 3(a) là chuỗi tọa độ trước khi xử lý; Hình 3(b) là chuỗi tọa độ sau khi loại bỏ dị thường, đường nét đứt màu xanh là bước nhảy và đường nét liền màu đỏ là đường mô hình (chuỗi tọa độ sau bình sai) xác định được; Hình 3(c) là chuỗi số hiệu chỉnh của tọa độ sau bình sai. Đây là một chuỗi phức tạp, trong đó có 3 bước nhảy do động đất vào các thời điểm 2003,9, 2006,2, 2010,0 và dịch chuyển sau động đất sau đó.

Với phương pháp đề xuất ở trên, chương trình Pygts đã loại bỏ các dị thường, tính toán bình sai với mô hình chuyển động tổng hợp và xác định được các tham số chuyển động của chuỗi trong Bảng 2. Dịch chuyển sau động đất năm 2003,9, 2006,2 và 2010,0 có thời gian tắt dần  $\tau$  xác định được trực tiếp từ chuỗi tọa độ ghi nhận được lần lượt là 0,393 năm (khoảng 143 ngày), 0,087 năm (31 ngày) và 0,063 năm (23 ngày).

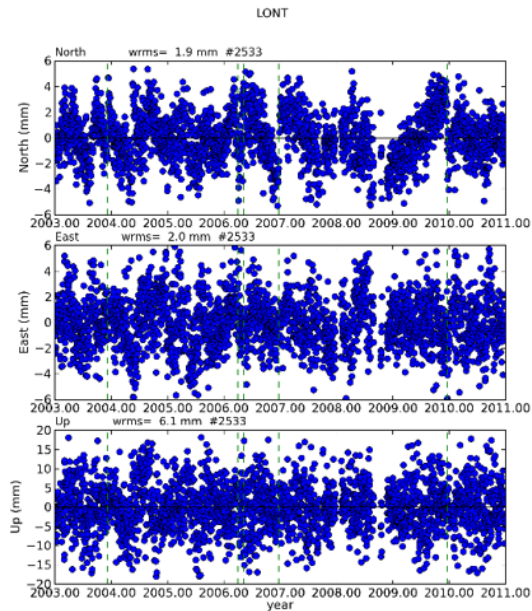
Tốc độ dịch chuyển và độ chính xác của tốc độ của điểm LONT lần lượt theo các thành phần n, e, u xác định được là  $-10,45 \pm 0,43$  mm/năm,  $11,97 \pm 0,41$  mm/năm và  $1,92 \pm 1,33$  mm/năm. Độ chính xác xác định vận tốc dịch chuyển của điểm đo này là rất cao trong xử lý chuỗi tọa độ GNSS nói chung.



(a) Chuỗi tọa độ đo



(b) Chuỗi tọa độ đo đã loại dị thường và mô hình xác định được hay chuỗi tọa độ sau bình sai (nét liền đỏ)



(c) Chuỗi số hiệu chỉnh của tọa độ

Hình 3. Chuỗi tọa độ của điểm LONT (Mạng lưới GNSS Đài Loan)

Kết quả xử lý chuỗi LONT đã được chúng tôi kiểm tra với các nghiên cứu tương tự như [8, 21] cho thấy kết quả là hoàn toàn tương tự, hoặc có phần cải thiện độ chính xác. Như vậy, phương pháp đề xuất xác định thời gian tắt dần sau động đất trực tiếp từ chuỗi tọa độ cho phép mô tả chính xác hơn chuyển dịch sau động đất.

Bảng 2. Các tham số chuyển dịch xác định được của chuỗi tọa độ LONT

Thành phần tọa độ	Vận tốc (mm/năm)	Dịch chuyển hàng năm		Động đất & chuyển dịch sau động đất 2003,9			Động đất & chuyển dịch sau động đất 2006,2			Bước nhảy 2006,4 (m)	Bước nhảy 2007,0 (m)	Động đất & chuyển dịch sau động đất 2010,0			wrms (mm)
		A	$\phi$	Bước nhảy (m)	Biên độ (m)	Thời gian tắt dần (năm)	Bước nhảy (m)	Biên độ (m)	Thời gian tắt dần (năm)			Bước nhảy (m)	Biên độ (m)	Thời gian tắt dần (năm)	
		(mm)	(năm)												
n	-10,45±0,43	0,37	-0,11	0,009	-0,004	0,393	0,081	0,026	0,087	-0,000	-0,078	-0,037	-0,004	0,630	1,9
e	11,97±0,41	1,03	-0,24	-0,011	-0,022	0,393	0,023	0,007	0,087	0,001	-0,023	-0,079	0,030	0,630	2,0
u	-1,92±1,33	4,20	-0,03	0,032	-0,011	0,393	-0,030	-0,015	0,087	-0,004	-0,009	0,002	0,073	0,630	6,1

#### 4. Kết luận

Thời gian tắt dần sau động đất, tương tự như các tham số khác, là tham số quan trọng cho mô hình địa vật lý kiến tạo để tìm hiểu quy luật vận động của các mảng kiến tạo. Việc xác định tham số này trực tiếp từ chuỗi tọa độ GNSS liên tục, sau đó nó được sử dụng lại để tính toán xác định các tham số còn lại như vận tốc dịch chuyển, biên độ bước nhảy do động đất, biên độ dịch chuyển sau động đất,... cho phép tính toán chính xác hơn.

Phương pháp xác định thời gian sau động đất được tính toán thực nghiệm trên bộ số liệu thiết kế, kết quả cho thấy các đại lượng xác định có giá trị gần như bằng với giá trị thiết kế, với sai số trung phương bằng sai số đưa vào.

Phương pháp chúng tôi đề xuất đã được sử dụng xử lý các mạng lưới thực tế như RENAG (Pháp), mạng lưới GNSS liên tục Đài Loan, khi so sánh với các kết quả nghiên cứu tương tự cho thấy kết quả có độ chính xác cao.

Từ kết quả nghiên cứu, chúng tôi thấy rằng các nghiên cứu về xử lý chuỗi tọa độ của các điểm đo GNSS địa động nhằm xác định các tham số dịch chuyển bề mặt đất và đặc biệt cung cấp số liệu trường vector vận tốc chính xác là những nghiên cứu bước đầu ở Việt Nam, nó là cần thiết trong bối cảnh nước ta hiện nay, nhất là khi mạng lưới trạm định vị vệ tinh VNGEONET đã đi vào hoạt động, sẽ thúc đẩy lĩnh vực ứng dụng GNSS liên tục trong các nghiên cứu về khoa học Trái đất.

#### Lời cảm ơn

Các tác giả trân trọng cảm ơn sự hỗ trợ tài chính của Trường Đại học Xây dựng Hà Nội cho đề tài khoa học công nghệ có mã số 13-2022/KHXD.

#### Tài liệu tham khảo

- [1] Hải, V. Q., Tô, T. Đ., Liêm, N. V. (2011). Xác định chuyển dịch hiện đại đới đứt gãy sông Hồng theo số liệu lưới GPS Tam Đảo - Ba Vì (1994 - 2007). *Tạp chí các Khoa học về Trái Đất*, 33(3):474-479.
- [2] Feigl, K., Masson, F., Công, D. C., Bourdillon, A., Duchesne, P. L., Thắng, N. C., Thành, N. H., Nam, T. N., Lan, H. T. (2010). Dịch chuyển vỏ Trái Đất theo số liệu GPS liên tục tại Việt Nam và khu vực Đông Nam Á. *Vietnam Journal of Earth Sciences*, 32(3):249-260.
- [3] Nocquet, J.-M., Villegas-Lanza, J. C., Chlieh, M., Mothes, P. A., Rolandone, F., Jarrin, P., Cisneros, D., Alvarado, A., Audin, L., Bondoux, F., Martin, X., Font, Y., Régnier, M., Vallée, M., Tran, T., Beauval, C., Mendoza, J. M. M., Martinez, W., Tavera, H., Yepes, H. (2014). *Motion of continental slivers and creeping subduction in the northern Andes*. *Nature Geoscience*, 7(4):287-291.
- [4] Chiều, V. Đ., Quang, V. N., Dũng, L. N., Hằng, H. T., Trọng, T. Đ. (2021). *Nghiên cứu các phương án xử lý kết hợp số liệu của nhiều hệ thống định vị vệ tinh trong mạng lưới GNSS*. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCNXD) - ĐHXDH*, 15(7V):156-166.
- [5] Trinh, P. T., Liem, N. V., To, T. D., Huong, N. V., Hai, V. Q., Thom, B. V., Phong, T. V., Vinh, H. Q., Xuyen, N. Q., Thuan, N. V., Tuc, N. D., Thuan, D. V., Tan, N. T., Thao, B. T., Tien, N. V., Tung, L. M., Hung, T. Q. (2015). *Present Day Deformation in the East Vietnam Sea and Surrounding Regions*. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Biển*, 15(2):105-118.

- [6] Trần, Đ. T., Nguyễn, T. Y., Dương, C. C., Vy, Q. H., Zuchiewicz, W., Nguyễn, Q. C., Nguyễn, V. N. (2013). [Recent crustal movements of northern Vietnam from GPS data](#). *Journal of Geodynamics*, 69: 5–10.
- [7] Bevis, M., Jonathan, B., Dana J., C. I. (2020). [Geodetic Time Series Analysis in Earth Sciences](#). Springer International Publishing.
- [8] Tran, D. T. (2013). [Analyse rapide et robuste des solutions GPS pour la tectonique](#). Université Nice Sophia Antipolis.
- [9] Wu, D., Yan, H., Shen, Y. (2017). [TSAlyzer, a GNSS time series analysis software](#). *GPS Solutions*, 21 (3):1389–1394.
- [10] Nikolaidis, R. (2002). [Observation of geodetic and seismic deformation with the Global Positioning System](#). University of California, San Diego.
- [11] 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](#). *Journal of the Polish Mineral Engineering Society*, 1(2).
- [12] Sabadini, R., Vermeersen, B. (2004). [Post-Seismic Deformation](#). *Global Dynamics of the Earth*, Springer Netherlands, 269–291.
- [13] Hearn, E. H. (2003). [What can GPS data tell us about the dynamics of post-seismic deformation?](#) *Geophysical Journal International*, 155(3):753–777.
- [14] Loevenbruck, A., Cattin, R., Pichon, X. L., Dominguez, S., Michel, R. (2004). [Coseismic slip resolution and post-seismic relaxation time of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake as constrained by geological observations, geodetic measurements and seismicity](#). *Geophysical Journal International*, 158(1):310–326.
- [15] Vallejos, J. A., McKinnon, S. D. (2011). [Correlations between mining and seismicity for re-entry protocol development](#). *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48(4):616–625.
- [16] Perfettini, H., Avouac, J.-P. (2004). [Postseismic relaxation driven by brittle creep: A possible mechanism to reconcile geodetic measurements and the decay rate of aftershocks, application to the Chi-Chi earthquake, Taiwan](#). *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 109(B2).
- [17] Cox, A., Hart, R. B. (1991). [Plate tectonics: How it works](#). John Wiley & Sons.
- [18] Tran, D. T., Nocquet, J.-M., Luong, N. D., Nguyen, D. H. (2022). [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.
- [19] Métivier, L., Collilieux, X., Lercier, D., Altamimi, Z., Beauducel, F. (2014). [Global coseismic deformations, GNSS time series analysis, and earthquake scaling laws](#). *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(12):9095–9109.
- [20] Klos, A., Bogusz, J. B., Bos, M. S., Gruszczynska, M. (2020). [Modelling the GNSS Time Series: Different Approaches to Extract Seasonal Signals](#). *Geodetic Time Series Analysis in Earth Sciences*, Springer International Publishing, 2–4.
- [21] Tran, D. T. (2022). [Nghiên cứu và phát triển phương pháp xử lý số liệu chuỗi tọa độ liên tục của lưới GNSS địa động](#). Đề tài KHCN Bộ Giáo dục và Đào tạo. Mã số B2020-XDA-05.