



A STUDY ON PRE-PROCESSING METHODS FOR REAL-TIME GNSS MONITORING DATA OF MULTI-TOWER CABLE-STAYED BRIDGES

Le Van Hien, Le Minh Ngoc, Tran Duc Cong

University of Transport and Communications, No 3 Cau Giay Street, Hanoi, Vietnam

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 09/08/2024

Revised: 27/10/2024

Accepted: 10/12/2024

Published online: 15/12/2024

<https://doi.org/10.47869/tcsj.75.9.9>

* *Corresponding author*

Email: hienlv@utc.edu.vn; Tel: +84981110910

Abstract. Global Navigation Satellite System technology (GNSS) has been widely applied for continuous displacement monitoring of long-span cable-stayed bridges due to its numerous advantages and high efficiency. However, the long-term continuous Global Navigation Satellite System monitoring data often has a large volume and contains numerous outliers such as missing data and noise, which can affect the accuracy and reliability of displacement analysis. This paper focuses on the research of pre-processing methods for real-time Global Navigation Satellite System monitoring data of multi-towers cable-stayed bridges. A dataset from a real-world multi-tower suspension bridge is extracted for analysis. Subsequently, outliers or missing data are interpolated using the Hampel filter. Furthermore, the Helmert transformation method is applied to convert the measured data from the geocentric coordinate system to the local bridge coordinate system. Finally, the processed data is used to evaluate the accuracy of the monitoring results and analyze the displacement of characteristic points on the target bridge.

Keywords: GNSS technology, displacement of cable-stayed bridges, Hampel Identifier, Helmet transformation

@ 2024 University of Transport and Communications



NGHIÊN CỨU PHƯƠNG PHÁP TIỀN XỬ LÝ DỮ LIỆU QUAN TRẮC LIÊN TỤC GNSS CỦA CẦU DÂY VĂNG NHIỀU TRỤ THÁP

Lê Văn Hiến, Lê Minh Ngọc, Trần Đức Công

Trường Đại học Giao thông vận tải, Số 3 Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 09/08/2024

Ngày nhận bài sửa: 27/10/2024

Ngày chấp nhận đăng: 10/12/2024

Ngày xuất bản Online: 15/12/2024

<https://doi.org/10.47869/tcsj.75.9.9>

* Tác giả liên hệ

Email: hienlv@utc.edu.vn; Tel: +84981110910

Tóm tắt. Công nghệ định vị vệ tinh GNSS đã và đang được ứng dụng phổ biến trong quan trắc liên tục chuyển vị của cầu dây văng nhịp lớn với nhiều ưu điểm vượt trội và hiệu quả cao. Tuy nhiên, dữ liệu quan trắc liên tục GNSS thời gian dài có một dung lượng rất lớn và xuất hiện nhiều dữ liệu bất thường như dữ liệu bị mất, dữ liệu nhiễu, gây ảnh hưởng đến độ chính xác và độ tin cậy khi phân tích kết quả quan trắc chuyển vị công trình. Bài báo này tập chung nghiên cứu các phương pháp tiên xử lý dữ liệu quan trắc liên tục GNSS của cầu dây văng. Một bộ dữ liệu quan trắc GNSS của một cầu dây văng nhiều trụ tháp thực tế được trích xuất để nghiên cứu. Sau đó, các dữ liệu bất thường hoặc dữ liệu mất được xử lý nội suy bằng phương pháp Hampel. Tiếp theo, phương pháp tính chuyển tọa độ Helmet được áp dụng để tính chuyển dữ liệu đo từ hệ tọa độ không gian địa tâm về hệ tọa độ công trình cầu. Cuối cùng, dữ liệu sau xử lý được dùng để đánh giá độ chính xác kết quả quan trắc cũng như phân tích chuyển vị của các điểm đặc trưng trên cầu.

Từ khóa: công nghệ GNSS, chuyển vị cầu dây văng, phương pháp Hampel, tính chuyển Helmet

@ 2024 Trường Đại học Giao thông vận tải

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Nghiên cứu về ứng dụng hệ thống quan trắc liên tục (Structural Health Monitoring - SHM) cho các công trình như nhà cao tầng, công trình cầu lớn, hay các kết cấu phức tạp đã và đang được nghiên cứu phổ biến trên thế giới, đặc biệt với dạng công trình cầu hệ dây nhịp lớn như Nhật bản, Mỹ, Trung Quốc... Các lĩnh vực nghiên cứu liên quan đến hệ thống SHM bao gồm từ việc thiết kế hệ thống các loại cảm biến, lựa chọn và cài đặt tần số thu nhận tín hiệu

của cảm biến, hệ thống kết nối và truyền dẫn tín hiệu, hệ thống phần cứng để lưu trữ dữ liệu quan trắc, các bài toán phân tích sức khỏe kết cấu từ dữ liệu quan trắc... Trong các loại cảm biến của một hệ thống SHM, công nghệ định vị vệ tinh GPS/GNSS được ứng dụng để quan trắc chuyển vị của các điểm đặc trưng [1-4]. Tuy nhiên, hiện nay chưa có nhiều các nghiên cứu về xử lý, phân tích các dữ liệu đo quan trắc liên tục bằng GPS/GNSS. Một số nghiên cứu chỉ dừng về việc phân tích giá trị chuyển vị của điểm đo tại một số thời điểm nghiên cứu để nhận diện thay đổi của kết cấu [1]; hoặc nghiên cứu ứng dụng công nghệ định vị vệ tinh trong quan trắc chuyển vị của một mô hình kết cấu mô phỏng. Một số nghiên cứu gần đây [5-6] có đánh giá về những ưu, nhược điểm của ứng dụng công nghệ GPS/GNSS trong các hệ thống quan trắc SHM của cầu, có chỉ ra rằng, mặc dù có nhiều ưu điểm nhưng công nghệ này vẫn có một số nhược điểm có thể gây ra những sai số trong dữ liệu đo đạc. Hiện chưa có một nghiên cứu nào về tiền xử lý dữ liệu quan trắc liên tục GNSS thời gian dài của một cầu hệ dây nhịp lớn nhằm mục đích nội suy các dữ liệu bất thường xảy ra trong quá trình quan trắc như dữ liệu bị mất (missing data) hay dữ liệu ngoại lai (outlier data), từ đó làm sạch chuỗi dữ liệu quan trắc thời gian dài phục vụ các nhiệm vụ phân tích chuyên sâu.

Ở Việt Nam, hệ thống quan trắc sức khỏe kết cấu (SHM) nói chung và công nghệ định vị vệ tinh GPS/GNSS nói riêng đã và đang được ứng dụng với nhiều dạng công trình khác nhau, đặc biệt ứng dụng phổ biến với dạng công trình cầu hệ dây nhịp lớn như cầu dây văng Cần Thơ, cầu Bạch Đằng, cầu Nhật Tân, cầu Vàm Cống... Tuy nhiên, các nghiên cứu về xử lý phân tích chuỗi dữ liệu quan trắc liên tục GNSS thực tế còn rất nhiều hạn chế, rất ít nghiên cứu đề cập, từ đó làm giảm hiệu quả sử dụng công nghệ này trong thực tiễn. Hướng nghiên cứu về xử lý, phân tích và đánh giá chuỗi dữ liệu quan trắc liên tục GPS/GNSS ứng dụng trong quan trắc sức khỏe kết cấu cầu hệ dây nhịp lớn ở Việt Nam là một hướng nghiên cứu xuyên suốt của chủ nhiệm đề tài kể từ giai đoạn nghiên cứu sinh. Một số nghiên cứu tiêu biểu có thể kể đến như sau: năm 2015, nhóm tác giả đã nghiên cứu phân tích tương quan giữa dữ liệu quan trắc GPS và các dữ liệu quan trắc môi trường để nhận diện mô hình chuyển vị tổng thể của cầu dây văng đối xứng, kết quả nghiên cứu đã chỉ rõ mô hình chuyển vị của các điểm đặc trưng dưới tác động của yếu tố nhiệt độ môi trường [7]. Tiếp theo, năm 2016 nhóm tác giả đã nghiên cứu sự tương quan giữa gió, nhiệt độ và chuyển vị của một số vị trí trên cầu Cần Thơ, từ đó xây dựng mô hình dự đoán chuyển vị của dầm chủ tại mặt cắt giữa nhịp chính cầu Cần Thơ từ số liệu quan trắc thông qua bài toán hồi quy [8-9]. Năm 2019, dựa trên các kết quả nghiên cứu mô hình chuyển vị tổng thể của cầu dây văng dựa trên dữ liệu quan trắc GPS, áp dụng phương pháp mô hình toán thống kê để trích xuất các tham số đặc trưng, nhóm tác giả đã mô hình hoá một cầu dây văng đối xứng, sử dụng các tham số đặc trưng để nhận diện những thay đổi (hông học) của các điều kiện kết cấu cầu [10]. Ngoài ra, nhóm tác giả còn thực hiện một số nghiên cứu khác liên quan và đã trình bày trong các báo cáo hội nghị trong nước và quốc tế. Trong các nghiên cứu được đề cập trên đây, các dữ liệu bất thường là các dữ liệu bị mất đã được nghiên cứu để nội suy bằng phương pháp đa thức tuyến tính [7], tuy nhiên phương pháp này chỉ phù hợp đối với số lượng ít dữ liệu bị mất xảy ra (<5 dữ liệu liên tục) mà chưa xem xét đến các dữ liệu ngoại lai (outlier data).

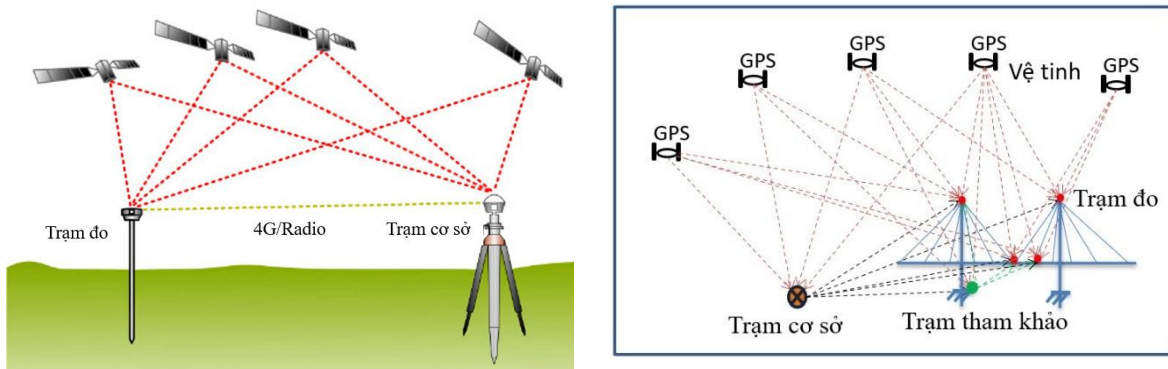
2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT NGHIÊN CỨU

2.1. Nguyên tắc định vị tương đối động thời gian thực GNSS-RTK ứng dụng trong quan trắc cầu dây văng

Phương pháp định vị tương đối động GNSS-RTK (GNSS-Real Time Kinematic) thực hiện dựa trên nguyên tắc định vị tương đối của GNSS. Theo phương pháp này, trạm cơ sở

được đặt tại một điểm không chế đã biết tọa độ, một hoặc nhiều trạm đo đặt tại các điểm cần xác định. Hai trạm cơ sở và trạm đo liên kết với nhau thông qua sóng viễn thông 4G (phổ biến hiện nay) hoặc sóng radio và cùng thu nhận tín hiệu từ các vệ tinh tại cùng một thời điểm đo theo thời gian thực. Trạm cơ sở thu nhận tín hiệu vệ tinh, xử lý và xác định tọa độ tức thời của điểm cơ sở, so sánh với tọa độ đã biết để xác định đại lượng hiệu chỉnh và truyền đại lượng hiệu chỉnh đến các trạm đo thông qua phương thức 4G hoặc radio. Hình 1a mô tả nguyên tắc cơ bản của phương pháp định vị động GNSS-RTK.

Nguyên tắc định vị GNSS-RTK ứng dụng trong các hệ thống quan trắc SHM của cầu dây văng gồm có một trạm cơ sở thường được xây dựng gần với công trình cầu và các trạm đo được đặt cố định tại các điểm đặc trưng cần quan trắc trên cầu như: tại đỉnh các tháp; chính giữa các nhịp của cầu; tại đỉnh các trụ... Các đầu thu GNSS (sensors) được kết nối về đầu thu dữ liệu thông qua cáp nối, và dữ liệu đo được quản lý trên một hệ thống chung. Hình 1b mô tả sơ đồ quan trắc GNSS-RTK của một cầu dây văng có hai trụ tháp.

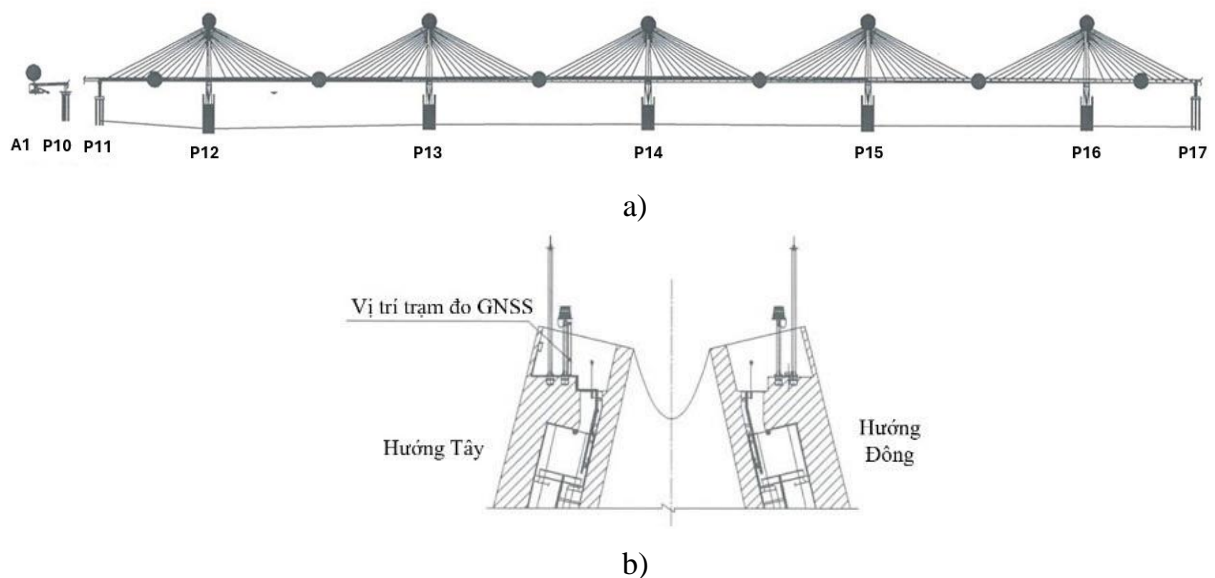


a) Nguyên tắc định vị GNSS-RTK [11].

b) Sơ đồ quan trắc GNSS-RTK của cầu dây văng.

Hình 1. Nguyên tắc định vị GNSS-RTK và ứng dụng trong quan trắc cầu dây văng.

2.2. Hệ thống quan trắc GNSS-RTK của cầu dây văng nhiều trụ tháp Nhật Tân

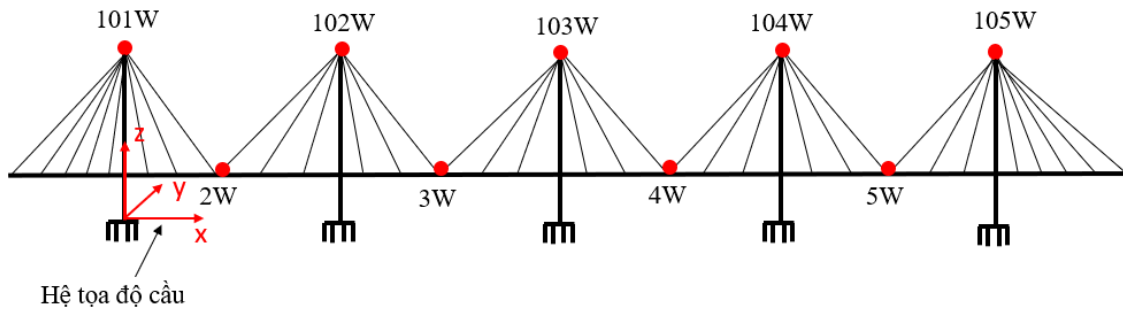


Hình 2. Sơ đồ lắp đặt máy thu GNSS trên cầu dây văng Nhật Tân.

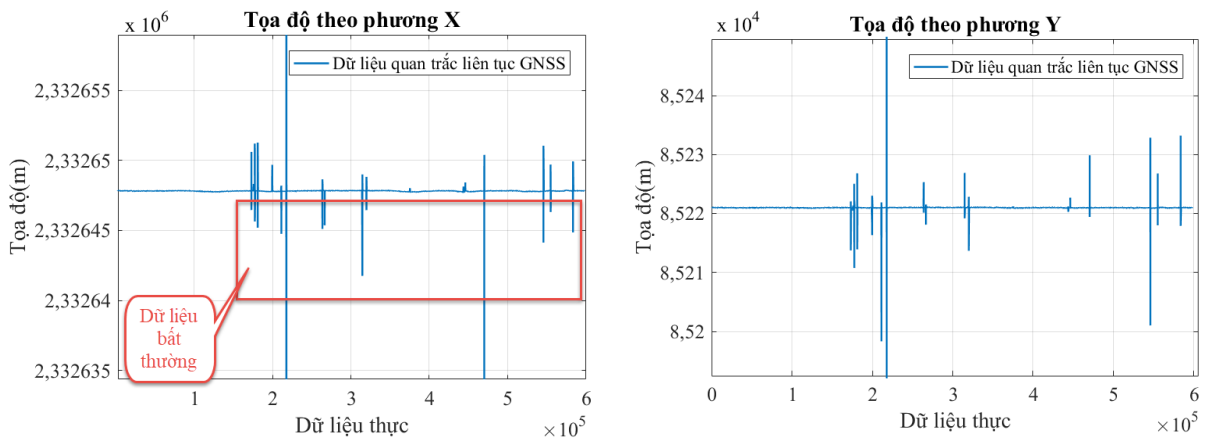
Cầu dây văng Nhật Tân là một cầu dây văng nhiều trụ tháp được xây dựng bắc qua sông Hồng và đưa vào khai thác từ tháng 1 năm 2015 với chiều dài 3,9 kilomet, trong đó chiều dài vượt sông là 2,5 kilomet. Cầu có 5 trụ tháp hình thoi và 6 nhịp dây văng. Hệ thống quan trắc SHM của cầu Nhật Tân được đánh giá là hệ thống đầy đủ các loại cảm biến và hiện đại nhất ở Việt Nam, trong đó hệ thống quan trắc GNSS bao gồm 1 trạm đo cơ sở và 17 trạm đo gắn trên 5 đỉnh tháp và 12 điểm trên dầm cầu. Các máy thu GNSS của cầu Nhật Tân sử dụng máy thu của hãng Leica, gồm ăng-ten Leica AS10 cho trạm đo và Leica AR10 cho trạm cơ sở. Hệ thống quan trắc GNSS của cầu Nhật Tân là hệ thống có nhiều trạm đo nhất ở Việt Nam. Hình 2a mô tả sơ đồ vị trí lắp đặt các máy thu GNSS, hình 2b mô tả vị trí lắp đặt máy thu GNSS trên đỉnh tháp của cầu. Hệ thống quan trắc GNSS được xác lập trong hệ tọa độ vuông góc không gian địa tâm OXYZ.

2.3 Đặc điểm dữ liệu quan trắc và phương pháp nghiên cứu

2.3.1. Đặc điểm dữ liệu quan trắc GNSS-RTK của cầu Nhật Tân. Một bộ dữ liệu quan trắc GNSS-RTK với tần số thu nhận 1Hz của cầu Nhật Tân được trích xuất để nghiên cứu từ 15 tháng 6 đến 15 tháng 7 năm 2015. Các điểm quan trắc dùng trong nghiên cứu này là 5 điểm đỉnh tháp và 4 điểm chính giữa của 4 nhịp chính. Hình 3 mô tả vị trí các điểm quan trắc nghiên cứu. Hình 4 biểu diễn dữ liệu quan trắc của một điểm chính giữa nhịp cầu xác định trong hệ tọa độ vuông góc không gian địa tâm.



Hình 3. Sơ đồ các điểm quan trắc nghiên cứu.



Hình 4. Dữ liệu quan trắc nghiên cứu của điểm 3W.

Có thể thấy rằng, dữ liệu quan trắc GNSS có chứa nhiều dữ liệu bất thường, ảnh hưởng đến độ tin cậy khi phân tích, đánh giá độ chính xác của kết quả quan trắc, cũng như tính toán giá trị chuyển vị thực tế của các điểm đặc trưng. Bên cạnh đó, để phân tích được chính xác

chuyển vị của các điểm trong hệ tọa độ của cầu (với phương trục x là phương dọc cầu, phương y là phương ngang và phương z là phương thẳng đứng – như hình 3), thì cần thiết phải thực hiện tính chuyển tọa độ của toàn bộ dữ liệu nghiên cứu từ hệ tọa độ vuông góc không gian địa tâm về hệ tọa độ cầu.

2.3.2. Phương pháp nghiên cứu. Để thực hiện mục tiêu nghiên cứu là tiền xử lý dữ liệu và phân tích đánh giá kết quả quan trắc liên tục GNSS-RTK của cầu dây văng nhiều trụ tháp, các bước thực hiện nghiên cứu được đề xuất như sau:

Bước 1: Nội suy các dữ liệu quan trắc bất thường bằng phương pháp Hampel.

Bước 2: Tính chuyển tọa độ từ hệ tọa độ vuông góc không gian địa tâm về hệ tọa độ cầu

Bước 3: Đánh giá độ chính xác kết quả quan trắc và phân tích chuyển vị của các điểm quan trắc.

a) Nội suy dữ liệu bằng phương pháp Hampel

Phương pháp nội suy Hampel được nhà khoa học Hampel đề xuất dựa trên nguyên lý xác định giá trị trung bình và trị trung bình tuyệt đối của một chuỗi dữ liệu, từ đó sử dụng các giá trị này cùng với độ lệch chuẩn để phát hiện và nội suy các dữ liệu bất thường (ngoại lai). Dựa trên nguyên lý này, thuật toán của phương pháp được mô tả như sau:

Giả sử có một chuỗi dữ liệu $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ theo thời gian; k là độ dài của một cửa sổ trượt. Các giá trị trung bình và độ lệch chuẩn của đoạn dữ liệu tương ứng với cửa sổ trượt tính như sau:

$$m_i = \text{median}(x_{i-k}, x_{i-k+1}, x_{i-k+2}, \dots, x_i, x_{i+k-2}, x_{i+k-1}, x_{i+k}) \quad (1)$$

$$\sigma_i = \kappa \cdot \text{median}(|x_{i-k} - m_i|, \dots, |x_{i+k} - m_i|) \quad (2)$$

Trong đó, m_i là trị trung bình của đoạn dữ liệu; σ_i là độ lệch chuẩn của đoạn dữ liệu; hằng số ước tính phân phối chuẩn Gauss $\kappa = \frac{1}{\sqrt{2} \text{erfc}^{-1}(1/2)} \approx 1,4826$

Nếu một dữ liệu x_i thỏa mãn điều kiện $|x_i - m_i| > t \cdot \sigma_i$ thì được coi là một dữ liệu bất thường, khi đó dữ liệu này được thay thế bằng giá trị trung bình m_i của đoạn dữ liệu đó. Theo cách đó, cửa sổ trượt sẽ lần lượt dịch chuẩn từ đầu đến cuối chuỗi dữ liệu để nhận diện và nội suy các dữ liệu bất thường của chuỗi.

b) Tính chuyển tọa độ theo phương pháp Helmet

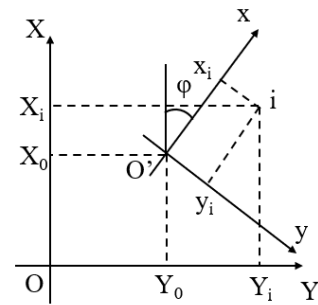
Tọa độ X, Y của các điểm quan trắc thu được từ hệ tọa độ vuông góc không gian địa tâm được tính chuyển về hệ tọa độ công trình cầu theo phương pháp tính chuyển Helmet. Nguyên lý của phương pháp tính chuyển như sau:

Giả sử một điểm i có tọa độ trong cả hai hệ tọa độ OXY và O'xy (Hình 5), khi đó công thức liên hệ tọa độ theo phương pháp Helmet như sau:

$$\begin{cases} X_i = X_0 + m \cdot x_i \cdot \cos\varphi - m \cdot y_i \cdot \sin\varphi \\ Y_i = Y_0 + m \cdot y_i \cdot \cos\varphi + m \cdot x_i \cdot \sin\varphi \end{cases} \quad (3)$$

Trong đó:

- (X_0, Y_0) là tọa độ điểm gốc O' trong hệ tọa độ OXY;
- (X_i, Y_i) là tọa độ của điểm I trong hệ tọa độ OXY;
- (x_i, y_i) là tọa độ của điểm i trong hệ $O'xy$.
- φ là góc xoay giữa hai hệ tọa độ;
- m là hệ số tỷ lệ dài giữa hai hệ tọa độ



Hình 5. Tính chuyển Helmet.

c) Đánh giá độ chính xác kết quả quan trắc và phân tích chuyển vị

- Sai số trung phương RMSE (Root Mean Square Error) thường được sử dụng để đánh giá độ chính xác của một chuỗi kết quả đo cùng độ chính xác, công thức tính như sau:

$$RMSE = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_0)^2}{n - 1}} \quad (4)$$

Trong đó, y_i là dữ liệu thực tế; y_0 là giá trị trung bình của chuỗi kết quả đo, n là độ dài của chuỗi dữ liệu.

- Đặc điểm chuyển vị của cầu dây văng nhiều trụ tháp được phân tích dựa trên sự tương quan giữa các điểm quan trắc theo các hướng của hệ tọa độ cầu (dọc cầu – phương x ; ngang cầu – phương y ; phương đứng – z). Công thức tính hệ số tương quan giữa hai chuỗi dữ liệu x_i và y_i như sau:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)}{(n-1) s_x s_y} \quad (5)$$

Trong đó: \bar{x} , \bar{y} là giá trị trung bình của hai chuỗi dữ liệu. Hệ số tương quan có giá trị từ -1 đến +1. Hệ số tương quan càng lớn (gần bằng ± 1) thể hiện sự tương quan càng cao giữa hai chuỗi dữ liệu xét.

3. TÍNH TOÁN THỰC NGHIỆM

Một bộ dữ liệu quan trắc GNSS-RTK liên tục tính trung bình theo 1 phút của 9 điểm quan trắc trên cầu Nhật Tân (05 điểm trên đỉnh tháp và 04 điểm trên dầm – Hình 3) được trích xuất để nghiên cứu từ 15 tháng 6 đến 15 tháng 7 năm 2015.

3.1. Nội suy dữ liệu bất thường

Dữ liệu nghiên cứu sau đó được nội suy các dữ liệu bất thường bằng phương pháp Hample để tăng độ chính xác của chuỗi dữ liệu. Biểu đồ hình 6 minh họa dữ liệu trước và sau nội suy của điểm trên dầm 3W. Có thể thấy rằng, dữ liệu quan trắc GNSS có chứa nhiều dữ

liệu bất thường (ngoại lai), và các dữ liệu này có thể được phát hiện và nội suy bằng phương pháp Hampel. Kết quả nội suy của dữ liệu cho độ chính xác cao hơn.

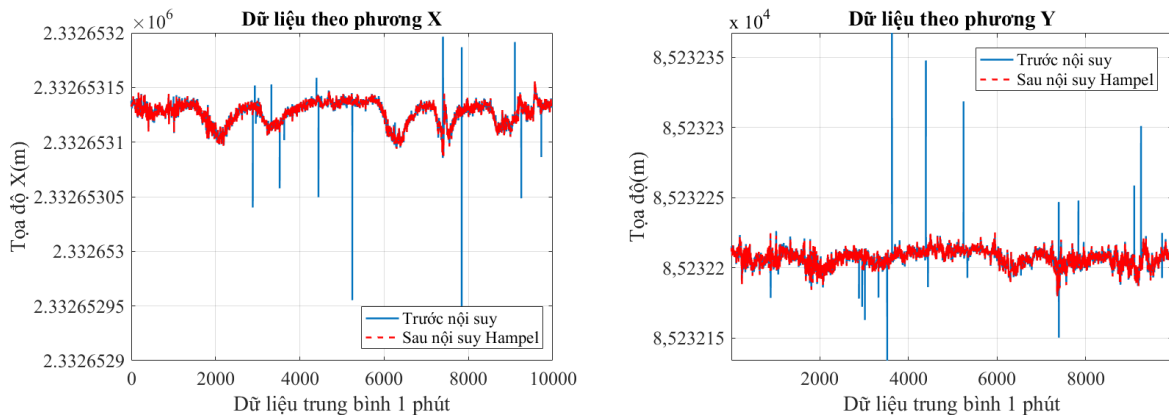
3.2. Tính chuyển dữ liệu quan trắc về hệ tọa độ cầu

Dữ liệu quan trắc sau nội suy được tính chuyển về hệ tọa độ của cầu bằng phương pháp tính chuyển Helmet với nguyên tắc như sau:

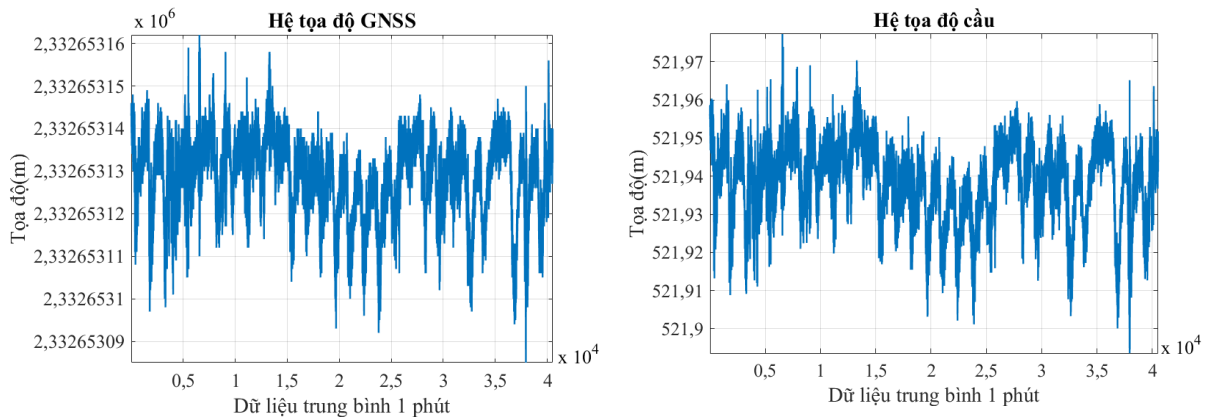
- Hai điểm quan trắc 101W và 105W được chọn là 2 điểm cơ sở để tính chuyển về hệ tọa độ của cầu.

- Hệ tọa độ cầu có đặc điểm: trục x là phương dọc cầu; trục y là phương ngang cầu; và trục z là phương thẳng đứng.

Hình 7 minh họa dữ liệu quan trắc theo phương dọc cầu của điểm 3W ở hai hệ tọa độ.



Hình 6. Kết quả nội suy dữ liệu bất thường của điểm 3W.



a) Trước tính chuyển.

b) Sau tính chuyển.

Hình 7. Kết quả tính chuyển về hệ tọa độ cầu – điểm 3W.

Có thể thấy rằng, dữ liệu sau tính chuyển về hệ tọa độ cầu theo phương pháp Helmet bảo toàn nguyên vẹn các đặc tính của dữ liệu quan trắc theo thời gian như xu hướng biến đổi của dữ liệu.

3.3. Đánh giá độ chính xác kết quả quan trắc

Dữ liệu sau tính chuyển về hệ tọa độ cầu được dùng để đánh giá độ chính xác kết quả quan trắc theo công thức (4). Biên độ chuyển vị theo từng phương của từng điểm được xác định bằng hiệu số giữa giá trị lớn nhất và giá trị nhỏ nhất. Kết quả đánh giá độ chính xác của các điểm quan trắc được trình bày trong bảng 1. Có thể nhận thấy rằng, sai số trung phương lớn nhất theo các phương dọc cầu, ngang cầu và phương đứng lần lượt là $\pm 0,020\text{m}$; $\pm 0,007\text{m}$ và $\pm 0,035\text{m}$. Tỷ lệ % giữa sai số trung phương và biên độ chuyển vị lớn nhất là 18% theo phương dọc cầu. Kết quả này chứng tỏ rằng, độ chính xác của phương pháp GNSS trong quan trắc liên tục cầu dây văng làm đảm bảo độ chính xác theo yêu cầu đặt ra.

Bảng 1. Kết quả đánh giá độ chính xác quan trắc của các điểm.

Tên điểm	Sai số trung phương (m)			Biên độ chuyển vị (m)			Tỷ lệ % của sai số so với biên độ		
	m_x	m_y	m_z	Phương	Phương	Phương	Phương	Phương	Phương
				x	y	z	x	y	z
2W	0,020	0,004	0,024	0,112	0,050	0,170	18%	8%	14%
3W	0,010	0,004	0,020	0,077	0,065	0,181	13%	7%	11%
4W	0,009	0,005	0,020	0,076	0,079	0,178	12%	6%	11%
5W	0,019	0,007	0,035	0,216	0,219	0,701	9%	3%	5%
101W	0,020	0,004	0,011	0,111	0,056	0,133	18%	7%	8%
102W	0,015	0,005	0,014	0,095	0,063	0,168	16%	7%	8%
103W	0,009	0,005	0,014	0,076	0,075	0,186	12%	6%	8%
104W	0,012	0,005	0,015	0,089	0,081	0,214	13%	6%	7%
105W	0,019	0,006	0,016	0,115	0,072	0,230	16%	8%	7%

3.4. Phân tích tương quan chuyển vị giữa các điểm quan trắc

Dữ liệu quan trắc của các điểm trên cầu được sử dụng để phân tích tương quan theo các hướng đặc trưng của cầu, áp dụng công thức tính hệ số tương quan theo công thức 5. Phân tích chuyển vị tổng thể của cầu, sự tương quan giữa các điểm theo phương dọc cầu (phương x) và phương thẳng đứng (phương z) là các phương đặc trưng cần xét đến. Các hệ số tương quan có giá trị tuyệt đối từ 0,5 đến 1 là các hệ số tương quan có ý nghĩa từ tương quan trung bình đến tương quan rất cao. Bảng 2 thể hiện hệ số tương quan giữa các điểm theo phương dọc cầu, trong khi đó bảng 3 thể hiện hệ số tương quan giữa các điểm theo phương dọc cầu (điểm đỉnh tháp) và phương đứng (điểm trên dầm). Kết quả hệ số tương quan là đối xứng nhau qua đường chéo.

Bảng 2. Hệ số tương quan giữa các điểm theo phương dọc cầu (phương x).

	101W-X	2W-X	102W-X	3W-X	103W-X	4W-X	104W-X	5W-X	105W-X
101W-X	1,00	0,10	0,85	0,80	0,37	-0,16	-0,39	-0,66	-0,50
2W-X		1,00	0,18	0,16	0,17	0,09	0,03	-0,02	0,08
102W-X			1,00	0,89	0,71	0,21	-0,02	-0,33	-0,06
3W-X				1,00	0,68	0,38	0,02	-0,22	-0,04
103W-X					1,00	0,71	0,61	0,33	0,56
4W-X						1,00	0,83	0,78	0,81
104W-X							1,00	0,87	0,92
5W-X								1,00	0,89
105W-X									1,00

Bảng 3. Hệ số tương quan giữa các điểm theo hai phương: dọc cầu và phương đứng.

	101W-X	2W-Z	102W-X	3W-Z	103W-X	4W-Z	104W-X	5W-Z	105W-X
101W-X	1,00	-0,22	0,85	0,30	0,37	0,31	-0,39	0,35	-0,50
2W-Z		1,00	-0,11	0,11	0,03	0,10	0,14	0,10	0,22
102W-X			1,00	0,50	0,71	0,50	-0,02	0,56	-0,06
3W-Z				1,00	0,38	0,96	-0,06	0,94	0,12
103W-X					1,00	0,36	0,61	0,42	0,56
4W-Z						1,00	-0,08	0,94	0,09
104W-X							1,00	-0,07	0,92
5W-Z								1,00	0,12
105W-X									1,00

Từ các hệ số tương quan có ý nghĩa (in đậm), có thể thấy rằng:

- Theo phương dọc cầu, điểm đỉnh thấp tại vị trí đối xứng (103W) có tương quan cao và đồng biến với các điểm đỉnh thấp 102W; tương quan trung bình và đồng biến với các điểm 104W và 105W; tương quan cao và đồng biến với hai điểm trên hai nhịp liền kề là 3W và 4W.
- Các điểm đỉnh thấp theo phương dọc cầu có tương quan thấp đến phương thẳng đứng của các điểm trên dầm. Trong khi đó, theo phương thẳng đứng, các điểm trên dầm có tương quan đồng biến rất cao.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu phương pháp tiền xử lý dữ liệu quan trắc liên tục GNSS của cầu dây văng nhiều trụ thấp, tính toán thực nghiệm với số liệu quan trắc thực tế, nhóm tác giả có một số kết luận như sau:

- Dữ liệu quan trắc liên tục GNSS có chứa nhiều dữ liệu bất thường (ngoại lai), gây ảnh hưởng đến đánh giá độ chính xác và phân tích chuyển vị của các điểm quan trắc. Phương pháp nội suy Hampel cho phép phát hiện và nội suy giá trị của các dữ liệu bất thường, từ đó tăng độ chính xác của kết quả quan trắc.
- Dữ liệu quan trắc cần thiết được tính chuyển về hệ tọa độ của cầu với các phương đặc trưng là dọc cầu, ngang cầu để có thể phân tích chính xác giá trị chuyển vị theo các phương này, từ đó đánh giá được các điều kiện làm việc của kết cấu cầu. Phương pháp tính chuyển tọa độ Helmet với thuật toán đơn giản, có thể ứng dụng để tính chuyển tọa độ quan trắc về hệ tọa độ cầu.
- Thực nghiệm với dữ liệu quan trắc thực tế cho thấy, phương pháp định vị vệ tinh GNSS đảm bảo độ chính xác để quan trắc cầu dây văng nhiều trụ thấp. Kết quả phân tích tương quan giữa các điểm quan trắc theo hai hướng dọc cầu và thẳng đứng cho thấy sự tương quan cao đến rất cao giữa một số điểm đỉnh thấp và điểm trên dầm cầu. Tuy nhiên, phân tích tương quan cần được nghiên cứu sâu hơn để từ đó nhận diện các mô hình chuyển vị tổng thể của cầu dây văng nhiều trụ thấp.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường đại học Giao thông vận tải trong đề tài mã số T2024-CT-009.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. M. R. Kaloop, H. Li, Monitoring of bridge deformation using GPS technique, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 13 (2009) 423-431. <https://doi.org/10.1007/s12205-009-0423-y>
- [2]. V. M. Karbhari, F. Ansari, *Structural Health Monitoring of civil infrastructure systems*, Woodhead Publishing Limited, 2009.
- [3]. P. Omenzetter, J. M. W. Brownjohn, Application of time series analysis for bridge monitoring, *Smart Materials and Structures*, 15 (2006) 129-138. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/15/1/041>
- [4]. C. R. Farrar, P. Cornwell, S. W. Doebling, M. B. Prime, *Structural Health Monitoring Studies of the Alamosa Canyon and I-40 Bridges*, Los Alamos National Laboratory, LA-13635-MS, 2000.
- [5]. Z. M. Y. Mohd, I. Nuremira, S. A. Fatimah, A review on bridge dynamic displacement monitoring using global positioning system and accelerometer, *AIP Conference Proceeding*, (2018). <https://doi.org/10.1063/1.5022933>
- [6]. G. M. Guzman-Acevedo, G. E. Vazquez-Becerra, GPS, Accelerometer, and Smartphone Fused Smart Sensor for SHM on Real-Scale bridges, *Advances in Civil Engineering*, (2019), <https://doi.org/10.1155/2019/6429430>
- [7]. V. H. Le, M. Nishio, Time-series analysis of GPS monitoring data from a long-span bridge considering the global deformation due to air temperature changes, *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 5 (2015) 415–425. <https://doi.org/10.1007/s13349-015-0124-9>
- [8]. Hồ Thị Lan Hương, Lê Văn Hiến, Nghiên cứu sự tương quan giữa gió, nhiệt độ và chuyển vị của một số vị trí trên cầu Cần Thơ, *Tạp chí khoa học Giao thông vận tải*, 54 (2016).
- [9]. Hồ Thị Lan Hương, Lê Văn Hiến, Nghiên cứu sự tương quan giữa gió, nhiệt độ và chuyển vị của một số vị trí trên cầu Cần Thơ, *Tạp chí khoa học Giao thông vận tải*, 55 (2016).
- [10]. V. H. Le, M. Nishio, Structural change monitoring of a cable-stayed bridge by time-series modeling of the global thermal deformation acquired by GPS monitoring, *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 9 (2019) 689-701. <https://doi.org/10.1007/s13349-019-00360-9>
- [11]. Geo Matching, Which is Better Among Static Survey, RTK or PPK? <https://geo-matching.com/articles/which-is-better-among-static-survey-rtk-or-ppk>. Truy cập ngày 8 tháng 9 năm 2024