

DOI:10.22144/ctujos.2025.212

ỨNG DỤNG PHƯƠNG PHÁP GNSS TĨNH VÀ ĐỘNG THỜI GIAN THỰC TRONG QUAN TRẮC CHUYỂN VỊ BẢN MẶT CẦU CÔNG TRÌNH CẦU DÂY VĂNG

Nguyễn Việt Hà¹ và Vũ Ngọc Quang^{2*}

¹Khoa Trắc địa Bản đồ và Quản lý đất đai, Trường Đại học Mô - Địa chất, Việt Nam

²Khoa Công trình, Trường Đại học Công nghệ Giao thông Vận tải, Việt Nam

*Tác giả liên hệ (Corresponding author): quangvn@utt.edu.vn

Thông tin chung (Article Information)

Nhận bài (Received): 03/04/2025

Sửa bài (Revised): 27/04/2025

Duyệt đăng (Accepted): 05/08/2025

Title: Application of static and real-time kinematic GNSS methods in monitoring deck displacement of cable-stayed bridge structure

Author: Nguyen Viet Ha¹ and Vu Ngoc Quang^{2*}

Affiliation(s): ¹Faculty of Geomatics and Land Administration, Ha Noi University of Mining and Geology, Viet Nam; ²Engineering faculty, University of Transport Technology, Viet Nam

TÓM TẮT

Bài báo được thực hiện nhằm nghiên cứu, phân tích hiệu suất quan trắc công trình cầu dây văng sử dụng hệ định vị vệ tinh toàn cầu với hai phương pháp đo tĩnh xử lý sau và đo động thời gian thực với máy thu Topcon MR2. Trong nghiên cứu, kết quả từ một anten quan trắc trên công trình cầu dây văng trong thời gian 9 ngày từ 21/7/2022 đến 29/7/2022 đã được sử dụng với tổng số lượng 216 trị đo, thời gian đo tĩnh của mỗi ca là một giờ đồng hồ. Với phương pháp đo động thời gian thực, 86400 trị đo, ở tần suất 1 giây đã được sử dụng trong nghiên cứu. Kết quả phân tích cho thấy phương pháp đo tĩnh có biên độ dao động nhỏ hơn nhiều lần so với phương pháp đo động thời gian thực xét trong thời gian một ngày và cả khi lấy trung bình theo thời gian một giờ đồng hồ với phương pháp đo động. Về xu hướng, cả hai đều thể hiện cùng một xu hướng khi cho kết quả dao động theo phương ngang ngang cầu là nhỏ nhất, tiếp theo là phương ngang dọc cầu và cuối cùng là phương đứng.

Từ khóa: Dao động, GNSS động, GNSS tĩnh, quan trắc cầu

ABSTRACT

The paper analyses the monitoring performance of a cable-stayed bridge using the Global Navigation Satellite System with post-processed static and real-time kinematic methods utilising a Topcon MR2 receiver. Data is collected from a monitoring antenna on a stayed cable bridge for 9 days from 21/7/2022 to 29/7/2022, with 216 static observations, one-hour sessions. Regarding the real-time kinematic method, the study uses 86400 one-second interval observations. The analysis results indicate that the static measurement exhibits significantly more minor fluctuations than the real-time kinematic measurement method, both over one day and when averaged over one-hour intervals. In terms of trend, both methods exhibit the same overall trend. Specifically, the smallest oscillations are observed in the transverse direction of the bridge, followed by the longitudinal direction, with the largest oscillations occurring in the vertical direction.

Keywords: Bridge monitoring, Oscillation, RTK-GNSS, static GNSS

1. GIỚI THIỆU

Trên thế giới có nhiều hệ thống định vị vệ tinh đã và đang được sử dụng rộng rãi trong các lĩnh vực. (Langley et al., 2015). Sự phát triển của chúng đã mở rộng các ứng dụng của công nghệ này trong tất cả các lĩnh vực trong đó có lĩnh vực quan trắc công trình cầu. Các máy thu GNSS hiện đại ngày nay có khả năng thu tín hiệu từ nhiều hệ thống định vị vệ tinh khác nhau, hỗ trợ nhiều kênh thu và tần số giúp cải thiện đáng kể độ chính xác định vị và mở rộng phạm vi ứng dụng từ khảo sát, thi công, quan trắc đến dẫn đường với hiệu suất cao hơn (Unicore Communications, 2022). Đặc biệt, việc tích hợp các tính năng IoT đã mở ra khả năng tự động hóa toàn diện, từ cài đặt, thu thập dữ liệu, truyền tải dữ liệu đến lưu trữ trên các máy chủ, phục vụ cho quá trình xử lý sau (ComNav Technology Ltd., 2020). Nhờ các tính năng tiên tiến này, hệ thống GNSS có thể thực hiện quan trắc tự động với các anten lắp đặt trên cầu theo thời gian thực (Vu et al., 2023), phương pháp đo động thời gian thực (GNSS-RTK) qua kết nối 4G hoặc radio đã được sử dụng. Đồng thời, các máy thu cũng có khả năng ghi lại dữ liệu đo tĩnh tại các trạm phục vụ xử lý dữ liệu hậu kỳ.

Với đặc điểm kết cấu nhịp dài, dầm cầu được đỡ bởi hệ thống dây văng kéo từ các trụ tháp (Lin & Yoda, 2017) dẫn đến việc các thành phần như nhịp cầu và trụ tháp chịu ảnh hưởng đáng kể từ dao động trong cả giai đoạn thi công và khai thác. Hệ thống quan trắc sức khỏe kết cấu (SHMS) bao gồm nhiều thành phần, có thể chia thành: hệ thống quan trắc trạng thái kết cấu (ứng suất, độ võng), hệ thống quan trắc khí tượng (nhiệt độ, độ ẩm, tốc độ gió), hệ thống quan trắc chuyển vị và biến dạng, cùng hệ thống giám sát hình ảnh (Luong, 2013). Kết quả nghiên cứu của Bisby (2006) cho thấy mức độ phức tạp của hệ thống SHMS được chia thành bốn cấp độ và trong tất cả các cấp độ này, thiết bị GNSS đều đóng vai trò thiết yếu để thực hiện nhiệm vụ quan trắc chuyển vị.

Với sự phát triển của các thuật toán, phương pháp GNSS-RTK được ứng dụng ngày càng nhiều trong các lĩnh vực của đời sống sản xuất (Wang et al., 2023). Trong lĩnh vực lâm nghiệp, phương pháp này hỗ trợ và kiểm soát công tác vận hành, khai thác rừng một cách chính xác (Cho et al., 2024). Kết quả nghiên cứu của Lewicka et al. (2022) đã đánh giá độ chính xác dẫn đường tự động bằng giải pháp GNSS-RTK cho máy bay không người lái ở các tốc độ 10 km/h, 20 km/h và 30 km/h. Kết quả của nghiên cứu có ý nghĩa quan trọng trong việc đảm bảo an toàn định vị, điều hướng và có khả năng áp dụng trong

nhiều lĩnh vực như khảo cổ, kiến trúc, quản lý rừng, bay chụp, nông nghiệp chính xác hay quan trắc phương tiện giao thông. Với lĩnh vực quan trắc, kỹ thuật RTK được cho là một lựa chọn tốt nhất trong phạm vi nhỏ hơn 15 km, kỹ thuật PPP-RTK cung cấp độ chính xác vượt trội khi tính đến phạm vi và mức độ chênh cao lớn (Huang et al., 2023). Sự kết hợp của các trị đo động thời gian thực kết hợp với các trị đo cảm biến còn có thể áp dụng để phân tích dịch chuyển động và tần số phương thức trong quan trắc cầu nhịp dài (Niu et al., 2023). Kết quả nghiên cứu của Du et al. (2020) còn cho thấy khả năng sử dụng phương pháp đo động kết hợp kỹ thuật đồng bộ và không đồng bộ thời gian để đánh giá độ ổn định mốc tham chiếu.

Ở trong nước, phương pháp đo tĩnh có thời gian thu thập dữ liệu dài hơn, có độ chính xác cao hơn, được ứng dụng trong nhiều bài toán đo đạc khảo sát và đã được quy định trong nhiều tiêu chuẩn và thông tư hiện hành, làm cơ sở triển khai, đánh giá, nghiệm thu các nội dung đo đạc (Ministry of Construction, 2012; Ministry of Natural Resources and Environment, 2015). Trong khi đó, phương pháp GNSS-RTK với các phương pháp trạm base đơn hay mạng lưới NET-RTK mặc dù có sự phát triển sau so với các nước tiên tiến nhưng cũng đã được sử dụng rộng rãi thời gian gần đây và được tiêu chuẩn hóa (Phan et al., 2018; Ministry of Natural Resources and Environment, 2020) để phục vụ công tác đo đạc thành lập bản đồ, được đánh giá cao về hiệu suất và độ chính xác (Tran & Luong, 2024). Lợi thế lớn nhất của phương pháp GNSS-RTK là cung cấp số hiệu chỉnh thời gian thực. Do đó, các kết quả đạt được là nhanh chóng, nâng cao năng suất lao động. Tuy nhiên, độ chính xác của phương pháp này chịu ảnh hưởng bởi khoảng cách từ máy thu tới trạm cơ sở và một số yếu tố khác. Phương pháp GNSS-RTK trong quan trắc công trình cầu cũng có sự khác biệt so với các lĩnh vực khác, đặc biệt mức độ ảnh hưởng của các điều kiện như tải trọng bản thân công trình cầu, dao động theo các phương ngang, dọc, đứng của công trình cầu là rất lớn do cấu trúc mảnh, không cân đối giữa chiều dài và chiều rộng lại được nâng đỡ bởi hệ trụ tháp có chiều cao lớn, dây văng dài.

Hệ thống GNSS trong SHMS bao gồm một hoặc nhiều trạm cơ sở được đặt trên một nền móng ổn định và các trạm quan trắc gắn trên các kết cấu của công trình cầu. Các phương pháp kết nối và hoạt động giữa trạm cơ sở và trạm quan trắc có thể là phương pháp đo động thời gian thực, phương pháp đo tĩnh xử lý sau hoặc phương pháp PPK (Hofmann et al., 2008). Trong phương pháp GNSS-RTK, các phương pháp có thể được chia thành nhiều phương

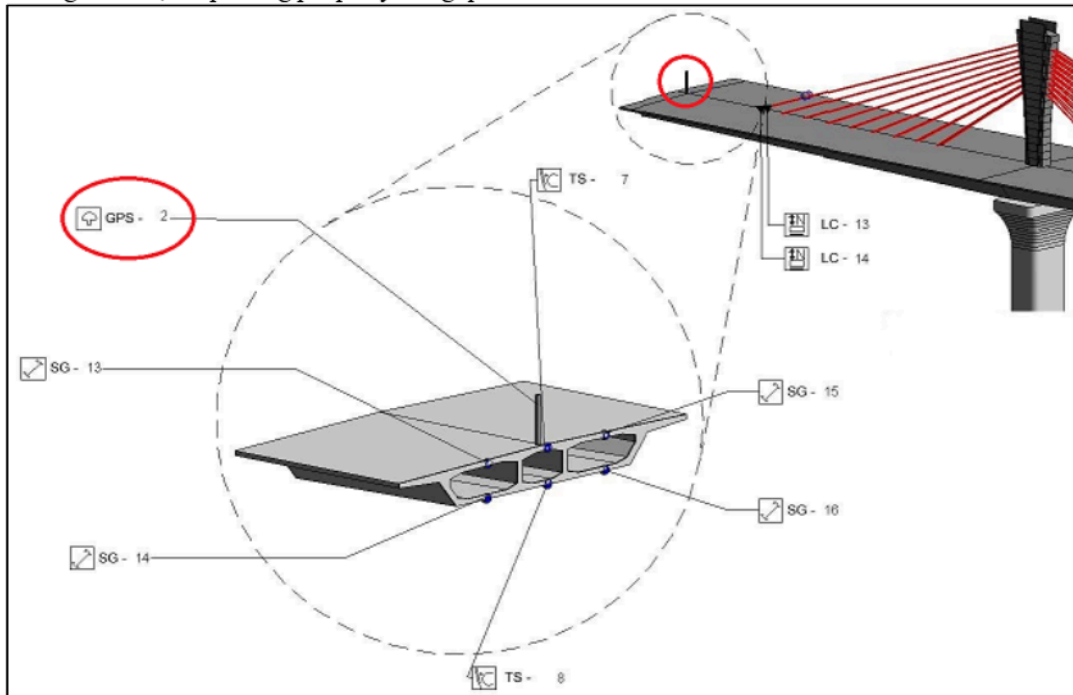
thức khác nhau như phương pháp trạm tham chiếu đơn, phương pháp mạng lưới RTK với nhiều kiểu khác nhau (El-Mowafy, 2012). Tuy nhiên do đặc thù của lĩnh vực quan trắc, số lượng trạm cơ sở thường là rất ít và do đó, phương pháp hoạt động phổ biến nhất là trạm base đơn hoặc đo tĩnh xử lý sau. Với mục tiêu quan trắc dài hạn để xem xét lượng dịch chuyển của công trình đồng thời nắm bắt kịp thời dao động của kết cấu, cả hai phương pháp đều cần phải được thực hiện đồng thời trong quá trình quan trắc. Trong bài báo, hai phương pháp này trong quan

trắc công trình cầu dây văng đã được nghiên cứu và so sánh để có lựa chọn phương pháp xử lý phù hợp với từng mục tiêu quan trắc.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Dữ liệu nghiên cứu

Trong nghiên cứu, dữ liệu được sử dụng theo GNSS-RTK và dữ liệu thu tĩnh đồng thời của một máy thu quan trắc lắp đặt trên bản mặt cầu dây văng như minh họa trong Hình 1.



Hình 1. Vị trí lắp đặt máy thu quan trắc

Máy thu quan trắc (GPS-2) lắp đặt trên bản mặt cầu được vận hành theo phương pháp GNSS-RTK trạm base đơn, khoảng cách tới trạm cơ sở trên bờ khoảng 890 m. Song song với quá trình thu thập dữ liệu tọa độ, độ cao theo thời gian thực, máy thu quan trắc và trạm cơ sở trên bờ đồng thời thu và lưu giữ số liệu đo tĩnh tự động với thời gian một giờ đồng hồ cho mỗi ca đo.

2.2. Phương pháp xử lý số liệu

Dữ liệu đo tĩnh được thu thập và xử lý trong thời gian 9 ngày liên tục từ ngày 21/07/2022 đến ngày 29/07/2022 với độ dài ca đo là một giờ đồng hồ, tương ứng với 24 ca đo/1 ngày. Dữ liệu đo động thời gian thực được thu với tần suất một giây trong ngày 21/07/2022. Tổng số lượng trị đo và phương pháp xử lý được thống kê trong Bảng 1.

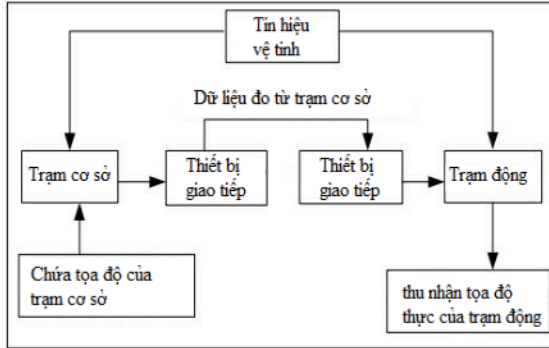
Bảng 1. Số lượng trị đo và phương pháp xử lý

Phương pháp	Số lượng trị đo	PP xử lý
Đo tĩnh	216	Trimble Business Center
Đo động	86400	Thời gian thực

Dữ liệu đo tĩnh được bình sai bằng phần mềm Trimble Business Center, dữ liệu đo động được thu thập theo thời gian thực. Cả hai loại dữ liệu được lưu trữ trên máy chủ lâu dài để phục vụ công tác phân tích hậu kỳ. Kết quả dao động từ hai phương pháp được so sánh và đánh giá. Việc xét riêng về phương pháp GNSS-RTK, đây là kỹ thuật định vị GNSS tương đối dựa trên trị đo pha sóng tải với mục tiêu đạt được độ chính xác cỡ cm trong thời gian thực (Heo et al., 2009). Kỹ thuật này được giới thiệu lần

đầu vào những năm 90 và đã được sử dụng rất rộng rãi cho các ứng dụng có yêu cầu độ chính xác cao.

Các hợp phần của hệ thống GNSS-RTK bao gồm một trạm tham chiếu, một trạm di động và đường truyền dữ liệu giữa hai trạm. Các hợp phần của hệ thống được mô tả trong Hình 2 (Zhang et al., 2020).



Hình 2. Các hợp phần của phương pháp RTK

Phương pháp GNSS-RTK phát triển từ phương pháp RTK trạm base đơn đến phương pháp NRTK (Net RTK) nhằm khắc phục các ảnh hưởng của khoảng cách từ trạm base tới trạm thu di động. Theo công bố của Cina et al. (2015), khoảng cách giữa các trạm tham chiếu có thể lên tới 70 - 80 km, còn theo El-Mowafy (2012), khoảng cách có thể lên tới 100 km và các kỹ thuật định vị cũng rất đa dạng.

Phương pháp GNSS-RTK sử dụng trạm base đơn yêu cầu ít nhất hai máy thu. Trong đó, một máy thu được thiết lập tại một điểm đã biết tọa độ, máy thu còn lại được thiết lập tại điểm cần quan trắc. Giữa hai máy thu cần duy trì kết nối để truyền số hiệu chỉnh bằng phương thức radio hay 4G. Khoảng

cách giữa hai trạm ở một trạm A, tại thời điểm t_0 được mô tả trong công thức 1 (Hofmann et al., 2008).

$$\lambda^S \Phi_A^S(t_0) = \rho_A^S(t_0) + \Delta \rho_A^S(t_0) + \Delta \rho^S(t_0) + \Delta \rho_A(t_0) + \lambda^S N_A^S \quad (1)$$

$\rho_A^S(t_0)$ là khoảng cách hình học, $\Delta \rho_A^S(t_0)$ là độ lệch phụ thuộc vệ tinh - máy thu, $\Delta \rho^S(t_0)$ là độ lệch chỉ phụ thuộc vệ tinh, $\Delta \rho_A(t_0)$ là độ lệch chỉ phụ thuộc máy thu, N_A^S là sự không chắc chắn về pha. Kết quả cho khoảng cách theo pha hiệu chỉnh được mô tả trong công thức 2.

$$\lambda^S \Phi_B^S(t)_{corr} = \rho_B^S(t) + \Delta \rho_{AB}(t) + \lambda^S N_{AB}^S \quad (2)$$

Vị trí của điểm B được định vị với khoảng cách theo pha hiệu chỉnh.

Kết quả đầu ra của cả hai phương pháp là các giá trị tọa độ, độ cao. Các giá trị đầu ra được sử dụng để tính toán dao động theo công thức 3.

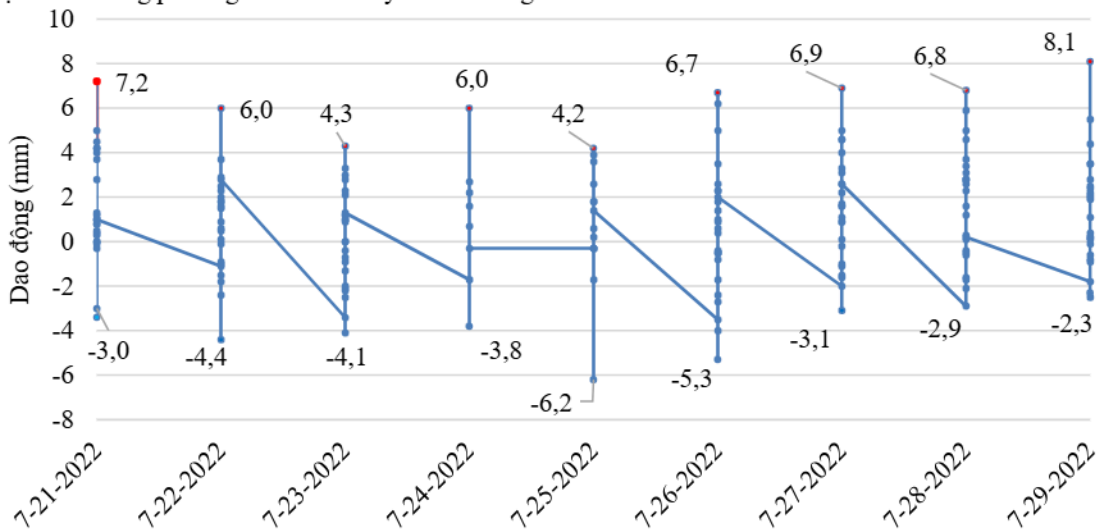
$$\begin{aligned} \Delta X_i &= X_i - X_0 \\ \Delta Y_i &= Y_i - Y_0 \\ \Delta Z_i &= Z_i - Z_0 \end{aligned} \quad (3)$$

Trong đó: ΔX_i , ΔY_i , ΔZ_i là các giá trị dao động theo các phương tương ứng; X_i , Y_i , Z_i là các giá trị tọa độ tương ứng tại thời điểm i ; X_0 , Y_0 , Z_0 là các giá trị tọa độ tương ứng tại thời điểm ban đầu.

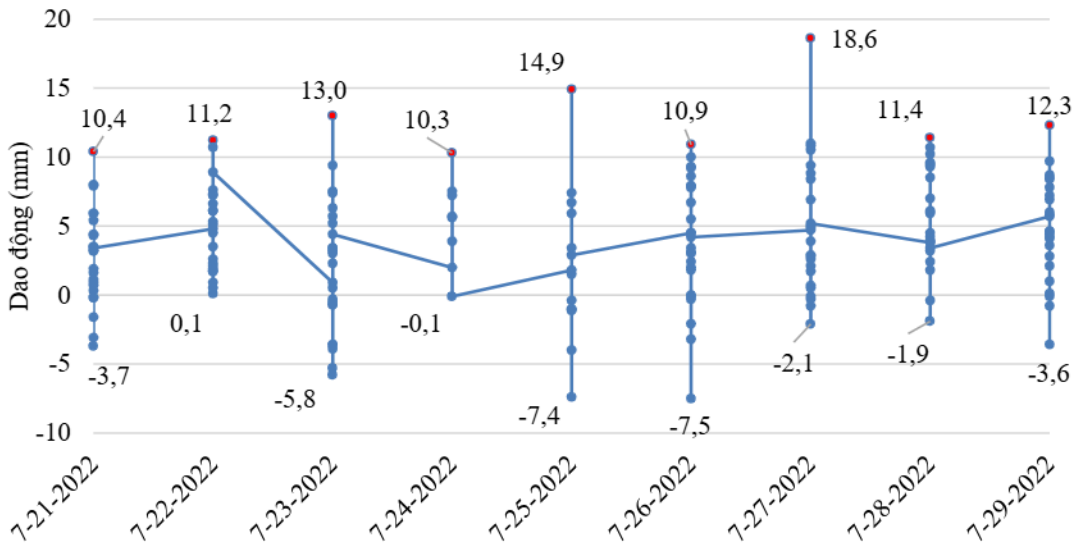
3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Kết quả xử lý dữ liệu đo tĩnh

Kết quả dao động theo ba phương bao gồm phương ngang ngang cầu, phương ngang dọc cầu và phương đứng theo phương pháp đo tĩnh xử lý sau được minh họa trong các Hình 3, Hình 4 và Hình 5.



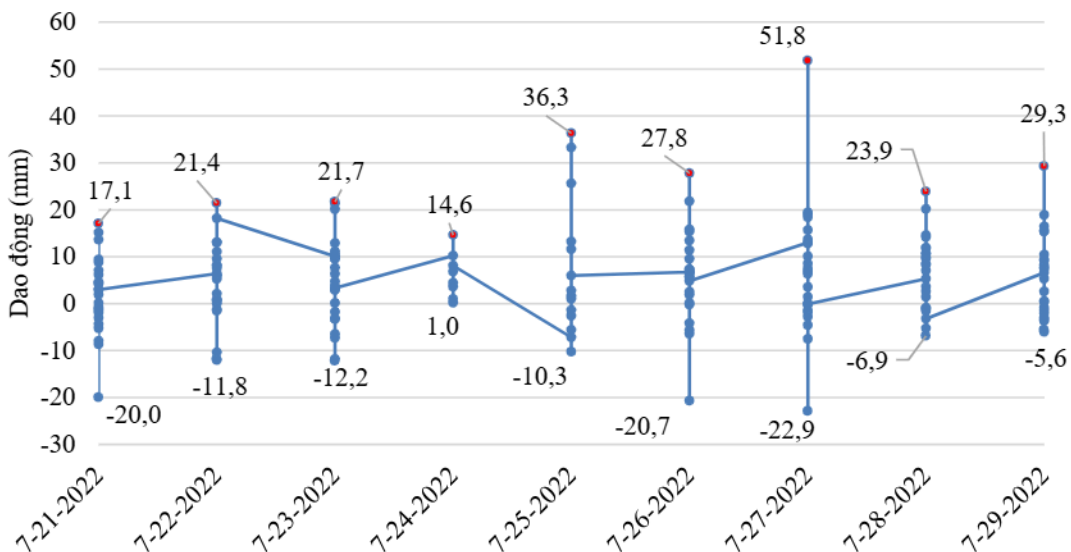
Hình 3. Dao động theo phương ngang ngang cầu



Hình 4. Dao động theo phương ngang dọc cầu

Biên độ dao động theo phương ngang ngang cầu được xác định từ phương pháp đo tĩnh, với thời gian ca đo một giờ đồng hồ có giá trị nhỏ và khá đồng đều khi so sánh các ngày với nhau từ 8,4 mm đến 12,0 mm.

Dao động theo phương ngang dọc cầu có giá trị lớn hơn so với phương ngang ngang cầu. Biên độ theo các ngày thay đổi từ 11,1 mm đến 22,3 mm. Trong tất cả các ngày, mức độ dao động, biên độ của phương ngang dọc cầu đều lớn hơn phương ngang ngang cầu.



Hình 5. Dao động theo phương đứng cầu

Dao động theo phương đứng của cầu có giá trị biên độ lớn hơn nhiều so với các biên độ dao động trong phương ngang, từ 13,6 mm đến 74,7 mm. Về mặt kết cấu và mô phỏng dao động, các giá trị dao động nằm bắt được từ phương pháp đo tĩnh theo các phương là phù hợp. Tuy nhiên, các ngày có mức độ dao động lớn nhất, nhỏ nhất là không đồng nhất mà

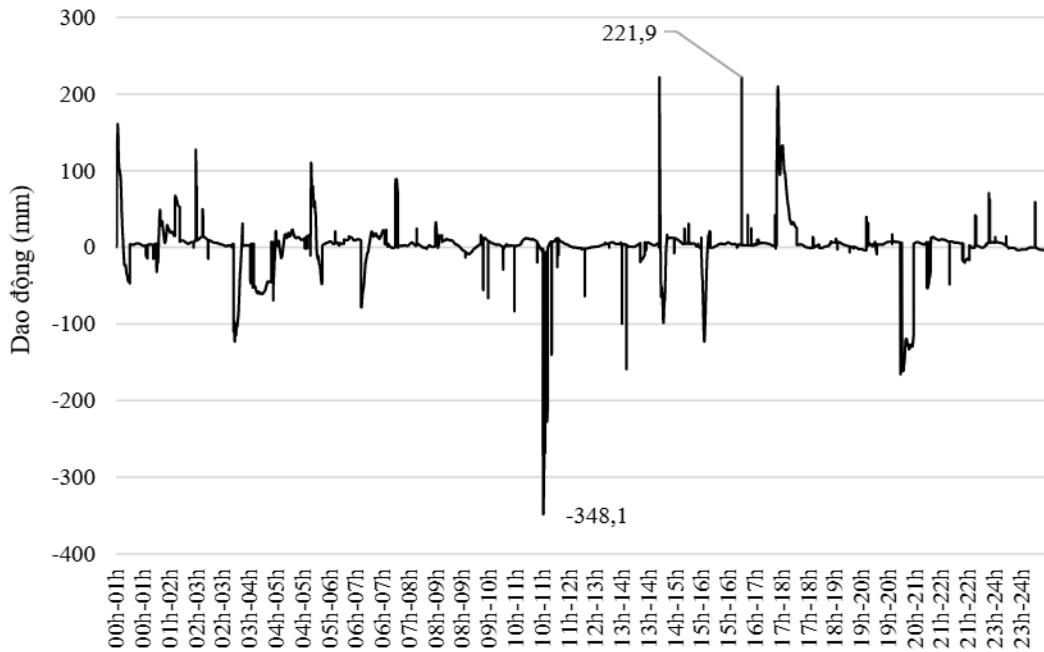
nằm trong các ngày khác nhau. Việc so sánh biên độ dao động lớn nhất theo phương ngang cho thấy giá trị này là rất nhỏ (3,9 mm).

3.2. Kết quả xử lý dữ liệu đo động

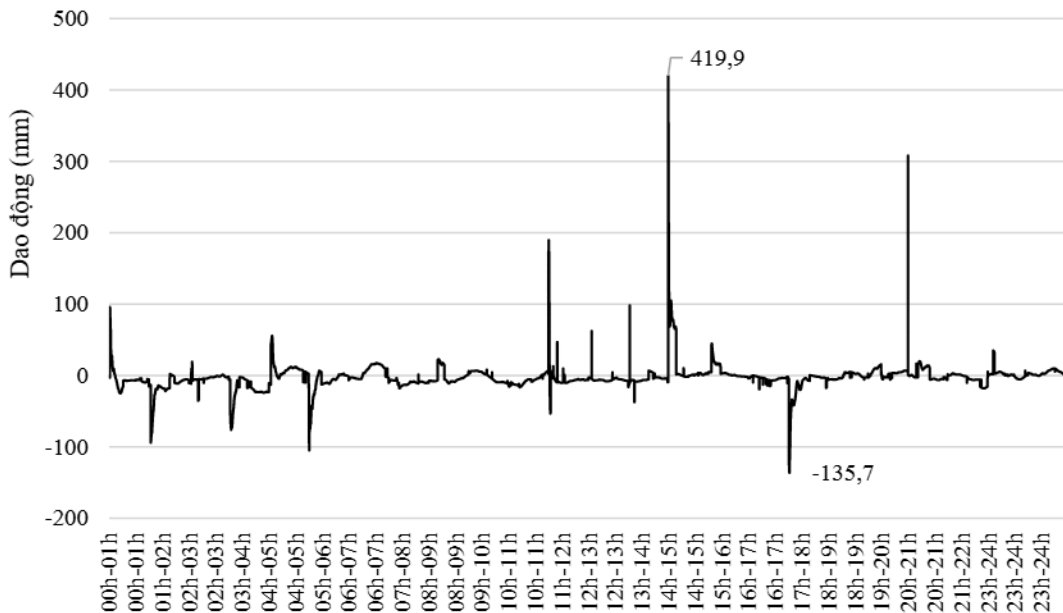
Kết quả dao động sử dụng phương pháp đo động thời gian thực theo ba phương được minh họa trong các Hình 6, Hình 7 và Hình 8. Các kết quả tính toán

theo hệ thống được hiển thị thời gian thực. Kết quả quan sát dao động theo phương ngang ngang cầu trong ngày 21/07/2022 ở tần suất một giây cho thấy

biên độ dao động lên tới 570 mm lớn hơn gấp 57 lần so với phương pháp đo tĩnh là 10,2 mm. Dao động phương ngang dọc cầu được minh họa trong Hình 7.



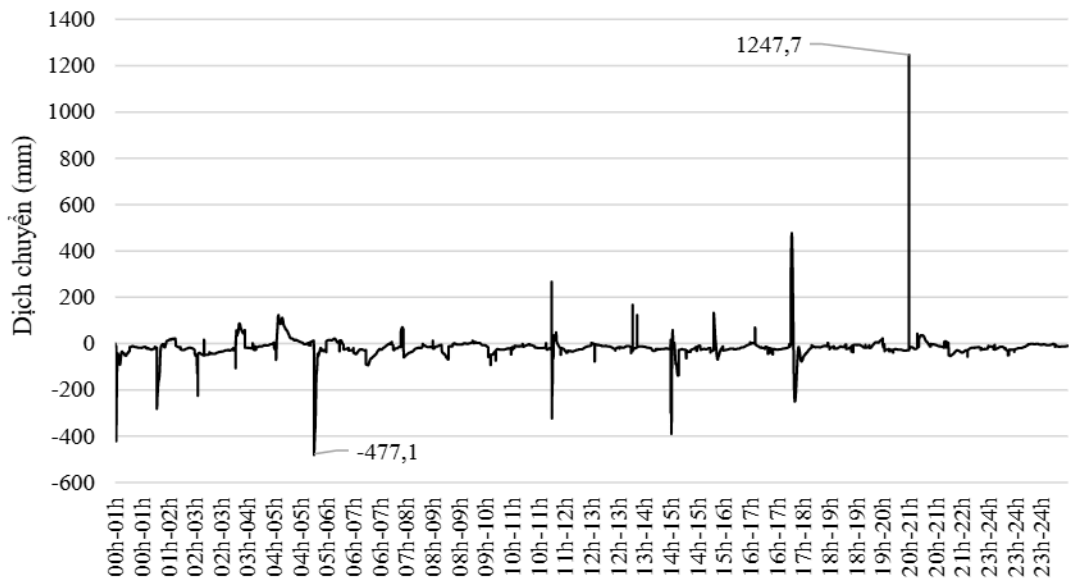
Hình 6. Dao động theo phương ngang ngang cầu (GNSS-RTK)



Hình 7. Dao động theo phương ngang dọc cầu (GNSS-RTK)

Dao động theo phương ngang dọc cầu cũng có giá trị lớn, biên độ dao động lên tới 555,5 mm, tương đương với dao động theo phương ngang ngang cầu

và lớn hơn khoảng 15 lần so với biên độ 37,1 mm trong cùng ngày từ phương pháp đo tĩnh. Tiếp theo, dao động theo phương đứng được minh họa trong Hình 8.



Hình 8. Dao động theo phương đứng cầu (GNSS-RTK)

Biên độ dao động theo phương đứng ghi nhận được từ phương pháp GNSS-RTK từ tệp dữ liệu GGA (Trimble, 2003) đầu ra có biên độ rất lớn, lên tới 1724,8 mm. Giá trị này chứng tỏ trong bản ghi dữ liệu có thể bao gồm các giá trị ngoài lời giải fix dẫn đến kết quả có tồn tại các giá trị ngoại lai và cần được loại bỏ (Vu et al., 2023; Vu & Le, 2022; Le et al., 2021).

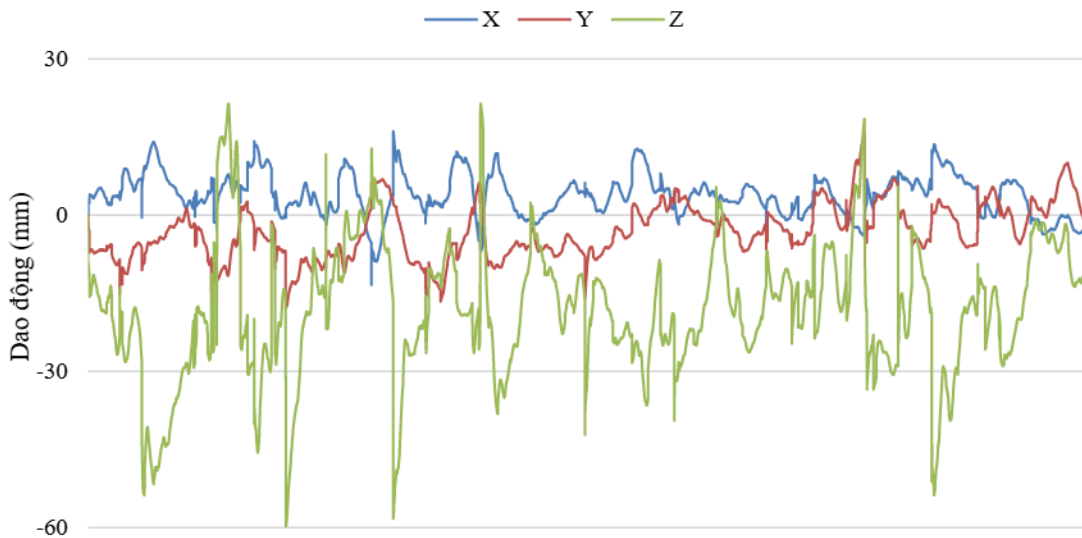
Kết quả được xem xét trong tệp dữ liệu đầu ra GGA (hình 9) và tìm các lời giải có thể xuất hiện trong trường dữ liệu thứ 6 có ký hiệu Q. Theo định nghĩa của Trimble (2003), trường dữ liệu thứ 6 là các dạng lời giải bao gồm lời giải fix ($Q = 1$), lời giải float ($Q = 2$) và các lời giải khác. Trong bài toán định vị động thời gian thực độ chính xác cao, lời giải fix được sử dụng là chủ yếu, đặc biệt trong quan trắc.

2219	345691,000	11,4281	889,6049	18,6980	1	9
2219	345692,000	11,4281	889,6049	18,6980	1	9
2219	345693,000	11,4280	889,6049	18,6978	1	9
2219	345694,000	11,4280	889,6049	18,6977	1	9
2219	345695,000	11,4280	889,6049	18,6978	1	9
2219	345696,000	11,4280	889,6049	18,6977	1	9
2219	345697,000	11,4280	889,6049	18,6976	1	9
2219	345698,000	11,4279	889,6049	18,6976	1	9
2219	345699,000	11,5646	889,7041	18,2881	2	9
2219	345700,000	11,5631	889,7041	18,2989	2	9
2219	345701,000	11,5615	889,7036	18,2988	2	9
2219	345702,000	11,5606	889,7028	18,2977	2	9
2219	345703,000	11,5574	889,7032	18,2988	2	9

Hình 9. Một đoạn dữ liệu GGA

Trong tệp dữ liệu đầu ra GGA của thiết bị định vị MR2, Topcon có tồn tại hai giá trị $Q = 1$ và $Q = 2$, tổng số lời giải có giá trị $Q = 2$ lên tới 20 943 giá trị, chiếm 24,24% trên tổng số 86400 giá trị ghi nhận

được từ tệp dữ liệu ban đầu. Việc loại bỏ 20 943 giá trị có $Q = 2$ biên độ dao động theo ba phương đã được tiến hành với lời giải fixed được minh họa trong Hình 10.

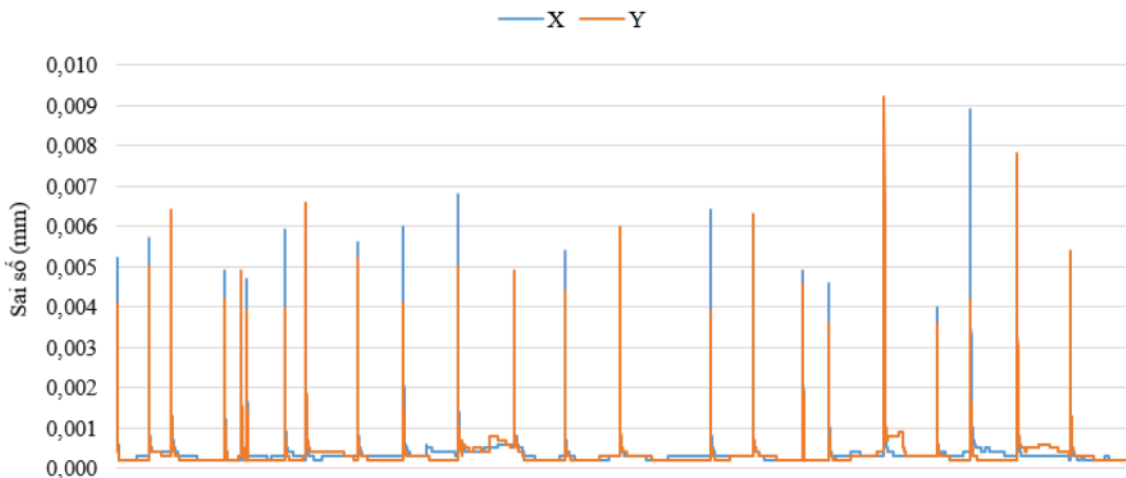


Hình 10. Dao động theo ba phương sau lọc của phương pháp đo động thời gian thực

Biên độ dao động theo cả ba phương giảm đi nhiều lần sau khi loại bỏ các giá trị rời giải float ($Q = 2$). Các giá trị biên độ theo ba phương lần lượt là 29,5 mm, 33,3 mm và 81,2 mm. Kết quả so sánh với 24 kết quả đo tĩnh trong cùng ngày 21/07/2022 biên độ dao động lần lượt là 10,2 mm, 14,1 mm và 74,7 mm, các giá trị dao động từ hai phương pháp theo ba phương của công trình cầu là thống nhất khi phương ngang ngang cầu có giá trị nhỏ nhất, phương ngang dọc cầu có độ lớn thứ hai và phương đứng có giá trị lớn nhất. Mặc dù các giá trị độ lệch về biên độ dao động đã được giảm đáng kể nhưng vẫn còn một khoảng cách nhất định. Sự sai khác này có thể

được giải thích theo hai khía cạnh. Một là: phương pháp đo tĩnh trong thời gian dài (1 giờ), các kết quả xử lý sau được tính toán trung bình từ một số lượng lớn trị đo với tần suất ghi tín hiệu nhất định trong khi phương pháp đo động cho ra kết quả thời gian thực, tần suất cập nhật dữ liệu nhanh hơn, có thể nắm bắt các dao động chi tiết hơn. Ngoài ra theo lý thuyết, phương pháp đo tĩnh luôn có thông số về độ chính xác cao hơn.

Sai số theo hai phương X, Y của tập hợp các trị đo động thời gian thực đạt lời giải fix được minh họa trong Hình 11.



Hình 11. Các giá trị sai số hai phương ngang và dọc cầu

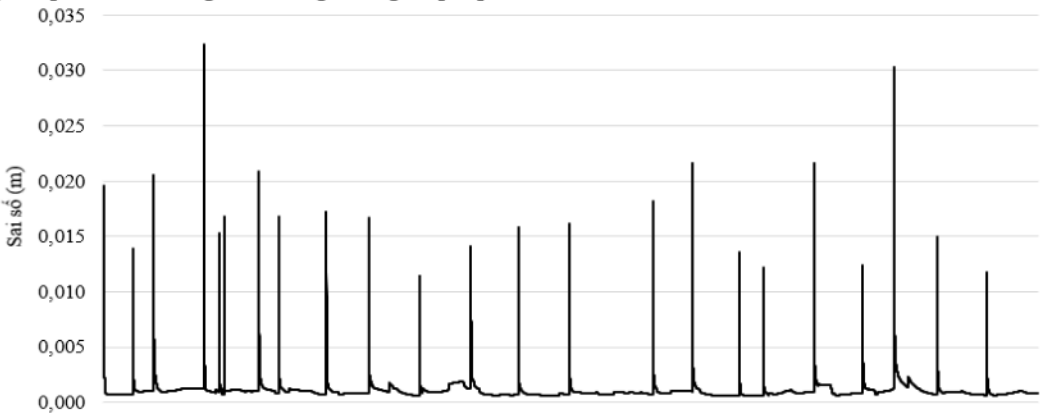
Các giá trị sai số mật bằng theo hai phương của phương pháp đo động thời gian thực đều rất nhỏ

(nhỏ hơn 10 mm), các giá trị này được so sánh với tham số của thiết bị và khoảng cách từ trạm base (nhỏ hơn 1 km) trên bờ tới điểm quan trắc là phù

hợp. Các giá trị sai số trong phương đứng được minh họa trong Hình 12.

Với phương đứng, các giá trị sai số của các trị đo có lời giải fix lớn hơn so với sai số theo phương ngang và phản ánh đúng khả năng của giải pháp

GNSS-RTK trong xác định các yếu tố độ cao. Bài toán thống kê mô tả được sử dụng để xem xét một số đặc trưng của dãy dữ liệu dao động theo ba phương, kết quả thống kê được trình bày trong Bảng 2.



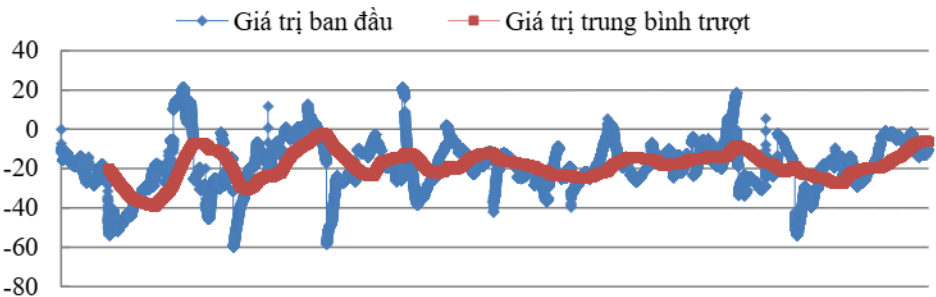
Hình 12. Các giá trị sai số phương đứng cầu

Bảng 2. Một số chỉ tiêu thống kê mô tả

Thông số	X	Y	H
Mean (mm)	3,87	-3,14	-18,23
Standard Error (mm)	0,02	0,02	0,05
Median (mm)	3,70	-3,70	-18,40
Mode (mm)	3,70	-5,50	-19,20
Standard Deviation (mm)	4,02	5,21	12,71
Sample Variance (mm ²)	16,12	27,12	161,48
Kurtosis	0,12	-0,08	0,79
Skewness	0,04	0,26	-0,07
Range (mm)	29,50	33,30	81,20
Minimum (mm)	-13,40	-17,70	-59,80
Maximum (mm)	16,10	15,60	21,40

Kết quả quan sát các tham số thống kê mô tả theo ba phương cho thấy các giá trị trung bình (*mean*) và giá trị trung vị tương ứng có giá trị rất gần nhau. Giá trị xuất hiện nhiều nhất (*mode*) trong cả ba thành phần cũng có giá trị tương đương. Các giá trị độ lệch chuẩn cũng tăng dần tương đương với mức độ dao động tăng dần theo ba phương. Kết quả quan sát

biểu đồ dao động của phương đứng trong Hình 10 có thể thấy các giá trị đầu ra không thể hiện được quy luật hay xu hướng nào của công trình theo phương đứng. Bài toán trung bình trượt với kích thước cửa sổ 3600 (*tương đương với số lượng trị đo trong một giờ đồng hồ*) được sử dụng để xem xét dao động theo phương đứng.



Hình 13. Phương pháp trung bình trượt

Bài toán trung bình trượt với kích thước cửa sổ 3600 đã được sử dụng để có thể hiển thị dạng dao động rõ ràng hơn. Biên độ dao động cũng giảm đi đáng kể khi sử dụng bài toán trung bình trượt với kích thước cửa sổ $M = 3600$, còn khoảng 40 mm.

4. KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu, việc so sánh, đánh giá hai phương pháp đo tĩnh xử lý sau và đo động thời gian thực trong quan trắc công trình cầu với công nghệ định vị vệ tinh đã được thực hiện. Dựa trên kết quả nghiên cứu, một số kết luận sau được đưa ra:

Kết quả từ hai phương pháp đo tĩnh và đo động thời gian thực với lời giải fix ở khoảng cách gần là tương đương về biên độ dao động, có độ chính xác tương đương nhau.

Phương pháp đo tĩnh được áp dụng với thời gian thu dữ liệu dài và xử lý sau có độ chính xác cao hơn nhưng không thể ghi nhận hết các mức dao động so với phương pháp đo động thời gian thực ở tần suất

cập nhật dữ liệu một giây. Tần suất cập nhật này có ý nghĩa quan trọng trong quan trắc, phân tích, đánh giá mức độ dao động của công trình cầu. Với các máy thu có tần suất cập nhật dữ liệu lớn hơn (10 Hz, 20 Hz), thời gian thu dữ liệu dài hơn các mức độ dao động hoàn toàn có thể được ghi nhận đầy đủ và mô phỏng chi tiết hơn.

Tuy nhiên, dựa trên tính chất dao động phức tạp của công trình cầu và các ảnh hưởng của các điều kiện ngoại cảnh tới dao động, tới kết quả của phương pháp đo động thời gian thực, đây trị đo có thể chứa các giá trị ngoại lai (*kể cả trong trường hợp chỉ sử dụng lời giải fixed*). Do đó, để có kết quả chính xác hơn, việc kết hợp với các dữ liệu cảm biến dao động có độ nhạy cao và các cảm biến khí tượng trong quá trình phân tích đánh giá là cần thiết.

LỜI CẢM ƠN

Bài báo nghiên cứu nhận được sự hỗ trợ tài chính của đề tài mã số B2004-MDA-08 từ Bộ giáo dục và đào tạo.

TÀI LIỆU THAM KHẢO (REFERENCES)

- Bernhard Hofmann, W., Herbert, L., & Wasle, E. (2008). *GPS, GLONASS, GALILEO & more*. SpringerWienNewYork.
- Bisby, L. A. (2006). *An Introduction to Structural Health Monitoring*. Samco
- Luong, C. M. (2013). Long-term monitoring system for large bridge projects. *Proceeding of the 2013 Annual Scientific Conference*, 31–33 (in Vietnamese).
- Cho, H. M., Park, J. W., Lee, J. S., & Han, S. K. (2024). Assessment of the GNSS-RTK for Application in Precision Forest Operations. *Remote Sensing*, 16(1), 148–167. <https://doi.org/10.3390/rs16010148>
- Cina, A., Dabove, P., Manzino, A. M., & Piras, M. (2015). Network Real Time Kinematic (NRTK) Positioning – Description, Architectures and Performances. *Satellite Positioning - Methods, Models and Applications*, 23–45. <https://doi.org/10.5772/59083>
- ComNav Technology Ltd. (2020). *K803 GNSS Module 30*. <https://www.comnavtech.com/uploads/soft/20240530/e17361cc7d0801f76e359053fd704bb5.pdf>
- Du, Y., Huang, G., Zhang, Q., Gao, Y., & Gao, Y. (2020). Asynchronous RTK method for detecting the stability of the reference station in GNSS deformation monitoring. *Sensors*, 20(5), 1320–1331. <https://doi.org/10.3390/s20051320>
- El-Mowafy, A. (2012). Precise Real-Time Positioning Using Network RTK. In Jin, S. (Ed.), *Global Navigation Satellite Systems: Signal, Theory and Applications* (161–187). InTech. <https://doi.org/10.5772/1134>
- Heo, Y., Li, B., Lim, S., & Rizos, C. (2009). Development of a network real-time kinematic processing platform. *22nd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*, 3647–3655. Curran Associates, Inc.
- Huang, G., Du, S., & Wang, D. (2023). GNSS techniques for real-time monitoring of landslides: a review. *Satellite Navigation*, 4(1), 5–14. <https://doi.org/10.1186/s43020-023-00095-5>
- Langley, R. B., Teunissen, P. J. G., & Montenbruck, O. (2015). *An introduction to GNSS: GPS, GLONASS, BeiDou, Galileo and Other Global Navigation Satellite Systems* (Second Ed.). NovAtel.
- Lewicka, O., Specht, M., & Specht, C. (2022). Assessment of the Steering Precision of a UAV along the Flight Profiles Using a GNSS RTK Receiver. *Remote Sensing*, 14(23), 1–16. <https://doi.org/10.3390/rs14236127>
- Lin, W., & Yoda, T. (2017). Cable-stayed bridges. In Weiwei Lin, Teruhiko Yoda (Ed), *Bridge Engineering Classifications, Design Loading, and Analysis Methods* 175–194. Elsevier.

- <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804432-2.00010-4>
- Phan, M. N., Nguyen, A. T., & Tran, T. A. (2018). Innovation of Surveying technology, determining coordinates and altitudes based on the application of CORS station services in Vietnam. *National Conference on Surveying and Mapping Science*, 1–10 (in Vietnamese).
- Ministry of Construction. (2012). *Technical of measuring and Processing GPS data in engineering survey* (in Vietnamese).
- Ministry of Natural Resources and Environment. (2015). Circular No. 68/2015/TT-BTNMT of the Ministry of Natural Resources and Environment: Technical regulations for direct terrain measurement to serve the establishment of topographic maps and geographic database at 1:500 scale, 1:1000, 1:2000, 1:5000 (in Vietnamese).
- Ministry of Natural Resources and Environment. (2020). *Technical regulations on national satellite positioning station network* (in Vietnamese).
- Vu, Q. N., Le, N. T., Luong, D. N. (2023). Analysis of bridge displacement using GNSS time-series data. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1289(1), 012034.
<https://doi.org/10.1088/1757-899x/1289/1/012034>
- Vu, Q. N., & Le, H. V. (2022). Filtering Outliers in GNSS Time Series Data in Real-Time Bridge Monitoring. In Nguyen-Xuan, T., Nguyen-Viet, T., Bui-Tien, T., Nguyen-Quang, T., De Roeck, G. (eds), *Proceedings of the 4th International Conference on Sustainability in Civil Engineering*, 657–663. Springer.
<https://doi.org/doi.org/10.1007/978-981-99-2345-8>
- Niu, Y., Li, J., Zhou, S., Liu, G., Xiang, Y., Zhang, H., & Shu, J. (2023). Dynamic displacement estimation and modal analysis of long-span bridges integrating multi-GNSS and acceleration measurements. *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*, 4(1).
<https://doi.org/10.1186/s43065-023-00077-6>
- Vu, Q. N., Nguyen, H. V., & Tran, T. D. (2023). Combination of GNSS, Accelerometer sensor, and IoT solution in bridge real-time monitoring. *Journal of Science and Technology in Civil Engineering*, 17(4V), 139–151 (in Vietnamese).
[https://doi.org/10.31814/stce.huce2023-17\(4v\)-12](https://doi.org/10.31814/stce.huce2023-17(4v)-12)
- Le, N. T., Männel, B., Jarema, M., Seemala, G. K., Heki, K., & Schuh, H. (2021). Selection of an optimal algorithm for outlier detection in GNSS time series.
<https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-1598>.
- Tran, T. D., & Luong, D. N. (2024). Study on the positioning efficiency of GNSS RTK for road profile surveys - case study in Vietnam. *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (JSTCE) - HUCE*, 18(2), 86–98.
[https://doi.org/10.31814/stce.huce2024-18\(2\)-07](https://doi.org/10.31814/stce.huce2024-18(2)-07)
- Trimble. (2003). *Trimble ® R7/R8 GPS Receiver User Guide*.
https://www.ngs.noaa.gov/corbin/class_description/TrimbleR7-R8_UserGuide.pdf
- Unicore Communications. (2022). *UM982 GPS/BDS/GLONASS/Galileo/QZSS All-constellation Multi-frequency High Precision Positioning & Heading Module*.
<https://www.manualslib.com/manual/2585774/Unicorecomm-Um982.html>
- Wang, S., Wang, S., & Sun, X. (2023). A Multi-Scale Anti-Multipath Algorithm for GNSS-RTK Monitoring Application. *Sensors*, 23, 1–16.
<https://doi.org/doi.org/10.3390/s23208396>
- Zhang, Q., Jing, H., Wang, N., & Tang, L. (2020). Test method of real-time kinematic and its application in terminal positioning performance test. *Journal of Physics: Conference Series*, 1607(1).
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1607/1/012121>