

XÂY DỰNG

TẠP CHÍ ĐIỆN TỬ CỦA BỘ XÂY DỰNG
JOURNAL OF CONSTRUCTION

TẠP CHÍ XÂY DỰNG - eISSN 3030-4482

Tổng quan xu hướng phát triển công nghệ GNSS và xử lý dữ liệu trong quan trắc sức khỏe công trình cầu

A review of development trends in GNSS technology and data processing for bridge structural health monitoring

➤ **ThS Lê Minh Ngọc, ThS Trần Đức Công*, TS Hà Trung Hiếu**

Trường Đại học Giao thông vận tải

*Email: congtd@utc.edu.vn

THÔNG TIN BÀI BÁO

Chuyên mục: Khoa học công nghệ

Ngày nhận bài: 09/4/2026

Ngày sửa bài: 21/4/2026

Ngày chấp nhận đăng: 05/5/2026

Ngày xuất bản Online: 15/5/2026

Tác giả liên hệ:

Email: congtd@utc.edu.vn

TÓM TẮT

Hệ thống định vị vệ tinh toàn cầu (Global Navigation Satellite System - GNSS) có tiềm năng lớn trong quan trắc sức khỏe công trình cầu (Bridge Structural Health Monitoring - BSHM) nhờ khả năng cung cấp dữ liệu chuyển vị liên tục trên công trình quy mô lớn. Tuy nhiên, hiệu quả ứng dụng vẫn bị hạn chế bởi nhiễu đo, gián đoạn tín hiệu và sự rời rạc giữa các hướng nghiên cứu về công nghệ đo, tích hợp cảm biến và xử lý dữ liệu.

Bài báo tổng quan các nghiên cứu từ năm 2020 đến nay về ứng dụng GNSS trong quan trắc công trình cầu, nhằm làm rõ các xu thế phát triển chính và vai trò của chúng trong theo dõi chuyển vị, nhận dạng đặc trưng động học và đánh giá trạng thái kết cấu. Kết quả cho thấy GNSS đang chuyển từ công cụ đo đơn lẻ sang nền tảng dữ liệu cho BSHM đa nguồn, với các xu hướng nổi bật là nâng cao năng lực đo, tích hợp cảm biến và xử lý dữ liệu theo hướng thông minh hơn.

Từ khóa: GNSS, quan trắc kết cấu cầu, xử lý dữ liệu, học máy, học sâu.

ABSTRACT

The Global Navigation Satellite System (GNSS) has strong potential for bridge structural health monitoring (BSHM) because it can provide continuous displacement data for large-scale structures. However, its practical application is still limited by measurement noise, signal interruptions, and the weak connection among research directions in measurement technology, sensor integration, and data processing.

This paper reviews studies published since 2020 on the application of GNSS to bridge monitoring, with the aim of clarifying the main development trends and their roles

in displacement tracking, dynamic characteristic identification, and structural condition assessment. The review shows that GNSS is evolving from a stand-alone measurement tool into a data platform for multi-source BSHM systems, with major trends including improved measurement capability, sensor integration, and more intelligent data processing.

Keywords: GNSS, BSHM, data processing, machine learning, deep learning.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Cầu nhịp lớn cần được quan trắc thường xuyên do chịu ảnh hưởng đồng thời của tải trọng khai thác, môi trường và sự suy giảm vật liệu theo thời gian. Trong hệ BSHM, chuyển vị là một đại lượng quan trọng vì phản ánh trực tiếp phản ứng tổng thể của kết cấu. Với khả năng cung cấp tọa độ ba chiều liên tục trên công trình quy mô lớn, GNSS đã trở thành một công nghệ có nhiều tiềm năng trong quan trắc cầu [1].

Tuy nhiên, hiệu quả ứng dụng của GNSS không chỉ phụ thuộc vào độ chính xác định vị mà còn gắn với khả năng xử lý nhiễu, tách tín hiệu, khai thác đặc trưng động học và tích hợp với các cảm biến bổ trợ. Những năm gần đây, nghiên cứu quốc tế cho thấy xu hướng phát triển rõ rệt theo các hướng này, trong khi ở Việt Nam việc tổng hợp và đánh giá còn thiếu tính hệ thống.

Vì vậy, bài báo này thực hiện tổng quan các nghiên cứu từ năm 2020 đến nay nhằm làm rõ các xu hướng phát triển chính của GNSS trong BSHM và thảo luận khả năng áp dụng trong điều kiện Việt Nam.

2. CƠ SỞ KỸ THUẬT ỨNG DỤNG GNSS TRONG BSHM

BSHM nhằm theo dõi trạng thái làm việc của công trình cầu thông qua các đại lượng đặc trưng cho đáp ứng kết cấu. Đối với cầu, các đại lượng chủ yếu là chuyển vị và dao động, phục vụ đánh giá an toàn khai thác, hiệu chỉnh mô hình kết cấu và cảnh báo sớm hư hỏng [1].

2.1. Các đại lượng quan trắc đặc trưng bằng phương pháp GNSS

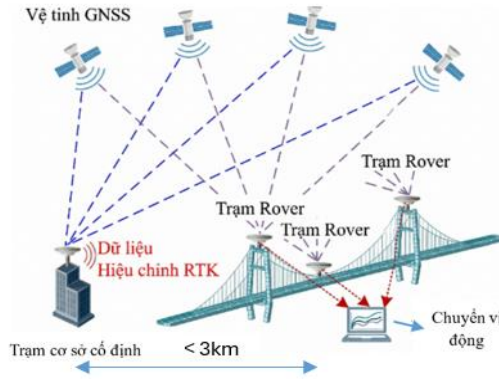
Các đại lượng quan trắc chính được tổng hợp trong Bảng 1.

Bảng 1. Phân loại chi tiết các đại lượng quan trắc trong BSHM [2].

Nhóm đại lượng	Tham số đo đạc	Tốc độ lấy mẫu yêu cầu	Mục tiêu kỹ thuật
Chuyển vị tĩnh/ bán tĩnh	Độ lún trụ, dịch chuyển móng, nghiêng tháp. Giãn nở nhịp, chuyển vị đỉnh tháp theo nhiệt độ	0.1 - 1 Hz	Giám sát ổn định dài hạn, phát hiện lún không đều Đánh giá phản ứng nhiệt, kiểm tra khe co giãn
Chuyển vị động	Biên độ dao động nhịp, quỹ đạo chuyển động dây văng	10 -100 Hz	Phân tích tác động gió, xe cộ, động đất
Tham số động học	Tần số riêng, dạng dao động	Dẫn xuất từ dữ liệu động	Cập nhật mô hình số (FEM), đánh giá hư hỏng

2.2. Phương pháp đo GNSS sử dụng trong BSHM

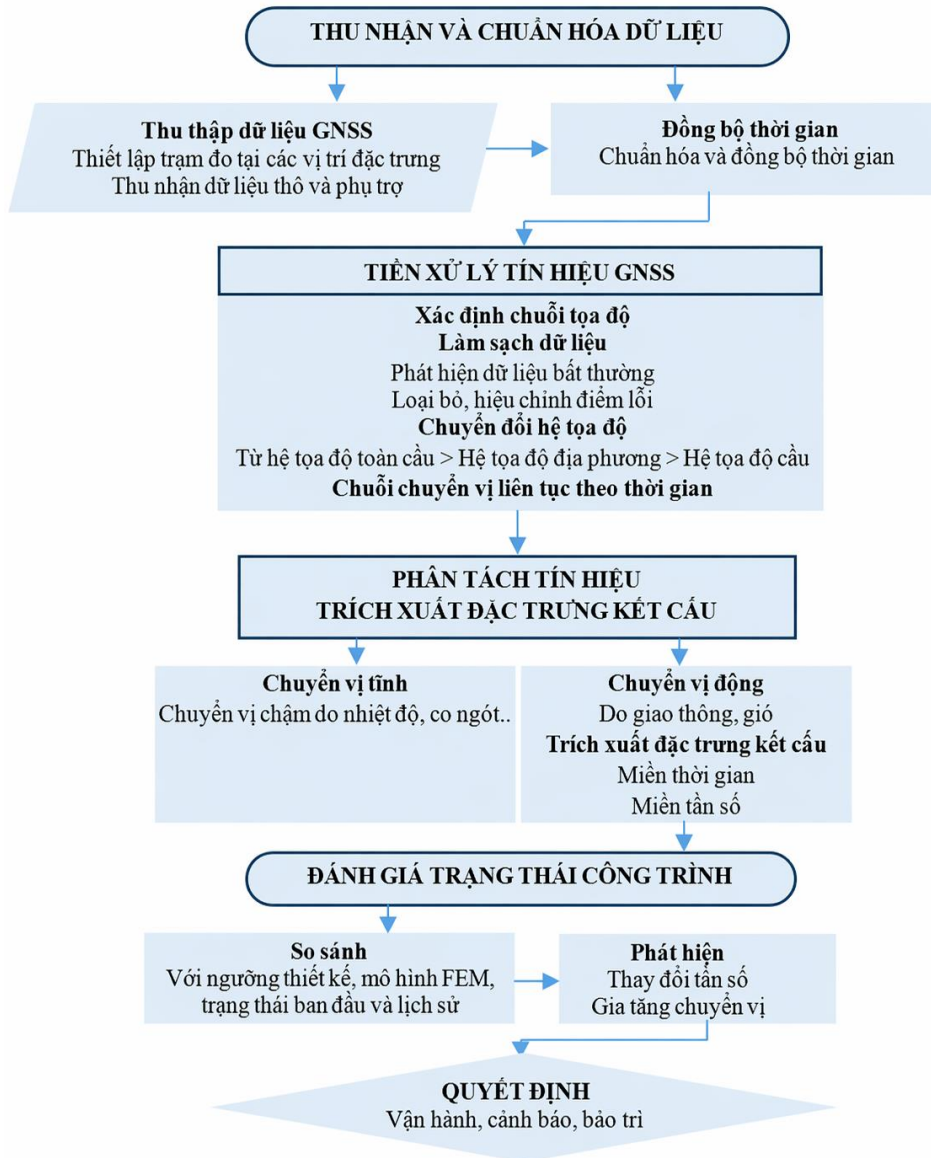
GNSS trong BSHM chủ yếu sử dụng ba phương pháp: Đo tĩnh, RTK [3] và PPP [4], với sự khác biệt về độ chính xác, thời gian thực và mức độ phụ thuộc vào trạm tham chiếu.



Hình 1: Nguyên lý hoạt động của GNSS-RTK trong quan trắc cầu.

2.3. Sơ đồ tổng hợp quá trình xử lý dữ liệu GNSS trong BSHM

Trong BSHM, Dữ liệu GNSS cần được tiền xử lý, phân tách tín hiệu và trích xuất đặc trưng trước khi phục vụ đánh giá kết cấu Hình 2.



Hình 2: Sơ đồ tổng hợp các bước xử lý dữ liệu GNSS phục vụ BSHM.

3. XU THẾ ỨNG DỤNG GNSS TRONG QUAN TRẮC KẾT CẤU CẦU

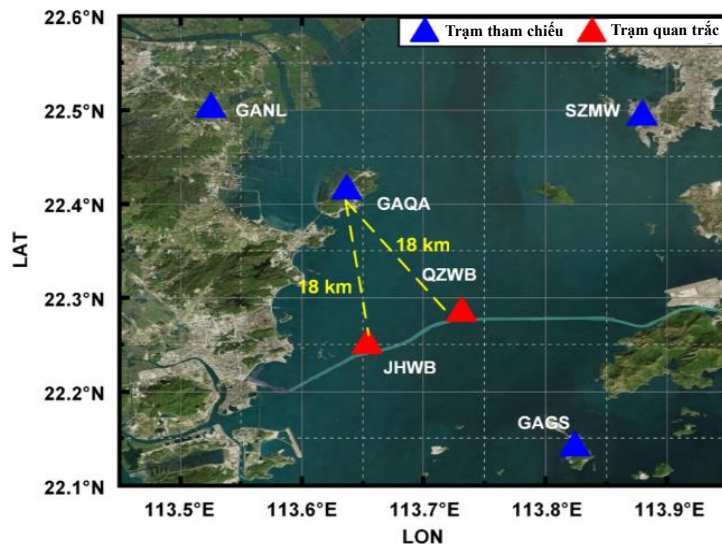
Bài báo này tập trung vào các nghiên cứu liên quan trực tiếp đến ứng dụng GNSS trong BSHM và đáp ứng đồng thời ba điều kiện: (i) GNSS là công nghệ quan trắc chính, (ii) bài báo trình bày rõ phương pháp định vị, xử lý dữ liệu hoặc mô hình tích hợp và (iii) kết quả nghiên cứu gắn trực tiếp với bài toán theo dõi chuyển vị, dao động hoặc nhận dạng đặc trưng động học của cầu. Các nghiên cứu được hệ thống hóa theo ba hướng: Phát triển công nghệ đo GNSS, tích hợp đa cảm biến và xử lý dữ liệu.

3.1. Phát triển các công nghệ đo GNSS

Trong quan trắc BSHM, GNSS đa hệ đã trở thành nền tảng phổ biến nhờ cải thiện khả năng quan sát và tính liên tục của kết quả định vị. Trên cơ sở đó, công nghệ đo hiện phát triển theo hai hướng chính.

- Tăng tần số lấy mẫu từ khoảng 1 - 20 Hz lên 10 - 100 Hz để thu nhận tốt hơn dao động kết cấu dải thấp - vừa; tuy nhiên, dữ liệu 100 Hz có thể nhiều hơn khoảng 10,3% so với 1 Hz, nên cần các thuật toán hậu xử lý hiệu quả hơn [3].

- Chuyển từ RTK truyền thống sang PPP, nhằm giảm phụ thuộc trạm gốc nhưng vẫn duy trì độ chính xác cao. Một số nghiên cứu gần đây cho thấy PPP-RTK có thể nhận dạng tốt 6 tần số dao động đầu tiên và cho kết quả gần tương đương RTK; với BDS PPP-RTK, sai số đạt khoảng 6 mm theo phương dọc và 1,6 cm theo phương đứng, sau làm trơn còn khoảng 3 mm và 6 mm [5], [6].



Hình 3: Sơ đồ mô tả vị trí các trạm tham chiếu và điểm quan trắc bằng PPP-RTK [6].

3.2. Tích hợp GNSS với các cảm biến và nền tảng khác

Trong quan trắc thực tế, GNSS vẫn bị hạn chế bởi nhiễu và gián đoạn tín hiệu, nên xu thế hiện nay là phát triển hệ BSHM đa nguồn, trong đó GNSS giữ vai trò tham chiếu chuyển vị tuyệt đối, còn các cảm biến khác bổ sung thông tin dao động và duy trì chuỗi đo:

- Nổi bật nhất là tích hợp GNSS với gia tốc kế, giúp kết hợp độ ổn định ở dải tần thấp của GNSS với khả năng thu nhận dao động nhanh của gia tốc kế; nhờ đó, sai số chuyển vị có thể giảm khoảng 55 - 78%, duy trì dưới 1 mm, với sai số biên độ dưới 0,5 mm [7], [8].

- Bên cạnh đó, tích hợp GNSS/IMU giúp tăng độ ổn định kết quả đo, hỗ trợ duy trì quan trắc khi tín hiệu GNSS gián đoạn ngắn và cho phép theo dõi cả chuyển vị lẫn góc quay kết cấu; cấu hình ba ăng-ten GNSS/IMU đã cho sai số khoảng 2,6 mm, cải thiện khoảng 33,0% so với cấu hình một ăng-ten [9].

3.3. Phát triển phương pháp xử lý dữ liệu GNSS

Các phương pháp xử lý dữ liệu GNSS ngày nay không chỉ phục vụ bài toán định vị, mà còn hướng tới khai thác thông tin kết cấu từ chuỗi tọa độ theo thời gian.

3.3.1. Tiền xử lý tín hiệu GNSS

Chuỗi GNSS thường chứa nhiễu và ngoại lai, cần tiền xử lý trước khi phân tích Bảng 2.
Bảng 2: Tổng hợp các phương pháp xử lý tín hiệu truyền thống.

Phương pháp/nhóm phương pháp	Mục tiêu xử lý	Ưu điểm chính	Hạn chế chính
Trung vị trượt/Hampel [10]	Phát hiện và loại bỏ ngoại lai, điểm nhảy bất thường	Đơn giản, dễ áp dụng, phù hợp bước tiền xử lý	Phụ thuộc cửa sổ trượt; khó xử lý nhiễu phức tạp
Bộ lọc Kalman/ Kalman bền vững/thích nghi [11]	Làm mượt dữ liệu, ước lượng chuyển vị thực và giảm ảnh hưởng của nhiễu, ngoại lai	Phù hợp quan trắc thời gian thực và tích hợp GNSS và gia tốc kế	Phụ thuộc mô hình và tham số lọc. Cấu hình phức tạp
Biến đổi Wavelet [12]	Khử nhiễu tín hiệu không dừng	Giữ được đặc trưng cục bộ tốt	Phụ thuộc hàm wavelet và ngưỡng
CEEMD/CEEMDAN, VMD [13]	Phân rã tín hiệu để tách nhiễu và thành phần hữu ích	Phù hợp chuỗi phi tuyến, không dừng	Nhạy với tham số và số mode

Tuy nhiên, khi dữ liệu GNSS chịu tác động của nhiễu phức tạp, gián đoạn chuỗi đo hoặc cần khai thác sâu hơn các mẫu bất thường, các phương pháp xử lý truyền thống thường chưa đủ linh hoạt. Vì vậy, nhiều nghiên cứu gần đây đã chuyển sang khai thác các mô hình học máy (Machine Learning - ML) và học sâu (Deep Learning DL), như tổng hợp trong Bảng 3.

Bảng 3: Các phương pháp xử lý tín hiệu bằng học máy, học sâu.

Hướng ứng dụng ML/DL	Kết quả tiêu biểu	Ý nghĩa/Hạn chế
Làm sạch dữ liệu [14],[15]	TFM-CNN tách đa đường ở mức milimét; SVM cải thiện độ chính xác định vị động tới 65,4% theo phương ngang và 85% theo phương đứng.	Hiệu quả rõ trong nâng cao chất lượng dữ liệu GNSS, nhưng còn phụ thuộc vào loại nhiễu và dữ liệu huấn luyện.
Khôi phục dữ liệu [16], [17]	Trên chuỗi GNSS cầu Cần Thơ, LSTM cho kết quả tốt nhất, GRU cạnh tranh với ANN và CNN.	Là hướng phát triển mạnh, vượt trội hơn nhiều phương pháp truyền thống; Transformer/self-attention là xu hướng mới đáng chú ý.

3.3.2. Phân tách tín hiệu và trích xuất đặc trưng kết cấu

Tách chuyển vị tĩnh và động là bước quan trọng trong xử lý dữ liệu GNSS phục vụ BSHM, vì chuỗi quan trắc thường chứa đồng thời thành phần biến dạng chậm, dao động kết cấu và nhiễu đo. Các phương pháp hiện nay chủ yếu gồm ba nhóm:

Bảng 4. Tổng hợp các phương pháp phân tách tín hiệu GNSS phổ biến.

Nhóm phương pháp	Nguyên lý	Kết quả tiêu biểu	Hạn chế

Loại số cổ điển [18]	Dùng các bộ lọc low-pass, high-pass, band-pass để tách thành phần tĩnh và động	Phổ biến nhờ đơn giản, dễ triển khai và thuận tiện trong xử lý tín hiệu GNSS	Phụ thuộc mạnh vào tần số cắt; dễ sai lệch hoặc mất thông tin khi dải dao động gần dải nhiễu
Wavelet/ EWT [19]	Phân tích tín hiệu theo nhiều thang tần số, phù hợp với chuỗi GNSS phi tuyến, không dừng	EWT nhận dạng từ dữ liệu GNSS tần số cơ bản 1.6707 Hz, hệ số cản 0.82% và chuyển vị động cực đại 10.1 mm trên cầu Wilford	Phụ thuộc vào hàm wavelet, số mức phân rã và ngưỡng khử nhiễu
Phân rã thích nghi (EMD, ICEEMDAN, VMD) [12], [21]	Phân rã tín hiệu GNSS không dừng thành các thành phần có ý nghĩa vật lý rõ hơn	ICEEMDAN-DFA-wavelet đạt RMSE ~0.85 mm; VMD-Random Forest tách được chuyển vị theo gió, nhiệt độ và giao thông	Nhạy với số mode và tham số lựa chọn; kết quả còn phụ thuộc bước hiệu chỉnh

Sau khi phân tách, dữ liệu GNSS có thể được khai thác để xác định các đặc trưng động học quan trọng của cầu:

Bảng 5: Tổng hợp các phương pháp xác định tham số dao động kết cấu từ dữ liệu GNSS.

Tham số động học	Phương pháp	Kết quả tiêu biểu	Ý nghĩa/Hạn chế
Tần số tự nhiên [12], [20]	Sử dụng biến đổi Fourier nhanh (FFT) hoặc phân tích mật độ phổ công suất (PSD) từ dữ liệu GNSS tần số cao	Có thể xác định các mode dao động với sai số so với mô hình phần tử hữu hạn chỉ khoảng 1% [12], [16]	Có tiềm năng trong nhận dạng đặc trưng động học của cầu
Dạng dao động	Triển khai mạng lưới anten GNSS đồng bộ thời gian tại nhiều vị trí trên kết cấu	Cho phép vẽ lại dạng dao động của toàn bộ cầu	Đòi hỏi bố trí mạng đo đồng bộ tại nhiều điểm
Hệ số cản [19], [21]	Phân tích dữ liệu GNSS bằng các phương pháp xử lý tín hiệu, trong đó có biến thể của Wavelet như EWT	Một số nghiên cứu xác định được tần số cơ bản, ví dụ 1.6707 Hz và hệ số cản 0.82% trên cầu treo Wilford	Có thể xác định hệ số cản, nhưng chủ yếu hiệu quả với các mode bậc thấp

3.3.3. Đánh giá và dự báo trạng thái công trình

Ứng dụng ML/DL trong xử lý dữ liệu GNSS phục vụ BSHM đang phát triển rất mạnh mẽ, từ vai trò hỗ trợ lọc nhiễu đến tham gia ngày càng sâu vào toàn bộ chuỗi xử lý dữ liệu bao gồm cả dự báo biến dạng và phát hiện bất thường kết cấu.

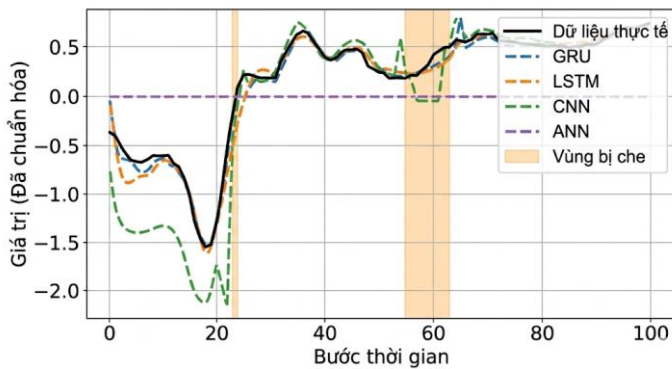
Bảng 6. Tổng hợp các phương pháp ML/DL trong xử lý dữ liệu GNSS.

Phương pháp	Nội dung chính	Ứng dụng chính
Học máy + chỉ báo bất thường [22]	Phát hiện và định vị bất thường trên mạng cảm biến GNSS của cầu	Phát hiện bất thường, hỗ trợ đánh giá trạng thái kết cấu
VMD + Random Forest [13]	Tách và định lượng ảnh hưởng của gió, nhiệt độ, giao thông lên chuyển vị cầu đo bằng GNSS	Phân tích nguyên nhân chuyển vị, đánh giá trạng thái vận hành
ANN cập nhật thời gian thực [23]	Dự báo quan hệ tải trọng - biến dạng của cầu trong điều kiện môi trường khắc nghiệt	Dự báo chuyển vị/biến dạng thời gian thực
Học sâu CNN+GRU [24]	CNN để trích đặc trưng và GRU để nắm bắt quan hệ thời gian. CNN-GRU và CNN-LSTM cải thiện hiệu năng dự báo khoảng 45%	Dự báo biến dạng/chuyển vị GNSS

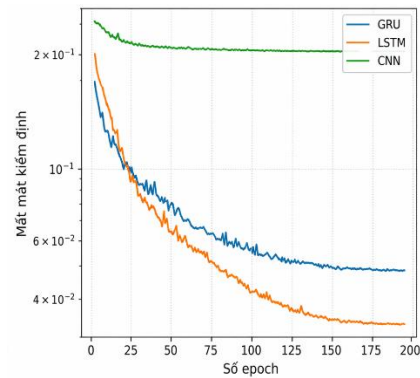
3.4. Tình hình nghiên cứu GNSS trong BSHM tại Việt Nam

Ở Việt Nam, BSHM đã được triển khai trên một số cầu lớn như Cần Thơ, Nhật Tân và Bãi Cháy, trong đó GNSS/GPS được sử dụng như một thành phần theo dõi chuyển vị kết cấu. Tuy nhiên, việc triển khai vẫn còn phân tán và hạn chế về tiêu chuẩn kỹ thuật, năng lực khai thác dữ liệu và nguồn nhân lực chuyên sâu.

Từ năm 2020 đến nay, nghiên cứu trong nước chủ yếu tập trung vào làm sạch, chuẩn hóa và khôi phục chuỗi chuyển vị GNSS; các phương pháp như Kalman, Hampel, LOF, ANN, CNN, GRU và LSTM đã được thử nghiệm trên dữ liệu cầu dây văng, trong đó LSTM cho kết quả tốt trong bài toán bù dữ liệu thiếu trên chuỗi cầu Cần Thơ [17], [25], [26].



Hình 4a: So sánh kết quả dự đoán của các mô hình với dữ liệu thực [17].



Hình 4b: Đường cong mất mát kiểm định của các mô hình [17].

Bên cạnh đó, một số nghiên cứu bước đầu xem xét ảnh hưởng của yếu tố môi trường, phân cụm dữ liệu và tích hợp GNSS với gia tốc kế/IoT [27], [28].

Nghiên cứu trong nước đang chuyển từ xử lý tín hiệu đơn lẻ sang khai thác dữ liệu thông minh hơn, kết hợp học máy và tích hợp đa cảm biến. Tuy nhiên, vẫn còn thiếu các nghiên cứu về nhận dạng đặc trưng động học từ dữ liệu GNSS, dung hợp thời gian thực với các cảm biến khác, cũng như phát hiện và chẩn đoán hư hỏng dựa trên chuỗi quan trắc dài hạn.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã phân tích và hệ thống hóa các xu thế ứng dụng GNSS trong giám sát sức khỏe kết cấu cầu theo ba hướng chính: công nghệ đo, tích hợp đa cảm biến và xử lý dữ liệu. Tổng quan cho thấy GNSS đang chuyển từ công cụ theo dõi chuyển vị sang nền tảng dữ liệu phục vụ nhận dạng đặc trưng động học và đánh giá trạng thái kết cấu. Đồng thời, ML/DL đang thúc đẩy tự động hóa xử lý dữ liệu GNSS, từ làm sạch trị đo, bù

dữ liệu thiếu và dự báo biến dạng đến phát hiện bất thường, qua đó nâng cao độ tin cậy của thông tin kết cấu và hỗ trợ quan trắc thời gian thực.

Đối với Việt Nam, nghiên cứu GNSS cho BSHM cần được dịch chuyển từ xử lý tín hiệu đơn lẻ sang các hệ tích hợp thông minh, thời gian thực và đa cảm biến. Trong giai đoạn tới, cần ưu tiên xây dựng bộ dữ liệu dài hạn, tin cậy; chuẩn hóa quy trình thu nhận và xử lý dữ liệu; tăng cường tích hợp GNSS với các cảm biến bổ trợ để nâng cao tính khả thi của các giải pháp quan trắc cầu thời gian thực.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Giao thông vận tải trong Đề tài mã số T2026-CT-015.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] X. Wang, Q. Zhao, R. Xi, C. Li, G. Li, and L. Li, Review of bridge structural health monitoring based on GNSS: From displacement monitoring to dynamic characteristic identification, *IEEE Access*, vol. 2021, pp. 80043-80065, May, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3083749.

[2] S. Bianchi et al., "Structural health monitoring of bridges based on GNSS," in *Life-Cycle of Structures and Infrastructure Systems*, CRC Press, 2023.

[3] X. Qu, B. Shu, X. Ding, Y. Lu, G. Li, and L. Wang, "Experimental study of accuracy of high-rate GNSS in context of structural health monitoring," *Remote Sens.*, vol. 14, no. 19, p. 4989, Oct. 2022, doi: 10.3390/rs14194989.

[4] R. Li, Z. Zhang, Y. Gao, J. Zhang, and H. Ge, A new method for deformation monitoring of structures by precise point positioning, *Remote Sens.*, vol. 15, no. 24, p. 5743, Jan. 2023, doi: 10.3390/rs15245743.

[5] L. He et al., Displacement monitoring and multimodal frequency identification of long-span bridges utilizing PPP-RTK," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 36, no. 5, p. 056309, May 2025, doi: 10.1088/1361-6501/add31d.

[6] H. Zhong, R. Gao, J. Zha, F. Ye, and B. Zhang, BDS PPP-RTK for deformation monitoring of Hong Kong-Zhuhai-Macao bridge, *Measurement*, vol. 257, p. 118651, Jan. 2026, doi: 10.1016/j.measurement.2025.118651.

[7] K. Kim and H. Sohn, Dynamic displacement estimation for Long-Span bridges using acceleration and heuristically enhanced displacement measurements of Real-Time kinematic global navigation System, *Sensors*, vol. 20, no. 18, Art. no. 18, Jan. 2020, doi: 10.3390/s20185092.

[8] J. Paziewski, K. Stepniak, R. Sieradzki, and C. O. Yigit, Dynamic displacement monitoring by integrating high-rate GNSS and accelerometer: on the possibility of downsampling GNSS data at reference stations, *GPS Solut.*, vol. 27, no. 3, p. 157, Jul. 2023, doi: 10.1007/s10291-023-01500-x.

[9] W. Dai, X. Li, W. Yu, X. Qu, and X. Ding, Multi-Antenna Global Navigation Satellite System/Inertial Measurement Unit Tight Integration for Measuring Displacement and Vibration in Structural Health Monitoring, *Remote Sens.*, vol. 16, no. 6, Art. no. 6, Jan. 2024, doi: 10.3390/rs16061072.

[10] N. Q. Vu, T. N. Le, and N. D. Luong, Analysis of bridge displacement using GNSS time-series data, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1289, no. 1, p. 012034, Aug. 2023, doi: 10.1088/1757-899X/1289/1/012034.

[11] Outlier Detection Based on Nelder-Mead Simplex Robust Kalman Filtering for Trustworthy Bridge Structural Health Monitoring. Accessed: Apr. 15, 2026. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2072-4292/15/9/2385>.

[12] C. Xiong, Z. Shang, M. Wang, and S. Lian, Dynamic Monitoring of a Bridge from GNSS-RTK Sensor Using an Improved Hybrid Denoising Method, *Sensors*, vol. 25, p. 3723, Jun. 2025, doi: 10.3390/s25123723.

[13] X. Qu, X. Ding, Y. Xia, and W. Yu, A data-driven approach for analyzing contributions of individual loading factors to GNSS-measured bridge displacements, *J. Geod.*, vol. 98, no. 11, p. 95, Nov. 2024, doi: 10.1007/s00190-024-01913-7.

[14] Y. Tao, C. Liu, C. Liu, X. Zhao, H. Hu, and H. Xin, Joint time-frequency mask and convolutional neural network for real-time separation of multipath in GNSS deformation monitoring, *GPS Solut.*, vol. 25, no. 1, p. 25, Jan. 2021, doi: 10.1007/s10291-020-01074-y.

[15] An SVM Based Weight Scheme for Improving Kinematic GNSS Positioning Accuracy with Low-Cost GNSS Receiver in Urban Environments." Accessed: Apr. 10, 2026. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/24/7265>

[16] Y. LI, Application of LSTM-Based GNSS Data Imputation for Structural Health Monitoring: A Case Study of a World's Top 10 Longest Long-Span Floating Bridge in Norway. 2025. doi: 10.12783/shm2025/37525.

[17] Khanh G. L., Duc C. T., and Lan H. H. T., Self-supervised deep learning for gnss time series imputation: a comparative study of neural network architectures, *Tạp Chí Khoa học Giao thông vận tải*, vol. 77, no. 1, pp. 127-141, 2026, doi: 10.47869/tcsj.77.1.10.

[18] N. Shen et al., A Review of Global Navigation Satellite System (GNSS)-Based Dynamic Monitoring Technologies for Structural Health Monitoring, *Remote Sens.*, vol. 11, no. 9, p. 1001, Jan. 2019, doi: 10.3390/rs11091001.

[19] Z. Fang, J. Yu, and X. Meng, Modal Parameters Identification of Bridge Structures from GNSS Data Using the Improved Empirical Wavelet Transform, *Remote Sens.*, vol. 13, no. 17, p. 3375, Jan. 2021, doi: 10.3390/rs13173375.

[20] Y. Xie, S. Zhang, X. Meng, D. T. Nguyen, G. Ye, and L. Haiyang, An Innovative Sensor Integrated with GNSS and Accelerometer for Bridge Health Monitoring, *Remote Sens.*, vol. 16, p. 607, Feb. 2024, doi: 10.3390/rs16040607.

[21] C. Xiong, L. Yu, and Y. Niu, Dynamic Parameter Identification of a Long-Span Arch Bridge Based on GNSS-RTK Combined with CEEMDAN-WP Analysis, *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 7, p. 1301, Jan. 2019, doi: 10.3390/app9071301.

[22] N. Manzini et al., Machine Learning Models Applied to a GNSS Sensor Network for Automated Bridge Anomaly Detection, *J. Struct. Eng.*, vol. 148, no. 11, p. 04022171, Nov. 2022, doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0003469.

[23] L. Hu, X. Meng, Y. Xie, C. Hancock, G. Ye, and Y. Bao, Examination of load-deformation characteristics of long-span bridges in harsh natural environments based on real-time updating artificial neural network, *Eng. Struct.*, vol. 308, p. 118022, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.engstruct.2024.118022.

[24] Y. Xie et al., Deep Learning CNN-GRU Method for GNSS Deformation Monitoring Prediction, *Appl. Sci.*, vol. 14, no. 10, p. 4004, Jan. 2024, doi: 10.3390/app14104004.

[25] H. V. Le, Study to process abnormal data for GNSS monitoring system of a long-span cable-stayed bridge in Vietnam, *J. Mater. Eng. Struct. (JMES)*, vol. 9, no. 4, pp. 421-426, Dec. 2022.

[26] Linh N. T. and Giang L. K., Nghiên cứu ứng dụng phương pháp Local Outlier Factor trong phát hiện ngoại lai kết quả đo GNSS-RTK quan trắc chuyển dịch cầu hệ dây tại Việt Nam *Tạp Chí Xây dựng*, số 05.2025, pp. 126-129.

[27] Đức C. T., Lan H. H. T., Khánh G. L., and Văn H. L., Nghiên cứu ứng dụng thuật toán phân cụm không giám sát trong phân tích dữ liệu GNSS-RTK phục vụ quan trắc cầu dây văng, *Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải*, vol. 76, no. 8, pp. 1138-1150, 2025, doi: 10.47869/tcsj.76.8.8.

[28] Quang V. N., Hà N. V., and Trọng T. Đ., Kết hợp GNSS, cảm biến gia tốc và giải pháp IoT trong quan trắc cầu thời gian thực," *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng -*

Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, vol. 17, no. 4V, pp. 139–151, Nov. 2023, doi:
10.31814/stce.huce2023-17(4V)-12.