

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC MỎ - ĐỊA CHẤT

NGUYỄN THÙY LINH

NGHIÊN CỨU GIẢI PHÁP CÔNG NGHỆ
QUAN TRẮC CHUYỂN VỊ CÔNG TRÌNH CẦU
TRONG ĐIỀU KIỆN VIỆT NAM

NGÀNH: KỸ THUẬT TRẮC ĐỊA - BẢN ĐỒ
MÃ SỐ: 9.520503

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

HÀ NỘI - 2022

Công trình được hoàn thành tại: **Bộ môn Trắc địa công trình,
Khoa Trắc địa - Bản đồ và Quản lý đất đai,
Trường Đại học Mở - Địa chất, Hà Nội**

Người hướng dẫn khoa học:

- 1. PGS. TS Trần Khánh**, Trường Đại học Mở - Địa chất
- 2. PGS. TS Hồ Thị Lan Hương**, Trường Đại học Giao thông Vận tải

Phản biện 1: **GS. TSKH Hoàng Ngọc Hà**

Phản biện 2: **TS Lê Văn Hiến**

Phản biện 3: **PGS. TS Nguyễn Quang Tác**

Luận án sẽ được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án cấp Trường, họp tại Trường Đại học Mở - Địa chất, vào hồi giờ ngày tháng năm 2022

Có thể tìm hiểu luận án tại:

Thư viện Quốc Gia Việt Nam

Thư viện Trường Đại học Mở - Địa chất

MỞ ĐẦU

1. Tính cấp thiết của đề tài

Quan trắc chuyên dịch công trình cầu được thực hiện với mục đích thu thập số liệu về sự chuyển dịch của công trình một cách chính xác, cùng với các số liệu quan trắc khác được sử dụng để tính toán sự thay đổi nội lực từ đó đánh giá, dự báo mức độ an toàn; kiểm tra thiết kế; cảnh báo nguy hiểm; cung cấp các số liệu phục vụ cho việc duy tu, sửa chữa cầu trong quá trình khai thác. Với các công trình cầu lớn, có kết cấu phức tạp, để đảm bảo yêu cầu độ chính xác rất cao trong quan trắc chuyên dịch, lại đo trong điều kiện khó khăn, khối lượng dữ liệu quan trắc thường lớn thì việc nghiên cứu các giải pháp công nghệ trong xử lý, phân tích số liệu nhằm thuận lợi đo đạc, nâng cao độ chính xác khi quan trắc chuyên dịch cầu là rất cần thiết và quan trọng.

2. Mục tiêu, đối tượng và phạm vi nghiên cứu

Mục tiêu nghiên cứu là đề xuất các giải pháp công nghệ nhằm nâng cao độ chính xác khi quan trắc chuyên dịch cầu. Đối tượng nghiên cứu là cầu có kết cấu cứng và cầu dây văng. Phạm vi nghiên cứu thuộc lĩnh vực quan trắc chuyên dịch cầu trong quá trình khai thác tại Việt Nam.

3. Nội dung nghiên cứu

Nghiên cứu sơ đồ đo hướng chuẩn ở dạng tổng quát và ứng dụng nguyên lý số bình phương nhỏ nhất để xử lý số liệu đo hướng chuẩn tổng quát trong quan trắc chuyên dịch ngang cầu cứng; Nghiên cứu ứng dụng GNSS - RTK trong quan trắc chuyên dịch theo phương đứng cầu dây văng; Nghiên cứu ứng dụng mạng nơ-ron nhân tạo (ANN) trong thành lập mô hình chuyển dịch cầu dây văng dựa trên sự tác động các yếu tố tải trọng động đến chuyển dịch cầu.

4. Phương pháp nghiên cứu

Phương pháp thống kê, phân tích, thực nghiệm, so sánh, toán học và ứng dụng tin học.

5. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của luận án

Luận án góp phần hoàn thiện lý thuyết về xử lý số liệu lưới khống chế trắc địa hướng chuẩn khi quan trắc chuyển dịch ngang công trình cầu. Đồng thời là cơ sở khoa học trong việc xây dựng quy chuẩn về quan trắc chuyển dịch cầu dây văng khi ứng dụng công nghệ GNSS - RTK. Ngoài ra phát triển ứng dụng ANN trong thành lập mô hình chuyển dịch dựa trên một số lượng dữ liệu lớn của hệ thống quan trắc kết cấu cầu dây văng. Các kết quả nghiên cứu có thể được ứng dụng trong giảng dạy, nghiên cứu khoa học và thực tế sản xuất.

6. Các luận điểm bảo vệ

- *Luận điểm thứ nhất:* Tổng quát hóa sơ đồ đo hướng chuẩn và ứng dụng nguyên lý số bình phương nhỏ nhất để xử lý số liệu đo hướng chuẩn trong sơ đồ này cho phép ứng dụng phương pháp hướng chuẩn trong quan trắc chuyển dịch ngang cầu cứng được chính xác, linh hoạt, thuận tiện.

- *Luận điểm thứ hai:* Công nghệ GNSS - RTK trong quan trắc chuyển dịch cầu dây văng và phân tích số liệu quan trắc theo ANN cho phép thành lập mô hình chuyển dịch cầu đạt độ chính xác cao.

7. Các điểm mới của luận án

- Đề xuất sơ đồ hướng chuẩn tổng quát để xây dựng bậc lưới cơ sở, lưới quan trắc và xử lý số liệu đo sơ đồ tổng quát theo nguyên lý số bình phương nhỏ nhất trong quan trắc chuyển dịch ngang cầu cứng.

- Nghiên cứu độ chính xác và đánh giá khả năng ứng dụng quan trắc chuyển dịch cầu dây văng theo phương đứng bằng GNSS - RTK trong điều kiện Việt Nam.

- Nghiên cứu ứng dụng mạng nơ-ron nhân tạo nhằm thành lập mô hình chuyển dịch cầu dây văng dựa trên sự tác động của tải trọng động.

8. Cấu trúc và nội dung luận án

Luận án gồm ba phần: mở đầu, 4 chương nội dung và kết luận.

Chương 1

TỔNG QUAN VỀ QUAN TRẮC CHUYỂN DỊCH CẦU TRÊN THẾ GIỚI VÀ VIỆT NAM

1.1. Tổng quan về công trình cầu

1.2. Tổng quan về quan trắc chuyển dịch công trình cầu

1.3. Tổng quan tình hình nghiên cứu lý thuyết và thực tiễn quan trắc chuyển dịch cầu trên thế giới và Việt Nam

1.3.1. Trên thế giới

1. Nghiên cứu về phương pháp đo và xử lý số liệu đo hướng chuẩn.
2. Nghiên cứu ứng dụng GNSS -RTK trong quan trắc chuyển dịch cầu.
3. Nghiên cứu ứng dụng ANN để xử lý số liệu quan trắc chuyển dịch.
4. Các cầu dây văng có lắp đặt GNSS trong hệ thống quan trắc kết cấu.

1.3.2. Tại Việt Nam

1. Nghiên cứu phương pháp hướng chuẩn trong quan trắc chuyển dịch công trình. Nghiên cứu lý thuyết tổng quát về phương pháp thành lập, bình sai lưới khống chế trắc địa cơ sở, đánh giá độ ổn định mốc.
2. Nghiên cứu độ chính xác của GNSS - RTK và khả năng ứng dụng GNSS - RTK trong quan trắc chuyển dịch cầu dây văng gồm hướng dẫn việc lựa chọn, thiết kế lắp đặt thiết bị, phương pháp đo GNSS.
3. Nghiên cứu ứng dụng mạng nơ-ron nhân tạo trong thành lập mô hình chuyển dịch công trình như công trình thủy điện, hầm lò.
4. Một số cầu dây văng lắp đặt GNSS thuộc hệ thống quan trắc kết cấu

1.4. Đánh giá chung về tình hình nghiên cứu và định hướng nghiên cứu trong luận án

1.4.1. Các thành tựu đã đạt được

- Phương pháp hướng chuẩn đã được áp dụng khi quan trắc chuyển dịch ngang các công trình xây dựng chịu áp lực từ một phía như nhà máy thủy điện, cầu...

- Việc nghiên cứu đánh giá độ chính xác, khả năng ứng dụng GNSS

- RTK trong quan trắc chuyển dịch công trình theo phương ngang, phương dọc được nghiên cứu nhiều, đạt được độ chính xác cao.

- ANN là công cụ mạnh để giải quyết bài toán có tính phi tuyến và được sử dụng phổ biến trong dự báo thiên tai, chứng khoán,...

1.4.2. Các vấn đề còn tồn tại

- Với yêu cầu độ chính xác cao mà phải đo trong điều kiện khó khăn vượt qua sông, hồ,... thì việc áp dụng cứng nhắc một trong bốn sơ đồ đo hướng chuẩn trong suốt quá trình quan trắc chuyển dịch ngang cầu cứng đã gây nhiều trở ngại cho công tác đo đạc.

- Việc nghiên cứu đánh giá độ chính xác trong quan trắc chuyển dịch cầu dây văng bằng GNSS - RTK theo phương đứng chưa có nhiều.

- Chưa có nghiên cứu sâu về ứng dụng ANN trong xử lý, phân tích một số lượng rất lớn số liệu quan trắc chuyển dịch cầu dây văng.

1.4.3. Các hướng nghiên cứu chính trong luận án

- Nghiên cứu sơ đồ đo hướng chuẩn ở dạng tổng quát và ứng dụng nguyên lý số bình phương nhỏ nhất để xử lý số liệu đo hướng chuẩn theo sơ đồ tổng quát này.

- Nghiên cứu độ chính xác của GNSS - RTK trong quan trắc chuyển dịch theo phương đứng cầu dây văng.

- Nghiên cứu ứng dụng ANN trong thành lập mô hình chuyển dịch theo ba phương X, Y, Z của cầu dây văng.

Chương 2

NGHIÊN CỨU ỨNG DỤNG PHƯƠNG PHÁP HƯỚNG CHUẨN TRONG QUAN TRẮC CHUYỂN DỊCH NGANG CẦU CỨNG

2.1. Đặc điểm kết cấu, yêu cầu kỹ thuật quan trắc chuyển dịch ngang cầu kết cấu cứng

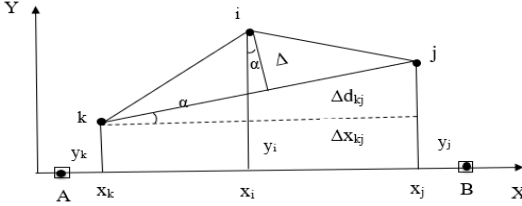
2.2. Hệ thống lưới quan trắc chuyển dịch ngang

2.3. Phương pháp hướng chuẩn trong quan trắc chuyển dịch ngang cầu cứng

2.4. Nghiên cứu mô hình hướng chuẩn tổng quát

2.4.1. Mô hình hóa một phép đo trong hướng chuẩn

Trong sơ đồ hướng chuẩn, điểm đặt máy k, điểm định hướng j, điểm đo i trong hệ tọa độ giả định có trục hoành trùng với hướng chuẩn. Đại lượng đo Δ_i , độ lệch hướng y_i , khoảng cách giữa các điểm quan trắc S_{ki} , S_{ij} . Trong hướng chuẩn, đường nối k j là đường đáy đo.



Hình 2. 10: Sơ đồ hướng chuẩn tổng quát

Ở Hình 2. 10 mối quan hệ hình học giữa trị đo Δ và độ lệch hướng y (so với hướng chuẩn gốc) được biểu diễn bằng phương trình sau:

$$\frac{\Delta}{\cos \alpha} = y_i - \frac{x_j - x_i}{x_j - x_k} y_k - \frac{x_i - x_k}{x_j - x_k} y_j \quad (2.11)$$

$$\cos \alpha = \frac{x_j - x_k}{\Delta d_{kj}} \quad (2.12)$$

$$\Delta = \cos \alpha \left(y_i - \frac{x_j - x_i}{x_j - x_k} y_k - \frac{x_i - x_k}{x_j - x_k} y_j \right) \quad (2.13)$$

Δ : trị đo độ lệch của i so với hướng k j; y_k, y_i, y_j : tung độ của k, i, j

Đối với trị đo thứ m có phương trình số hiệu chỉnh dạng tổng quát:

$$v_m = \frac{\partial \Delta_m}{\partial y_1} \delta y_1 + \dots + \frac{\partial \Delta_m}{\partial y_t} \delta y_t - \Delta_m$$

$$\text{hay } v_m = a_{m1} \delta y_1 + \dots + a_{mt} \delta y_t - \Delta_m \quad (2.14)$$

Xác định hệ số của phương trình số hiệu chỉnh: Đối với các ẩn không tham gia vào (2.14) có hệ số $a_m = 0$. Hệ số a_i, a_k, a_j được xác định:

$$a_{mi} = \cos \alpha \quad (2.15)$$

$$a_{mk} = \frac{\Delta x_{ji}}{\sqrt{\Delta y_{kj}^2 + \Delta x_{kj}^2}} + y_k \Delta x_{ji} \times \frac{y_j - y_k}{\sqrt{(\Delta y_{kj}^2 + \Delta x_{kj}^2)^3}} \quad (2.16)$$

$$a_{mj} = \frac{\Delta x_{ik}}{\sqrt{\Delta y_{kj}^2 + \Delta x_{kj}^2}} - y_j \Delta x_{ik} \times \frac{y_j - y_k}{\sqrt{(\Delta y_{kj}^2 + \Delta x_{kj}^2)^3}} \quad (2.17)$$

Với mỗi trị đo sẽ thành lập được một phương trình dạng (2.14).

2.4.2. Xử lý số liệu đo lưới hướng chuẩn theo nguyên lý số bình phương nhỏ nhất

Số lượng trị đo nhiều hơn số ẩn số, hệ phương trình số hiệu chỉnh:

$$A \cdot Y + \Delta = V \quad (2.18)$$

$$\text{với } V^T = [v_1 \quad \dots \quad v_n]_{1 \times n} \quad \Delta^T = -[\Delta_1 \quad \dots \quad \Delta_n]_{1 \times n}$$

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1t} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2t} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nt} \end{bmatrix}_{n \times t} \quad Y^T = [Y_1 \quad \dots \quad Y_t]_{1 \times t}$$

Số hiệu chỉnh tọa độ điểm quan trắc theo trục tung được xác định bằng cách giải hệ phương trình theo nguyên lý số bình phương nhỏ nhất.

Lúc này có hệ phương trình chuẩn:

$$A^T A Y + A^T \Delta = 0 \quad (2.19)$$

Giải hệ phương trình chuẩn có được tung độ (y) điểm quan trắc:

$$Y = -(A^T A)^{-1} A^T \Delta \quad (2.20)$$

Ứng dụng thuật toán này để lập chương trình xử lý và tính toán độ lệch hướng trong quan trắc công trình bằng phương pháp đo hướng chuẩn.

2.5. Thành lập lưới khống chế cơ sở theo đồ hình hướng chuẩn

2.5.1. Cơ sở lý thuyết

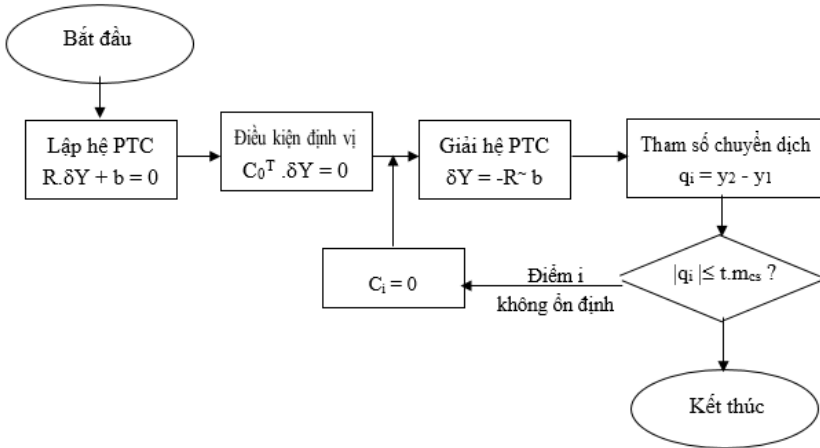
Để nâng cao độ chính xác khi quan trắc chuyển dịch ngang cầu cứng bằng phương pháp hướng chuẩn, lưới hướng chuẩn được thành lập. Lúc này lưới hướng chuẩn gồm 4 điểm thay vì 2 điểm ở 2 đầu.



Hình 2. 11: Sơ đồ lưới cơ sở thành lập theo đồ hình hướng chuẩn

2.5.2. Quy trình tính toán

Để đánh giá độ ổn định các điểm mốc cơ sở và định vị mạng lưới khống chế trắc địa trong bài toán xử lý số liệu lưới cơ sở theo phương pháp hướng chuẩn thì phương pháp bình sai lưới tự do với quy trình tính lặp nhích dần được áp dụng và được thể hiện trên hình vẽ 2.13.



Hình 2. 13: Sơ đồ xử lý số liệu lưới cơ sở

2.6. Chuyển dịch ngang cầu cứng theo số liệu quan trắc hướng chuẩn

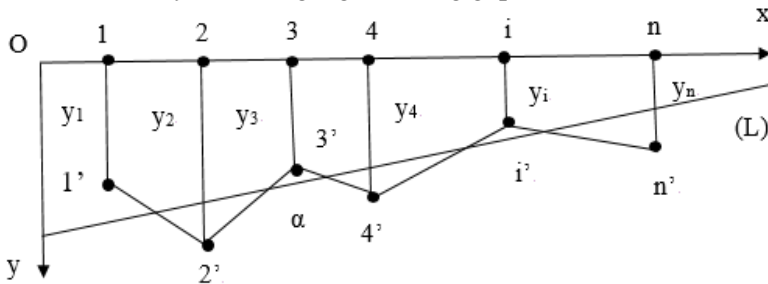
2.6.1. Xác định độ chuyển dịch ngang các điểm quan trắc

Độ chuyển dịch ngang điểm quan trắc m ở chu kỳ i được so sánh với chu kỳ đầu (chu kỳ 0) qua công thức sau:

$$y_m = y_m^{(i)} - y_m^{(0)} \quad (2.40)$$

2.6.2. Biểu đồ chuyển dịch ngang, đánh giá chuyển dịch tổng thể cầu

Quan trắc n điểm $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$, vector chuyển dịch ngang theo hướng vuông góc với trục công trình $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T$, sẽ lập được mặt cắt chuyển dịch ngang là đường gấp khúc G .



Hình 2. 15: Tham số chuyển dịch ngang công trình

Xấp xỉ (G) bằng một đường thẳng (L) sao cho tổng bình phương độ lệch các đỉnh của G so với đường thẳng L là nhỏ nhất $[V_q^2] \rightarrow Min$ thì L được gọi là đường thẳng chuyển dịch ngang xác suất.

Phương trình đường thẳng L được viết dưới dạng:

$$y_i = a.x_i + b \quad (\text{với } a = \text{tg } \alpha) \quad (2.41)$$

α - Góc nghiêng của đường thẳng so với phương nằm ngang

b - Giá trị chuyển dịch ngang của công trình tại điểm gốc tọa độ

Kết luận chương 2

Đề xuất sơ đồ đo hướng chuẩn tổng quát và ứng dụng nguyên lý số bình phương nhỏ nhất để xử lý số liệu đo hướng chuẩn theo sơ đồ này trong quan trắc chuyển dịch ngang cầu có kết cấu cứng.

Chương 3

NGHIÊN CỨU ỨNG DỤNG GNSS - RTK TRONG QUAN TRẮC VÀ PHÂN TÍCH CHUYỂN DỊCH CẦU DÂY VĂNG

3.1. Quan trắc kết cấu công trình cầu dây văng

3.2. Ứng dụng GNSS - RTK trong quan trắc chuyển dịch cầu

3.3. Nghiên cứu đánh giá độ chính xác quan trắc chuyển dịch theo phương đứng cầu dây văng bằng phương pháp GNSS - RTK trong điều kiện Việt Nam

3.3.1. Quan trắc chuyển dịch theo phương đứng cầu dây văng bằng phương pháp GNSS - RTK

Giá trị hiệu độ cao đo bằng GNSS - RTK của một điểm tại hai thời điểm khác nhau có thể xem bằng giá trị hiệu độ cao chuẩn hay kết quả biên độ dao động (hiệu độ cao của một điểm tại các thời điểm đo khác nhau) sẽ không bị ảnh hưởng bởi dị thường độ cao [45].

3.3.2. Ứng dụng trung bình động trong lọc nhiễu số liệu GNSS- RTK

Giá trị trung bình động của kết quả đo chuyển dịch được xác định [25]:

$$x = (l_t + l_{t-1} + l_{t-2} + \dots + l_{t-n+1})/n \quad (3.4)$$

x là giá trị trung bình động tại thời điểm t ; l_t là giá trị đo chuyển dịch tại thời điểm t ; n là số thời điểm tính trung bình động.

3.3.3. Nghiên cứu đánh giá độ chính xác phương pháp GNSS - RTK trong quan trắc chuyển dịch theo phương đứng cầu dây văng

3.3.3.1. Đánh giá độ chính xác GNSS - RTK trong quan trắc chuyển dịch cầu dây văng theo phương đứng - trường hợp cầu chưa thông xe

Để đánh giá độ chính xác số liệu đo chuyển dịch GNSS - RTK theo phương đứng, dùng phương pháp đối chiếu số liệu đo dao động cầu bằng GNSS với số liệu đo trên thước trượt. Thước trượt dài 60cm, có vạch khắc chính xác đến mm, lắp trên chân máy và có thể di chuyển theo phương đứng bằng tay quay. Trước khi đo, thước trượt đã được kiểm nghiệm và coi như không có sai số. Máy rover được gắn trên thước trượt và được đặt tại các điểm đặc trưng của cầu. Tại mỗi vị trí của thước trượt, máy được thu tín hiệu trong một khoảng thời gian nhất định, đồng thời đọc giá trị trên thước. Kết quả đo GNSS - RTK là các giá trị độ cao của một điểm quan trắc tại các vị trí của thước. Tiếp theo xác định được độ lệch theo phương đứng giữa giá trị đo trên thước trượt với hiệu độ cao của một điểm tại hai thời điểm đo liên tiếp.

Kết quả đo bằng GNSS -RTK là độ cao của một điểm quan trắc ở các thời điểm đo khác nhau được đánh giá độ chính xác theo yếu tố sau:
a. Sai số trung phương hiệu độ cao một điểm tại hai thời điểm liên tiếp

Sai số trung phương của hiệu độ cao một điểm tại hai thời điểm đo liên tiếp nhau được tính theo các bước như sau:

+ Độ cao trung bình giá trị đo GNSS - RTK tại mỗi vị trí của thước:

$$H_{tb} = \frac{[H_i]}{n} \quad (3.5)$$

H_i : Độ cao đo bằng GNSS - RTK ở lần đo thứ i ; n : số lần quan trắc

+ Hiệu độ cao của một điểm tại hai thời điểm đo liên tiếp nhau:

$$\Delta H_{(j-1,j)} = H_{tb(j)} - H_{tb(j-1)} \quad (3.6)$$

H_{tbj} , $H_{tb(j-1)}$: Độ cao trung bình tại vị trí (j) , $(j-1)$ khi trượt thước.

+ Độ lệch giữa giá trị đo trên thước với hiệu độ cao của một điểm:

$$\Delta D_{(j-1,j)} = D_{thước(j-1,j)} - \Delta H_{(j-1,j)} \quad (3.7)$$

+ Sai số trung phương kết quả đo được tính theo công thức Gauss:

$$m_{\Delta H} = \pm \sqrt{\frac{[\Delta D \Delta D]}{t}} \quad (3.8)$$

t là số lần tính hiệu độ cao của một điểm tại hai thời điểm đo liên tiếp.

ΔD : Độ lệch giữa giá trị đo trên thước với hiệu độ cao của một điểm

b. Sai số trung phương của một lần đo tại mỗi thời điểm đo

- Để tính sai số trung phương của 1 lần đo, tính số hiệu chỉnh kết quả đo như sau:

$$v_i = H_{tb} - H_i \quad (3.9)$$

- Xác định sai số trung phương của một lần đo [4]:

$$m_H = \pm \sqrt{\frac{[vv]}{n-1}} \quad \text{Với } n \text{ là số lần đo} \quad (3.10)$$

c. Xác định sai số trung phương của một lần đo trong trị đo kép

Khi các trị đo kép được đo độc lập và cùng độ chính xác, dãy kết quả đo được mô tả như sau: $H_1(H'_1, H''_1), H_2(H'_2, H''_2) \dots H_n(H'_{n1}, H''_{n1})$

Lúc đó, sai số giữa hiệu độ cao của một điểm đo đi và đo về:

$$d_i = H'_i + H''_i \quad (3.11)$$

H'_i, H''_i : Hiệu độ cao của một điểm tại hai thời điểm đo đi, đo về

Sai số trung phương của từng trị đo trong trị đo kép được tính [4]:

$$m_H = \pm \sqrt{\frac{[dd]}{2n_1}} \quad (n_1 \text{ là số cặp trị đo kép}) \quad (3.12)$$

Sau khi tính được các sai số trung phương tiến hành so sánh sai số trung phương tính được với sai số cho phép trong quan trắc để kết luận độ chính xác kết quả quan trắc chuyển dịch cầu bằng GNSS-RTK. Sai số cho phép bằng 1/10 đến 1/20 lần giá trị chuyển dịch cho phép [7]. Giá trị chuyển dịch cho phép lấy từ bản thiết kế công trình.

3.3.3.2. Đánh giá độ chính xác GNSS - RTK trong quan trắc chuyển dịch cầu dây văng theo phương đứng - trường hợp cầu đã thông xe

Khi các phương tiện giao thông di chuyển trên cầu thì phương đứng của điểm giữa nhịp chính cầu dây văng thường dao động lớn, liên tục

nên giá trị trung bình động với chuỗi thời gian được lựa chọn để tính giá trị trung bình các kết quả quan trắc.

Giá trị trung bình động được tính theo công thức (3.4).

Số hiệu chỉnh của chuyển dịch được tính theo công thức:

$$v_t = x - l_t \quad (3.13)$$

Độ chính xác kết quả đo được đánh giá bằng cách xác định sai số trung phương của một lần đo theo công thức (3.10).

Độ chính xác của GNSS - RTK được đánh giá thông qua việc so sánh sai số trung phương xác định chuyển dịch với sai số cho phép.

3.4. Tổ chức quan trắc và xác lập cơ sở dữ liệu quan trắc kết cấu cầu dây văng

3.4.1. Tổ chức quan trắc, xác lập cơ sở dữ liệu quan trắc kết cấu cầu

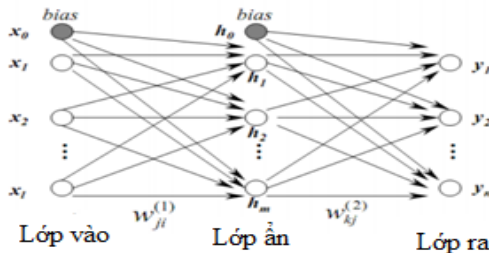
3.4.2. Quy trình hoạt động của hệ thống SHM

3.5. Mạng nơ-ron nhân tạo và ứng dụng ANN trong xây dựng mô hình chuyển dịch công trình cầu dây văng

3.5.1. Khái niệm mạng nơ-ron nhân tạo

3.5.2. Cấu trúc mạng nơ-ron nhân tạo

Cấu trúc của ANN được xác định bởi: số lớp, sự liên kết giữa các nơ-ron, số nơ-ron trên mỗi lớp. Dựa vào số lớp có thể phân thành mạng một lớp, mạng nhiều lớp; hay dựa vào sự liên kết giữa các lớp trong mạng mà phân ra mạng truyền thẳng, mạng hồi quy. Hình 3.24 là mô hình mạng nơ-ron nhiều lớp (lớp vào, lớp ra, lớp ẩn) truyền thẳng.



Hình 3. 24: Mô hình mạng nơ-ron 3 lớp truyền thẳng

Mạng nơ-ron có thể nhiều hơn một lớp ẩn. Tuy nhiên, một lớp ẩn duy nhất là đủ để ANN tính toán được với độ phức tạp của hàm phi tuyến tính [23], [37], [56]. Số lượng của các nơ-ron trong lớp ẩn phụ thuộc vào các yếu tố như số đầu vào, đầu ra, độ nhiễu của dữ liệu đầu ra mong muốn, hàm mục tiêu, kiến trúc mạng, thuật toán luyện mạng.

3.5.3. Huấn luyện mạng nơ-ron nhân tạo

Việc tìm ra được trọng số tối ưu phải dựa vào vào các thuật toán trong huấn luyện mạng. Các thuật toán sẽ thuộc về một các phương pháp huấn luyện mạng, là học có giám sát và học không giám sát.

- Học có giám sát: Mạng được huấn luyện dựa trên một tập hợp mẫu huấn luyện (các cặp mẫu đầu vào x và đầu ra thực tế d). Sự khác biệt giữa các đầu ra thực tế với đầu ra tính toán của mạng được thuật toán sử dụng để điều chỉnh các trọng số.

- Học không có giám sát: Quá trình huấn luyện không có so sánh với kết quả đầu ra thực tế để chỉ ra rằng đầu ra của mạng là đúng hay sai.

3.5.4. Giải thuật lan truyền ngược

3.5.4.1. Hàm mục tiêu

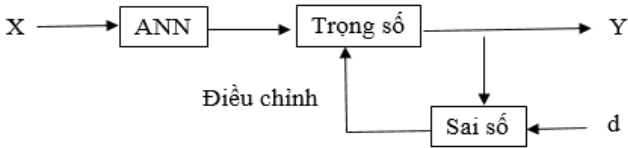
Hàm mục tiêu hay được sử dụng nhất theo công thức sau [6], [23]:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (d_i - y_i)^2 \quad (3.20)$$

d_i, y_i : tương ứng là đầu ra thực tế và dữ liệu đầu ra tính toán của mạng.

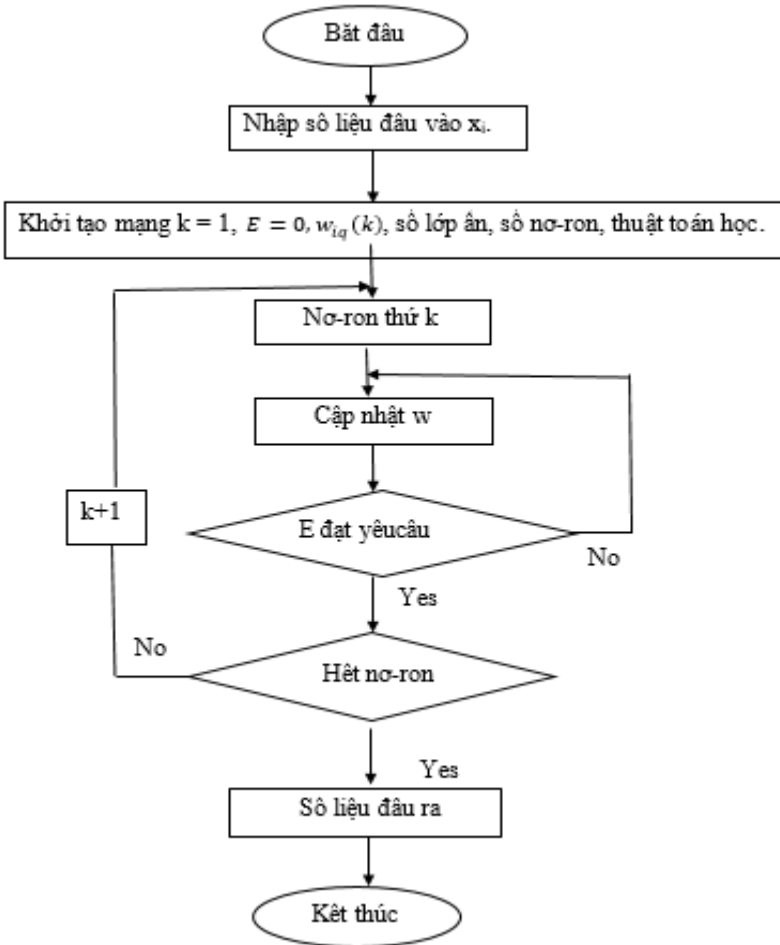
3.5.4.2. Giải thuật lan truyền ngược

Giải thuật lan truyền ngược và phương pháp học có giám sát thường được sử dụng trong mạng nơ-ron truyền thẳng nhiều lớp. Thuật toán lan truyền ngược sẽ thực hiện 2 bước truyền thông tin như sau: Đầu tiên tín hiệu vào x_i được truyền từ đầu vào đến đầu ra tạo ra tín hiệu y_i . Sau đó sai lệch giữa dữ liệu thực tế (d_i) và dữ liệu đầu ra tính toán (y_i) được truyền ngược từ lớp ra trở về lớp trước đó để điều chỉnh trọng số sao cho bộ trọng số mới làm cho hàm mục tiêu E bé hơn. Quá trình tìm bộ trọng số này sẽ được lặp đi lặp lại cho đến khi hàm mục tiêu đạt giá trị nhỏ nhất.



Hình 3.26: Sơ đồ quá trình lan truyền ngược

Trên cơ sở nguyên tắc giải thuật trên, thuật toán lan truyền ngược được thực hiện theo sơ đồ sau:



Hình 3.28: Sơ đồ thuật toán mạng nơ-ron

3.5.4.3. Các chỉ số đánh giá độ chính xác kết quả huấn luyện ANN

Để đánh giá độ chính xác kết quả huấn luyện mạng và kết quả lập mô hình chuyển dịch, các chỉ số thường được sử dụng như sau [23]:

Sai số bình phương trung bình MSE (Mean Square Error):

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - d_i)^2 \quad (3.40)$$

Sai số trung phương RMSE (Root Mean Square Error):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - d_i)^2}{n}} \quad (3.41)$$

Sai số tuyệt đối trung bình MAE (Mean Absolute Error):

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - d_i| \quad (3.42)$$

với y_i : Giá trị đầu ra tính toán từ mạng; d_i : Giá trị đầu ra thực tế
Hệ số xác định (hệ số hồi quy):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (d_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2} \quad (3.43)$$

\bar{d}_i : Giá trị đầu ra thực tế trung bình

Sai số MSE, RMSE, MAE càng nhỏ thì kết quả huấn luyện bằng ANN càng tốt và ngược lại. Với hệ số xác định, khi R^2 càng lớn thì kết quả mô hình chuyển dịch đạt độ chính xác càng cao.

3.5.5. Ứng dụng ANN trong xây dựng mô hình chuyển dịch cầu

3.5.5.1. Ứng dụng chung của ANN

3.5.5.2. Ứng dụng ANN trong xây dựng mô hình chuyển dịch cầu dây văng

a. Các yếu tố ảnh hưởng đến chuyển dịch của cầu dây văng

Việc tính toán xây dựng mô hình chuyển dịch cầu dây văng được dựa vào các yếu tố ảnh hưởng đến kết quả lập mô hình. Cầu dây văng thường có nhịp dài, độ cứng nhỏ, lại có thêm hệ dàn dây và cột tháp cao nên nó dễ nhạy cảm với các tải trọng tác động như gió, nhiệt độ, hoạt tải của các phương tiện giao thông. Vận tốc gió và nhiệt độ đã được chứng minh là hai yếu tố môi trường ảnh hưởng rất lớn đến chuyển dịch cầu dây văng [9], [69]. Ngoài ra, cấu tạo của cầu dây văng là các đỉnh tháp cầu nối với dầm chính thông qua các dây cáp. Các dây cáp này

được kéo căng và đỡ lấy dầm chính. Theo tài liệu [42], [43], [69], sự chuyển dịch theo phương đứng của điểm giữa nhịp chính cầu còn do sự chuyển dịch của các đỉnh tháp gây nên. Như vậy, nhiệt độ, hoạt tải của các phương tiện lưu thông, sự chuyển dịch của đỉnh tháp là nguyên nhân chính gây ra sự chuyển dịch điểm giữa nhịp chính cầu và sẽ là số liệu đầu vào của quá trình xây dựng mô hình chuyển dịch điểm giữa nhịp chính cầu dây văng.

b. Ứng dụng ANN trong lập mô hình chuyển dịch cầu dây văng

Để xác định được tình trạng cầu dựa trên một số lượng lớn các số liệu quan trắc của rất nhiều loại cảm biến khác nhau thuộc hệ thống SHM, các kỹ thuật khai thác dữ liệu được áp dụng. Bài báo [57] chứng minh rằng ANN được sử dụng nhiều nhất, chiếm 30% các nghiên cứu trong xử lý, phân tích số liệu. So với các phương pháp khác, ANN có ưu điểm nổi bật như xây dựng mô hình phi tuyến tính, tính toán rất nhanh trong xử lý, phân tích dữ liệu lớn. Trong xác định sự hư hỏng của cầu, mạng nơ-ron truyền thẳng nhiều lớp cũng được áp dụng để xây dựng mô hình và dự đoán dao động cầu. Công bố khoa học [44], [45], [60] đã đề xuất phương pháp này để phát hiện sự hư hỏng của cầu bằng cách lập mô hình sự thay đổi tần số dao động riêng dựa trên các số liệu đo bằng máy gia tốc kế. Với những ưu điểm trên, ANN truyền thẳng nhiều lớp có thể mạnh trong các bài toán xây dựng mô hình chuyển dịch, dự báo, nhận dạng hư hỏng,...

c. Quy trình thành lập mô hình chuyển dịch cầu dây văng bằng ANN

Quá trình xây dựng mô hình chuyển dịch cầu theo 3 bước chính sau:

Bước 1: Chuẩn bị dữ liệu được thực hiện như sau:

-Thu thập dữ liệu: Để huấn luyện ANN thì dữ liệu thu thập gồm có nhiệt độ, gió, ứng suất, chuyển vị theo phương X, Y, Z tại các điểm nhịp chính, điểm đỉnh tháp cầu dây văng. Các số liệu này phải được đo cùng một thời điểm và đo trong một thời gian dài.

-Tiền xử lý số liệu: Do tính toán đơn giản và giữ được xu hướng dao động cầu nên trung bình động được áp dụng để lọc nhiễu số liệu [70].

- Xác định mối quan hệ tương quan giữa chuyển dịch theo cả 3 phương X, Y, Z của điểm giữa nhịp chính cầu với gió, nhiệt độ, ứng suất, chuyển dịch đỉnh tháp để làm cơ sở lựa chọn các biến đầu vào cho quá trình xây dựng mô hình chuyển dịch bằng ANN.

Bước 2: Xây dựng mô hình chuyển dịch cầu

-Thiết kế ANN dựa trên cơ sở dữ liệu đầu vào, cấu trúc mạng, thuật toán, thông số tối ưu nhất được điều chỉnh trong quá trình huấn luyện. Sau đó sẽ huấn luyện mạng bằng cách điều chỉnh trọng số liên kết. Kết quả quá trình luyện mạng sẽ hiển thị sai số MSE và hệ số hồi quy R^2 .

Bước 3: Đánh giá mô hình chuyển dịch cầu.

Nhằm đảm bảo chất lượng của mô hình chuyển dịch cầu được thành lập tiến hành đánh giá độ chính xác mô hình. Dựa vào các chỉ số MSE, RMSE, MAE, R^2 để từ đó xác định được mô hình tốt nhất.

Kết luận chương 3

- *Độ chính xác GNSS - RTK trong quan trắc chuyển dịch cầu dây văng theo phương đứng được nghiên cứu đánh giá dựa trên các yếu tố là sai số trung phương của hiệu độ cao tại hai thời điểm liên tiếp, sai số trung phương của một lần đo tại mỗi thời điểm đo, sai số trung phương của một lần đo trong trị đo kép. Các sai số này được so sánh với sai số cho phép trong quan trắc chuyển dịch cầu dây văng để từ đó đánh giá độ chính xác của phương pháp GNSS - RTK.*

- *Nghiên cứu ứng dụng mạng nơ-ron truyền thẳng nhiều lớp với thuật toán lan truyền ngược trong xây dựng mô hình chuyển dịch cầu dây văng. Đồng thời đưa ra quy trình xây dựng mô hình chuyển dịch cầu bằng ANN cũng như xác định số liệu đầu vào để huấn luyện mạng là nhiệt độ, ứng suất, chuyển dịch theo 3 phương của điểm giữa nhịp chính, điểm đỉnh tháp và lựa chọn phương pháp trung bình động để lọc nhiễu số liệu.*

Chương 4

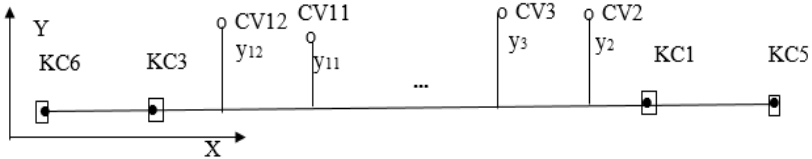
THỰC NGHIỆM

4.1. Thực nghiệm xử lý số liệu quan trắc chuyển dịch ngang cầu cứng Chương Dương

4.1.1. Giới thiệu chung về cầu Chương Dương

Đây là cây cầu cứng, thẳng nên phương pháp hướng chuẩn được chọn để quan trắc chuyển dịch ngang trụ cầu bằng máy toàn đạc điện tử với $m_\beta = \pm 1.5''$. Yêu cầu độ chính xác khi quan trắc $\pm 5\text{mm}$. Độ chính xác của điểm yếu $\pm 3.5\text{mm}$, của lưới cơ sở $\pm 1.1\text{mm}$, lưới quan trắc $\pm 3.3\text{mm}$.

4.1.2. Sơ đồ phân bố mốc khống chế cơ sở và mốc quan trắc



Hình 4.1: Sơ đồ hướng chuẩn quan trắc chuyển dịch ngang cầu

4.1.3. Kết quả đo và kết quả bình sai lưới quan trắc chuyển dịch ngang cầu Chương Dương

Ứng dụng sơ đồ đo hướng chuẩn tổng quát có được kết quả đo là độ lệch hướng được thể hiện trong bảng 4.3. Tiến hành xử lý số liệu có được các bảng 4.2, bảng 4.3, bảng 4.4.

Bảng 4.2: Tọa độ bình sai và sai số vị trí điểm

STT	Tên điểm	Tọa độ bình sai Y(m)	Sai số vị trí m_Y (m)
1	CV2	200.0448	0.0009
2	CV3	200.0561	0.0016
...
10	CV11	200.2001	0.0005
11	CV12	200.0132	0.0003
12	KC1	200.0391	0.0004
13	KC3	200.0447	0.0001

Bảng 4.3: Trị đo và trị bình sai độ lệch hướng

TT	Kí hiệu bước đo			Trị đo (m)	Hiệu chỉnh (m)	Trị bình sai (m)
	Đ. Máy	Định hướng	Đ. đo			
1	KC5	KC6	CV2	0.0440	-0.0002	0.0438
2	KC5	KC6	CV3	0.0560	-0.0008	0.0552
...
43	KC3	KC5	KC6	-0.0440	-0.0009	-0.0449
44	KC1	KC6	KC5	-0.0412	-0.0006	-0.0418

Bảng 4.4: Đánh giá độ lệch tọa độ điểm cơ sở (đơn vị m)

TT	Tên điểm	Tọa độ ck 0	Độ lệch	Tọa độ ck 1	Đánh giá
1	KC1	200.0403	-0.0012	200.0391	Ổn định
2	KC3	200.0451	-0.0004	200.0447	Ổn định
3	KC5	200.0000	0.0011	200.0011	Ổn định
4	KC6	200.0000	0.0005	200.0005	Ổn định

Sai số trung phương trọng số đơn vị $m = \pm 2.2$ (mm)

4.2. Thực nghiệm đánh giá độ chính xác quan trắc chuyển dịch theo phương đứng cầu Bạch Đằng bằng GNSS - RTK

4.2.1. Mô tả thực nghiệm

Để đánh giá độ chính xác số liệu đo chuyển dịch theo phương đứng bằng GNSS - RTK, tiến hành đo đạc thực nghiệm tại cầu dây văng Bạch Đằng. Coi dao động của cầu rất nhỏ, máy rover R8 của hãng Trimble có tần số 1Hz được gắn trên thước trượt. Sơ đồ bố trí máy GNSS gồm 1 trạm cố định, 1 trạm động đặt lần lượt tại các điểm QT01, QT02 (là 2 điểm giữa nhịp chính cầu). Tại mỗi vị trí đo 1, 2, 3,..., 7 trên thước trượt, máy thu tín hiệu liên tục trong 5 phút. Theo hồ sơ thiết kế cầu, giới hạn cho phép chuyển dịch của nhịp chính cầu là ± 30 cm. Sai số cho phép khi quan trắc cầu được chọn bằng 1/10 giá trị giới hạn cho phép và bằng ± 3 cm.

4.2.2. Đánh giá độ chính xác số liệu GNSS - RTK trong quan trắc chuyển dịch theo phương đứng cầu Bạch Đằng

Kết quả tính sai số trung phương nhằm đánh giá độ chính xác số liệu:

- Sai số trung phương hiệu độ cao một điểm vào hai thời điểm liên tiếp tại QT01 là ± 8 mm. Sai số trung phương tại điểm QT02 là ± 9 mm.
- Sai số trung phương của một lần đo tại mỗi thời điểm:

Bảng 4.8: Sai số trung phương độ cao tại các vị trí thước (đvị mm)

Vị trí Điểm GNSS	Vị trí										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
QT01	± 9	± 8	± 6	± 6	± 7	± 7	± 7	± 8			
QT02	± 5	± 6	± 7	± 6	± 7	± 6	± 8	± 10	± 10	± 9	± 11

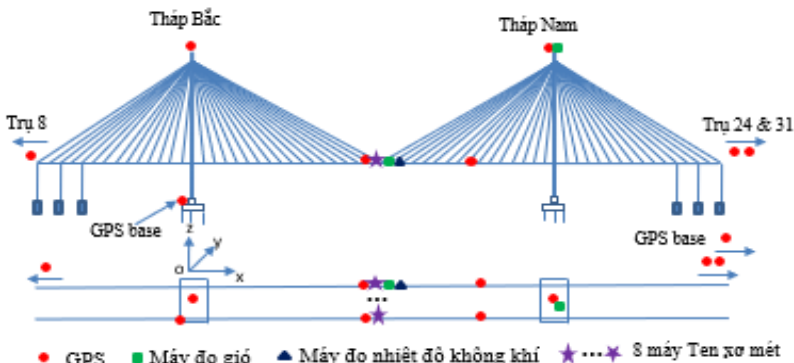
- Sai số trung phương của một lần đo trong trị đo kép bằng ± 5 mm.

Qua đó thấy rằng giá trị các sai số trung phương tính được ở trên đều nhỏ sai số cho phép khi quan trắc chuyển dịch theo phương đứng cầu.

4.3. Thực nghiệm đánh giá độ chính xác quan trắc chuyển dịch theo phương đứng cầu Cần Thơ bằng phương pháp GNSS - RTK

4.3.1. Mô tả số liệu

Cầu dây văng Cần Thơ có nhịp chính dài 550m, chiều cao tháp 134.7m.



Hình 4. 7: Sơ đồ vị trí máy đo gió, nhiệt độ, GNSS, ứng suất

Các thiết bị đo tải trọng động tác động đến cầu thuộc SHM như gió, nhiệt độ, ứng suất và hệ thống GNSS sử dụng kỹ thuật RTK gồm 2 trạm base và 9 máy rover đo chuyển dịch cầu được thể hiện trên hình 4.7. Để xác định độ chính xác theo phương đứng, dữ liệu quan trắc chuyển dịch của điểm giữa nhịp chính trong 1 ngày (144 dữ liệu) được tính toán.

4.3.2. Đánh giá độ chính xác số liệu GNSS - RTK trong quan trắc chuyển dịch cầu

Kết quả tính sai số trung phương của một lần đo bằng $\pm 6\text{mm}$ nhỏ hơn sai số cho phép quy định trong hồ sơ thiết kế kỹ thuật là $\pm 78\text{ mm}$.

Nhận xét: Phương pháp GNSS - RTK hoàn toàn đảm bảo độ chính xác trong quan trắc chuyển dịch theo phương đứng cầu dây văng.

4.4. Xây dựng mô hình chuyển dịch cầu dây văng Cầu Thơ bằng phương pháp ANN truyền thẳng nhiều lớp

4.4.1. Chuẩn bị dữ liệu

- Thu thập số liệu: Các yếu tố như nhiệt độ không khí, gió, ứng suất, số liệu chuyển dịch của điểm giữa nhịp chính, điểm đỉnh tháp cầu được đo cùng thời điểm, tần suất lấy mẫu là 10 phút/lần. Với thời gian đo liên tục trong 07 ngày được 1008 số liệu mỗi loại. Số liệu được lọc nhiễu bằng phương pháp trung bình động, số thời điểm tính trung bình động $n = 10$. Dựa trên hệ số tương quan giữa chuyển dịch điểm giữa nhịp chính cầu theo phương X, Y, Z với các yếu tố nhiệt độ, vận tốc gió, ứng suất, chuyển dịch của điểm đỉnh tháp Bắc, tháp Nam và những biến có hệ số tương quan lớn hơn ± 0.5 sẽ được chọn làm dữ liệu đầu vào của quá trình huấn luyện mạng.

Bảng 4.10: Mối quan hệ tương quan giữa nhiệt độ, vận tốc gió, chuyển dịch đỉnh tháp và chuyển dịch điểm giữa nhịp chính [9],[42]

Phương	Hệ số tương quan (r)							
	Nhiệt độ	Vận tốc gió	Tháp Bắc			Tháp Nam		
			X	Y	Z	X	Y	Z
X	0.58	0.25	0.54	-0.08	0.05	0.24	-0.13	0.08
Y	0.07	0.02	0.52	0.65	-0.05	-0.50	0.67	-0.10
Z	-0.93	-0.05	-0.67	0.29	-0.18	0.77	0.36	-0.31

Bảng 4.11: Môi quan hệ tương quan giữa chuyển dịch của điểm giữa nhịp chính cầu và ứng suất (US)

Phương	Hệ số tương quan (r)							
	US 1	US 2	US 3	US 4	US 5	US 6	US 7	US 8
X	0.09	0.12	0.10	0.19	0.50	0.38	0.32	0.50
Y	0.69	0.69	0.66	0.68	0.50	-0.14	-0.25	0.13
Z	-0.14	-0.20	-0.17	-0.33	-0.93	-0.71	-0.60	-0.88

Vậy để lập mô hình chuyển dịch theo phương X điểm giữa nhịp dùng dữ liệu nhiệt độ, ứng suất 5, 8, chuyển dịch phương X đỉnh tháp Bắc; theo phương Y đưa dữ liệu ứng suất 1, 2, 3, 4, 5, chuyển dịch phương X, Y đỉnh tháp Bắc, tháp Nam; với phương Z thì số liệu nhiệt độ, ứng suất 5, 6, 7, 8, chuyển dịch phương X đỉnh tháp Bắc, tháp Nam được sử dụng.

4.4.2. Xây dựng mô hình chuyển dịch điểm giữa nhịp chính cầu

- Thiết kế mạng có hàm huấn luyện là hàm phi tuyến sig-moid, học có giám sát, giải thuật huấn luyện lan truyền ngược. Các số liệu đo nhiệt độ, ứng suất, chuyển dịch của đỉnh tháp Bắc, tháp Nam là dữ liệu đầu vào. Lốp ra lần lượt là giá trị chuyển dịch theo phương dọc, phương ngang, phương đứng của điểm giữa nhịp chính cầu dây văng.

Tổng hợp độ chính xác khi huấn luyện mạng có Bảng 4. 14 sau:

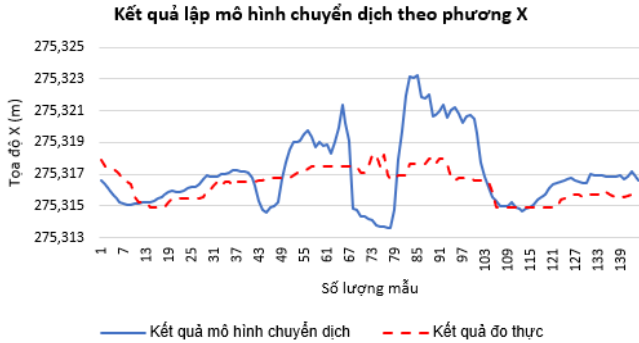
Bảng 4. 14: Kết quả độ chính xác huấn luyện mạng

Phương chuyển dịch	X	Y	Z
R²	0.962	0.995	0.997
MSE (m²)	5x10 ⁻⁷	4x10 ⁻⁷	5x10 ⁻⁶

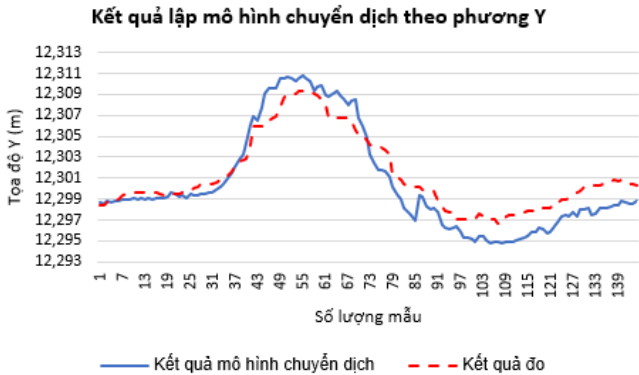
Sai số MSE của phương X, Y, Z rất nhỏ, gần bằng 0, hệ số hồi quy của ba phương lớn, gần bằng 1. Nó thể hiện kết quả huấn luyện rất tốt.

- Lập mô hình chuyển dịch cầu dây văng của điểm giữa nhịp chính cầu theo phương X, Y, Z trong 01 ngày bằng ANN với các số liệu đầu vào tương ứng là nhiệt độ, hoạt tải của phương tiện giao thông, chuyển dịch của điểm đỉnh tháp Bắc, tháp Nam. Kết quả đầu ra lần lượt là giá trị của mô hình chuyển dịch điểm giữa nhịp chính cầu theo cả 3 phương.

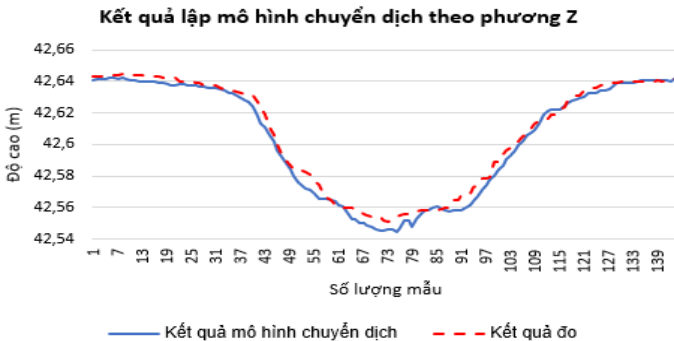
Kết quả mô hình chuyển dịch điểm giữa nhịp chính cầu dây văng theo phương X, Y, Z được thể hiện trên Hình 4. 14, 4. 15, 4. 16.



Hình 4. 14: Kết quả xây dựng mô hình chuyển dịch phương X



Hình 4. 15: Kết quả xây dựng mô hình chuyển dịch phương Y



Hình 4. 16: Kết quả xây dựng mô hình chuyển dịch phương Z

Từ Hình 4.14, 4.15, 4.16, thấy rằng độ lệch giữa kết quả mô hình chuyển dịch và kết quả đo GNSS - RTK khá nhỏ.

4.4.3. Đánh giá độ chính xác mô hình chuyển dịch cầu dây văng

Độ chính xác mô hình chuyển dịch cầu được thể hiện trên bảng 4.18.

Bảng 4. 18: Kết quả sai số trung phương trong xây dựng mô hình chuyển dịch cầu

Phương	X	Y	Z
RMSE (m)	±0.002	±0.002	±0.003

Qua Bảng 4.18 nhận thấy sai số trung phương khi xây dựng mô hình chuyển dịch điểm giữa nhịp chính cầu theo 3 phương là rất nhỏ.

Nhận xét: ANN có thể được sử dụng để lập mô hình chuyển dịch của cầu dây văng dựa trên các yếu tố của tải trọng động như nhiệt độ không khí, hoạt tải của phương tiện giao thông, chuyển dịch của điểm đỉnh tháp Bắc, tháp Nam.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

1. KẾT LUẬN

Để nâng cao hiệu quả trong quan trắc chuyển dịch công trình cầu mà chủ yếu là nâng cao độ chính xác, nội dung nghiên cứu của luận án có những kết luận như sau:

- Ứng dụng sơ đồ hướng chuẩn tổng quát và xử lý số liệu đo theo sơ đồ này bằng nguyên lý số bình phương nhỏ nhất như đề xuất trong luận án cho phép nâng cao độ chính xác của phương pháp hướng chuẩn đồng thời ứng dụng phương pháp này giúp cho việc đo đạc được thuận lợi, linh hoạt khi quan trắc chuyển dịch ngang cầu có kết cấu cứng.

- Từ kết quả nghiên cứu lý thuyết và tính toán thực nghiệm cho thấy phương pháp GNSS - RTK hoàn toàn đáp ứng được yêu cầu độ chính xác trong quan trắc chuyển dịch cầu dây văng theo phương đứng, số liệu quan trắc chuyển dịch theo phương Z có đủ độ tin cậy cho xử lý,

phân tích, đánh giá, dự báo chuyển dịch cầu trong quá trình khai thác sử dụng.

- Mối quan hệ tương quan giữa ứng suất và chuyển dịch điểm giữa nhịp theo cả 3 phương nhất là phương Y, phương Z được xác định trong luận án từ đó xác định phương tiện giao thông đang lưu thông trên cầu là một trong những nguyên nhân chủ yếu gây ra chuyển dịch của điểm giữa nhịp chính theo phương Y và phương Z. Đó cũng là một những đầu vào quan trọng của quá trình huấn luyện ANN trong xây dựng mô hình chuyển dịch cầu dây văng.

- Do có độ chính xác, độ tin cậy cao (R^2 lớn hơn 0.962, sai số RMSE nhỏ hơn $\pm 0.003\text{m}$) nên mạng nơ-ron truyền thẳng nhiều lớp với thuật toán lan truyền ngược có thể được áp dụng để lập mô hình quá trình chuyển dịch liên tục của cầu dây văng dưới tác động của nhiệt độ, hoạt tải của các phương tiện giao thông, chuyển dịch của các đỉnh tháp cầu.

2. KIẾN NGHỊ

- Triển khai ứng dụng rộng rãi phương pháp hướng chuẩn có sơ đồ đo tổng quát trong quan trắc chuyển dịch ngang cầu cứng tại Việt Nam.

- Tiếp tục nghiên cứu xử lý số liệu quan trắc chuyển dịch cầu dây văng, trong đó có nghiên cứu sâu vấn đề lọc nhiễu số liệu GNSS - RTK nhằm cung cấp các số liệu tin cậy cho việc phân tích chuyển dịch cầu.

- Kiến nghị các cơ quan ban ngành sớm có các văn bản pháp quy quy định yêu cầu độ chính xác, việc lựa chọn chủng loại, số lượng thiết bị, cách thức thiết kế, lắp đặt máy móc, phương pháp đo, xử lý, tính toán, phân tích số liệu đo chuyển dịch cầu.

**CÔNG TRÌNH KHOA HỌC CỦA TÁC GIẢ ĐÃ CÔNG BỐ
LIÊN QUAN ĐẾN NỘI DUNG LUẬN ÁN**

1. H. L. T. Ho, H. V. Le, L. T. Nguyen, (2017), “A Study on Accuracy Evaluation of GPS Vertical Monitoring Outcomes on Main Span of Can Tho Bridge, Vietnam”, *The 8th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure Brisbane, Australia*, pp. 60-67.
2. Thuy Linh Nguyen, Van Hien Le, Minh Ngoc Le, Duc Cong Tran, (2018), “Accuracy assessment of displacement measurements of cable-stayed bridge using GPS-RTK technology”, *International Conference on Sustainability in Civil Engineering, Hanoi, Vietnam*, pp.351-354.
3. Trần Khánh, Nguyễn Thùy Linh, Nguyễn Kim Thanh, (2018), “Ứng dụng phương pháp hướng chuẩn quan trắc chuyển dịch ngang cầu Chương Dương”, *Hội nghị Toàn quốc Khoa học Trái đất và Tài nguyên với Phát triển bền vững, Hà Nội*, tr. 22-28.
4. Nguyễn Thùy Linh, Hồ Thị Lan Hương, Lê Văn Hiến, Lê Đức Hải, (2018), “Nghiên cứu đánh giá độ chính xác số liệu quan trắc chuyển dịch cầu dây văng theo phương đứng bằng kỹ thuật đo GPS – RTK”, *Tạp chí Khoa học Giao thông Vận tải*, số 67, tr. 41-48.
5. Nguyễn Thùy Linh, Hồ Thị Lan Hương, Lê Văn Hiến, Lê Đức Hải, (2018), Nghiên cứu phương pháp đánh giá và xử lý số liệu quan trắc chuyển dịch cầu dây văng bằng GPS – RTK theo phương đứng, Báo cáo tổng kết đề tài NCKH cấp cơ sở, Mã T2018-CT-043, Trường Đại học Giao thông Vận tải.
6. Nguyễn Thùy Linh, Hồ Thị Lan Hương, Nguyễn Hữu Hưng (2019), “Nghiên cứu ứng dụng trí tuệ nhân tạo xây dựng mô hình dự báo

chuyển dịch theo phương đứng cầu dây văng”, *Tạp chí Giao thông Vận tải*, tháng 12/2019, tr. 72-77.

7. Thuy Linh Nguyen, Huu Hung Nguyen, (2020), “Application of Artificial Neural Network for recovering GPS - RTK data in the monitoring of cable - stayed bridge deformation”, *Structural Health Monitoring and Engineering Structure Select proceedings of SHM&ES 2020, Lecture Notes in Civil Engineering*, ISBN 978-981-16-0945-9, pp. 63-76.

8. Tinh Duc Le, Hien Van Le, Linh Thuy Nguyen, Thanh Kim Thi Nguyen, Duy Tien Le, (2020), “Application of correlation and regression analysis between GPS – RTK and environmental data in processing the monitoring data of cable – stayed”, *Journal of Mining and Earth Sciences*, 6(61), pp. 59-72.

9. Nguyễn Thùy Linh, Hồ Thị Lan Hương, Nguyễn Hữu Hưng, Lê Văn Hiến, (2021), “Nghiên cứu ứng dụng mạng nơ - ron để khôi phục số liệu GNSS trong quan trắc chuyển vị cầu dây văng”, *Tạp chí Giao thông Vận tải*, tháng 11/2021, tr 67-71.

10. Nguyễn Thùy Linh, Hồ Thị Lan Hương, Nguyễn Hữu Hưng, Lê Văn Hiến, (2021), Nghiên cứu ứng dụng trí tuệ nhân tạo (AI) để khôi phục số liệu GPS - RTK trong quan trắc chuyển vị công trình cầu dây văng tại Việt Nam, Báo cáo tổng kết đề tài NCKH cấp cơ sở, Mã T2021-CT-033, Trường Đại học Giao thông Vận tải.