



ISSN 0866-7608

TẠP CHÍ KHOA HỌC TÀI NGUYÊN VÀ MÔI TRƯỜNG

TRƯỜNG ĐẠI HỌC TÀI NGUYÊN VÀ MÔI TRƯỜNG HÀ NỘI

HANOI UNIVERSITY OF NATURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT



Số 47

Tháng 9/2023

NGHIÊN CỨU

TỔNG BIÊN TẬP
PGS.TS. Phạm Quý Nhân

PHÓ TỔNG BIÊN TẬP
TS. Nguyễn Bá Dũng

ỦY VIÊN HỘI ĐỒNG BIÊN TẬP

1. PGS.TS. Hoàng Anh Huy
2. PGS.TS. Trần Duy Kiều
3. PGS.TS. Nguyễn Ngọc Thanh
4. PGS.TS. Hoàng Ngọc Quang
5. PGS.TS. Nguyễn Thế Hưng
6. TS. Phạm Anh Tuấn
7. PGS.TS. Nguyễn Hoàn
8. PGS.TS. Lê Thị Trinh
9. TS. Phạm Thị Hoa
10. TS. Nguyễn Hồng Lân
11. PGS.TS. Phí Trường Thành
12. TS. Lê Xuân Hùng
13. PGS.TS. Nguyễn Việt Lành
14. TS. Lê Phú Hưng
15. PGS.TS. Phạm Văn Cự
16. GS.TS. Mai Trọng Nhuận
17. PGS.TS. Nguyễn Thế Trinh
18. GS.TS. Phan Tuấn Nghĩa
19. GS.TS. Trần Thực
20. GS.TS. Trần Đức Viên
21. GS.TS. Trần Thọ Đạt

Thư ký tòa soạn
TS. Trần Thị Minh Hằng

Trị sự - Tổng hợp
ThS. Nguyễn Đức Mạnh

Giấy phép xuất bản
Số: 2760/GP-BTTTT - Bộ Thông tin và Truyền thông
cấp ngày 27 tháng 12 năm 2012
In tại: Công ty TNHH In và Thương mại Châu Anh

Tòa soạn - Trị sự
Trường Đại học Tài nguyên và Môi trường Hà Nội
Đ/c: 41 A Phú Diễn, phường Phú Diễn,
quận Bắc Từ Liêm, Hà Nội
Điện thoại: 84-24-37645798, Fax: 84-24-38370597
Email: tapchikhtnmt@hunre.edu.vn

1. **Đinh Thế Toàn, Nguyễn Như Hùng, Lê Minh Hằng:** Nghiên cứu thành lập bản đồ hiện trạng lớp phủ tỷ lệ trung bình khu vực bãi cạn ngoài biển bằng ảnh vệ tinh WorldView-2..... 3
2. **Dương Thành Trung, Hoàng Anh Tuấn, Đỗ Văn Dương:** Giải pháp nâng cao độ chính xác trong quan trắc công trình bằng công nghệ GNSS RTK 15
3. **Vũ Văn Lân, Bùi Xuân Thông, Nguyễn Hồng Lân, Lê Ngọc Anh:** Đánh giá ảnh hưởng của hoạt động điện gió đến chế độ thủy thạch động lực khu vực ven biển tỉnh Bạc Liêu 26
4. **Đỗ Thị Bích:** Phân tích, đánh giá nguy cơ hạn hán gây ra trên lưu vực sông Vu Gia - Thu Bồn trong điều kiện biến đổi khí hậu 38
5. **Đào Văn Khánh:** Nghiên cứu các nhân tố ảnh hưởng đến giá bán căn hộ chung cư hạng A trên địa bàn quận Nam Từ Liêm, thành phố Hà Nội 51
6. **Đỗ Thị Nhung, Nguyễn Thị Thảo Vân, Nguyễn Thị Diễm My, Đặng Đỗ Lâm Phương, Bùi Thị Thúy Đào, Phạm Văn Mạnh:** Tiếp cận địa không gian trong đánh giá phân mảnh môi trường sống gắn với thay đổi sử dụng đất: nghiên cứu điển tại công viên địa chất toàn cầu UNESCO Đắk Nông, Việt Nam..... 63
7. **Đào Văn Khánh:** Đánh giá việc thực hiện quyền của người sử dụng đất trên địa bàn huyện Cao Lộc, tỉnh Lạng Sơn 76
8. **Ngô Thị Xuân Thịnh, Phương Ngọc Nam, Đoàn Thị Oanh, Nguyễn Thị Minh Diệp, Trần Thị Vân Anh, Hà Thanh Hòa, Nguyễn Xuân Trường, Phạm Quốc Tuấn:** Đánh giá ô nhiễm vi nhựa trong nước uống đóng chai trên địa bàn tỉnh Phú Thọ 88
9. **Phạm Anh Tuấn:** Ảnh hưởng của một số dự án quy hoạch sử dụng đất đến giá đất ở tại huyện Đông Anh, thành phố Hà Nội 96
10. **Đỗ Thị Hoài, Lê Minh Hằng:** Nghiên cứu kết hợp thông tin địa động lực và kỹ thuật PSInSAR trong đánh giá ảnh hưởng của động đất tại khu vực Kon Tum..... 110
11. **Trần Thị Duyên:** Đánh giá mức độ hài lòng của sinh viên đối với chất lượng dịch vụ đào tạo của Khoa Môi trường Trường Đại học Tài nguyên và Môi trường Hà Nội năm học 2022 - 2023 122
12. **Nguyễn Chính Kiên, Nguyễn Thị Hằng, Dương Thị Thanh Hương:** Áp dụng mô hình mạng nơ-ron nhân tạo trong tính toán cường độ mưa từ độ phân hồi radar tại tỉnh Thừa Thiên - Huế 136
13. **Lê Thị Thùy Trang, Hà Trần Kiều My:** Nghiên cứu thực trạng và đề xuất giải pháp nâng cao công tác quản lý chất thải rắn sinh hoạt tại xã đảo Nhơn Châu, thành phố Quy Nhơn, tỉnh Bình Định..... 145
14. **Trương Hoàng Đan, Lê Trần Thanh Liêm, Lý Văn Lợi, Lê Thị Diễm Mí:** Đánh giá mức độ xâm hại của sinh vật ngoại lai xâm lấn tại tỉnh An Giang 161
15. **Thái Thị Thanh Minh:** Thực trạng thực hiện chính sách, pháp luật ứng phó với biến đổi khí hậu tại tỉnh Yên Bái..... 176

TRAO ĐỔI, TIN TỨC & SỰ KIỆN

16. **Bùi Thị Hạnh:** Tọa đàm xin ý kiến dự thảo chuẩn chương trình đào tạo khối ngành môi trường và bảo vệ môi trường..... 185

GIẢI PHÁP NÂNG CAO ĐỘ CHÍNH XÁC TRONG QUAN TRẮC CÔNG TRÌNH BẰNG CÔNG NGHỆ GNSS RTK

Dương Thành Trung¹, Hoàng Anh Tuấn¹, Đỗ Văn Dương²

¹Trường Đại học Mở - Địa chất

²Trường Đại học Tài nguyên và Môi trường Hà Nội

Tóm tắt

Quan trắc chuyển dịch công trình là một trong các tham số để đánh giá và cảnh báo về sức khỏe các công trình xây dựng. Quan trắc chuyển dịch bằng GNSS theo phương pháp đo đồng thời gian thực (GNSS RTK) đã được ứng dụng phổ biến với ưu điểm ở tính tự động hóa cao và cho báo cáo ở thời gian thực. Tuy nhiên, do ảnh hưởng của môi trường và các điều kiện đo khác nhau, dữ liệu GNSS RTK thường bị suy giảm độ chính xác đáng kể so với các phương pháp truyền thống. Do vậy, nghiên cứu này tập trung vào các phương pháp lọc nhiễu trong trị đo GNSS RTK nhằm nâng cao độ chính xác của kết quả đo. Với các dữ liệu quan trắc ở thời gian thực với tần số đầu ra cỡ 1 Hz, nhóm tác giả đề xuất phương pháp lọc hai chiều dựa trên thuật toán Kalman mở rộng với các tham số phù hợp. Mục đích của bài báo là xây dựng mô hình toán học cho phép lọc nhiễu trong công tác quan trắc chuyển vị công trình liên tục tự động. Kết quả nghiên cứu cho thấy rằng khi áp dụng các phép lọc để xử lý số liệu quan trắc, độ chính xác và độ tin cậy của kết quả quan trắc bằng GNSS RTK tăng lên đáng kể so với dữ liệu chưa qua xử lý. Độ chính xác quan trắc đạt 3,9 - 6,0 mm với khoảng thời gian thu thập dữ liệu trong 1 phút.

Từ khóa: Quan trắc tự động; GNSS RTK; Kalman; Lọc hai chiều.

Abstract

Improving positional accuracy in deformation monitoring using GNSS RTK

The automatic monitoring system has been widely applied for structure deformation monitoring. A monitoring system consists of many automatic monitoring sensor stations installed at specific locations of the project site, with the aim of monitoring different quantities such as displacement, settlement, inclination,... All stations are generally connected to a control system through software, transmission of real-time monitoring data of the monitored objects. Monitoring data can be analyzed and evaluated over time for reporting its health status. Due to the influence of the environment and different measurement conditions, the measurement data is often affected by noise, causing measurement errors. Therefore, noise filtering is necessary in the processing of monitoring data to ensure the accuracy of measurement results. With real-time continuous monitoring data with a frequency from a few seconds to a few minutes, we propose an extended Kalman filter with parameters suitable for current monitoring conditions in Vietnam. The main objective of the paper is to build a mathematical model for extended Kalman filtering in automatic continuous construction displacement monitoring. Research results show that when applying filters to process monitoring data, the accuracy and reliability of monitoring results increase significantly compared to untreated data. Observation accuracy reached 3.9 - 6.0 mm with a data collection interval of 1 minute.

Keywords: Deformation monitoring; GNSS; Kalman filter; Two - ways filter.

1. Đặt vấn đề

Ngày nay, cùng với sự phát triển kinh tế - xã hội, các công trình cơ sở hạ tầng quy mô lớn ngày càng gia tăng. Các công trình xây dựng lớn thường phải chịu tác động mạnh của nhiều yếu tố ngoại cảnh như tải trọng, gió, nhiệt độ, động đất,... Những tác động này gây ra sự biến dạng và sự thiếu ổn định của công trình. Để đánh giá tình trạng của công trình và kịp thời phát hiện những vấn đề bất ổn trong quá trình thi công và vận hành công trình, việc quan trắc biến dạng công trình là rất cần thiết.

Từ những năm 90 của thế kỷ trước, trên thế giới đặc biệt là các nước phát triển đã hoàn thiện và ứng dụng hệ thống quan trắc biến dạng công trình thời gian thực cho các công trình xây dựng của họ. Các hệ thống quan trắc phức tạp đã được xây lắp đồng bộ, gắn trên các cây cầu lớn, các đập thủy điện, nhà ga, hầm lò.

Đi đầu trong lĩnh vực nghiên cứu và phát triển các giải pháp quan trắc biến dạng công trình phải kể đến các công ty lớn, các tập đoàn đa quốc gia như: Leica (Thụy sĩ), VSL (Thụy Sĩ), GeoKon (Mỹ), Slope Indicator (Mỹ),...

Mục đích chính của việc quan trắc công trình thời gian thực là để theo dõi tình trạng sức khỏe của công trình (Structure Health Monitoring), đánh giá các nguyên nhân tác động và kịp thời phát hiện những hư hỏng [1]. Trong đó, các thông số để đánh giá tình trạng của công trình bao gồm mức độ chuyển dịch, chuyển vị, lún, nghiêng, vặn xoắn, độ rung lắc, sức căng kết cấu,... Những tình trạng này có thể được đánh giá thông qua các thiết bị đo đạc, cảm biến như máy thu

GNSS, máy toàn đạc điện tử tự động, cảm biến nghiêng, cảm biến rung, cảm biến sức căng,... Các yếu tố chính gây nên và làm ảnh hưởng đến sức bền của công trình bao gồm tải trọng của công trình và tải trọng mang, các tác động từ môi trường như nhiệt độ, áp suất, gió, động đất và ánh sáng mặt trời. Mức độ tác động của các yếu tố môi trường có thể tính toán, phân tích thông qua các cảm biến như nhiệt kế, áp suất kế, phong kế, camera giám sát và các thiết bị phụ trợ khác [2].

Alojz Kopáčík và nhóm tác giả (2015) [2] giới thiệu việc quan trắc thời gian thực cầu dây văng nhịp lớn Lafranconi ở Bratislava, Cộng hòa Slovak. Theo bài báo này, hệ thống quan trắc tự động bao gồm hai nhóm cảm biến chính là nhóm các cảm biến trắc địa bao gồm máy thu GNSS, máy toàn đạc điện tử tự động, cảm biến nghiêng với độ chính xác cao và nhóm cảm biến khí tượng bao gồm cảm biến nhiệt độ, áp suất, độ ẩm, tốc độ và hướng gió,... Các cảm biến này được kết nối vào một máy tính chủ để đồng bộ hóa về thời gian và các số liệu đo được xử lý bằng phần mềm Geomos của hãng Leica để đưa ra các số liệu phân tích.

Xiao Meng (2002) [3] đã phân tích chi tiết và đánh giá khả năng của việc quan trắc biến dạng cầu ở thời gian thực sử dụng máy thu GNSS và gia tốc kế. Theo kết luận của tác giả, việc lựa chọn và nâng cao độ chính xác định vị của GNSS là cần thiết để có thể đáp ứng được yêu cầu quan trắc chuyển dịch công trình ở mức mm về độ chính xác.

Ehsan và nhóm tác giả (2021) [4] đã phân tích các phép đo GNSS trong quan trắc biến dạng cầu dựa trên phép lọc Kalman và mạng Nơron thần kinh

nhân tạo. Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng phương pháp này có thể được áp dụng để lọc nhiễu nhằm nâng cao độ chính xác của kết quả quan trắc đến cỡ mm. Vấn đề của nghiên cứu này cần có lượng trị đo chuẩn đủ lớn để huấn luyện mô hình sai số cho phép ước lượng.

Cejing và nhóm tác giả (2023) [5] giới thiệu giải pháp tích hợp GNSS và gia tốc kế với mô hình nhiễu thích nghi. Kết luận của bài báo chỉ rằng phép lọc Kalman có ý nghĩa lớn trong việc xử lý nhiễu, đặc biệt là trong các biến động phức tạp. Tuy vậy, với thuần túy trị đo GNSS, các trị đo với sai số lớn bất thường có thể xuất hiện trong những điều kiện không được dự đoán trước và gia tốc kế có tác dụng phát hiện những sai số này trong phép đo quan trắc. Hạn chế của giải pháp này nằm ở giá cả của hệ thống, đặc biệt là gia tốc kế đủ nhạy để có thể phát hiện các trị đo GNSS bất thường.

Ở nước ta hiện nay, công tác quan trắc biến dạng và tính an toàn công trình ngày càng được quan tâm nghiên cứu và ứng dụng. Một số trường đại học, các viện nghiên cứu lớn đã và đang bắt tay vào nghiên cứu để đưa ra quy trình quan trắc biến dạng công trình thời gian thực. Tuy nhiên, các thiết bị máy móc, cảm biến và cả phần mềm xử lý số liệu hầu hết là được nhập khẩu từ nước ngoài, trong đó giá thành của các thành phần này khá cao trong điều kiện Việt Nam, điều này làm giảm khả năng tiếp cận, vận hành cũng như cải tiến các hệ thống hiện tại [8].

Từ các vấn đề trên, bài báo này đề xuất phương pháp lọc nhiễu dựa trên phép lọc Kalman kết hợp với phép lọc 2 chiều thời gian thực nhằm nâng cao độ chính xác quan trắc chuyển dịch công trình dựa

trên công nghệ định vị vệ tinh GNSS.

2. Cơ sở lý thuyết và phương pháp nghiên cứu

2.1. Tổng quan về phép lọc Kalman

2.1.1. Tổng quan về phép ước lượng và lọc Kalman

Ước lượng là một dạng xử lý số liệu nhằm tìm ra các giá trị có độ tin cậy cao nhất của các đại lượng cần xác định [4]. Bản chất của việc ước lượng là xác định hàm phân phối xác suất của các đại lượng cần xác định. Để giải quyết vấn đề này, các mô hình toán học hệ thống với luật phân phối xác suất và mô hình trị đo với luật phân phối xác suất được xây dựng như công thức (1) và (2).

$$x_k = f_k(x_{k-1}, w_k) \quad (1)$$

$$z_k = h_k(x_k, v_k) \quad (2)$$

Trong đó:

$x_k \in R^{n_x}$ là véc tơ trạng thái ở thời điểm k ; $w_k \in R^{n_w}$ là nhiễu hệ thống; $z_k \in R^{n_z}$ là trị đo hỗ trợ; $v_k \in R^{n_v}$ là nhiễu trị đo; $f_k: R^{n_x} \times R^{n_w} \rightarrow R^{n_x}$ và $h_k: R^{n_x} \times R^{n_v} \rightarrow R^{n_z}$ là các hàm của véc tơ trạng thái và véc tơ trị đo.

Nếu xác định được hàm phân phối $P(x_k | z_{1:k})$ xác suất thì có thể xác định được trị xác suất nhất của véc tơ trạng thái \hat{x}^k và ma trận hiệp phương sai tương ứng P_k .

Để đạt mục đích này, theo lý thuyết ước lượng Bayes, hai bước ước lượng được thực hiện:

Bước 1: Tiên đoán trong đó sử dụng mô hình hệ thống để xác định tiên đoán của véc tơ trạng thái x_k tại thời điểm k với các trị đo ở thời điểm $k - 1$ ($z_{1:k-1}$) theo công thức:

$$P(x_k|z_{k-1}) = \int P(x_k|x_{k-1})P(x_{k-1}|z_{1:k-1})dx_{k-1} \quad (3)$$

Bước 2: Cập nhật tại thời điểm k , nếu có các trị đo cập nhật, tiên đoán được cập nhật theo công thức sau:

$$P(x_k|z_{1:k}) = \frac{P(z_k|x_k)P(x_k|z_{1:k-1})}{P(z_k|z_{1:k-1})} \quad (4)$$

Phép lọc Kalman (KF) được xem như là một dạng đặc biệt của lý thuyết ước lượng Bayes. Trong trường hợp hàm hệ thống và hàm trị đo có dạng tuyến tính, trở thành:

$$x_k = \Phi_{k-1;k}x_{k-1} + w_{k-1} \quad (5)$$

$$z_k = H_k x_k + v_k \quad (6)$$

Trong đó:

$\Phi_{k-1;k}$ là ma trận tính chuyển trạng thái từ thời điểm $k-1$ đến k ;

H_k là ma trận hệ số biểu diễn mối quan hệ giữa trị đo hỗ trợ và véc tơ trạng thái.

Trong KF, nhiễu được giả thiết rằng tuân theo luật phân bố chuẩn với kỳ vọng "0" và ma trận hiệp phương sai Q_k và R_k .

$$w_k \sim N(0, Q_k) \quad (7)$$

$$v_k \sim N(0, R_k) \quad (8)$$

Với giả thiết này, các hàm mật độ xác suất (PDFs) tiên đoán và cập nhật sẽ tuân theo luật phân bố chuẩn với kỳ vọng \hat{x} và hiệp phương sai P như trong công thức (3) và công thức (4).

$$P(x_k|z_{k-1}) = N(x_k; \hat{x}_{k|k-1}, P_{k|k-1}) \quad (9)$$

$$P(x_k|z_k) = N(x_k; \hat{x}_{k|k}, P_{k|k}) \quad (10)$$

Phân tích dựa trên nguyên lý tối thiểu hóa phương sai, các bước tính toán của KF được trình bày dưới đây theo [7]:

* Tiên đoán:

$$\hat{x}^-_k = \Phi_{k-1;k} \hat{x}_{k-1} \quad (11)$$

$$\hat{P}^-_k = \Phi_{k-1;k} P_{k-1} \Phi_{k-1;k}^T + Q_k \quad (12)$$

Với \hat{x}^-_k và P^-_k là véc tơ trạng thái và ma trận hiệp phương sai tiên đoán

* Cập nhật:

$$K_k = P^-_k H_k^T [H_k P^-_k H_k^T + R_k]^{-1} \quad (13)$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}^-_k + K_k (z_k - H_k \hat{x}^-_k) \quad (14)$$

$$P_k = P^-_k - K_k H_k P^-_k \quad (15)$$

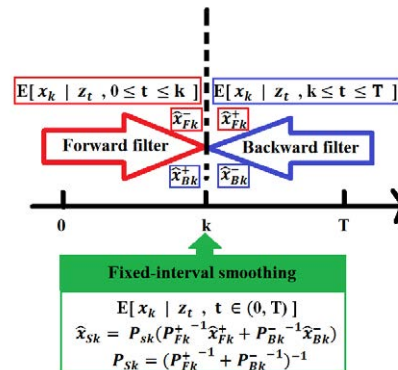
Trong đó: \hat{x}_k và P_k véc tơ trạng thái và ma trận hiệp phương sai cập nhật.

2.2. Phép lọc 2 chiều

Để làm tăng độ chính xác của phép ước lượng, phương pháp ước lượng hai chiều được Rauch-Tung-Striebel (RTS) đề xuất đối với các ứng dụng xử lý tín hiệu. Ước lượng hai chiều đơn giản là sự kết hợp của chiều thuận và chiều đảo KF. Như mô tả trong Hình 1, KF thuận (FKF) cho lời giải ước lượng từ trước đến thời điểm t_k , và KF đảo (BKF) ước lượng lời giải ước lượng từ sau trở về thời điểm t_k . Lời giải của phép ước lượng hai chiều được tính là trị trung bình trọng số của FKF và BKF như trong các công thức (16) và (17).

$$\hat{x}_{SK} = P_{SK} (P_{FK}^{-1} \hat{x}_{FK} + P_{BK}^{-1} \hat{x}_{BK}) \quad (16)$$

$$P_{SK} = (P_{FK}^{-1} + P_{BK}^{-1})^{-1} \quad (17)$$



Hình 1: Ước lượng 2 chiều

Trong đó, các ký hiệu chỉ số dưới S, F, và B là ký hiệu kết quả ước lượng tron, chiều đi và chiều về.

2.3. Xây dựng mô hình toán học cho phép lọc Kalman mở rộng

Xuất phát từ phương trình chuyển dịch của một điểm trong hệ tọa độ phẳng

$$x_t = x_{t-1} + vx_{t-1}T + \frac{1}{2}aT^2 \quad (18)$$

$$v_t = v_{t-1} + aT \quad (19)$$

Trong đó: x_t, v_t là vị trí vận tốc ở thời điểm t, a là gia tốc chuyển động.

Nếu thiết kế véc tơ trạng thái như sau:

$$X_t = \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ H_t \\ vx_t \\ vy_t \\ vH_t \\ \bar{\varphi}_t \end{bmatrix} \quad (20)$$

Và có thể viết lại:

$$X_t = FX_{t-1} + Bu_t \quad (21)$$

Trong đó Bu_{t-1} có thể được coi như thành phần nhiễu hệ thống.

*** Mô hình trị đo tọa độ**

Trong mô hình toán học phép lọc Kalman mở rộng, các trị đo (x, y, H) là tọa độ điểm. Khi đó, phương trình trị đo có dạng như sau:

$$\begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ y_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ H_t \\ vx_t \\ vy_t \\ vH_t \\ \bar{\varphi}_t \end{bmatrix} + V_t$$

Trong đó V_t gọi là nhiễu trị đo.

Có thể viết lại dạng ma trận như sau.

$$z_k = D_k X_k + v_k \quad (22)$$

Ma trận nhiễu trị đo:

$$R = Cov(V) = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z^2 \end{bmatrix}$$

*** Mô hình trị đo phương vị**

Trong trường hợp trị đo cập nhật là phương vị φd_t , khi đó, phương trình trị đo có dạng như sau:

$$\bar{\varphi} d_t = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1] \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ H_t \\ vx_t \\ vy_t \\ vH_t \\ \bar{\varphi}_t \end{bmatrix} + P_t$$

Trong đó P_t gọi là nhiễu phương vị đo.

Có thể viết lại dạng ma trận như sau.

$$z_k = D_k X_k + v_k$$

Ma trận nhiễu trị đo:

$$R = Cov(P) = \sigma_p^2 \quad (23)$$

Như vậy, sau khi xây dựng được mô hình toán học của mô hình chuyển dịch tọa độ cho phép lọc Kalman, các bước tính toán dựa trên thuật toán của phép lọc Kalman được thực hiện tuần tự các bước theo các công thức đã trình bày ở trên.

*** Phát hiện trị đo bất thường từ phép lọc Kalman**

Trong công thức cập nhật trị đo (14),

Ký hiệu

$$inno = z_k - H\hat{x}_k^- = z_k - z_{PRE} \quad (24)$$

Trong môi trường điều kiện lý tưởng, độ lớn của véc tơ inno bằng không. Vì trong phép lọc Kalman giả thiết rằng các nhiễu có luật phân bố chuẩn Gauss, do vậy tập giá trị inno cũng tuân theo luật

Nghiên cứu

phân bố chuẩn với kỳ vọng không và độ lệch chuẩn, với:

$$\sigma_{\text{inno}} = \sqrt{\sigma_{Z_k}^2 + \sigma_{Z_{\text{pre}}}^2} \quad (25)$$

Dựa vào lý thuyết xác suất thống kê, nếu inno tuân theo luật phân bố chuẩn, nó sẽ được giới hạn bởi một giá trị nhất định với một độ tin cậy nhất định:

$$|\text{inno}| \leq \varepsilon_{\beta} \cdot \sigma_{\text{inno}} \quad (26)$$

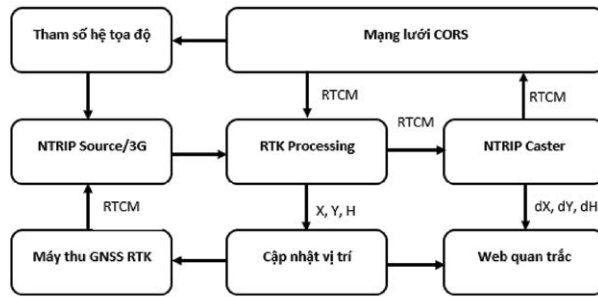
Trong đó là hệ số đánh giá với mức tin cậy (), là độ lớn của véc tơ, được xác định bởi công thức:

$$|\text{inno}| = \sqrt{z_x^2 + z_y^2 + z_H^2} \quad (27)$$

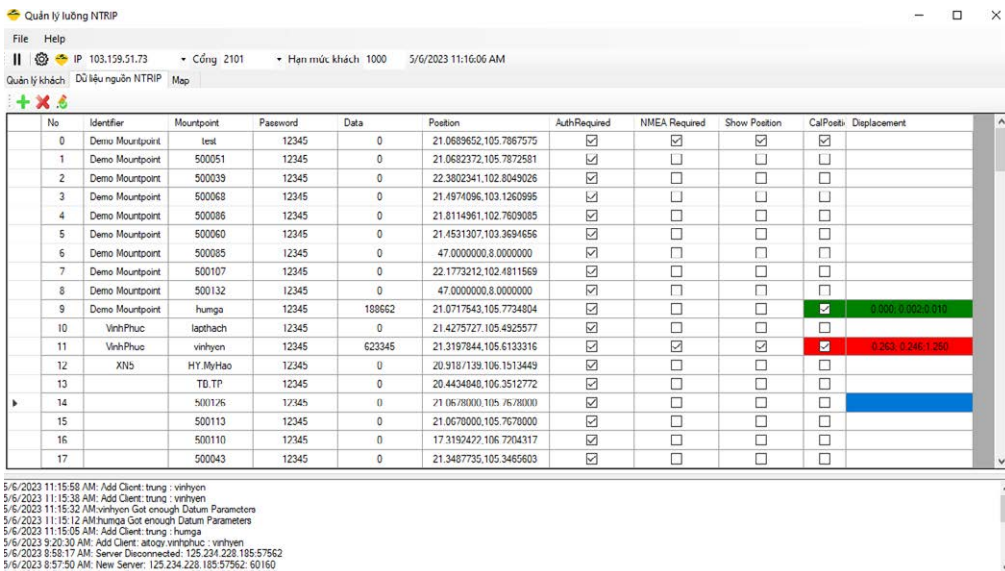
Dựa trên tiêu chuẩn trong công thức (31), Nếu, thì trị đo GNSS tương ứng sẽ bị loại bỏ.

3. Thiết kế phần mềm quan trắc

Phần mềm quan trắc được nhóm nghiên cứu thiết kế và lập trình trên nền hệ điều hành Window OS thông qua ngôn ngữ C#. Với cơ sở nguyên lý phương thức quản lý NTRIP (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol), phần mềm cho phép thu thập dữ liệu đồng thời từ các trạm quan trắc và xử lý lọc nhiễu, quản lý và xuất báo cáo. Sơ đồ khối của phần mềm được trình bày ở Hình 2 và hình ảnh giao diện của phần mềm được thể hiện ở Hình 3.



Hình 2: Sơ đồ khối của phần mềm quan trắc



Hình 3: Giao diện của phần mềm quan trắc

4. Thực nghiệm

Để đánh giá độ chính xác và khả năng ứng dụng của phương pháp đề xuất, hai thực nghiệm được tiến hành. Thực nghiệm thứ nhất nhằm đánh giá độ chính xác và mức độ cải thiện của các phép xử lý nhiễu. Thực nghiệm thứ 2 nhằm đánh giá khả năng áp dụng của giải pháp quan trắc công trình bằng GNSS với điều kiện thử nghiệm tương tự trong điều kiện công trình trong thực tế.

4.1. Thực nghiệm thứ nhất

Để thực nghiệm độ chính xác của phương pháp đo GNSS RTK trong quan trắc công trình, một bàn dịch chia vạch đến mm được thiết kế để có thể dịch máy cố ý (Hình 4). Máy thu GNSS B290 được đặt trên bàn dịch để đo và dịch cố ý tại các điểm 6 vị trí gồm 0, 2 cm, 4 cm, 6 cm, 8 cm và 10 cm. Ở mỗi khoảng dịch tiến hành đo trong 1 phút, lấy trị đo thô, trị đo với phép lọc Kalman và với phép lọc 2 chiều là khoảng cách giữa các khoảng dịch. Kết quả sau đó so sánh với khoảng dịch thực tế để phân tích. Bảng phân tích về độ chính xác được tính theo sai số thực được trình bày ở Bảng 1.

Bảng 1. Bảng so sánh độ chính xác giữa các dữ liệu trước và sau khi xử lý bằng KF và RTS

STT	Vị trí thử nghiệm	0 cm	2 cm	4 cm	6 cm	8 cm	10 cm	Sai số trung phương
1	Sai số trị đo thô	0,0017	0,0183	-0,0054	-0,0080	0,0133	0,0016	0,0094
2	Sai số sau KF	0,0032	-0,0095	-0,0015	0,0031	-0,0010	0,0080	0,0054
3	Sai số sau RTS	0,0024	-0,0018	-0,0003	0,0003	0,0007	-0,0008	0,0013

Từ kết quả thực nghiệm thứ nhất có thể thấy rằng với giải pháp lọc nhiễu 2 chiều, có thể cho độ chính xác quan trắc cỡ mm. Nếu lấy độ nhận biết mức độ dịch chuyển bằng 3 lần sai số trung phương thì trong điều kiện thông thoáng, giải pháp



Hình 4: Thực nghiệm đánh giá độ chính xác

Nếu coi khoảng cách giữa các khoảng dịch là không có sai số, sai số trung phương đo và xử lý được tính theo công thức:

$$m = \sqrt{\frac{[\Delta\Delta]}{n}}$$

Trong đó:

Sai số thực: trị đo - trị thực.

Trị đo: Là khoảng dịch tính được từ các trị đo tọa độ ở các vị trí đặt máy thu.

Trị thực: Là khoảng dịch thực tế đọc trực tiếp trên bàn dịch.

n: là số vị trí thử nghiệm.

này có thể nhận biết khoảng dịch là $3 \times 1,3 = 3,9$ mm với xác suất 99 % sau 1 phút hay 60 trị đo.

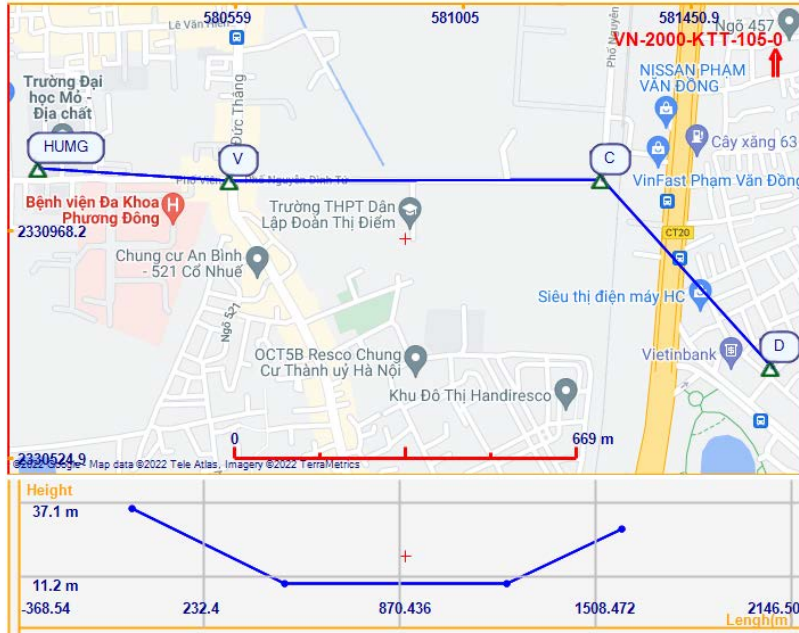
4.2. Thực nghiệm thứ hai

Trong thử nghiệm thứ 2, nhóm tác giả tiến hành đo đạc thử nghiệm trên mốc

Nghiên cứu

đã được thành lập kết nối với các điểm bố trí được xác định tọa độ trong hệ tọa độ VN2000. Các điểm HUMG, V, C, D là các điểm đã có tọa độ được xác định trong hệ tọa độ thi công và hệ VN2000

bằng công nghệ GNSS tĩnh với tiêu chuẩn mốc không chế hạng IV. Bảng kết quả tọa độ được thể hiện ở Bảng 2, trong đó điểm HUMG được chọn làm điểm cơ sở. Sơ đồ bố trí được thể hiện ở Hình 5.



Hình 5: Sơ đồ bố trí các điểm thực nghiệm
Bảng 2. Tọa độ điểm mốc quan trắc trong VN2000

Tên điểm	X (m)	Y (m)	H (m)
D	2331062.9688	580897.2112	8.9225
C	2331072.5974	581277.6140	8.7803
V	2331067.8212	580552.7458	8.7494
HUMG	2331091.3810	580178.1070	27.9200

Bảng 3. Thông số độ chính xác của các thiết bị được nhà sản xuất cung cấp như sau

Tên thiết bị	Leica GR50	Aitogy Ainav - B290
Thông số độ chính xác đo RTK	Mặt bằng: 6 mm + 1 ppm Độ cao: 10 mm + 1 ppm	Mặt bằng: 8 mm + 1 ppm Độ cao: 15 mm + 1 ppm

Các máy thu Aitogy Ainav - B290 đặt tại các điểm V, C, D để quan trắc liên tục trong thời gian 3 giờ với tần số đầu ra 1 Hz (1 giây/gói dữ liệu). Điểm HUMG là một điểm trạm CORS được lắp đặt cố định và liên tục cung cấp dữ liệu cải chính

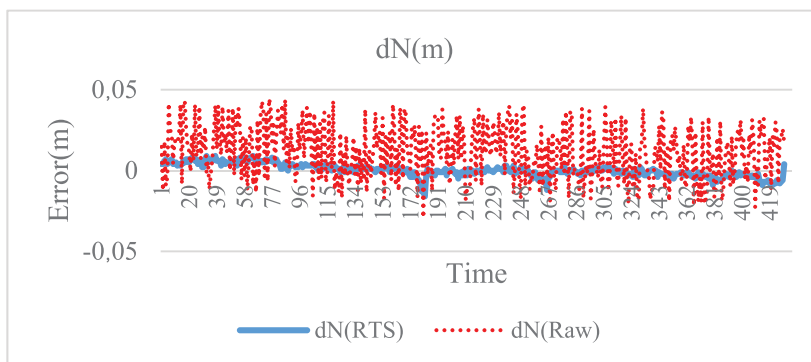
bởi máy thu GNSS Leica GR50 (Hình 6), thông số độ chính xác máy được trình bày ở Bảng 3. Tiến hành thu tín hiệu GNSS RTK. Sau khi lọc tín hiệu thu GNSS bằng phép lọc 2 chiều cho ra tọa độ chính xác của các điểm V, C, D.



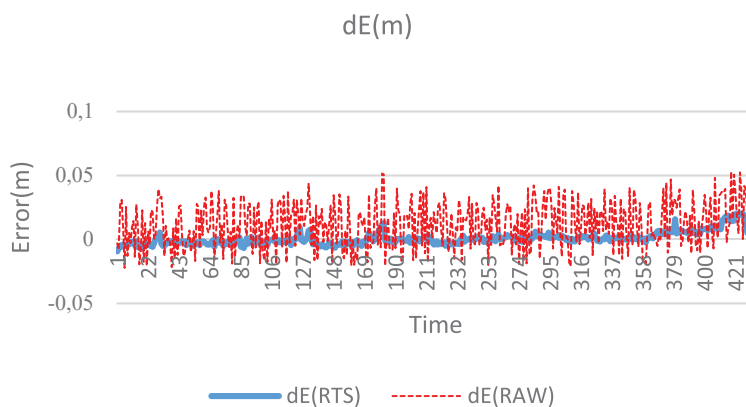
Hình 6: Thiết bị sử dụng thử nghiệm với trạm cơ sở và trạm quan trắc

Thực hiện quan trắc bằng GNSS tại 3 điểm, ta có số liệu quan trắc tại các điểm. Kết quả so sánh tọa độ giữa dữ liệu thô và dữ liệu đã được xử lý qua phần mềm lọc nhiễu được thể hiện ở các Hình 7, 8, 9 và ở Bảng 4.

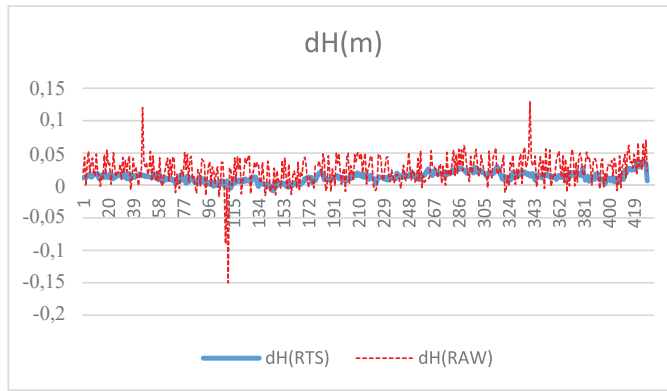
Tín hiệu thu không qua xử lý lọc nhiễu hai chiều.



Hình 7: Kết quả lọc nhiễu theo hướng Bắc (N)



Hình 8: Kết quả lọc nhiễu theo hướng Đông (E)



Hình 9: Kết quả lọc nhiễu theo cao độ (H)

Bảng 4. So sánh sai số tọa độ

Tên điểm	So sánh tọa độ không qua lọc				So sánh tọa độ sau phép lọc			
	dX (m)	dY (m)	dH (m)	mP(m)	dX (m)	dY (m)	dH (m)	mP(m)
D	-0,0364	0,0360	-0,0231	0,0340	-0,0055	-0,0048	0,0080	0,0073
C	-0,0645	0,0410	-0,0513	0,0316	0,0060	-0,0037	-0,0092	0,0070
V	-0,0064	-0,0210	0,0236	0,0778	-0,0053	0,0049	-0,0094	0,0072

Kết quả thực nghiệm cho thấy hệ thống quan trắc khi không qua phép lọc đạt độ chính xác từ 4 - 7 cm về mặt bằng và 8 - 9 cm về độ cao, hệ thống quan trắc đã qua phép lọc hai chiều đạt độ chính xác từ 3,9 - 6,0 mm về mặt bằng; 3,9 - 9,2 mm về độ cao.

So sánh với độ chính xác ở thử nghiệm thứ nhất có thể thấy ở thử nghiệm thứ 2, độ chính xác kém hơn so với thử nghiệm thứ nhất. Điều đó cho thấy kết quả ở thử nghiệm thứ hai bị ảnh hưởng với số liệu chuẩn (xác định bằng đo tĩnh theo tiêu chuẩn lưới không chế hạng IV) và trong điều kiện môi trường không được lý tưởng (ảnh hưởng bởi cây cối, địa vật xung quanh), độ chính xác quan trắc cũng bị suy giảm.

5. Kết luận

Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả đã sử dụng lý thuyết của phép lọc nhiễu 2 chiều để thử nghiệm trong quan trắc tự động độ biến dạng công trình dựa trên công nghệ định vị vệ tinh. Đã lập được

phần mềm quản lý dữ liệu từ nhiều thiết bị quan trắc, đồng thời xử lý dữ liệu qua phép lọc hai chiều nâng cao độ chính xác của các phép quan trắc.

Kết quả từ thực nghiệm cho thấy rằng với phép lọc 2 chiều, độ chính xác quan trắc tăng lên đáng kể so với sử dụng dữ liệu thô từ máy GNSS. Với độ chính xác quan trắc 3 - 6 mm về mặt bằng và cỡ 1 cm về cao độ. Có thể áp dụng giải pháp này trong một số ứng dụng phù hợp như quan trắc trượt lở đất và các ứng dụng khác có yêu cầu độ chính xác tương đương.

Do bị ảnh hưởng bởi môi trường đo đạc, khi quan trắc bằng GNSS cần lưu ý bố trí các điểm quan trắc tránh các vật cản làm giảm mức độ thông hướng của máy thu lên bầu trời và tránh các thiết bị thu - phát sóng điện từ.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Kaya Y., Safak E. (2013). *Real - time structural health monitoring and damage detection*. In: Catbas F., Pakzad S.,

Racic V., Pavic A., Reynolds P. (eds). Topics in Dynamics of Civil Structures, Volume 4. Conference proceedings of the Society for experimental mechanics series. Springer, New York, NY.

[2]. Alojz KOPÁČIK, Imrich LIPTÁK, Ján ERDÉLYI, Peter KYRINOVIC (2015). *Structural health monitoring of bridges using accelerometers - A case study at Apollo Bridge in Bratislava*. Geonauka, Vol. 3, No. 1.

[3]. Xiaolin Meng (2002). *Real - time deformation monitoring of bridges using GPS/Accelerometers*. Thesis submitted to the University of Nottingham for the degree of Doctor of Philosophy May 2002.

[4]. Gelb, A. (ed.) (1974). *Applied optimal estimation*. MIT Press, Cambridge, Mass.

[5]. Forootan, E.; Farzaneh, S.; Naderi, K.; Cederholm, J. P (2021). *Analyzing GNSS measurements to detect and predict bridge movements using the Kalman*

Filter (KF) and Neural Network (NN) techniques. Geomatics 2021, 1, 65 - 80. <https://doi.org/10.3390/geomatics1010006>.

[6]. Ce Jing, Guanwen Huang, Xin Li, Qin Zhang, Huan Yang, Kai Zhang, Guolin Liu (2023). *GNSS/accelerometer integrated deformation monitoring algorithm based on sensors adaptive noise modeling*. Measurement, Volume 218, 113179, ISSN 0263 - 2241.

[7]. Chiang, K.-W.; Duong, T.T.; Liao, J.-K.; Lai, Y.-C.; Chang, C.-C.; Cai, J.-M.; Huang, S.-C. (2012). *On - line smoothing for an integrated navigation system with low - cost MEMS inertial sensors*. Sensors 2012, 12, 17372 - 17389. <https://doi.org/10.3390/s121217372>.

[8]. Nguyễn Việt Trung (2011). *Cơ sở quan trắc công trình cầu trong thi công và khai thác*. Nxb. Xây dựng, Hà Nội.

BBT nhận bài: 19/6/2023; Phản biện xong: 30/6/2023; Chấp nhận đăng: 26/9/2023