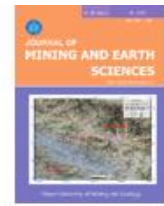




Journal of Mining and Earth Sciences

Website: <http://jmes.humg.edu.vn>



Combination of free network adjustment with S-transformation and Kalman filter with original data information adjustment for displacement analysis



Ha Ngoc Hoang *

Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam

ARTICLE INFO

Article history:

Received 22nd Mar. 2023

Revised 29th July 2023

Accepted 24th Aug. 2023

Keywords:

Deformation analysis,

GNSS,

Kalman Filter.

ABSTRACT

To evaluate the displacement of the coordinates of the GNSS network points according to the measured data of the periods, the theory of free network adjustment has been widely applied. However, changing the stable points in the cycles if only considering the coordinate difference after the adjustment in the normal way will not be accurate because the result of the free network adjustment of the coordinates is determined with different origin points. Therefore, it is necessary to convert the coordinate system of the previous period to the coordinate system of the following period, applying S - transformation to analyze the deformation. In addition to the displacement of the points, it is necessary to define the velocity and acceleration parameters of the displacement. In this paper, a method of displacement analysis has been studied based on using GNSS network measurement data in measurement cycles and applying the theory of free network adjustment and S transformation, Kalman filtering technique and rationalizing the geodetic network adjustment theory with the error information of the original data to analyze and predict the displacement on the experimental area of the Saigon River area. The analysis concludes the shift based on the student distribution (t - distribution). In the study, static and dynamic models were considered and gave consistent calculation results. The theory has been proven to develop the Kalman filter technique for deformation analysis and prediction problems by applying GNSS technology. This result allows to expand the scope of application of GNSS technology for monitoring and analysis of landslides, subsidence and displacement of the Earth's crust on a local scale as well as a territorial extent in Vietnam, and can e data from GNSS CORS observation stations.

Copyright © 2023 Hanoi University of Mining and Geology. All rights reserved.

*Corresponding author

E - mail: hoangngochoa@humg.edu.vn

DOI: 10.46326/JMES.2023.64(4).04



Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Mỏ - Địa chất

Trang điện tử: <http://tapchi.humg.edu.vn>



Kết hợp bình sai lưới tự do với phép biến đổi S và phép lọc Kalman với bình sai sử dụng sai số số liệu gốc trong phân tích chuyển dịch biến dạng

Hoàng Ngọc Hà *

Trường Đại học Mỏ - Địa chất, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

Quá trình:

Nhận bài 22/3/2023

Sửa xong 29/7/2023

Chấp nhận đăng 24/8/2023

Từ khóa:

GNSS,

Lọc Kalman,

Phân tích biến dạng.

TÓM TẮT

Để đánh giá sự chuyển dịch của tọa độ của các điểm lưới GNSS theo số liệu đo các chu kỳ, lý thuyết bình sai lưới tự do đã ứng dụng rộng rãi. Tuy nhiên, việc thay đổi các điểm ổn định trong các chu kỳ nếu chỉ xét hiệu tọa độ sau bình sai theo cách thông thường sẽ không chính xác bởi vì kết quả bình sai lưới tự do tọa độ được xác định với các điểm gốc khác nhau. Do đó, cần phải chuyển tọa độ của chu kỳ trước về hệ tọa độ chu kỳ sau và trong bài báo này yêu cầu áp dụng phép biến đổi S (S - transformation) để phân tích. Ngoài sự dịch chuyển của tọa độ của các điểm, cần xác định thêm các tham số vận tốc và gia tốc chuyển dịch. Trong bài báo đã nghiên cứu phương pháp đánh giá sự dịch chuyển trên cơ sở sử dụng số liệu đo lưới GNSS trong các chu kỳ và ứng dụng lý thuyết bình sai lưới tự do và phép biến đổi S , kỹ thuật lọc Kalman và kết hợp lý thuyết bình sai với sai số số liệu gốc để xác định ma trận hiệp phương sai của vectơ trạng thái trong quá trình lọc, nhằm phân tích độ dịch chuyển trên vùng thực nghiệm khu vực sông Sài Gòn. Các phân tích kết luận dịch chuyển dựa theo phân bố Student (t - distribution). Trong nghiên cứu, tác giả đã xem xét 2 mô hình tĩnh và động và cho kết quả tính toán thống nhất. Mô hình động cho phép xác định vận tốc và gia tốc chuyển dịch biến dạng. Đã chứng minh lý thuyết nhằm phát triển kỹ thuật lọc Kalman đối với bài toán phân tích biến dạng ứng dụng công nghệ GNSS.

© 2023 Trường Đại học Mỏ - Địa chất. Tất cả các quyền được bảo đảm.

1. Mở đầu

Ứng dụng công nghệ GNSS trong lĩnh vực Trắc địa - Bản đồ đã tạo ra bước đột phá rất hiệu quả trong công tác thành lập bản đồ địa hình cũng

như quan trắc địa động học và quan trắc chuyển dịch biến dạng. Các mạng lưới GNSS là mạng lưới không gian ba chiều, nên việc đo lặp theo chu kỳ cho phép đồng thời xác định cả véc tơ chuyển dịch ngang lẫn véc tơ chuyển dịch đứng của vỏ trái đất và của các công trình. Với các ưu điểm cơ bản của công nghệ định vị vệ tinh như không đòi hỏi sự thông hướng giữa các điểm, đo đạc được tiến hành trong mọi điều kiện thời tiết, có thể nhanh chóng

*Tác giả liên hệ

E - mail: hoangngochoa@humg.edu.vn

DOI: 10.46326/JMES.2023.64(4).04

phát triển mạng lưới địa động học trên phạm vi lãnh thổ.

Trên thế giới, nhiều nghiên cứu đã đề cập vấn đề ứng dụng công nghệ GNSS để nghiên cứu địa động học (Casula, 2016). Về ứng dụng phép lọc Kalman (1960), Welsch và Heunecke (2001) đã tập trung xây dựng các mô hình ứng dụng phép lọc Kalman để phân tích biến dạng. Kuhlmann (2003) đã ứng dụng phép lọc Kalman với nhiều màu để nghiên cứu biến dạng.

Ở Việt Nam, công nghệ định vị vệ tinh đã được ứng dụng trong một số nghiên cứu về chuyển dịch vỏ trái đất như nghiên cứu chuyển dịch của đới đứt gãy sông Đà và đới đứt gãy Sơn La - Bim Sơn (Vy và nnk., 2005), nghiên cứu chuyển dịch của vỏ Trái đất trên khu vực đứt gãy Lai Châu - Điện Biên dựa trên mạng lưới đo bằng công nghệ định vị vệ tinh gồm 5 điểm (Hà và nnk., 2004). Hoàng Ngọc Hà và Phạm Thanh Thảo (2016) đã ứng dụng lý thuyết bình sai tự do lưới GPS trong phân tích dịch chuyển đứt gãy sông Sài Gòn,...

Để đánh giá sự chuyển dịch của tọa độ của các điểm lưới GNSS theo số liệu đo theo các chu kỳ, lý thuyết bình sai lưới tự do đã ứng dụng rộng rãi. Tuy nhiên, việc thay đổi các điểm ổn định trong các chu kỳ nếu chỉ xét hiệu tọa độ sau bình sai theo cách thông thường sẽ không chính xác bởi vì kết quả bình sai lưới tự do tọa độ được xác định với các điểm gốc khác nhau. Do đó, cần phải chuyển tọa độ của chu kỳ trước về hệ tọa độ chu kỳ sau, trong bài báo này đã áp dụng phép biến đổi (S-transformation) để phân tích. Ngoài sự dịch chuyển tọa độ của các điểm, cần xác định thêm các tham số vận tốc và gia tốc chuyển dịch. Bài báo cũng đã nghiên cứu phương pháp đánh giá sự dịch chuyển trên cơ sở sử dụng số liệu đo lưới GNSS trong các chu kỳ, ứng dụng lý thuyết bình sai lưới tự do và phép biến đổi S cùng kỹ thuật lọc Kalman kết hợp với lý thuyết bình sai với sai số số liệu gốc để xác định ma trận hiệp phương sai của vector trạng thái trong quá trình lọc nhằm phân tích độ dịch chuyển trên vùng thực nghiệm lưới GNSS gồm 8 điểm ở khu vực phía nam sông Sài Gòn.

2. Cơ sở lý thuyết

2.1. Bình sai lưới tự do GNSS

Giả sử trong mạng lưới GNSS có m điểm cần xác định, hệ phương trình các số hiệu chỉnh đối với n cạnh (baseline) có dạng như sau:

$$V_{n \times 1} = A_{n \times 3m} \Delta x_{3m \times 1} + L_{n \times 1} \quad (1)$$

Trong đó: A - ma trận hệ số với các hệ số +1 và -1 tương ứng với các thành phần tọa độ trong trị đo baseline ΔX_{ij} , ΔY_{ij} , ΔZ_{ij} trong hệ tọa độ địa tâm.

Δx - vector ẩn số; V và L - vector các số hiệu chỉnh và số hạng tự do. K = 3 x m.

Ma trận trọng số P có dạng:

$$P = \begin{pmatrix} P_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & P_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P_n \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$P_i = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} \end{pmatrix} = Q_i^{-1} \quad (3)$$

Q_i - ma trận hiệp phương sai của các trị đo baseline thứ i.

Hệ phương trình chuẩn có dạng:

$$R \Delta x_{k \times 1} + b_{k \times 1} = 0 \quad (4)$$

$$R = A^T P A, b = A^T P L$$

Ở đây ma trận R suy biến. Để tìm nghiệm của hệ (4) điều kiện ràng buộc đối với vector số hiệu chỉnh có dạng sau:

$$C \Delta x = 0 \quad (5)$$

Khi đó, vector ẩn số được tính theo công thức:

$$\Delta x = -R^{-1} b \quad (6)$$

Trong đó, R^{-1} là ma trận nghịch đảo tổng quát:

$$R^{-1} = (R + C C^T)^{-1} - T T^T \quad (7)$$

Trong đó:

$$T^T = B(C^T B)^{-1} \quad (8)$$

$$B^T = (B_1 \quad B_2 \quad \dots \quad B_n) \quad (9)$$

B_i là ma trận Helmert. Đối với lưới GNSS đo baseline ($\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$), ma trận B có dạng: $B^T = (B_1 \quad B_2 \quad \dots \quad B_k)$.

$$B_i = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; i = 1, 2, \dots, n. \quad (10)$$

$$C^T = (B_1 \quad \dots \quad B_k \quad 0 \quad \dots \quad 0) \quad (11)$$

Trong trường hợp $C = B$, ma trận nghịch đảo tổng quát được tính theo công thức:

$$R^+ = (R + B B^T)^{-1} - T T^T \quad (12)$$

Trong đó: $T^T = B(B^T B)^{-1}$

Để đánh giá chính xác cần tính sai số trung phương trọng số đơn vị:

$$\mu = \pm \sqrt{\frac{v^T P v}{n-k+d}} \quad (13)$$

Trong đó: n - số trị đo của lưới; k - số ẩn số; d - số khuyết của lưới ($d = 3$).

Sai số trung phương hàm số F_i :

$$m_{F_i} = \mu \sqrt{\frac{1}{P_{F_i}}} \quad (14)$$

Trong đó: $\frac{1}{P_{F_i}} = Q_{F_i} = f_i^T R^+ f_i$

2.2. Phép biến đổi S (S-transformation)

Để phân tích biến dạng cần thực hiện trên một hệ tọa độ. Dữ liệu của các mạng lưới trắc địa được đo và bình sai trong chu kỳ i với các ma trận C_i . Do đó, có thể thấy nếu các điểm ổn định thay đổi thì sẽ biến đổi gốc tọa độ. Bài toán đặt ra là cần chuyển tọa độ và ma trận hiệp phương sai về một hệ thống định vị bằng phép biến đổi S và không cần tính toán bình sai lại. Phép biến đổi S được thực hiện bằng các công thức sau:

$$x_j = S_j x_k \quad (15)$$

$$Q_{x_j} = S_j Q_{x_k} S_j^T \quad (16)$$

Trong đó: x_j, x_k - vector tọa độ chu kỳ thứ j và k ; S_j - ma trận biến đổi S; ma trận Q_{x_j} và Q_{x_k} - ma trận hiệp phương sai của ẩn số vector tọa độ các điểm lưới ở chu kỳ j và k . Với S_j được xác định như sau:

$$S_j = E - B(C^T B)^{-1} C^T \quad (17)$$

2.3. Ứng dụng phép lọc Kalman

Mô hình động theo thời gian với tọa độ, vận tốc và gia tốc được biểu diễn bằng công thức sau:

$$\begin{aligned} X_j^{(k+1)} &= X_j^{(k)} + (t_{k+1} - t_k)v_{Xj} + 1/ \\ &2(t_{k+1} - t_k)^2 a_{Xj} \\ Y_j^{(k+1)} &= Y_j^{(k)} + (t_{k+1} - t_k)v_{Yj} + \\ &1 \\ &2(t_{k+1} - t_k)^2 a_{Yj} \\ Z_j^{(k+1)} &= Z_j^{(k)} + (t_{k+1} - t_k)v_{Zj} + 1/ \\ &2(t_{k+1} - t_k)^2 a_{Zj} \end{aligned} \quad (18)$$

Trong đó: $X_j^{(k+1)}, Y_j^{(k+1)}, Z_j^{(k+1)}$ - tọa độ các điểm j ở thời điểm chu kỳ (t_{k+1}) ; $X_j^{(k)}, Y_j^{(k)}, Z_j^{(k)}$ - tọa độ các

điểm j ở thời điểm chu kỳ (t_k) ; v_{xj}, v_{yj}, v_{zj} - vận tốc dịch chuyển của tọa độ X, Y, Z của điểm j ; a_{xj}, a_{yj}, a_{zj} : gia tốc của tọa độ X, Y, Z của điểm j ; $k=1, 2, \dots, i$ (i : số thứ tự chu kỳ đo); $j=1, 2, \dots, n$ (n : số thứ tự của điểm trong lưới).

Kỹ thuật lọc Kalman được sử dụng để dự đoán vector trạng thái hiện tại bằng cách sử dụng thông tin vector trạng thái của các thông số chuyển động đã biết ở chu kỳ t_k và các phép đo ở chu kỳ t_{k+1} . Vector trạng thái của tham số chuyển động bao gồm các biến vị trí, chuyển động và gia tốc. Hệ phương trình của mô hình chuyển động được sử dụng để dự báo các tham số chuyển động bằng kỹ thuật lọc Kalman trong các lưới 3D có thể được biểu diễn dưới dạng ma trận như sau:

$$\hat{Y}_{(k+1)} = M_{(k+1)} \hat{Y}_k \quad (19)$$

Trong đó:

$$\hat{Y}_{(k+1)} = (X \ Y \ Z \ v_X \ v_Y \ v_Z \ a_X \ a_Y \ a_Z)_{(k+1)} \quad (20)$$

$$\hat{Y}_{(k)} = (X \ Y \ Z \ v_X \ v_Y \ v_Z \ a_X \ a_Y \ a_Z)_{(k)}$$

$$M_{(k+1)} = \begin{pmatrix} E & (t_{k+1} - t_k)E & 0,5 \cdot (t_{k+1} - t_k)^2 E \\ 0 & E & (t_{k+1} - t_k)E \\ 0 & 0 & E \end{pmatrix} \quad (21)$$

Ở đây các ma trận: $E_{(3 \times 3)}$ - ma trận đơn vị; $0_{(3 \times 3)}$ - ma trận 0.

$\hat{Y}_{(k+1)}$ - vector giá trị dự báo của tọa độ, vận tốc và gia tốc

$\hat{Y}_{(k)}$ - vector trạng thái tại thời điểm t_k .

$M_{(k+1)}$ - ma trận dịch chuyển.

Phương trình (18) là phương trình dự báo trong phép lọc Kalman.

Phương trình có yếu tố nhiễu sẽ như sau:

$$\hat{Y}_{(k+1)} = M_{(k+1)} \hat{Y}_k + S_{k+1,k} \quad (22)$$

$$C_{\hat{Y}(k+1)} = M_{k+1,k} C_Y M_{k+1,k}^T + S_{k+1,k} C_S S_{k+1,k}^T$$

Ở đây ma trận C_Y là ma trận hiệp phương sai của vector trạng thái \hat{Y}_k đã được lọc ở thời điểm t_k .

Ma trận C_S là ma trận hiệp phương sai của vector nhiễu hệ thống ở thời điểm t_k .

Tại thời điểm t_{k+1} chúng ta thực hiện đo đạc lưới GNSS và có thể thành lập hệ phương trình đo (phương trình lọc) như sau:

$$\hat{Y}_{(k+1)} = M_{(k+1)} \hat{Y}_k + S_{k+1,k} \quad (23)$$

$$K_{\hat{Y}(k+1)} = \quad (24)$$

$$M_{k+1,k} C_Y M_{k+1,k}^T + S_{k+1,k} C_S S_{k+1,k}^T$$

Kết hợp các biểu thức (18) và (23) chúng ta có công thức sau:

$$v_{l,k+1} = A_{k+1} \hat{Y}_k - l_{k+1} \quad (25)$$

Ở đây chúng ta ký hiệu:

$$V = \begin{pmatrix} v_{k+1} \\ v_{l,k+1} \end{pmatrix} \quad (26)$$

$$\hat{A}_{k+1} = \begin{pmatrix} E \\ A_{k+1} \end{pmatrix} \quad (27)$$

$$L = - \begin{pmatrix} \bar{Y}_{k+1} \\ l_{k+1} \end{pmatrix} \quad (28)$$

Ma trận hiệp phương sai:

$$K_{k+1} = \begin{pmatrix} K_{\bar{Y}(k+1)} & 0 \\ 0 & K_{l,k+1} \end{pmatrix} \quad (29)$$

Ma trận A_{k+1} trong biểu thức (27) trong trường hợp lấy giá trị đo bằng chính giá trị bình sai ở chu kỳ k+1 sẽ là: $A_{k+1}^T = (E \ 0 \ 0)$. Ở đây ma trận $E_{(n \times n)}$ là ma trận đơn vị, k là số ẩn số tọa độ.

2.4. Ứng dụng lý thuyết bình sai với sai số số liệu gốc và công thức truy hồi trong tính toán ma trận hiệp phương sai của vector trạng thái

Hệ phương trình (25) với các ma trận (26)÷(29) thực chất là hệ phương trình các số hiệu chỉnh của mô hình bình sai với sai số số liệu gốc theo phương pháp bình sai gián tiếp (Markuze và Hoàng, 1991). Hệ phương trình chuẩn sẽ là:

$$R_{k+1} \hat{Y}_{k+1} + b = 0 \quad (30)$$

$$R_{k+1} = \hat{A}_{k+1}^T C_{k+1}^{-1} \hat{A}_{k+1} \quad (31)$$

$$b = \hat{A}_{k+1}^T C_{k+1}^{-1} L_{k+1} \quad (32)$$

Theo lý thuyết phép lọc Kalman ma trận Gain sẽ là:

$$G_{k+1} = C_{\bar{Y}(k+1)} A_{k+1}^T (K_{l,k+1}^{-1} + A_{k+1} C_{A_{k+1}}^{-1})^{-1} \quad (33)$$

Vector trạng thái ở thời điểm t_{k+1} sẽ là:

$$\hat{Y}_{k+1} = \bar{Y}_{k+1} + G_{k+1} (l_{k+1} - A_{k+1} \bar{Y}_{k+1}) \quad (34)$$

Mặt khác từ các biểu thức (27), (29) và (31) sẽ có:

$$R_{k+1} = K_{l,k+1}^{-1} + A_{k+1}^T C_{l,k+1}^{-1} A_{k+1} \quad (34)$$

Ma trận hiệp phương sai của vector trạng thái \hat{Y}_{k+1} sẽ là:

$$R_{k+1} = K_{l,k+1}^{-1} + A_{k+1}^T C_{l,k+1}^{-1} A_{k+1} \quad (36)$$

Thực hiện theo công thức truy hồi (Markuze và Goolubev, 2010), có biểu thức:

$$(K_{\bar{Y}(k+1)}^{-1} + A_{k+1}^T C_{l,k+1}^{-1} A_{k+1})^{-1} = K_{\bar{Y}(k+1)} - C_{\bar{Y}(k+1)} A_{k+1}^T N^{-1} A_{k+1} K_{\bar{Y}(k+1)} \quad (37)$$

Ở đây ma trận: $N = (C_{l,k+1}^{-1} + A_{k+1} C_{\bar{Y}(k+1)} A_{k+1}^T)$.

Kết hợp các biểu thức (33), (36), (37) chúng ta có ma trận hiệp phương sai của vector trạng thái ở thời điểm t_{k+1} sẽ là:

$$C_{k+1} = C_{\bar{Y}(k+1)} - G_{k+1} A_{k+1} C_{\bar{Y}(k+1)} \quad (38)$$

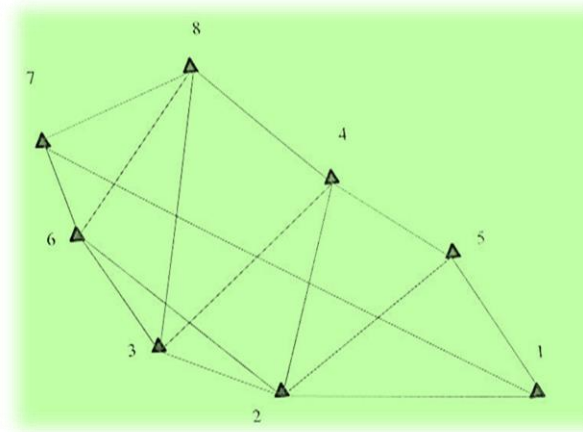
3. Tính toán thực nghiệm

3.1. Số liệu thực nghiệm

Mạng lưới quan trắc bao gồm 8 điểm được thành lập ở khu vực nam sông Sài Gòn. Lưới được đo bằng công nghệ GNSS. Mốc được xây dựng theo quy cách mốc định tâm bắt buộc đặt trên nền đá gốc.

Trên Hình 1 là vị trí mốc quan trắc chuyển dịch khu vực nghiên cứu. Để thực hiện đo đạc mạng lưới đã sử dụng 8 máy thu hai tần số đặt trên 8 mốc, đo đồng thời trong khoảng thời gian 23h30 x 4 ngày đêm = 94 giờ. Thực hiện đo lặp 3 chu kỳ 2013, 2014, 2015, giãn cách thời gian giữa các chu kỳ là một năm.

Sử dụng phần mềm Bernese 5.0 xử lý số liệu đo đạc thu được thông tin của các Baselines.



Hình 1. Sơ đồ lưới quan trắc chuyển dịch.

3.2. Kết quả tính toán và thảo luận

3.2.1. Phân tích theo mô hình tĩnh

Ứng dụng phương pháp bình sai tự do lưới không gian (phương pháp sử dụng gốc trọng tâm) xử lý các cạnh, thu được tọa độ lưới ở các chu kỳ năm 2013, 2014 và 2015.

Tiến hành đánh giá độ dịch chuyển các mốc giữa 2 chu kỳ. Tính các giá trị $T_X = dX/m_{dX}$, $T_Y = dY/m_{dY}$, $T_Z = dZ/m_{dZ}$. Kiểm tra các tiêu chí T (t-distribution (Markuze và Gôlubev, 2010) : $|T_X| < q_X$, $|T_Y| < q_Y$, $|T_Z| < q_Z$, (q_X, q_Y, q_Z là các giá trị thống kê được xác định theo bảng (t-distribution). Kết quả đánh giá thấy điểm 1 ổn định. Các điểm còn lại dịch chuyển. Thực hiện phép biến đổi S, được trình bày ở phần 2.2, sử dụng điểm định vị là điểm 1 sẽ có ma trận S như sau:

$$S = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -E & E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -E & 0 & E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -E & 0 & 0 & E & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -E & 0 & 0 & 0 & E & 0 & 0 & 0 \\ -E & 0 & 0 & 0 & 0 & E & 0 & 0 \\ -E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & E & 0 \\ -E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & E \end{bmatrix}$$

Ở đây các ma trận khối: $E_{(3 \times 3)}$ - ma trận đơn vị; $0_{(3 \times 3)}$ - ma trận 0.

Thực hiện phép biến đổi S được trình bày ở phần 2.2 chúng ta có kết quả tính số liệu dịch chuyển của chu kỳ 2 và chu kỳ 3 so với chu kỳ 1 (đơn vị mm) và thành phần đường chéo của ma trận hiệp phương sai ở Bảng 1 và 2.

Đánh giá độ dịch chuyển các mốc giữa 2 chu kỳ theo tiêu chí $|T_X| < q_X$, $|T_Y| < q_Y$, $|T_Z| < q_Z$, chúng ta thấy có sự dịch chuyển các điểm từ 2 đến điểm 8.

3.2.2. Phân tích dịch chuyển động theo phép lọc Kalman

Trong mô hình động chúng ta không chỉ xác định các tham số dịch chuyển tọa độ của các điểm (dX,dY,dZ), mà có các tham số dịch chuyển như vận tốc và gia tốc dịch chuyển. Nếu các tham số vượt quá giá trị theo tiêu chí T (t-distribution) thì được đánh dấu (+), nhỏ hơn thì đánh dấu (-).

4. Kết luận và kiến nghị

Bài báo đã nghiên cứu lý thuyết và tiến hành tính toán thực nghiệm trên cơ sở sử dụng dữ liệu GNSS, kết hợp các phương pháp xử lý số liệu trắc địa hiện đại và phép lọc Kalman, qua đó xác định và thống nhất được gốc của lưới quan trắc chuyển

Bảng 1. Kết quả tính toán sau phép biến đổi S giữa năm 2013 - 2014.

Tên điểm	dX (mm)	m_X^2 (mm)	dY (mm)	m_Y^2 (mm)	dZ (mm)	m_Z^2 (mm)
6	-11	4	13	10	-3	3
7	0	4	42	5	6	3
8	-3	4	25	10	-3	3
1	0	0	0	0	0	0
2	17	4	-21	10	-6	2
3	-6	4	1	10	-4	3
4	1	4	-12	10	-9	3
5	-14	4	16	10	-4	3

Bảng 2. Kết quả tính toán sau phép biến đổi S giữa năm 2013 - 2015.

Tên điểm	dX (mm)	m_X^2 (mm)	dY (mm)	m_Y^2 (mm)	dZ (mm)	m_Z^2 (mm)
6	-12	2	-15	20	-3	3
7	5	5	24	20	10	3
8	-7	2	18	20	-3	3
1	0	0	0	0	0	0
2	20	2	-19	20	-10	2
3	-5	2	-10	20	-5	3
4	1	2	-9	20	-16	3
5	-17	5	27	20	-5	3

dịch thông qua phép biến đổi S với bình sai lưới tự do. Sự kết hợp lọc Kalman và bình sai với sai số số liệu gốc cho phép xác định ma trận hiệp phương sai vector trạng thái trong quá trình tính toán.

Qua tính toán thử nghiệm, có thể thấy mô hình động theo Kalman cho phép xác định vận tốc dịch chuyển và gia tốc của mỗi điểm lưới. Các kết quả nghiên cứu này có thể ứng dụng để nghiên cứu địa động học trong địa chất, nghiên cứu biến dạng công trình, xác định đứt gãy, sạt lở. Trong tương lai với việc phát triển lưới quan trắc GNSS, ở phạm vi vùng và trên toàn lãnh thổ có thể kết hợp với mạng lưới trạm CORS (hiện có 65 trạm), mở ra khả năng quan trắc và phân tích dịch chuyển liên tục theo thời gian một cách thuận tiện với độ chính xác cao.

Đóng góp của tác giả

Hoàng Ngọc Hà – xây dựng ý tưởng nghiên cứu và thực hiện tính toán trên cơ sở lý thuyết áp dụng vào thực tiễn, sau đó hoàn thiện bản thảo và nội dung kiến nghị.

Tài liệu tham khảo

Casula, G., (2016). Geodynamics of the Calabrian Arc area (Italy) inferred from a dense GNSS network observations. *Geodesy and Geodynamics*, 7(1), 76-86.

Hoàng Ngọc Hà, Phạm Thanh Thảo, (2016). *Ứng dụng lý thuyết bình sai tự do lưới không gian trong phân tích độ dịch chuyển đứt gãy sông Sài Gòn*. Tài nguyên và môi trường, số 23(253), Kỳ 1,12/.

Hà Minh Hòa, Nguyễn Ngọc Lâu, Dương Chí Công, (2004). *Nghiên cứu ứng dụng công nghệ GPS để xác định chuyển dịch vỏ trái đất trên khu vực đứt gãy Lai châu - Điện Biên*. Đề tài KHCN cấp Bộ Tài nguyên và Môi trường giai đoạn 2002 - 2004. Viện Khoa học Đo đạc và Bản đồ.

Kalman, R.E., (1960). *A new approach to linear filtering and prediction problems*, J Basic Eng 82D.

Kuhlmann, H.: Kalman, (2003). *Filtering with coloured measurement noise for deformation analysis*, in: Proceedings of 11th FIG Symposium on Deformation Measurements, 25-28 May, Santorini, Greece, 2003, 455-462.

Markuze, Y. U. I., Hoàng Ngọc Hà, (1991). *Bình sai các mạng lưới không gian mặt đất và vệ tinh*, Nhà xuất bản Nedra Matxcova. Sách chuyên khảo (tiếng Nga). 1991.

Markuze, Y. U. I, Gôlubev, V.V.(2010). *Lý thuyết xử lý toán học lưới trắc địa*. Alma Mater. (Tiếng Nga).

Welsch, W. M. and Heunecke, O., (2001). *Models and terminology for the analysis of geodetic monitoring observations*, in: Proceedings of the 10th International Symposium on Deformation Measurements, Orange, California, USA, 390-412.

Vy Quốc Hải, Trần Đình Tô, Dương Chí Công, (2005). *Xác định chuyển dịch hiện đại đới đứt gãy sông Đà và đới đứt gãy Sơn La - Bim Sơn bằng số liệu GPS*. Địa chất và Khoáng sản, số 9, trang 257-265.