

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

**BÁO CÁO HỌC THUẬT HỌC KỲ 2
NĂM HỌC 2024 – 2025**

**PHÁT HIỆN DỊCH CHUYỂN TỪ CHUỖI DỮ LIỆU ĐỊNH VỊ
GNSS RTK TRONG QUAN TRẮC BIẾN DẠNG**

Người báo cáo: PGS.TS Phạm Công Khải

Đơn vị : Bộ môn Trắc địa mỏ

Khoa Trắc địa – Bản đồ và Quản lý đất đai

Hà Nội - 6/2025

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

**BÁO CÁO HỌC THUẬT HỌC KỲ 2
NĂM HỌC 2024 – 2025**

**PHÁT HIỆN DỊCH CHUYỂN TỪ CHUỖI DỮ LIỆU ĐỊNH VỊ
GNSS RTK TRONG QUAN TRẮC BIẾN DẠNG**

Phòng KHCN

Bộ môn Trắc địa mỏ

Người báo cáo

PGS. TS Phạm Công Khải

Hà Nội - 6/2025

MỤC LỤC

MỞ ĐẦU	2
1. Định dạng dữ liệu trong quan trắc dịch chuyển bằng công nghệ GNSS RTK. 3	
1.1. Tin nhắn trị đo GGA.....	4
1.2. Tin nhắn trị đo GST.....	6
2. Phương pháp xử lý dữ liệu quan trắc chuyển dịch.....	7
2.1. Lọc những giá trị dị thường trong chuỗi RTK	7
2.2. Tính chuyển tọa độ	10
3. Phân tích dữ liệu phát hiện dịch chuyển đất đá theo thời gian thực.....	14
4. Xây dựng phần mềm xử lý, phân tích dữ liệu phát hiện dịch chuyển theo thời gian thực	19
KẾT LUẬN	23
DANH MỤC TÀI LIỆU THAM KHẢO	24

MỞ ĐẦU

Việc phát hiện dịch chuyển, trượt lở đất đá theo thời gian thực có một ý nghĩa rất lớn trong việc đưa ra cảnh báo để giảm thiểu những rủi ro tai biến do nó gây ra. Trong thời gian gần đây, công nghệ hệ thống vệ tinh dẫn đường toàn cầu (Global Navigation Satellite System - GNSS) với kỹ thuật đo động xử lý tức thời (Real Time Kinematic – RTK) đã được ứng dụng rất có hiệu quả và rộng rãi trong quan trắc, giám sát dịch chuyển, trượt lở đất đá theo thời gian thực. Tuy nhiên do ảnh hưởng của nhiễu khi định vị RTK mà chuỗi dữ liệu quan trắc sẽ xuất hiện những giá trị dị thường, dễ nhầm lẫn với giá trị dịch chuyển, gây khó khăn trong việc phát hiện dịch chuyển. Để giải quyết vấn đề này, chúng tôi sử dụng chuỗi dữ liệu quan trắc bằng kỹ thuật RTK, được chiết xuất ra theo định dạng tiêu chuẩn NMEA ([National Marine Electronics Association](#)). Chuỗi dữ liệu này được lọc qua ba bước để loại bỏ nhiễu và các giá trị dị thường sau đó được tính chuyển sang hệ tọa độ vuông góc không gian địa diện chân trời. Phương pháp cửa sổ trượt (Sliding Window – SW) được đề xuất ứng dụng để phân tích chuỗi dữ liệu đã lọc nhiễu sẽ phát hiện ra thời điểm xảy ra chuyển dịch và giá trị chuyển dịch. Một thực nghiệm mô phỏng chuyển dịch được thực hiện với hệ thống thiết bị do chúng tôi thiết kế chế tạo đã minh chứng tính đúng đắn cho phương pháp nghiên cứu đã đề xuất.

1. Định dạng dữ liệu trong quan trắc dịch chuyển bằng công nghệ GNSS RTK.

Trong quan trắc chuyển dịch đất đá bãi thải theo thời gian thực, tín hiệu vệ tinh được ăng ten GNSS thu nhận sẽ truyền đến bộ thu GNSS, tại đây tín hiệu vệ tinh được giải mã sang dạng số và được truyền tức thời về máy tính chủ trên nền mạng IP qua giao thức NTRIP (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol). Để truyền dữ liệu từ thiết bị điện tử này sang thiết bị điện tử khác, Hiệp hội Điện tử Hàng hải Quốc gia Mỹ (National Marine Electronics Association – NMEA) đã đề xuất một tiêu chuẩn định dạng dữ liệu gọi là tiêu chuẩn NMEA [50]. NMEA là một sự kết hợp giữa kỹ thuật điện và dữ liệu để liên lạc giữa các thiết bị điện tử hàng hải như dụng cụ đo độ sâu bằng sóng âm, thiết bị định vị bằng âm thanh, máy đo gió, la bàn con quay, thiết bị lái tự động, máy thu GPS và nhiều loại thiết bị khác.

Hiện nay, trong định vị vệ tinh theo công nghệ GNSS/CORS việc truyền dữ liệu định vị từ các trạm Rover về trung tâm trạm chủ của trạm CORS chủ yếu sử dụng định dạng tiêu chuẩn NMEA. Định dạng tiêu chuẩn NMEA có nhiều phiên bản khác nhau nhưng phiên bản NMEA0183 đang được sử dụng rộng rãi hơn cả nên người sử dụng thường gọi là tiêu chuẩn NMEA. Tiêu chuẩn điện được sử dụng là RS232 là một chuẩn truyền thông được phát triển bởi “Electronic Industry Association - EIA” và “Telecommunications Industry Association - TIA”. Hầu hết phần cứng với tiêu chuẩn NMEA0183 đều kết nối được qua cổng RS232.

Định dạng dữ liệu theo tiêu chuẩn NMEA sử dụng tiêu chuẩn mã trao đổi thông tin Hoa Kỳ (American Standard Code for Information Interchange - ASCII), mỗi đoạn mã theo định dạng tiêu chuẩn NMEA bắt đầu với một ký tự tiền tệ đô la “\$” trên một hàng nối tiếp và không thể lớn hơn 80 ký tự. Dữ liệu được chứa đựng bên trên một hàng với những kiểu khác nhau và được cách nhau bởi dấu phẩy (,), sau dấu phẩy có ký tự khoảng trống. Có nhiều kiểu tin nhắn dữ

liệu khác nhau trong định dạng tiêu chuẩn NMEA và nó có cấu trúc chung như ở bảng 3.1

Bảng 3.1. Cấu trúc chung của dữ liệu theo định dạng tiêu chuẩn NMEA

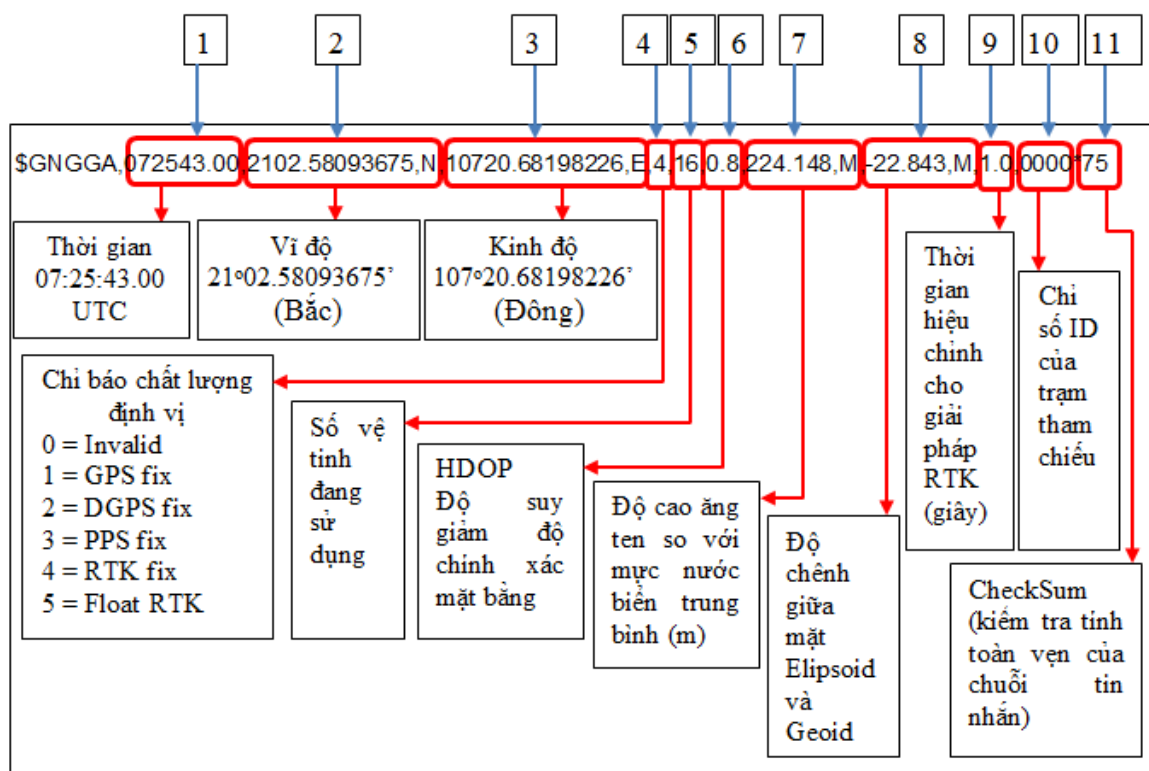
Cấu trúc chung: \$aacc,C-c*hh<CR><LF>		
Giải thích		
Ký tự	Hex	Mô tả
“\$”	24	Bắt đầu câu
aacc		Trường địa chỉ. "aa" là mã nhận diện hệ thống định vị. "ccc" mã xác định loại tin nhắn
“,”	2C	Dấu phân cách giữa các trường
C-c		Khối câu lệnh
“*”	2A	Dấu phân cách lệnh Checksum
hh		Trường tổng hợp
<CR><LF>	0D0A	Kết thúc câu

Mã xác định loại tin nhắn trong định dạng tiêu chuẩn NMEA có nhiều loại tin nhắn khác nhau. Trong định vị vệ tinh GNSS có tất cả 25 tin nhắn khác nhau, chẳng hạn như tin nhắn GGA, GST, GSA, RMC, VTG, GLL, GSV, ZDA... Tùy thuộc vào mục đích của người sử dụng mà có thể lựa chọn những tin nhắn cho phù hợp. Trong quan trắc chuyển dịch đất đá theo thời gian thực, có hai loại tin nhắn trị đo được sử dụng là GGA và GST.

1.1. Tin nhắn trị đo GGA

Tin nhắn trị đo GGA là tin nhắn được sử dụng phổ biến nhất trong định vị GNSS, nó bao gồm các thông tin về thời gian định vị theo hệ thời gian UTC (1), vĩ độ bắc hoặc nam (2), kinh độ đông hoặc tây (3), chỉ báo chất lượng định vị GNSS (4), số lượng vệ tinh được sử dụng (5), độ suy giảm độ chính xác mặt bằng HDOP (6), cao độ tâm pha ăng ten so với mặt Geoid, đơn vị là m (7), khoảng cách giữa mặt ellipsoid trái đất WGS-84 và mặt Geoid, đơn vị là m (8), thời gian hiệu chỉnh khi định vị RTK, đơn vị là giây (9), mã định danh ID của trạm tham chiếu (10), nếu không có mã định danh sẽ mặc định là bốn số 0 (0000), mã tổng kiểm tra tính toàn vẹn của chuỗi tin nhắn gửi về (11).

Các thông tin chi tiết của một dòng tin nhắn trị đo GGA theo định dạng tiêu chuẩn NMEA thu được ở trạm quan trắc được giải mã cụ thể như ở hình 3.1.



Hình 3.1. Các thông tin chi tiết của một dòng tin nhắn trị đo GGA

Trong dòng tin nhắn trị đo GGA có gửi đi chỉ báo chất lượng định vị RTK. Chỉ báo có 6 mức độ khác nhau từ 0 đến 5, ở bảng 3.2 là các chỉ báo với chất lượng định vị tương ứng.

Bảng 3.2. Chỉ báo chất lượng định vị RTK

TT	Mức chỉ báo	Chất lượng định vị	Giải thích
1	0	Invalid	Định vị không hợp lệ, không có vị trí nào khả dụng.
2	1	GPS Fix	Cải chính GPS tự động, không sử dụng dữ liệu hiệu chỉnh.
3	2	DGPS Fix	Cải chính DGPS, sử dụng trạm gốc DGPS cục bộ hoặc dịch vụ hiệu chỉnh

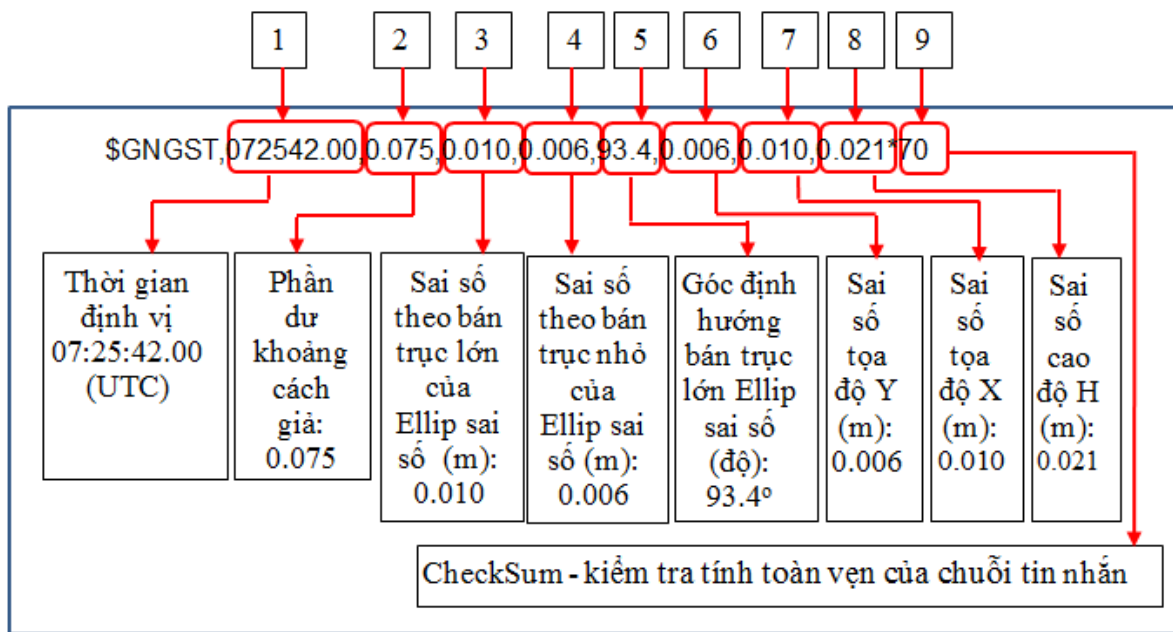
			nếu WAAS hoặc EGNOS.
4	3	PPS Fix	Cải chính từ dịch vụ định vị điểm chính xác (Precise Positioning Service).
5	4	RTK Fix	Đo động xử lý tức thời RTK có độ chính xác cao.
6	5	Flood RTK	Định vị RTK tự do, độ chính xác cao hơn DGPS Fix nhưng thấp hơn RTK Fix.

Khi định vị theo phương thức CORS/RTK nếu chỉ báo này là 4 thì có nghĩa là trị đo này đã được hiệu chỉnh từ trạm CORS và có độ chính xác cao. Khi đó người đo sẽ lấy giá trị tọa độ này trong chuỗi trị đo GGA. Kết hợp với sai số định vị thể hiện trong chuỗi tin nhắn GST, sẽ chọn được những tọa độ định vị tốt nhất.

1.2. Tin nhắn trị đo GST

Tin nhắn trị đo GST là tin nhắn thống kê sai số định vị GNSS bao gồm các thông tin về thời gian hiệu chỉnh vị trí theo hệ thời gian UTC (1), phần dư của khoảng cách giả (2), giá trị sai số theo bán trục lớn của ellip sai số (3), giá trị sai số theo bán trục nhỏ của ellip sai số (4), góc định hướng bán trục lớn của ellip sai số (5), giá trị sai số theo trục Y (6), giá trị sai số theo trục X (7), sai số độ cao (8), mã tổng kiểm tra tính toàn vẹn của chuỗi tin nhắn gửi về (9).

Các thông tin của một dòng tin nhắn trị đo GST theo định dạng tiêu chuẩn NMEA thu được ở trạm quan trắc được giải mã cụ thể như ở hình 3.2.



Hình 3.2. Các thông tin chi tiết của một dòng tin nhắn trị đo GST

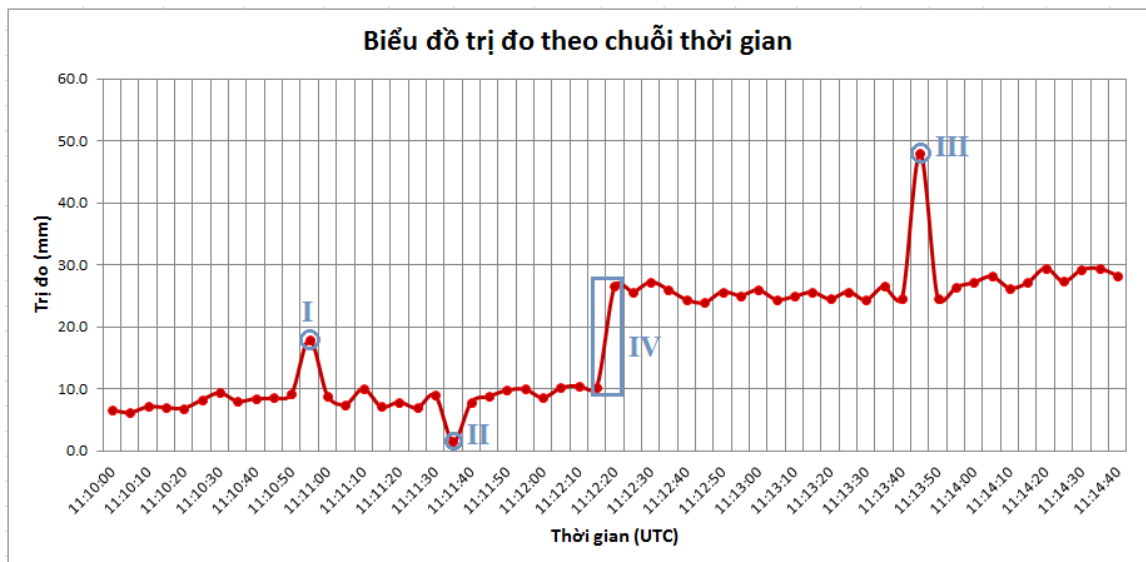
Dựa vào các thông tin thống kê về sai số định vị này để lọc được những giá trị định vị có sai số nhỏ hơn mức quy định theo yêu cầu đặt ra để nâng cao độ chính xác quan trắc.

2. Phương pháp xử lý dữ liệu quan trắc chuyển dịch

Quá trình xử lý, phân tích dữ liệu và phát hiện chuyển dịch bao gồm ba bước: lọc những giá trị dị thường trong chuỗi dữ liệu đo động xử lý tức thời RTK, tính chuyển tọa độ từ hệ tọa độ WGS84 sang hệ tọa độ vuông góc không gian địa diện chân trời, phân tích dữ liệu và phát hiện chuyển dịch.

2.1. Lọc những giá trị dị thường trong chuỗi RTK

Trong quan trắc liên tục dựa trên công nghệ GNSS với kỹ thuật RTK, điểm dị thường xuất hiện cùng với điểm thay đổi do chuyển dịch đột ngột. Vì vậy trong quá trình phát hiện chuyển dịch cần phải nhận biết điểm dị thường để loại bỏ nó trong chuỗi trị đo. Ở hình 2.18 các điểm I, II, III là điểm dị thường còn điểm IV là điểm thay đổi (hay còn gọi là điểm dịch chuyển). Điểm dị thường là do độ lệch tương đối trong chuỗi trị đo, còn điểm dịch chuyển là do thay đổi trạng thái trong chuỗi trị đo theo thời gian. Như ở hình 3.2, sau thời điểm 11h12m15s trong chuỗi trị đo có sự thay đổi và điểm dịch chuyển đã được phát hiện.



I, II, III là điểm dị thường.

IV là điểm dịch chuyển.

Hình 3.2. Sự khác nhau giữa điểm dị thường và điểm dịch chuyển

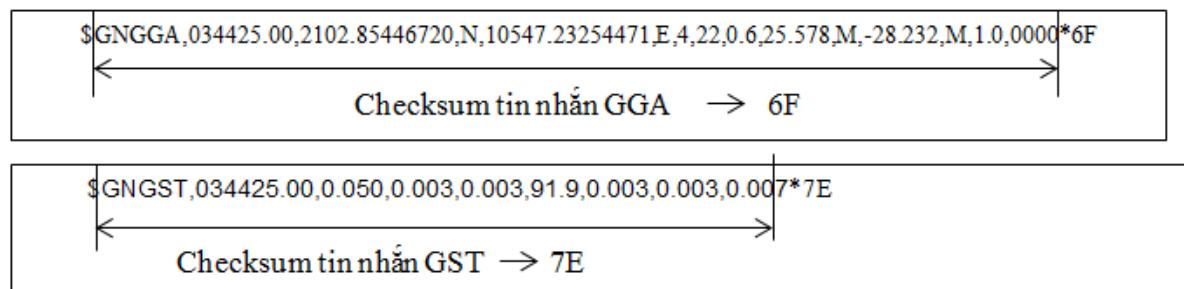
Rất khó để phát hiện điểm dị thường để loại bỏ nó nếu sử dụng dữ liệu quan trắc không có thông tin kèm theo, nhất là đối với các tập dữ liệu lớn.

Do tệp dữ liệu quan trắc thu được theo định dạng tiêu chuẩn NMEA có các thông tin kèm theo như đã giải mã như ở trên, nên quá trình lọc các giá trị dị thường được tiến hành qua các bước sau:

1. Bước thứ nhất: Kiểm tra tính toàn vẹn của các tin nhắn trong tệp dữ liệu NMEA.

Các dòng tin nhắn theo tiêu chuẩn NMEA được truyền từ trạm quan trắc về máy tính chủ qua giao thức NTRIP có thể bị lỗi đường truyền dẫn tới thông tin không đầy đủ. Để loại bỏ những dòng tin nhắn này cần phải kiểm tra tính toàn vẹn của nó. Để kiểm tra tính toàn vẹn của một chuỗi, người ta thường sử dụng thuật toán Checksum. Có nhiều thuật toán Checksum khác nhau được sử dụng, nhưng thuật toán CRC (Cyclic Redundancy Check) được sử dụng nhiều hơn cả. Thuật toán CRC gọi là “kiểm dư chu trình” được phát triển bởi W. Wesley Peterson vào năm 1961. Việc kiểm tra tính toàn vẹn của dữ liệu được thực hiện bằng cách phân tích tất cả các ký tự trong khoảng từ ký tự \$ đến ký tự * của

chuỗi tin nhắn NMEA thành một chuỗi mới (hình 3.3). Sau đó, chỉ cần thực hiện thuật toán thao tác bit XOR ký tự đầu tiên với ký tự tiếp theo, cho đến khi kết thúc chuỗi. Sử dụng Checksum trong chuỗi tin nhắn trị đo đã gửi kèm để so sánh với Checksum tính toán được, nếu trong chuỗi tin nhắn trị đo có một thay đổi nhỏ cũng sẽ tạo ra tổng Checksum khác nhau rất lớn. Nếu dòng tin nhắn NMEA không thay đổi tức là Checksum gửi đến và Checksum tính toán được giống nhau, có nghĩa là dòng tin nhắn gửi đi được bảo toàn, không bị thay đổi và nó được người sử dụng chấp nhận.



Hình 3.3. Checksum chuỗi tin nhắn GGA và GST

Việc kiểm tra tính toàn vẹn của các tin nhắn trong tệp dữ liệu NMEA được thực hiện bằng một module chương trình máy tính có tên là “**GGA chuyển đổi**” trong phần mềm “**Server GNSS CORS WDM**”.

2. Bước thứ hai: Lọc ra những tin nhắn có tọa độ đã được hiệu chỉnh vị trí (Fixed).

Trong chuỗi tin nhắn GGA có chỉ báo chất lượng phép định vị GNSS, các chỉ báo chất lượng phép đo RTK có 6 mức khác nhau đánh số từ 0 đến 5 được thể hiện như ở bảng (2.7). Trong định vị GNSS/CORS/RTK, khi chỉ số báo chất lượng là 4 thì trị đo này đã được được cải chỉnh vị trí từ trạm tham chiếu CORS và cho chất lượng tốt nhất và giá trị này được lọc ra cho mục đích sử dụng. Nếu chỉ số báo chất lượng là các số 0, 1, 2, 3, 5 thì không lấy trị đo này.

3. Bước thứ ba: Lọc những tin nhắn có tọa độ đã được hiệu chỉnh vị trí nhưng có sai số vị trí nhỏ nhất.

Sau khi lọc xong bước 2, những tin nhắn có chất lượng tốt nhất đã được giữ lại. Tuy nhiên sai số định vị RTK cũng khác nhau và nó được thể hiện trong tin nhắn GST. Để đạt độ chính xác cao, chỉ những tin nhắn có sai số vị trí nhỏ hơn giới hạn cho phép mới được giữ lại. Quá trình lọc ra những tin nhắn có sai số vị trí trong giới hạn cho phép được thực hiện bằng cách phân tích chuỗi tin nhắn GST như đã mô tả ở bảng 2.6. Trong luận án, lấy giới hạn về sai số mặt bằng là 4mm và sai số độ cao là 8mm.

Ở hình 2.18 các điểm I, II, III là điểm dị thường còn điểm IV là điểm thay đổi (hay còn gọi là điểm dịch chuyển). Điểm dị thường là do độ lệch tương đối trong chuỗi trị đo, còn điểm dịch chuyển là do thay đổi vị trí trong chuỗi trị đo theo. Như ở hình 2.8, sau thời điểm 11h12m15s trong chuỗi trị đo có sự thay đổi và điểm dịch chuyển đã được phát hiện.

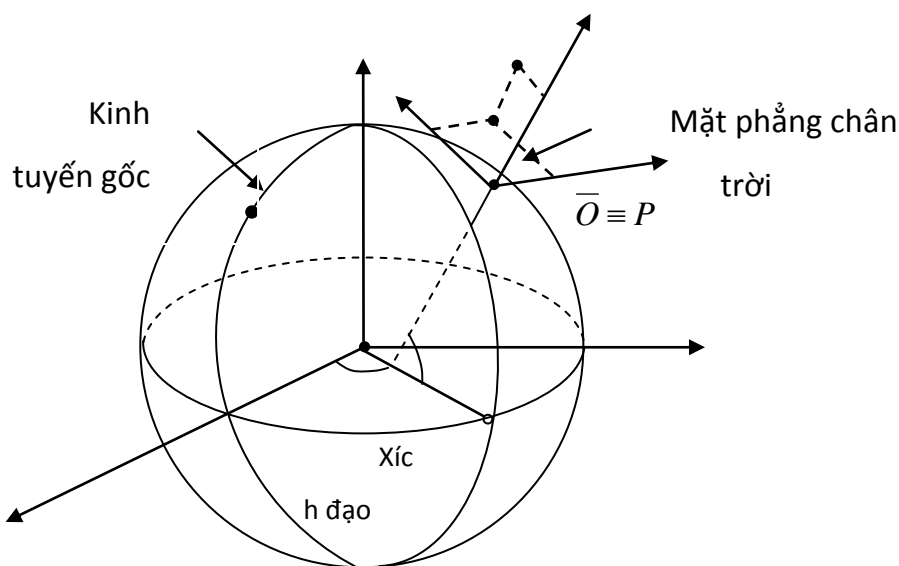
2.2. Tính chuyển tọa độ

Hệ tọa độ vuông góc không gian địa tâm chỉ cho phép xem xét chuyển dịch đất đá trong không gian. Để xác định được đại lượng chuyển dịch ngang và chuyển dịch đứng cần phải xét trên một bề mặt đặc trưng nhất, bề mặt đó chính là mặt phẳng chân trời trong hệ tọa độ vuông góc không gian địa diện chân trời (gọi tắt là hệ tọa độ địa diện chân trời).

Hệ tọa độ địa diện chân trời là hệ tọa độ có gốc tọa độ là điểm trên mặt đất hoặc trên mặt Ellipsoid. Mỗi điểm trên mặt đất đều có thể chọn làm gốc để xây dựng hệ tọa độ địa diện. Các hệ tọa độ địa diện đóng vai trò là các hệ tọa độ trung gian dùng để giải quyết các bài toán trong trắc địa vệ tinh. Hệ tọa độ địa diện chân trời được chia ra hệ tọa độ vuông góc không gian địa diện chân trời và hệ tọa độ cực địa diện chân trời. Hệ tọa độ vuông góc không gian địa diện chân trời có nhiều đặc điểm thuận lợi trong quan trắc chuyển dịch công trình, bề mặt đất [14].

Hệ tọa độ vuông góc không gian địa diện chân trời có gốc tọa độ trùng với điểm P trên mặt đất (thường là điểm trạm đo) có 3 trục tọa độ là \overline{ON} , \overline{OE} , \overline{OU} (hình 3.4).

Trục \overline{OU} trùng với phương pháp tuyến với mặt Elipsoid tại điểm P (hướng thiên đỉnh là hướng dương). Trục \overline{ON} nằm trong mặt phẳng kinh tuyến qua P, vuông góc với trục \overline{OU} và hướng về cực bắc trái đất. Trục \overline{OE} vuông góc với trục \overline{ON} , \overline{OU} và hướng về phía đông. Một số tài liệu còn ký hiệu N (North), E (East) và U (Up) là x, y, z. Trong hệ tọa độ này người ta có thể biểu diễn tọa độ của một điểm bởi 3 giá trị tọa độ N, E, U. Hệ tọa độ P-NEU được gọi là hệ tọa độ vuông góc không gian địa diện chân trời, còn hệ tọa độ O-XYZ là hệ tọa độ vuông góc không gian địa tâm.



Hình 3.4. Hệ tọa độ vuông góc không gian địa diện chân trời

Để chuyển đổi giữa tọa độ vuông góc không gian địa tâm và tọa độ vuông góc không gian địa diện, sử dụng công thức (3.1) [15]

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = R \cdot \begin{bmatrix} N \\ E \\ U \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_o \\ Y_o \\ Z_o \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Trong đó:

- (X, Y, Z) và (N, E, U) là tọa độ vuông góc không gian địa tâm và tọa độ vuông góc không gian địa diện chân trời của điểm xét.
- X_o, Y_o, Z_o là tọa độ không gian địa tâm của điểm gốc hệ tọa độ địa diện được tính theo công thức (3.2)

$$\left. \begin{aligned} X_o &= (N_o + H_o) \cdot \cos B_o \cdot \cos L_o \\ Y_o &= (N_o + H_o) \cdot \cos B_o \cdot \sin L_o \\ Z_o &= [N_o (1 - e^2) + H_o] \cdot \sin B_o \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

Trong đó:

- B_o, L_o, H_o là tọa độ trắc địa của điểm gốc hệ tọa độ địa diện chân trời.
- N_o là bán kính cong vòng thẳng đứng thứ nhất đi qua điểm gốc của hệ tọa độ địa diện chân trời

$$N_o = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \cdot \sin^2 B_o}} \quad (3.3)$$

Trong đó:

e – tâm sai thứ nhất của elipsoid WGS84

$$e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a} \quad (3.4)$$

Thay công thức (3.4) vào công thức (3.3) thì giá trị N_o được công thức (3.5)

$$N_o = \frac{a^2}{\sqrt{a^2 \cos^2 B_o + b^2 \cdot \sin^2 B_o}} \quad (3.5)$$

Trong đó:

a và b là bán trục lớn và bán trục nhỏ của elipsoid WGS84;

$a=6378137.0$ m;

$$b=6356752.3142\text{m}$$

$$\text{Độ dẹt } f=(a-b)/a = 1/298.257223563$$

Ma trận xoay R trong công thức (3.1), được xác định theo công thức (3.6)

$$R = \begin{bmatrix} -\sin B_0 \cdot \cos L_0 & -\sin L_0 & \cos B_0 \cdot \cos L_0 \\ -\sin B_0 \cdot \sin L_0 & \cos L_0 & \cos B_0 \cdot \sin L_0 \\ \cos B_0 & 0 & \sin B_0 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Từ (3.1) ta có công thức tính đổi ngược lại, từ hệ tọa độ địa tâm sang hệ tọa độ địa diện chân trời theo công thức (3.7).

$$\begin{bmatrix} N \\ E \\ U \end{bmatrix} = R^T \cdot \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

R^T là ma trận chuyển vị của ma trận R và các thành phần tọa độ X_0, Y_0, Z_0 như ở công thức (3.2) và thay vào công thức (3.7) sẽ được công thức tính chuyển tọa độ từ hệ tọa độ vuông góc không gian địa tâm sang hệ tọa độ địa diện chân trời theo công thức (3.8).

$$\begin{bmatrix} N \\ E \\ U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin B_0 \cdot \cos L_0 & -\sin B_0 \cdot \sin L_0 & \cos B_0 \\ -\sin L_0 & \cos L_0 & 0 \\ \cos B_0 \cdot \cos L_0 & \cos B_0 \cdot \sin L_0 & \sin B_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Do gốc tọa độ hệ tọa độ địa diện chân trời được chọn trùng với điểm quan trắc, cho nên các thành phần tọa độ địa diện chân trời (N, E, U) của điểm xét ở những thời điểm đo khác nhau là độ chuyển dịch. Trong quan trắc chuyển dịch đất đá theo thời gian thực, các thành phần tọa độ (N, E, U) được xác định liên tục theo chuỗi thời gian, do đó ở mỗi thời điểm có một giá trị tọa độ địa diện chân trời được xác định theo công thức (3.9).

$$\begin{bmatrix} N_i \\ E_i \\ U_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin B_0 \cdot \cos L_0 & -\sin B_0 \cdot \sin L_0 & \cos B_0 \\ -\sin L_0 & \cos L_0 & 0 \\ \cos B_0 \cdot \cos L_0 & \cos B_0 \cdot \sin L_0 & \sin B_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_i - X_0 \\ Y_i - Y_0 \\ Z_i - Z_0 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Để thuận tiện trong việc lập chương trình tính toán trên máy tính, từ công thức (3.9) sẽ tính được thành phần tọa độ của điểm quan trắc trong hệ tọa độ vuông góc không gian địa diện chân trời theo công thức (3.10)

$$\left. \begin{aligned} N_i &= -(X_i - X_0)\sin B_0 \cos L_0 - (Y_i - Y_0)\sin B_0 \sin L_0 + (Z_i - Z_0)\cos B_0 \\ E_i &= -(X_i - X_0)\sin L_0 + (Y_i - Y_0)\sin L_0 \\ U_i &= (X_i - X_0)\cos B_0 \cos L_0 + (Y_i - Y_0)\cos B_0 \sin L_0 + (Z_i - Z_0)\sin B_0 \end{aligned} \right\} (3.10)$$

Nhận xét:

-Trong công thức (3.9) nhận thấy rằng không có sự tham gia của thành phần độ cao trắc địa H_i . Vì thế, tọa độ phẳng (N_i , E_i) của các điểm trên mặt phẳng địa diện chân trời không phụ thuộc vào độ cao trắc địa của chúng. Vì vậy, việc sử dụng hệ tọa độ địa diện chân trời để xác định chuyển dịch ngang sẽ phù hợp hơn khi sử dụng hệ tọa VN2000 trong phép chiếu hình trụ ngang đồng góc UTM.

-Điểm gốc P của hệ tọa độ địa diện chân trời có thể chọn là điểm điểm quan trắc. Do đó, sự thay đổi vị trí của gốc tọa độ chính là độ dịch chuyển của trạm quan trắc. Vì vậy, công thức (3.9) được sử dụng để xác định độ chuyển dịch đất đá theo chuỗi thời gian thực.

Từ các thành phần tọa độ phẳng N_i và E_i , vị trí của các điểm đo RTK trong hệ tọa độ phẳng địa diện chân trời được xác định theo công thức (3.11)

$$P_i = \sqrt{N_i^2 + E_i^2} \quad (3.11)$$

Tiến hành phân tích chuỗi vị trí mặt bằng và độ cao của các điểm quan trắc theo thời gian (P_i , U_i) để phát hiện thời điểm xảy ra dịch chuyển ngang và dịch chuyển đứng.

3. Phân tích dữ liệu phát hiện dịch chuyển đất đá theo thời gian thực

Trong quan trắc chuyển dịch đất đá bãi thải theo thời gian thực dựa trên công nghệ GNSS/CORS với kỹ thuật đo động xử lý tức thời RTK, vấn đề phát

hiện dịch chuyển theo thời gian thực là tìm ra thời điểm dịch chuyển và ước tính đại lượng dịch chuyển.

Thuật toán cửa sổ trượt (sliding window algorithm) là một cách tiếp cận hữu ích trong việc xử lý và phân tích dữ liệu, đặc biệt khi áp dụng vào kỹ thuật RTK (Real-Time Kinematic). Thuật toán cửa sổ trượt là một kỹ thuật khá phổ biến trong xử lý chuỗi dữ liệu theo thời gian, đặc biệt trong việc phát hiện chuyển dịch (displacement detection). Ý tưởng của thuật toán cửa sổ trượt là sử dụng một “cửa sổ” có kích thước cố định hoặc thay đổi để di chuyển qua dữ liệu đầu vào. Tại mỗi bước, nó phân tích dữ liệu trong cửa sổ để phát hiện sự thay đổi (chuyển dịch) dựa trên một số tiêu chí như sự thay đổi giá trị trung bình, phương sai, độ lệch chuẩn.

Thuật toán cửa sổ trượt được thực hiện qua các bước sau:

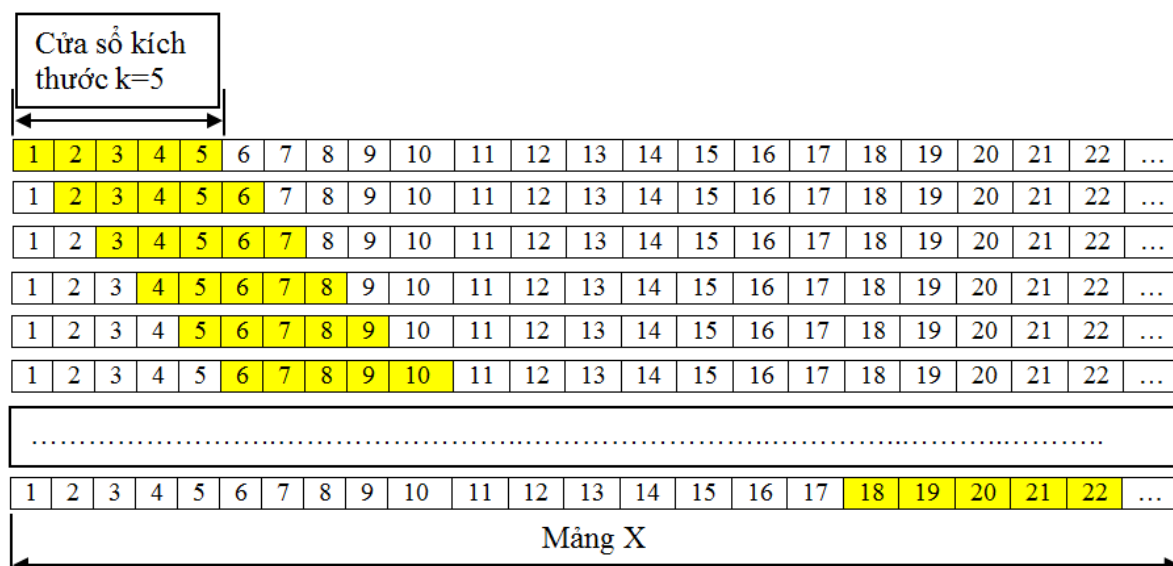
Xác định kích thước cửa sổ trượt: Chọn một kích thước cửa sổ (window size) phù hợp với bài toán. Kích thước này có thể cố định hoặc thích ứng tùy thuộc vào từng trường hợp cụ thể.

1. **Khởi tạo cửa sổ:** Đặt cửa sổ ở vị trí bắt đầu của chuỗi dữ liệu.
2. **Tính toán đặc trưng trong cửa sổ:** Tính toán một số đặc trưng (feature) của dữ liệu trong cửa sổ, như trị trung bình (mean), phương sai (variance), độ lệch chuẩn
3. **So sánh với ngưỡng hoặc cửa sổ khác:**
 - + Nếu chỉ dùng một cửa sổ, so sánh đặc trưng với một giới hạn quy định để phát hiện thay đổi.
 - + Nếu dùng hai cửa sổ (một cửa sổ tham chiếu và một cửa sổ hiện tại), so sánh đặc trưng giữa hai cửa sổ để phát hiện sự khác biệt.
4. **Trượt cửa sổ:** Di chuyển cửa sổ một bước (step size) và lặp lại quá trình từ bước 3.

5. **Phát hiện chuyển dịch:** Nếu sự thay đổi vượt quá giới hạn cho phép hoặc có sự khác biệt đáng kể giữa các cửa sổ, đánh dấu vị trí đó là điểm chuyển dịch.

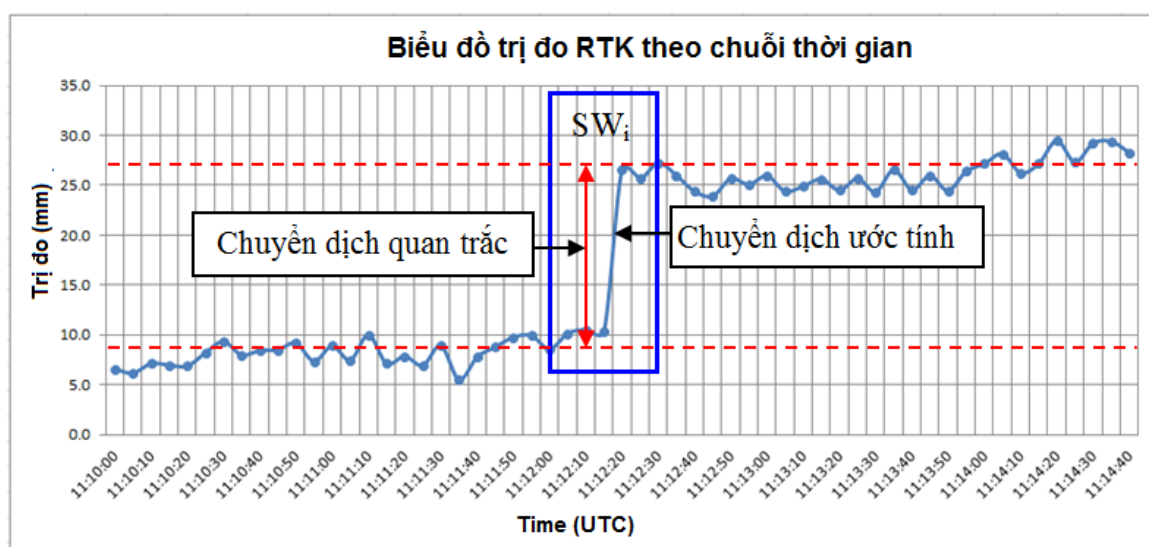
Giả sử, có chuỗi dữ liệu quan trắc là $X(x_1, x_2, \dots, x_n)$ tương ứng với chuỗi thời gian là $T(t_1, t_2, \dots, t_n)$ gọi là mảng lớn (cửa sổ lớn), cần phát hiện điểm chuyển dịch (tại đó dữ liệu thay đổi đột ngột). Đầu tiên, chia chuỗi dữ liệu đó thành nhiều mảng nhỏ (cửa sổ nhỏ) có kích thước s kề nhau (thông thường chọn $s \geq 5$ tùy vào kích thước của cửa sổ lớn) []. Cụ thể, cửa sổ thứ nhất bắt đầu từ tọa độ thứ nhất tới tọa độ thứ s , cửa sổ thứ hai bắt đầu từ tọa độ thứ hai tới tọa độ thứ $s+1$, và tiếp tục làm như vậy cho đến hết mảng X . Kiểu làm này được gọi là cửa sổ trượt được thể hiện như hình 3.6.

Phương pháp tiếp cận cửa sổ trượt chính là thiết lập một cửa sổ có kích thước k (k có thể chọn tùy ý, thông thường chọn $k \geq 5$) trên một mảng X , sau đó dịch cửa sổ đó trên toàn mảng nghĩa là thêm vào một phần tử sau và loại bỏ một phần tử trước, sau đó chia nó cho k để tìm và so sánh giá trị trung bình để tìm ra mảng có giá trị trung bình lớn nhất. Vì vậy, chúng ta sẽ tạo ra hai biến: `current_sum` và `max_sum`. Chúng ta lưu trữ tổng của k phần tử đầu tiên trong `current_sum` trước khi đặt `max_sum` bằng `current_sum`. Bây giờ chúng ta bắt đầu duyệt mảng, bắt đầu từ chỉ số k và đi đến cuối mảng, cập nhật biến `current_sum` bằng cách thêm phần tử sau và xóa phần tử trước đó. Thực hiện cho đến khi đạt được tổng lớn nhất tương ứng với kích thước cửa sổ k . Cuối cùng chúng ta chỉ cần chia nó cho k để lấy giá trị trung bình.



Hình 3.6. Phương pháp thiết lập cửa sổ trượt

Phương pháp cửa sổ trượt dựa trên sự biến đổi của các độ lệch chuẩn của chuỗi nhỏ (cửa sổ nhỏ) trong chuỗi lớn (cửa sổ lớn) tọa độ [27]. Vì trong chuỗi tọa độ đã loại bỏ các điểm dị thường nên chỉ còn các điểm dịch chuyển. Ở hình 3.2 có những điểm dị thường và điểm dịch chuyển, sau khi lọc chỉ còn lại điểm dịch chuyển (hình 3.7).



Hình 3.7. Điểm dịch chuyển trong chuỗi trị đo RTK đã lọc giá trị dị thường

Sau khi chọn được kích thước cửa sổ trượt, tiến hành tính độ lệch chuẩn của cửa sổ thứ i theo công thức (3.12)

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x}_i)^2}{s-1}} \quad (3.12)$$

Trong đó

x_j là trị đo thứ j ;

i là số thứ tự của cửa sổ;

\bar{x}_i là giá trị trung bình ở cửa sổ thứ i ;

s là kích thước cửa sổ.

Số lượng cửa sổ trượt nsw có kích thước s trong một chuỗi có k trị đo được tính theo công thức (3.13)

$$nsw = k - s + 1 \quad (3.13)$$

Để xác định điểm dịch chuyển, sử dụng giá trị giới hạn là 3σ . Các giới hạn này được thể hiện theo công thức (3.14).

$$\left\{ \begin{array}{l} |x_j - \bar{x}_i| \leq 3\sigma \rightarrow \text{Điểm } x_j \text{ không dịch chuyển} \\ |x_j - \bar{x}_i| \geq 3\sigma \rightarrow \text{Điểm } x_j \text{ dịch chuyển} \end{array} \right\} \quad (10)$$

Giá trị dịch chuyển ước tính sẽ được tính bằng hiệu giá trị đo của điểm cuối cùng và điểm trước nó trong cửa sổ trượt có chuyển dịch, được tính theo công thức (3.15).

$$Q_{est} = x_j - x_{j-1} \quad (3.15)$$

Giá trị dịch chuyển quan trắc được tính theo công thức (3.16)

$$Q_m = \frac{1}{n_2} \sum_{k=n_1+1}^{n_2} x_k - \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} x_i \quad (3.16)$$

Giả sử có một đoạn chuỗi trị đo RTK như ở hình 3.7 gồm 57 điểm đo đã được lọc các điểm dị thường và chỉ còn điểm dịch chuyển. Nếu chọn kích thước cửa sổ trượt $s = 15$ thì số cửa sổ trượt $nsw = 44$. Kết quả tính toán ví dụ để phát

hiện điểm dịch chuyển với một đoạn chuỗi trị đo RTK được thể hiện như ở bảng 3.5.

Bảng 3.5. Kết quả tính toán ví dụ để phát hiện điểm dịch chuyển

TT Cửa số	Thời gian UTC	$x_j - \bar{x}_i$	σ (mm)	3σ (mm)	Trị đo cuối cùng của cửa sổ	Q_{est} (mm)	Q_m (mm)	Ghi chú
1	11:11:10	2.07	1.12	3.37	10.0	-	-	
2	11:11:15	-0.85	1.08	3.25	7.1	-	-	
3	11:11:20	-0.23	0.96	2.89	7.9	-	-	
...	-	-	
14	11:12:15	1.64	1.49	4.47	10.3	-	-	
15	11:12:20	16.71	4.85	14.54	26.6	16.3	18.0	Điểm chuyển dịch
...	-	-	
...	-	-	
42	11:14:30	2.74	1.65	4.95	29.2	-	-	
43	11:14:35	2.59	1.71	5.14	29.4	-	-	
44	11:14:40	1.31	1.72	5.17	28.3	-	-	

Theo bảng 3.5, tại cửa sổ trượt số 15 có $x_j - \bar{x}_i > 3\sigma$ ($16.71 > 14.54$) điểm chuyển dịch nằm ở cửa sổ này và điểm cuối cùng của cửa sổ này là điểm chuyển dịch vào lúc 11h12m20s (UTC), giá trị chuyển dịch ước tính là 16.3 mm còn giá trị dịch chuyển quan trắc là 18.0 mm

4. Xây dựng phần mềm xử lý, phân tích dữ liệu phát hiện dịch chuyển theo thời gian thực

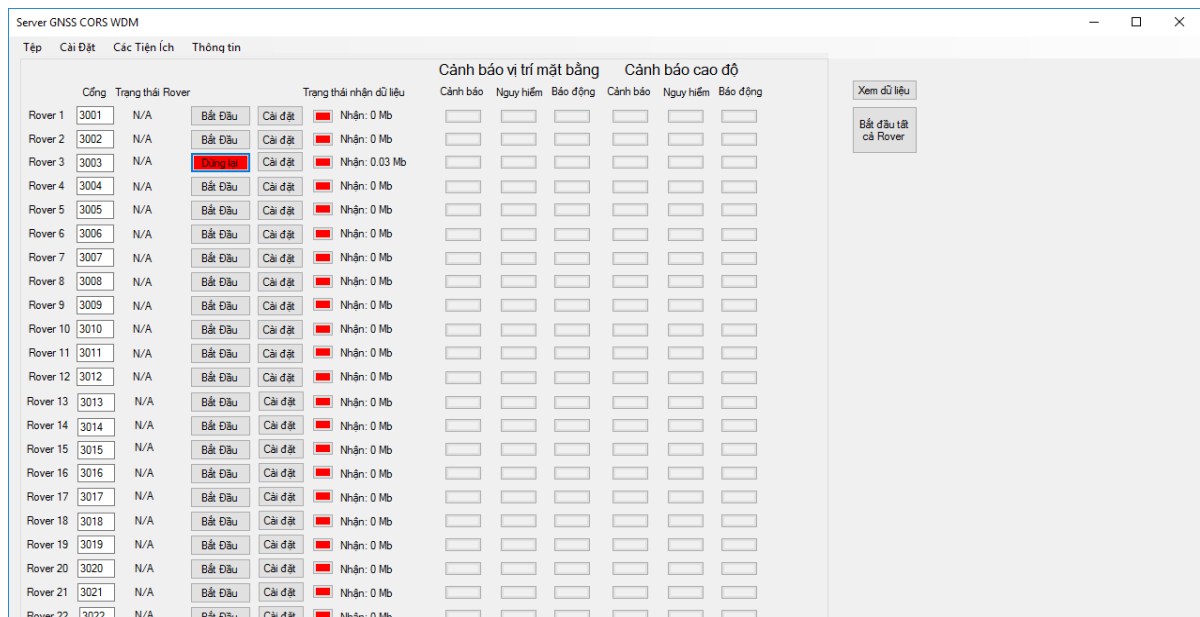
Khi quan trắc chuyển dịch, trượt lở đất đá theo thời gian thực, thường tiến hành liên tục trong một khoảng thời gian lâu dài hàng tháng hoặc hàng năm. Do đó vấn đề phát hiện dịch chuyển là phải tìm ra thời điểm dịch chuyển và ước tính được độ dịch chuyển phải được xác định tức thời bằng một phần mềm chuyên dụng

Số liệu quan trắc trượt lở đất đá được truyền liên tục từ trạm quan trắc về máy tính chủ (Server) thông qua bộ truyền dữ liệu. Một phần mềm được thiết kế và thành lập cài đặt trong máy chủ sẽ đảm nhận chức năng phân tích, xử lý số liệu GNSS từ các trạm quan trắc gửi về để xác định và hiển thị các đại lượng dịch chuyển biến dạng công trình. Trong luận án, một phần mềm xử lý số liệu quan trắc, phân tích phát hiện dịch chuyển, trượt lở trượt lở đất đá được viết bằng ngôn ngữ lập trình VB.Net nhờ công cụ lập trình Visual Studio 2017 có tên gọi là “**Server GNSS CORS WDM**” có chức năng thu nhận, xử lý, phân tích, cảnh báo, tổng hợp báo cáo kết quả quan trắc.

Phần mềm này có chức năng thiết lập các thông số hoạt động của trạm quan trắc đảm bảo cho quá trình thu nhận và truyền dẫn số liệu quan trắc từ các Rover đặt ở trạm quan trắc gửi về máy chủ, có khả năng thu nhận và xử lý số liệu đồng thời của 50 trạm quan trắc và có thể nâng cấp lên đến 100 trạm, phần mềm này có các tính năng chủ yếu như:

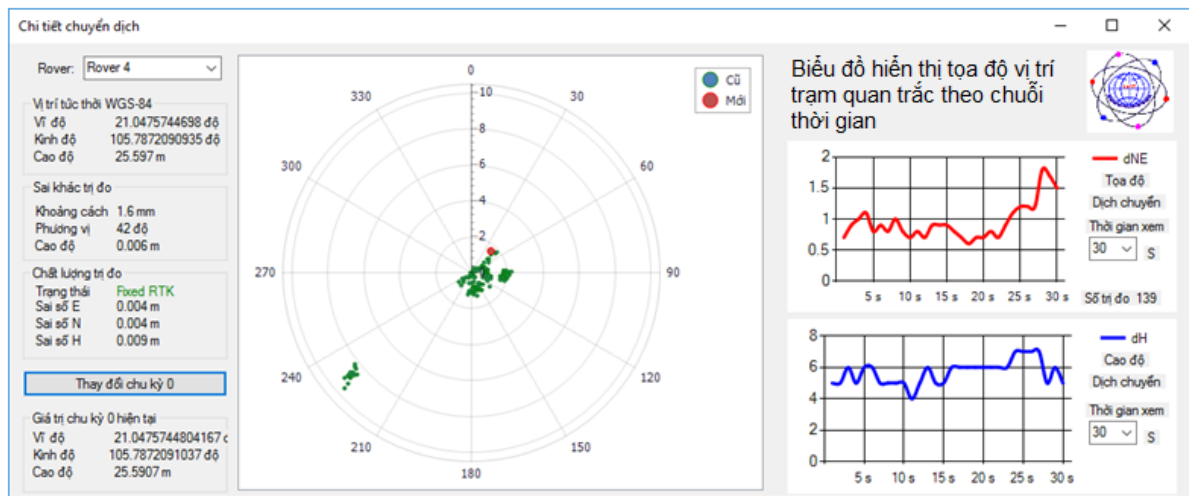
- Hỗ trợ quản lý tối thiểu 50 trạm quan trắc
- Hỗ trợ truyền số liệu quan trắc qua giao thức NTRIP
- Hỗ trợ thiết lập hệ thống kết nối với trạm CORS
- Cung cấp thông tin trạng thái định vị trên màn hình hiển thị
- Cài đặt chu kỳ 0 cho trạm quan trắc
- Xử lý dữ liệu quan trắc như kiểm tra tính toàn vẹn của các thông tin trị đo, lọc trị đo dị thường, tính chuyển tọa độ.
- Phân tích dữ liệu phát hiện dịch chuyển.
- Lập báo cáo

Giao diện chính của phần mềm Server GNSS CORS WDM được thể hiện như (hình 2.23).



Hình 2.23. Giao diện phần mềm Server GNSS CORS WDM

Một số module chính của phần mềm như để theo dõi quá trình trượt lở ở một trạm quan trắc, nhấn vào nút “Xem dữ liệu” và chọn tên trạm quan trắc khi đó xuất hiện giao diện tiếp theo như hình 2.24



Hình 2.24. Hiện thị thông tin dữ liệu tại trạm quan trắc

Ngoài ra còn có các module với chức năng kiểm tra tính toàn vẹn của các tín hiệu truyền và tách các tín hiệu chứa thông tin tọa độ điểm đo đã được hiệu chỉnh (trị đo Fixed) và tách các thông tin tọa độ điểm đo đã được hiệu chỉnh nhưng có sai số vị trí điểm nhỏ nhất (hình 2.25) và module lập báo cáo kết quả quan trắc (hình 2.26)

GGA Chuyển đổi

Tách tin nhắn NMEA-183

Mở File: C:\Users\Public\Public data Cors\data-Rover2-252019.txt

Số lượng tin nhắn NMEA-183: 3782 tin nhắn

Kiểu tin nhắn GGA: GNGGA

Kiểu tin nhắn GST: GST

Thời gian dự kiến chuyển đổi: 63 Giây

Chuyển đổi:

☒ Tách tin nhắn GGA

☐ Tách tin nhắn GST

Lưu vào: C:\Users\Public\Public data Cors\

☒ Kiểm tra Checksum

☐ Không kiểm tra Checksum

Bắt đầu chuyển đổi

Tiến trình: 0 %

Số lượng chuỗi hoàn chỉnh: 0

Số lượng chuỗi thiếu: 0

Checksum: *00

III

Hình 2.25. Module lọc các tin nhắn trị đo

Báo cáo quan trắc Rover

Lựa chọn thời gian xuất báo cáo:

☒ Kích hoạt

Xuất bản báo cáo theo Rover:

Lựa chọn Rover: Rover 1

Thời gian bắt đầu: 04/24/2021

Thời gian kết thúc: 11/01/2020

Kiểm tra

☐ Kích hoạt

Xuất báo cáo theo file quan trắc:

Chọn đường dẫn file giá trị đo:

Chọn

Cài đặt đường dẫn lưu: Cài đặt các thông số báo cáo

Chọn đường dẫn lưu báo cáo: D:\

Chọn

Xuất Thoát

Hình 2.26. Module lập báo cáo kết quả quan trắc

KẾT LUẬN

Báo cáo này đã nghiên cứu phương pháp quan trắc dịch chuyển theo thời gian thực dựa trên công nghệ GNSS/CORS với kỹ thuật đo động xử lý tức thời RTK. Dữ liệu quan trắc được chiết xuất theo định dạng tiêu chuẩn NMEA với hai loại tin nhắn GGA và GST cho phép lọc được những giá trị dị thường nâng cao độ chính xác định vị RTK đạt 4mm về mặt bằng và 8mm về độ cao. Dữ liệu quan trắc sau khi lọc nhiễu được tính chuyển sang hệ tọa độ không gian địa diện chân trời để phát hiện được dịch chuyển bằng thuật toán cửa sổ trượt. Bằng thực nghiệm mô phỏng dịch chuyển dựa trên hệ thống thiết bị quan trắc, dữ liệu quan trắc được xử lý và phân tích đã phát hiện được chính xác thời điểm xảy ra dịch chuyển và giá trị dịch chuyển. Độ chênh lệch lớn nhất giữa dịch chuyển quan trắc và dịch chuyển thực là 4.7 mm về dịch chuyển ngang và 5.8mm về dịch chuyển đứng. Như vậy phương pháp cửa sổ trượt đáp ứng được trong việc xử lý và phân tích chuỗi dữ liệu quan trắc để phát hiện dịch chuyển trượt lở đất đá theo thời gian thực.

DANH MỤC TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Jacek Sztubecki; Maria Mrówczyńska. Vertical displacement monitoring using the modified leveling method. *Measurement*. **2023**, 206, 112264. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.112264>.
2. Niccolo Dematteis; Aleksandra Wrzesniak; Paolo Allasia; Davide Bertolo; Daniele Giordan. Integration of robotic total station and digital image correlation to assess the three-dimensional surface kinematics of a landslide. *Engineering Geology*. **2002**, 303, 106655. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106655>.
3. Aigong Xu; Qiushi Yang; Huizhong Zhu; Meng Gao. Application of GPS technology in surface subsidence monitoring of water extraction. *Desalination and Water Treatment*. **2021**, 241, 207–215. doi: 10.5004/dwt.2021.27791.
4. Wang Jian; Peng Xiangguo; Xu Chang hui. Coal mining GPS subsidence monitoring technology and its application. *Mining Science and Technology (China)*. **2011**, 21, 463-467.
5. Jiawen Zhou; Nan Jiang; Congjiang Li; Haibo Li. A landslide monitoring method using data from unmanned aerial vehicle and terrestrial laser scanning with insufficient and inaccurate ground control points. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. **2024**, 16, 4125-4140.
6. Huiyan Lu; Weile Li; Qiang Xu; Wenlong Yu; Shengsen Zhou; Zhigang Li; Weiwei Zhan; Weimin Li; Shanmiao Xu; Pan Zhang; Xiujun Dong; Jingtao Liang; Daqing Ge e. Active landslide detection using integrated remote sensing technologies for a wide region and multiple stages: A case study in southwestern China. *Science of the Total Environment*. **2024**, 931, 172709. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172709>.
7. Omid Memarian Sorkhabi; Mohammad Khajehzadeh; Suraparb Keawsawasvong. Landslides monitoring with SBAS-InSAR and GNSS. *Physics and Chemistry of the Earth*. **2023**, 123, 103486. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2023.103486>.

8. Yang Liu, Xin Yao, Zhenkui Gu, Zhenkai Zhou, Xinghong Liu, Shangfei Wei. Study on InSAR image fusion for improved visualization of active landslides in alpine valley areas: A case in the Batang Region, China. *Computers & Geosciences*. **2024**, *186*, 105481. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2023.105481>.
9. Menghua Li; Lu Zhang; Chao Ding; Weile Li; Heng Luo; Mingsheng Liao; Qiang Xu. Retrieval of historical surface displacements of the Baige landslide from time-series SAR observations for retrospective analysis of the collapse event. *Remote Sensing of Environment*. **2020**, *240*, 111695. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111695>.
10. N. Shen, L.; Chen, J.; Liu, L.; Wang, T.; Tao, D.; Wu, R.; Chen. A review of global navigation satellite system (GNSS)-based dynamic monitoring technologies for structural health monitoring, *Remote Sens*. **2019**, *11* (9), 1001.
11. Ruijie Xi; Weiping Jiang; Xiaolin Meng; Hua Chena; Qusen Chen. Bridge monitoring using BDS-RTK and GPS-RTK techniques. *Measurement*. **2018**, *20*, 128-139. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.02.001>.
12. Ruijie Xi; Qiyi He; Xiaolin Meng. Bridge monitoring using multi-GNSS observations with high cutoff elevations: A case study. *Measurement*. **2021**, *168*, 108003. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108303>.
13. Boxiao Ju; Weiping Jiang; Jun Tao; Junliang Hu; Ruijie Xi; Jun Ma; Jingnan Liu. Performance evaluation of GNSS kinematic PPP and PPP-IAR in structural health monitoring of bridge: Case studies. *Measurement*. **2022**, *203*, 112011. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.112011>.
14. Guolin Liu; Guanwen Huang; Xin Li; Ce Jing; Huan Yang; Yang Gao. Fusion of numerical meteorological data to mitigate residual tropospheric error in GNSS RTK for large bridge monitoring in mountainous areas. *Measurement*. **2025**, *243*, 116442. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.116442>.
15. N. Quesada-Olmo; M.J. Jimenez-Martinez; M. Farjas-Abadia. Real-time high-rise building monitoring system using global navigation satellite

- system technology. *Measurement*. **2018**, *123*, 115-124.
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.03.054>.
16. Chunbao Xiong; Yanbo Niu. Investigation of the Dynamic Behavior of a Super High-rise Structure using RTK-GNSS Technique. *Journal of Civil Engineering*. **2019**, *23* (2), 654-665. DOI 10.1007/s12205-018-0238-9.
 17. Jiayi Zheng; Wei Lu; Weihua Hu; Jun Teng. Real-time estimation method for horizontal displacement of high-rise buildings based on fusion of inclination and acceleration monitoring data. *Journal of Building Engineering*. **2025**, *103*, 112083.
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.112083>.
 18. J. Rene Vazquez-Ontiveros; Carlos A. Martinez-Felix; G. Esteban Vazquez-Becerra; J. Ramon Gaxiola-Camacho; Angela Melgarejo-Morales; Jorge Padilla-Velazco. Monitoring of local deformations and reservoir water level for a gravity type dam based on GPS observations. *Advances in Space Research*. **2002**. *69* (1), 319-330.
 19. Bao Shu; Yuanhao He; Li Wang; Qin Zhang; Xinrui Li; Xuanyu Qu; Guanwen Huang; Wei Qu. Real-time high-precision landslide displacement monitoring based on a GNSS CORS network. *Measurement*. **2023**, *217*, 113056. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113056>.
 20. Pengxu Wang; Hui Liu; Guigen Nie; Zhixin Yang; Jiaji Wu; Chuang Qian; Bao Shu. Performance evaluation of a real-time high-precision landslide displacement detection algorithm based on GNSS virtual reference station technology. *Measurement*. **2022**, *199*, 111457.
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111457>.
 21. K. Gümüş; M.O. Selbesoğlu. Evaluation of NRTK GNSS positioning methods for displacement detection by a newly designed displacement monitoring system, *Measurement*. **2019**, *142*, 131–137.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2019.04.041>.
 22. Sermet Ogutcu; Salih Alcaý; Huseyin Duman; Behlul Numan Ozdemir; Ceren Konukseven. Static and kinematic PPP-AR performance of low-cost

GNSS receiver in monitoring displacements. *Advances in Space Research*. **2023**, 72(11), 4795-4808. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.09.025>

23. Nan Shen; Liang Chen; Ruizhi Chen. Displacement detection based on Bayesian inference from GNSS kinematic positioning for deformation monitoring. *Mechanical Systems and Signal Processing*. **2022**, 167, 108570. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.108570>.
24. Nguyễn Quang Phúc. Hệ tọa độ vuông góc không gian địa diện chân trời và ứng dụng của nó trong trắc địa công trình. *Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Mỏ - Địa chất*, **2013**, số 44, trang 34-38.
25. Đặng Nam Chinh, Đỗ Ngọc Đường. Giáo trình định vị vệ tinh. Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội, **2012**.
26. Trần Đình Trọng và cs. Phát hiện trị dị thường trong chuỗi trị đo vị trí điểm GNSS liên tục. *Tạp chí phát triển KH&CN*, **2016**, 19, tr 43-50.
27. Khải, P.C và cs. Nghiên cứu thiết kế, chế tạo hệ thống quan trắc chuyển dịch công trình theo thời gian thực trên địa bàn thành phố Hà Nội. Báo cáo tổng kết đề tài cấp thành phố 01C-01/02-2020-3.