



Journal of Mining and Earth Sciences

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



Monitoring subsidence of open pit mine slope based on GNSS/CORS technology - case study at the Coc Sau open-pit coal mine



Hai Van Nguyen ¹, Khai Cong Pham ^{2,*}, Dung Ngoc Vo ², Tuan Thanh Dinh ³, Chung Van Pham ²

¹ ThuyLoi University - Second campus, HoChiMinh City, Vietnam

² Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam

³ Dong Hai Surveying Company Limited, Vietnam

ARTICLE INFO

Article history:

Received 15th Jan. 2024

Revised 01st May 2024

Accepted 23rd May 2024

Keywords:

Coc Sau coal mine,
GNSS Receiver,
GNSS/CORS technology,
Open pit mine slope,
Subsidence monitoring.

ABSTRACT

Subsidence value is one of the important parameters to evaluate the stability of open pit mine slope. The subsidence is determined from height values measured at different times using different methods and equipment. When applying GNSS/CORS technology to monitor displacement, landslides, ground subsidence or structures, a specialized monitoring system is needed to ensure the necessary accuracy. This article presents the results of research on subsidence monitoring of open pit mine slope based on CORS technology and a self-developed GNSS receiver. The CORS station is set up with Trimble's Zephyr 2 Geodetic antenna and Stonex GNSS receiver located in Cam Pha city, Quang Ninh. The GNSS receiver for monitoring station is designed and developed based on the Trimble's GNSS BD970 board and integrated with a 4G wifi modem, allowing the transmission of monitoring data in standard NMEA0183 format to the CORS station's host computer. Decoded monitoring data and error filtering have improved the accuracy of height determination achieved at the mm level. Results of simulation experiments and experiments with actual monitoring data at Coc Sau coal mine, Cam Pha, Quang Ninh have proven the effectiveness and reliability of the method. With simulated experimental monitoring results, it shows that the largest subsidence difference is 16 mm and the smallest is 6 mm.

Copyright © 2024 Hanoi University of Mining and Geology. All rights reserved.

*Corresponding author

E - mail: phamconghai@humg.edu.vn

DOI: 10.46326/JMES.2024.65(3).10



Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Mỏ - Địa chất

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



Quan trắc độ lún bờ mỏ lộ thiên dựa trên công nghệ GNSS/CORS - Trường hợp nghiên cứu cho mỏ Cọc Sáu

Nguyễn Văn Hải¹, Phạm Công Khải^{2,*}, Võ Ngọc Dũng², Đinh Thanh Tuấn³, Phạm Văn Chung²

¹ Trường Đại học Thủy Lợi - Cơ sở 2, thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

² Trường Đại học Mỏ - Địa chất, Hà Nội, Việt Nam

³ Công ty TNHH đo đạc Đông Hải, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

Quá trình:

Nhận bài 15/01/2024

Sửa xong 01/5/2024

Chấp nhận đăng 23/5/2024

Từ khóa:

Bờ mỏ lộ thiên,
Bộ thu GNSS,
Công nghệ GNSS/CORS,
Mỏ Cọc Sáu,
Quan trắc độ lún.

TÓM TẮT

Giá trị độ lún là một trong những thông số quan trọng để đánh giá độ ổn định bờ mỏ lộ thiên. Độ lún được xác định từ các giá trị độ cao được đo ở những thời điểm khác nhau bằng những phương pháp và thiết bị khác nhau. Khi ứng dụng công nghệ GNSS/CORS để quan trắc chuyển dịch, trượt lở đất đá, độ lún mặt đất hoặc các công trình cần có một hệ thống quan trắc chuyên dụng để đảm bảo về độ chính xác cần thiết. Bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu quan trắc độ lún bề mặt bờ mỏ lộ thiên dựa trên công nghệ trạm CORS đơn và bộ thu GNSS tự thiết kế phát triển. Trạm CORS được thiết lập với ăng ten Zephyr 2 Geodetic của Trimble và bộ thu GNSS của hãng Stonex đặt ở thành phố Cẩm Phả, Quảng Ninh. Bộ thu GNSS của trạm quan trắc được thiết kế phát triển dựa trên bo mạch thu tín hiệu vệ tinh GNSS BD970 của hãng Trimble (Mỹ) và được tích hợp với modem wifi 4G cho phép truyền dữ liệu quan trắc theo định dạng tiêu chuẩn NMEA0183 về máy tính chủ của trạm CORS. Dữ liệu quan trắc được giải mã và lọc sai số đã nâng cao độ chính xác thành phần độ cao đạt được ở mức mm. Kết quả thực nghiệm mô phỏng và thực nghiệm với số liệu quan trắc thực tế ở mỏ than Cọc Sáu, Cẩm Phả, Quảng Ninh đã chứng minh được tính hiệu quả và độ tin cậy của của phương pháp. Với kết quả quan trắc thực nghiệm mô phỏng, cho thấy chênh lệch độ lún lớn nhất là 16 mm và nhỏ nhất là 6 mm.

© 2024 Trường Đại học Mỏ - Địa chất. Tất cả các quyền được bảo đảm.

*Tác giả liên hệ

E - mail: phamcongkhai@humg.edu.vn

DOI: 10.46326/JMES.2024.65(3).10

1. Mở đầu

Trước đây, việc quan trắc độ lún các công trình nói chung và độ lún bề mặt bờ mỏ nói riêng thường được thực hiện bằng phương pháp đo cao hình học hoặc lượng giác với việc sử dụng các thiết bị đo đạc truyền thống như máy thủy chuẩn, máy kinh vĩ, máy toàn đạc điện tử. Từ khi có công nghệ GPS, nó đã được ứng dụng để quan trắc chuyển dịch biến dạng công trình. Công nghệ GPS với phương pháp định vị vi phân DGPS đã được ứng dụng để quan trắc độ lún công trình nhà cao tầng (Wan và nnk., 2012; Khoo và nnk., 2010). Wang và nnk. (2011), Liu và nnk. (2012) đã ứng dụng công nghệ GPS để quan trắc độ lún bề mặt đất do ảnh hưởng của khai thác mỏ than ở Trung Quốc. Các nghiên cứu này đã chứng minh rằng độ cao trắc địa được đo bằng hệ thống định vị toàn cầu GPS có thể được áp dụng trực tiếp để theo dõi tình trạng sụt lún bề mặt đất ở mỏ than. Việc quan trắc độ lún của công trình bằng công nghệ GPS chủ yếu vẫn là sử dụng máy thu một tần số, thu tín hiệu vệ tinh của hệ thống định vị toàn cầu GPS của Mỹ với việc bố trí một mạng lưới các điểm quan trắc và đo theo từng chu kỳ. Ngày nay, với sự phát triển của công nghệ GNSS (Global Navigation Satellite System), hầu hết các quốc gia trên thế giới đều xây dựng mạng lưới các trạm CORS (Continuously Operating Reference Station) làm cơ sở hạ tầng không gian quốc gia. Khi đó phương thức đo động xử lý tức thời RTK (Real Time Kinematic) được ứng dụng rộng rãi trong lĩnh vực trắc địa bản đồ và quan trắc chuyển dịch biến dạng công trình. Trong những năm gần đây công nghệ GNSS với những ưu điểm vượt trội, đã được ứng dụng rộng rãi và có hiệu quả trong việc quan trắc chuyển dịch công trình, sụt lún bề mặt đất,... Với công nghệ GNSS việc quan trắc độ lún nhà cao tầng đã được thực hiện bởi Quesada-Olmo và nnk. (2018). Trong công trình nghiên cứu này các tác giả đã thiết lập một trạm CORS làm trạm tham chiếu và bốn trạm quan trắc đặt trên đỉnh của tòa nhà cao tầng. Gao và Hu. (2009) đã ứng dụng công nghệ GNSS CORS với phương thức đo động xử lý tức thời RTK để quan trắc độ lún trong một khu vực nhỏ của một vùng khai thác rộng lớn. Đặc biệt, để quan trắc độ lún mặt đất ở khu vực khai thác mỏ trên diện rộng, Bian và nnk. (2014) đã ứng dụng công nghệ GNSS xây dựng một mạng lưới các điểm quan trắc kết nối đến các điểm của mạng lưới IGS toàn cầu.

Nghiên cứu này cung cấp một cách tiếp cận hiệu quả và chính xác để quan trắc độ lún bề mặt đất trên diện rộng và độ chính xác quan trắc độ lún có thể đạt đến cỡ mm. Trong công trình nghiên cứu này các tác giả đã sử dụng dữ liệu của trạm CORS và phần mềm xử lý Gamit/Globk để xác định được chuyển dịch đứng (độ lún) bề mặt đất với tốc độ từ $-5,9 \div -6,2$ mm/năm. Tuy nhiên nghiên cứu này chỉ ứng dụng khi quan trắc độ lún bề mặt đất trên phạm vi lớn. Để phát hiện sự chuyển dịch của công trình, Nan và nnk. (2022) đã ứng dụng công nghệ GNSS với phương thức đo động xử lý tức thời RTK liên tục trong thời gian dài và sử dụng phép suy luận của Bayet để tách ra thành phần chuyển dịch trong chuỗi trị đo. Bao và nnk. (2023) đã ứng dụng công nghệ mạng lưới GNSS CORS trong quan trắc chuyển dịch, trượt lở đất đá theo thời gian thực với kỹ thuật định vị xử lý tức thời RTK. Nghiên cứu cho thấy rằng với kỹ thuật định vị RTK thì sai số trung phương điểm quan trắc về mặt bằng là 1,7 cm và độ cao là 3,9 cm. Wang và nnk. (2022) đã sử dụng trạm tham chiếu ảo VRS thay thế trạm tham chiếu vật lý trong việc phát hiện chuyển dịch, trượt lở đất đá. Kết quả thực nghiệm cho thấy độ chính xác quan trắc bằng trạm tham chiếu ảo VRS kém hơn một chút so với trạm tham chiếu vật lý, tuy nhiên khi xử lý bằng phương pháp chu kỳ cửa sổ trượt thì độ chính xác là tương đương nhau.

Trong những năm gần đây, việc phát triển máy thu GNSS có độ chính xác cao, chi phí thấp để ứng dụng trong các công tác trắc địa bản đồ được nhiều nhà khoa học trắc địa quan tâm. Takasu và Yasuda. (2008) đã phát triển được một máy thu GNSS với chi phí thấp có thể sử dụng để đo theo phương thức đo động xử lý tức thời RTK. Trajkovski và nnk. (2010) đã nghiên cứu phát triển một thiết bị định vị dựa vào cảm biến có độ nhạy cao để đo trong những điều kiện không thuận lợi. Lee (2010) đã tích hợp được thiết bị định vị GNSS với cảm biến INS để đo RTK đạt độ chính xác cao với cạnh cơ sở dài. Jinsang và nnk. (2012) đã nghiên cứu phát triển được một loại máy thu GNSS với chức năng đo RTK kết nối với trạm CORS. Hwang và nnk. (2012) đã tối ưu việc tích hợp thiết bị định vị GNSS với gia tốc kế để tạo ra một thiết bị ứng dụng trong quan trắc dịch chuyển biến dạng công trình. Wisniewski và nnk. (2013) đã phát triển một loại máy thu GNSS có chi phí thấp dựa trên công nghệ chip của U-blox

và khảo sát các phương pháp định vị khác nhau dựa trên phần mềm mã nguồn mở RTKLIB.

Như vậy, xu hướng ứng dụng công nghệ GNSS/CORS và máy thu GNSS tự phát triển để quan trắc độ lún công trình là hướng tiếp cận mới được nhiều tác giả trên thế giới quan tâm. Tuy nhiên, việc ứng dụng công nghệ này trong quan trắc chuyển dịch biến dạng công trình nói chung và quan trắc lún bề mặt tầng khai thác ở các mỏ lộ thiên Việt Nam nói riêng vẫn còn hạn chế, do chưa có thiết bị quan trắc đồng bộ với trạm CORS. Chưa có nhiều nghiên cứu về quan trắc chuyển dịch biến dạng công trình dựa trên công nghệ GNSS/CORS.

Bài báo này trình bày một kết quả nghiên cứu ứng dụng công nghệ GNSS/CORS và máy thu GNSS tự thiết kế, phát triển để quan trắc độ lún bề mặt tầng khai thác ở lộ thiên.

2. Phương pháp nghiên cứu

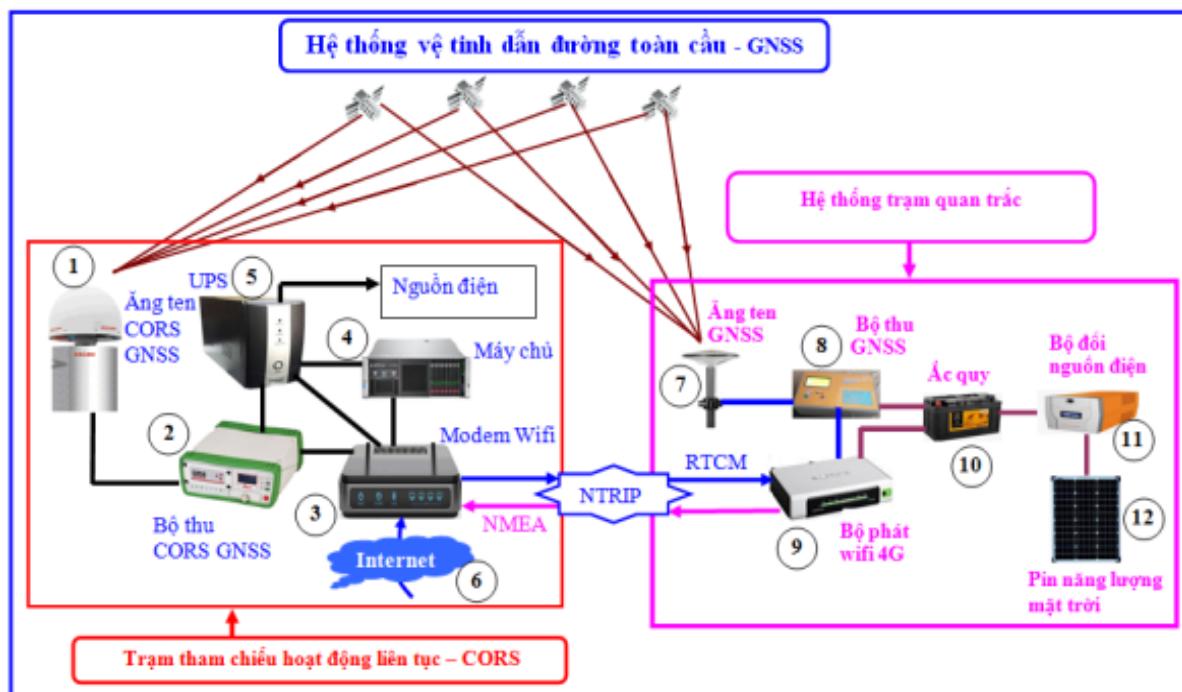
2.1. Thiết kế, xây dựng hệ thống quan trắc độ lún dựa trên công nghệ GNSS/CORS

Hệ thống quan trắc chuyển dịch đứng (độ lún) dựa trên công nghệ GNSS được nghiên cứu, thiết kế xây dựng gồm có hai phần chính (Phạm và nnk., 2020). Phần thứ nhất là hệ thống trạm tham chiếu hoạt động liên tục (CORS) và phần thứ hai là hệ thống trạm quan trắc (Hình 1).

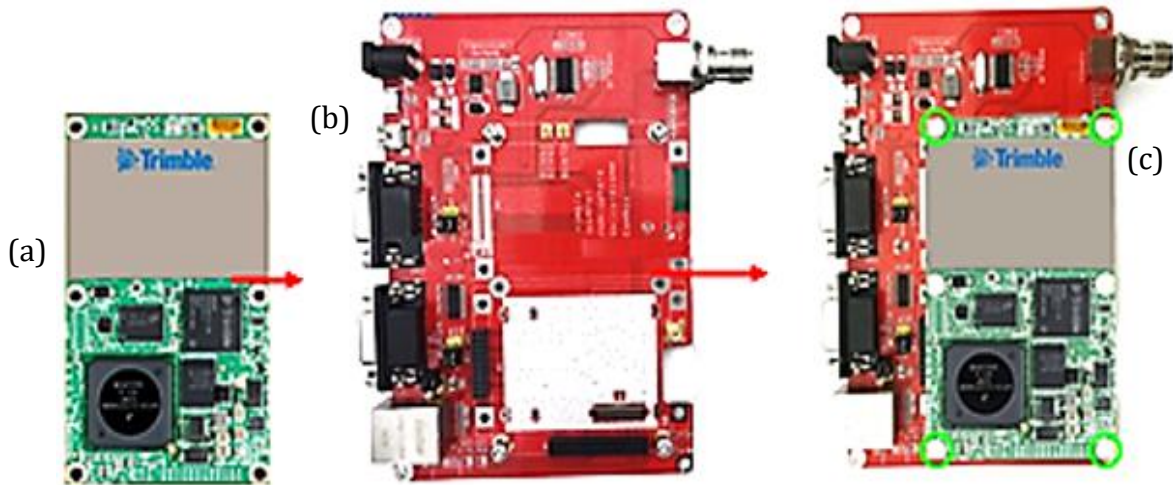
Chức năng của hệ thống trạm CORS là cung cấp số cải chính vị trí cho trạm quan trắc, xử lý số liệu của mạng lưới đo động xử lý tức thời RTK, hiệu chỉnh số nguyên đa trị của toàn mạng lưới trạm CORS, thiết lập mô hình cải chính sai số tầng đối lưu, tầng điện ly và quỹ đạo vệ tinh.

Hệ thống trạm quan trắc gồm có các thành phần chính là ăngten GNSS (7), bộ thu GNSS (8) và bộ phát wifi 4G (9), ắc quy (10), bộ đổi nguồn điện (11), pin năng lượng mặt trời (12). Trong các thành phần của trạm quan trắc thì bộ thu GNSS đã được nghiên cứu phát triển bởi Phạm và nnk. (2021). Tuy nhiên, trong nghiên cứu này, bộ thu đã được cải tiến, nâng cấp để tích hợp được với modem wifi 4G (5G) cho nên việc truyền dữ liệu tốt hơn. Bộ thu GNSS được thiết kế phát triển dựa trên bo mạch thu nhận và xử lý tín hiệu vệ tinh BD970 của Trimble (Hình 2a) và được tích hợp trên bo mạch kết nối (Hình 2b) để tạo thành module thu tín hiệu vệ tinh GNSS BD970 (Hình 2c).

Module GNSS BD970 có thể thu được 220 kênh của các vệ tinh trong hệ thống vệ tinh dẫn đường toàn cầu GNSS. Độ chính xác định vị RTK là 8 mm+1 ppm về mặt bằng và 15 mm+1 ppm về độ cao với khoảng cách định vị không quá 30 km (<https://oemgnss.trimble.com/>).



Hình 1. Sơ đồ hệ thống quan trắc độ lún dựa trên công nghệ GNSS/CORS.



Hình 2. Module thu tín hiệu vệ tinh GNSS BD970.

Module này có một cổng mạng LAN Ethernet qua đó có thể kết nối với modem wifi để truyền dữ liệu quan trắc về máy tính chủ theo địa chỉ IP và cổng nhận dữ liệu đã được mở trên modem. Module GNSS BD970 kết hợp với một số module khác được kết nối với nhau tạo thành bộ thu GNSS (Hình 3a) cho hệ thống trạm quan trắc (Hình 3b).

Bộ thu này có thể nhận số cài chính từ trạm CORS theo các định dạng tiêu chuẩn CMR, CMR+, SCMRX, RTCM 2.1, 2.2, 2.3, 3.0, 3.18 và nó có thể xuất ra dữ liệu ở định dạng tiêu chuẩn NMEA0183.

Để quản lý hoạt động của trạm quan trắc, cài đặt các thông số kỹ thuật cho hệ thống quan trắc, nhận và quản lý dữ liệu từ máy thu GNSS, một phần mềm chuyên dụng đã được thiết kế, xây dựng bằng công cụ lập trình Visual Studio 2019 có tên là Server GNSS CORS WDM (Phạm và nnk., 2023) và được cài đặt ở máy tính chủ của trạm CORS. Phần mềm này được thiết kế với nhiều tính năng như hỗ trợ quản lý nhiều trạm quan trắc cùng một lúc, hỗ trợ truyền số liệu quan trắc qua giao thức NTRIP, hỗ trợ thiết lập hệ thống kết nối

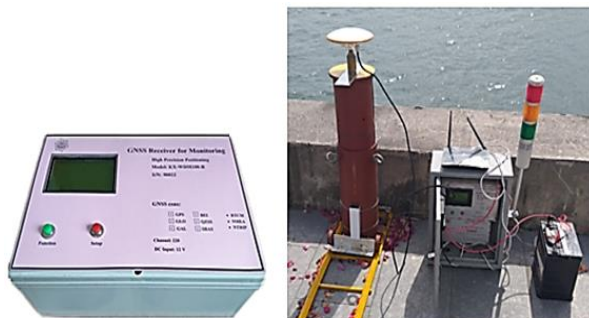
với trạm CORS, cung cấp thông tin trạng thái định vị trên màn hình hiển thị, cài đặt chu kỳ đầu tiên cho trạm quan trắc, quản lý và xử lý dữ liệu quan trắc, lập báo cáo kết quả quan trắc.

2.2. Xử lý dữ liệu quan trắc độ lún bằng công nghệ GNSS

2.2.1. Định dạng dữ liệu quan trắc lún

Có nhiều định dạng dữ liệu được phát triển trong định vị vệ tinh cho các mục đích khác nhau, chẳng hạn như để truyền vị trí định vị GPS giữa các thiết bị điện tử hoặc giữa các máy thu GNSS, truyền số hiệu chỉnh vị trí từ trạm tham chiếu đến các máy thu Rover. Hiện nay, Hiệp hội Điện tử Hàng hải Quốc gia của Mỹ (National Marine Electronics Association - NMEA) đã đề xuất một tiêu chuẩn lấy tên là NMEA để định dạng thông tin hệ thống định vị toàn cầu GPS hoặc hệ thống vệ tinh dẫn đường toàn cầu GNSS (<http://www.nmea.org>). Tiêu chuẩn NMEA có nhiều phiên bản khác nhau nhưng tiêu chuẩn NMEA-0183 được sử dụng rộng rãi nhất. NMEA sử dụng mã tiêu chuẩn ASCII, mỗi tin nhắn theo chuẩn định dạng NMEA bắt đầu với ký tự "\$" và kết thúc bằng ký tự "*", số ký tự trong một tin nhắn không lớn hơn 80. Thông tin trong một tin nhắn với những kiểu khác nhau và được ngăn cách bởi dấu phẩy (,), sau đó đến thông tin về thời gian, tọa độ mặt bằng, độ cao, trạng thái định vị.

Tiêu chuẩn NMEA gồm có nhiều tin nhắn, chẳng hạn như GNGGA, GPGST, GNLL GNGSA, GNGSV, GNRMC, GNVTG, GNZDA,... Một số tin nhắn NMEA có thể chứa các trường dữ liệu giống



(a) Bộ thu GNSS

(b) Hệ thống trạm quan trắc

Hình 3. Bộ thu GNSS và hệ thống trạm quan trắc.

nhau hoặc có thể chứa dữ liệu thông báo khác nhưng có kích thước nhỏ hơn. Trong các loại tin nhắn theo tiêu chuẩn NMEA, có hai tin nhắn quan trọng nhất khi định vị đó là GGA và GST.

Tin nhắn GGA là tin nhắn được sử dụng phổ biến nhất, nó bao gồm các thông tin về thời gian UTC, vĩ độ bắc hoặc nam, kinh độ đông hoặc tây, chỉ số chất lượng định vị, số lượng vệ tinh được sử dụng, độ suy giảm độ chính xác mặt bằng, cao độ ăng ten so với mặt Geoid, đơn vị độ cao ăng ten, khoảng cách giữa mặt ellipsoid trái đất WGS-84 và mặt Geoid, đơn vị khoảng cách, mã kiểm tra chuỗi tin nhắn gửi về.

Tin nhắn trị đo GST chứa các thông tin về thời gian hiệu chỉnh vị trí, phần dư của khoảng cách giả, giá trị bán trục lớn của ellip sai số, giá trị bán trục nhỏ của ellip sai số, góc định hướng của bán trục lớn của ellip sai số, giá trị sai số theo trục Y, giá trị sai số theo trục X, sai số độ cao, mã kiểm tra chuỗi tin nhắn gửi về.

Chỉ số chất lượng định vị RTK theo công nghệ CORS có 6 mức độ khác nhau từ mức 0 đến mức 5. Khi định vị theo phương thức CORS/RTK nếu chỉ số này ở mức 4 thì có nghĩa là trị đo này đã được hiệu chỉnh từ trạm CORS và 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.

2.2.2. Phương pháp xử lý dữ liệu quan trắc độ lún

Dữ liệu quan trắc độ lún dựa trên công nghệ GNSS/CORS nhận được theo định dạng tiêu chuẩn NMEA0183 cần được xử lý để nâng cao độ chính xác của kết quả quan trắc. Trong dữ liệu quan trắc độ lún có nhiều loại tin nhắn khác nhau nhưng có hai loại tin nhắn là GGA và GST có chứa các thông tin về tọa độ và độ cao cũng như sai số của nó. Dựa trên các thông tin này sẽ lọc được những trị đo tốt nhất.

Quá trình xử lý dữ liệu quan trắc độ lún được tiến hành qua các bước sau:

1) Kiểm tra tính toàn vẹn của các thông tin trong chuỗi tin nhắn trị đo

Các dòng tin nhắn trị đo theo định dạng NMEA0183 được truyền từ trạm quan trắc về máy tính chủ qua giao thức NTRIP có thể bị lỗi dẫn tới thông tin không đầy đủ. Để loại bỏ những dòng tin nhắn này cần phải kiểm tra tính toàn vẹn của nó. Nếu trong các tin nhắn này không đầy đủ các

thông tin thì sẽ loại bỏ các dòng tin nhắn trị đo này. Để kiểm tra tính toàn vẹn của các thông tin trong chuỗi tin nhắn trị đo cần phân tích tất cả các ký tự trong chuỗi từ ký tự "\$" đến ký tự "*", sau đó áp dụng thuật toán thao tác bit bắt đầu từ ký tự đầu tiên đến ký tự tiếp theo cho đến khi kết thúc chuỗi để nhận được mã phân tích chuỗi mới. Mã phân tích chuỗi này đem so sánh với mã checksum gửi kèm trong tin nhắn. Nếu hai mã checksum này giống nhau, thì dòng tin nhắn trị đo này sẽ được chấp nhận.

2) Lọc những tin nhắn có tọa độ và độ cao đã được hiệu chỉnh từ trạm CORS.

Trị số tọa độ và độ cao nhận được trong chuỗi tin nhắn GGA có chỉ số báo chất lượng phép đo GNSS khác nhau và được đánh số từ 0÷5. Khi chỉ số báo chất lượng ở mức 4 thì trị đo này đã được được cải chỉnh vị trí từ trạm CORS và cho chất lượng tốt nhất. Khi đó các giá trị tọa độ và độ cao trong dòng tin nhắn này được tách ra để sử dụng cho việc tính độ lún.

3) Lọc những tin nhắn trị đo có sai số vị trí nhỏ nhất.

Để đảm bảo yêu cầu độ chính xác trong quan trắc độ lún thì chỉ những tin nhắn có tọa độ và độ cao đã được hiệu chỉnh nhưng từ trạm CORS và có sai số nhỏ nhất mới được giữ lại. Để lọc ra những tin nhắn có tọa độ và độ cao có sai số nhỏ nhất cần tiến hành phân tích chuỗi tin nhắn GST. Chuỗi tin nhắn này có chứa các thông tin về ellip sai số và sai số vị trí điểm. Trong nghiên cứu này những tin nhắn có sai số mặt bằng nhỏ hơn 5 mm và sai số độ cao nhỏ hơn 9 mm sẽ được giữ lại.

4) Đánh mức độ phân tán của chuỗi trị đo độ cao

Độ phân tán của chuỗi trị đo độ cao được xác định bằng đại lượng độ lệch chuẩn của một dãy trị đo được xác định theo công thức (1) (Hoàng và Trương, 2003).

$$\delta_H = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (H_i - \bar{H})^2} \quad (1)$$

$$\bar{H} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n H_i$$

Trong đó: H_i - độ cao xác định lần thứ i (m); \bar{H} - độ cao trung bình trong chuỗi trị đo (m).

5) Xác định giá trị độ lún

Dựa vào giá trị độ cao xác định được ở hai thời điểm đo sẽ xác định được độ lún của điểm quan trắc theo công thức (2):

$$S = H_i(t+1) - H_i(t) \tag{2}$$

Trong đó: $H_i(t+1)$ - Độ cao của điểm thứ i tại thời điểm $t+1$; $H_i(t)$ - Độ cao của điểm thứ i tại thời điểm t .

Việc xử lý dữ liệu quan trắc lún dựa trên công nghệ GNSS/CORS được thực hiện bằng phần mềm **GNSS CORS Soft** do nhóm nghiên cứu tự xây dựng (Hình 4).

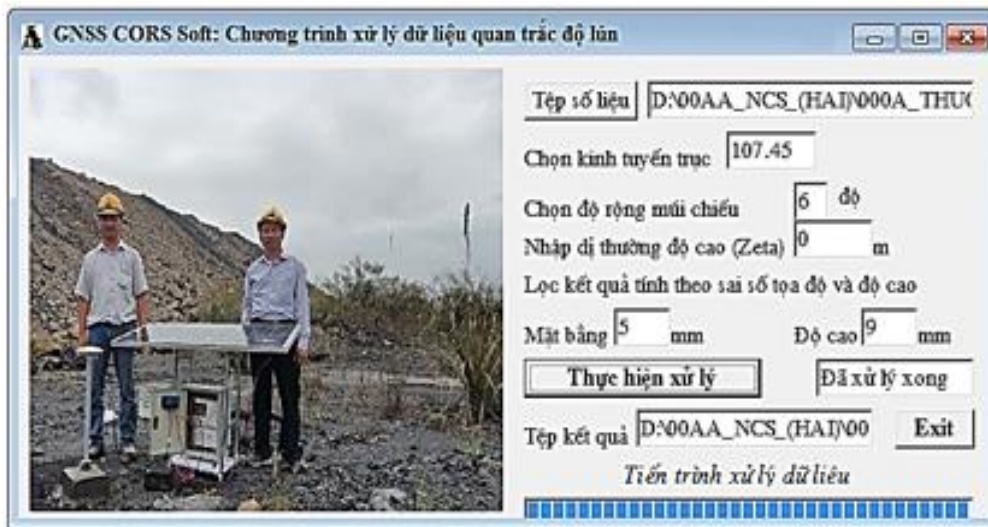
3. Thực nghiệm và kết quả quan trắc độ lún bằng công nghệ GNSS/CORS

3.1. Thực nghiệm mô phỏng độ lún

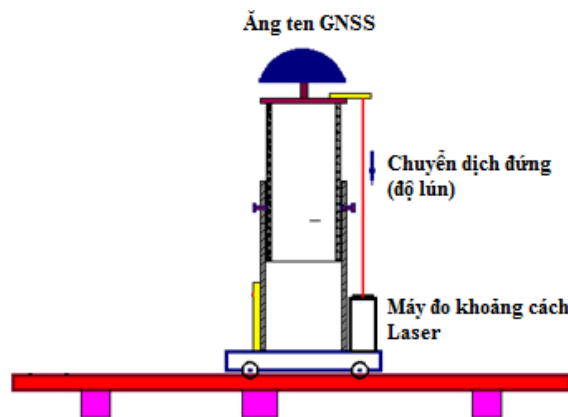
3.1.1. Nguyên lý thực nghiệm mô phỏng

Để kiểm chứng, đánh giá độ chính xác của hệ thống quan trắc độ lún dựa trên công nghệ GNSS/CORS, một thực nghiệm mô phỏng đã được tiến hành ở khu vực thành phố Cẩm Phả, Quảng Ninh, ở đó nhóm nghiên cứu đã thiết lập một trạm CORS có số hiệu CORS-CAMPHA. Nguyên lý của thực nghiệm mô phỏng độ lún là dựa trên sự thay đổi vị trí của ăng ten GNSS theo phương thẳng đứng (Hình 5).

Hệ thống thiết bị mô phỏng có thể đánh giá được cả chuyển dịch ngang và chuyển dịch đứng. Tuy nhiên trong nghiên cứu này chỉ thực nghiệm mô phỏng với chuyển dịch đứng (độ lún). Để tiến hành thực nghiệm mô phỏng độ lún, một hệ thống thiết bị đã được thiết kế chế tạo gồm có hai ống thép hình trụ lồng vào nhau. Ống thép ngoài cố định và ống thép trong có thể di chuyển theo phương thẳng đứng bên trong lòng ống thép



Hình 4. Giao diện phần mềm xử lý dữ liệu quan trắc độ lún.



Hình 5. Nguyên lý quan trắc thực nghiệm mô phỏng độ lún bằng công nghệ GNSS/CORS.

ngoài, phía trên ống thép trong có gắn một đĩa thép tròn, tâm của đĩa thép này có khoét một lỗ để lắp ăng ten thu tín hiệu vệ tinh GNSS. Sử dụng máy đo khoảng cách Laser cầm tay SD-120C của hãng SINCON để xác định khoảng dịch chuyển theo phương thẳng đứng từ điểm tham chiếu cố định đến mặt để trụ mốc có lắp ăng ten.

Tiến hành thu tín hiệu vệ tinh trong khoảng thời gian khoảng 30' thì thay đổi chiều cao ăng ten theo phương thẳng đứng xuống phía dưới, rồi lại đo khoảng cách từ điểm tham chiếu đến trụ mốc có lắp ăng ten và lại thu tín hiệu vệ tinh ở vị trí mới. Hiệu khoảng cách đo được giữa hai lần đo theo phương thẳng đứng chính là độ lún của ăng ten. Sau khi xử lý dữ liệu GNSS ở hai chu kỳ quan trắc sẽ xác định được độ cao ăng ten. Hiệu độ cao ở hai chu kỳ quan trắc chính là độ lún xác định được bằng công nghệ GNSS CORS. So sánh độ lún xác định bằng hai phương pháp này sẽ đánh giá được độ tin cậy, độ chính xác của công nghệ GNSS CORS.

3.1.2. Tiến hành thực nghiệm mô phỏng

Việc quan trắc thực nghiệm mô phỏng được tiến hành vào ngày 15 tháng 7 năm 2023 ở thành phố Cẩm Phả, Quảng Ninh với 6 chu kỳ. Sau mỗi chu kỳ quan trắc sẽ thay đổi vị trí ăng ten GNSS

theo phương thẳng đứng một cách chủ động để tạo ra độ lún. Vị trí đặt trạm quan trắc thực nghiệm mô phỏng nằm bên lề đường bao biển Cẩm Phả-Hạ Long cách trạm CORS-CAMPHA khoảng 3,40 km (Hình 6) trạm quan trắc được kết nối với trạm CORS-CAMPHA thông qua địa chỉ IP của máy tính chủ là 118.70.170.179 và cổng nhận dữ liệu là 3004. Dữ liệu quan trắc theo định dạng tiêu chuẩn NMEA được gửi về máy tính chủ đặt ở Trường Đại học Mỏ - Địa chất, Hà Nội. Trong thực nghiệm mô phỏng này, nhóm nghiên cứu đã tiến hành thực hiện 6 chu kỳ đo, mỗi chu kỳ đo với thời gian thu tín hiệu vệ tinh là 30 phút với tần suất thu tín hiệu là 1 giây. Dữ liệu của mỗi chu kỳ đo được lưu vào một tệp riêng biệt với hai loại tin nhắn trị đo thu được là GGA và GST.

3.1.3. Dữ liệu và kết quả quan trắc thực nghiệm mô phỏng

Dữ liệu quan trắc nhận được theo định dạng tiêu chuẩn NMEA với hai loại tin nhắn là GGA và GST. Ở (Bảng 1) là một đoạn dữ liệu quan trắc thực nghiệm mô phỏng ở chu kỳ thứ nhất. Dữ liệu quan trắc được xử lý bằng phần mềm GNSS CORS Soft theo bốn bước đã trình bày ở mục 2.2.2.



(a) Trạm quan trắc thực nghiệm mô phỏng (b) Trạm CORS-CAMPHA

Hình 6. Khu vực bố trí trạm quan trắc thực nghiệm mô phỏng.

Ở (Bảng 2) thể hiện kết quả xử lý dữ liệu quan trắc độ lún ở chu kỳ thứ nhất.

Dữ liệu quan trắc ở các chu kỳ tiếp theo cũng được xử lý tương tự như ở chu kỳ thứ nhất sẽ xác định độ cao và độ lệch chuẩn của nó. Dựa vào độ cao ở các chu kỳ quan trắc thực nghiệm mô phỏng sẽ xác định được độ lún theo công thức (2).

Độ lún này được so sánh với độ chuyển đứng (độ lún) đo trực tiếp bằng thiết bị đo khoảng cách Laser sẽ xác định được độ chênh lệch độ lún.

Kết quả quan trắc thực nghiệm mô phỏng độ lún dựa trên công nghệ GNSS/CORS được thể hiện như ở Bảng 3.

Thực nghiệm được tiến hành trên một khu vực bờ mỏ phía bắc của mỏ than Cọc Sáu thuộc địa phận thành phố Cẩm Phả, Tỉnh Quảng Ninh (Hình 7). Thời gian bắt đầu quan trắc từ ngày 16 tháng 7 năm 2023 với chu kỳ quan trắc là 30 ngày. Tính đến ngày 16 tháng 12 năm 2023 đã quan trắc được 6 chu kỳ. Độ cao trung bình bờ mỏ đặt trạm quan trắc khoảng +250 m, độ cao đáy mỏ đến thời điểm hiện tại là -300 m. Như vậy độ chênh cao từ bề mặt bờ mỏ quan trắc đến đáy mỏ khoảng 550 m. Với độ chênh cao lớn như vậy, cộng thêm với các hoạt động khai thác làm cho bề mặt bờ mỏ sụt lún rất nhanh. Để tiến hành quan trắc thực nghiệm ngoài thực địa, có 5 mốc đã được thiết kế gia công bằng thép không gỉ để lắp được ăng ten GNSS theo hình thức định tâm bắt buộc.

3.2. Thực nghiệm thực tế

3.2.1. Khu vực thực nghiệm

Bảng 1. Một đoạn dữ liệu quan trắc mô phỏng ở chu kỳ thứ nhất.

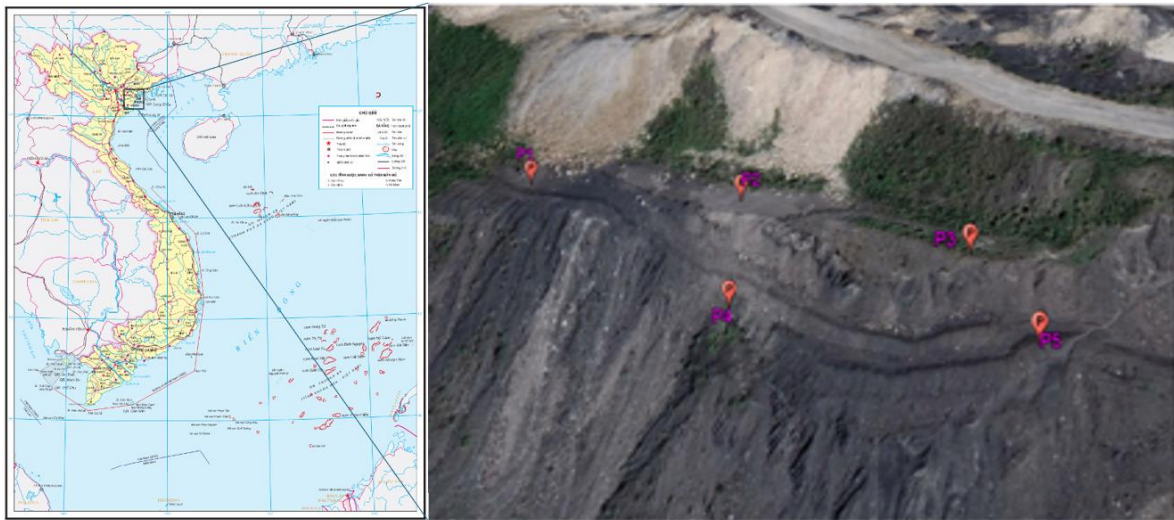
\$GNGGA;045915,00;2059,77350765;N;10716,19035748;E;1;10;0,9;21,233;M;-23,050;M;*66
\$GNGST;045917,00;8,083;2,096;1,647;1,6;2,096;1,648;4,100*49
\$GNGGA;045922,00;2059,77299225;N;10716,18966106;E;1;11;0,8;15,804;M;-23,050;M;*6C
\$GNGST;045922,00;8,005;1,893;1,497;1,77,9;1,893;1,498;3,565*4E
\$GNGGA;045929,00;2059,77217880;N;10716,18960659;E;1;22;0,6;13,742;M;-23,050;M;*6A
\$GNGST;045927,00;9,950;1,409;1,262;1,55,7;1,385;1,289;2,801*4A
\$GNGGA;045932,00;2059,77212546;N;10716,18967398;E;1;22;0,6;13,296;M;-23,050;M;*61
\$GNGST;045932,00;9,242;1,373;1,171;1,65,9;1,362;1,184;2,646*4A
\$GNGGA;045937,00;2059,76848666;N;10716,18868776;E;4;19;0,6;4,153;M;-23,050;M;1,0;0000*75
\$GNGST;045937,00;0,031;0,004;0,003;1,63,7;0,004;0,003;0,010*45
\$GNGGA;045915,00;2059,77350765;N;10716,19035748;E;1;10;0,9;21,233;M;-23,050;M;*66
\$GNGST;045917,00;8,083;2,096;1,647;1,6;2,096;1,648;4,100*49
\$GNGGA;045922,00;2059,77299225;N;10716,18966106;E;1;11;0,8;15,804;M;-23,050;M;*6C
.....

Bảng 2. Kết quả xử lý dữ liệu quan trắc mô phỏng độ lún ở chu kỳ thứ nhất.

TT	Tọa độ và độ cao trắc địa			$(H_i - \bar{H})$ (mm)	$(H_i - \bar{H})^2$ (mm)
	B (°, ', ")	L (°, ', ")	H (m)		
1	20 59 46,10905	107 16 11,32120	4,180	-4,0	16,00
2	20 59 46,10905	107 16 11,32116	4,189	5,0	25,00
3	20 59 46,10909	107 16 11,32120	4,184	0,0	0,00
4	20 59 46,10903	107 16 11,32124	4,182	-2,0	4,00
5	20 59 46,10913	107 16 11,32117	4,179	-5,0	25,00
...
195	20 59 46,10890	107 16 11,32109	4,189	5,0	25,00
196	20 59 46,10887	107 16 11,32108	4,188	4,0	16,00
197	20 59 46,10894	107 16 11,32106	4,188	4,0	16,00
198	20 59 46,10890	107 16 11,32108	4,188	4,0	16,00
199	20 59 46,10889	107 16 11,32105	4,183	-1,0	1,00
TB	20 59 46,10903	107 16 11,32107	4,184	0,0	2875,00
Độ lệch chuẩn $\delta_H = \pm 0,0038$ mm					

Bảng 3. Kết quả quan trắc thực nghiệm mô phỏng độ lún.

Chu kỳ quan trắc	Tọa độ và độ cao trắc địa			Độ lệch chuẩn (m)	Độ lún quan trắc S_{qt} (m)	Độ lún đo trực tiếp $S_{đo}$ (m)	Chênh lệch độ lún (m)
	Vĩ độ (B) ($^{\circ}$, $'$, $"$)	Kinh độ (L) ($^{\circ}$, $'$, $"$)	Cao độ Htd (m)				
1	20 59 46,10903	107 16 11,32107	4,184	$\pm 0,0038$			
					-0,068	-0,057	0,011
2	20 59 46,10904	107 16 11,32105	4,115	$\pm 0,0036$			
					-0,009	-0,015	0,006
3	20 59 46,10905	107 16 11,32103	4,106	$\pm 0,0035$			
					-0,056	-0,040	0,016
4	20 59 46,10902	107 16 11,32106	4,050	$\pm 0,0034$			
					-0,064	0,049	0,015
5	20 59 46,10901	107 16 11,32104	3,986	$\pm 0,0037$			
					-0,074	-0,084	0,010
6	20 59 46,10906	107 16 11,32108	3,912	$\pm 0,0036$			



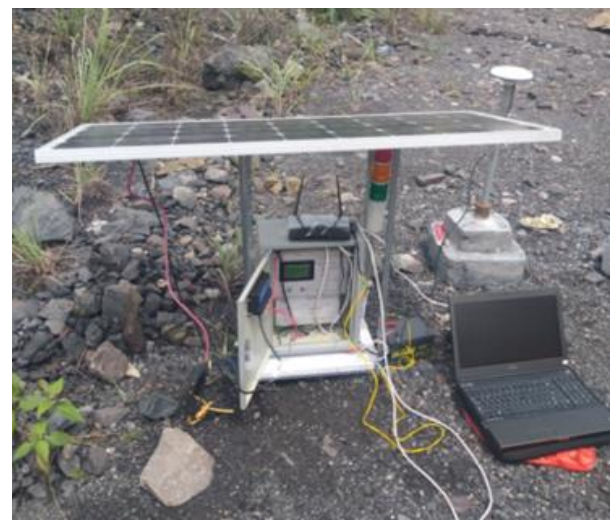
Hình 7. Khu vực quan trắc thực nghiệm.

Các mốc được thi công và gắn lên bề mặt bờ mỏ bằng xi măng ở những vị trí đã được thiết kế, lựa chọn và được đánh số từ P1 đến P5. Sau khi xi măng đông cứng, các mốc đã được gắn chắc chắn vào bề mặt bờ tầng thì tiến hành lắp đặt thiết bị cho trạm quan trắc. Ở (Hình 8) thể hiện một trạm quan trắc lún đã được lắp đặt hoàn chỉnh trên bề mặt bờ mỏ Cọc Sáu.

Các thao tác thực hiện tại trạm quan trắc trên bề mặt bờ mỏ cũng tương tự như thực nghiệm mô phỏng. Dữ liệu quan trắc theo định dạng tiêu chuẩn NMEA được tự động truyền về máy tính chủ của trạm CORS và được xử lý để xác định độ cao cho các mốc quan trắc ở những chu kỳ khác nhau.

3.2.2. Xử lý dữ liệu quan trắc

Quá trình xử lý dữ liệu quan trắc độ lún bề mặt bờ mỏ cũng thực hiện tương tự như xử lý dữ liệu



Hình 8. Trạm quan trắc lún đã được lắp đặt.

quan trắc mô phỏng, được thực hiện bằng phần mềm GNSS CORS Soft.

Dựa vào dữ liệu quan trắc ở chu kỳ thứ nhất của các trạm quan trắc, sử dụng phần mềm GNSS CORS Soft để xử lý và nhận được độ cao của các trạm quan trắc từ P1 đến P5 như ở (Bảng 4÷8).

Dữ liệu quan trắc ở các chu kỳ tiếp theo cũng đã được xử lý và xác định được độ cao tương tự như ở chu kỳ thứ nhất. Từ kết quả xử lý dữ liệu quan trắc của các mốc từ P1÷P5 trong 6 chu kỳ quan trắc đã xác định độ cao và độ lệch chuẩn của các mốc, từ đó xác định được độ lún cho từng chu kỳ. Kết quả độ cao và độ lún của các mốc được thể hiện như ở (Bảng 9).

4. Kết luận

Nghiên cứu này đã ứng dụng thành công công nghệ GNSS/CORS trong quan trắc độ lún bờ mỏ lộ thiên. Hệ thống quan trắc độ lún dựa trên công nghệ GNSS/CORS đã được thiết kế bao gồm hệ thống trạm CORS và hệ thống trạm quan trắc. Một đóng góp của nghiên cứu này là thiết kế phát triển được bộ thu GNSS cho hệ thống trạm quan trắc dựa trên nền tảng công nghệ của hãng Trimble. Bộ thu GNSS được phát triển thu được tín hiệu vệ tinh trong hệ thống GNSS, nhận được số liệu cải chính từ trạm CORS, giải mã tín hiệu vệ tinh GNSS để

Bảng 4. Kết quả xử lý dữ liệu ở trạm quan trắc P1.

TT	Tọa độ và độ cao trắc địa			$(H_i - \bar{H})$ (mm)	$(H_i - \bar{H})^2$ (mm)
	B (°, ', ")	L (°, ', ")	H (m)		
1	21 02 23,17744	107 19 57,49420	253,813	-2,0	4,0
2	21 02 23,17752	107 19 57,49416	253,813	-2,0	4,0
3	21 02 23,17748	107 19 57,49413	253,814	-1,0	1,0
...
777	21 02 23,17754	107 19 57,49382	253,816	1,0	1,0
778	21 02 23,17749	107 19 57,49374	253,816	1,0	1,0
779	21 02 23,17751	107 19 57,49382	253,811	-4,0	16,0
TB	20 02 23,17754	107 19 57,49378	253,815	0,0	4936,00
Độ lệch chuẩn $\delta_H = 0.0025$ mm					

Bảng 5. Kết quả xử lý dữ liệu ở trạm quan trắc P2.

TT	Tọa độ và độ cao trắc địa			$(H_i - \bar{H})$ (mm)	$(H_i - \bar{H})^2$ (mm)
	B (°, ', ")	L (°, ', ")	H (m)		
1	21 02 22,46008	107 20 00,34007	253,445	-1,0	2,0
2	21 02 22,45998	107 20 00,33964	253,450	4,0	16,0
3	21 02 22,46026	107 20 00,33939	253,446	-0,0	0,0
...
377	21 02 23,17754	107 19 57,49382	253,444	-2,0	4,0
378	21 02 23,17749	107 19 57,49374	253,449	-3,0	9,0
379	21 02 23,17751	107 19 57,49382	253,447	-1,0	1,0
TB	20 02 23,17754	107 19 57,49378	253,446	0,0	3942,00
Độ lệch chuẩn $\delta_H = \pm 0.0032$ mm					

Bảng 6. Kết quả xử lý dữ liệu ở trạm quan trắc P3

TT	Tọa độ và độ cao trắc địa			$(H_i - \bar{H})$ (mm)	$(H_i - \bar{H})^2$ (mm)
	B (°, ', ")	L (°, ', ")	H (m)		
1	21 02 21,20393	107 20 02,96080	247,641	4,0	16,0
2	21 02 21,17752	107 20 02,96076	247,643	6,0	36,0
3	21 02 21,17748	107 20 02,96066	247,634	-3,0	9,0
...
284	21 02 21,17754	107 20 02,96074	247,63	-7,0	49,0
285	21 02 21,17749	107 20 02,96065	247,632	-5,0	25,0
286	21 02 21,17751	107 20 02,96072	247,641	4,0	16,0
TB	20 02 21,17754	107 20 02,96078	247,637	0,0	3542,00
Độ lệch chuẩn $\delta_H = \pm 0.0035$ mm					

Bảng 7. Kết quả xử lý dữ liệu ở trạm quan trắc P4

TT	Tọa độ và độ cao trắc địa			$(H_i - \bar{H})$ (mm)	$(H_i - \bar{H})^2$ (mm)
	B (°; ' ; ")	L (°; ' ; ")	H (m)		
1	21 02 21,22666	107 20 00,32848	240,319	-6,0	36,0
2	21 02 21,22670	107 20 00,32843	240,323	-2,0	4,0
3	21 02 21,22664	107 20 00,32846	240,317	-8,0	64,0
...
218	21 02 21,22665	107 20 00,32836	240,329	4,0	16,0
219	21 02 21,22662	107 20 00,32839	240,322	-3,0	9,0
TB	20 02 23,17754	107 19 57,49378	240,325	0,0	2942,00
Độ lệch chuẩn $\delta_H = \pm 0,0037$ mm					

Bảng 8. Kết quả xử lý dữ liệu ở trạm quan trắc P5.

TT	Tọa độ và độ cao trắc địa			$(H_i - \bar{H})$ (mm)	$(H_i - \bar{H})^2$ (mm)
	B (°; ' ; ")	L (°; ' ; ")	H (m)		
1	21 02 21,22666	107 20 00,32848	240,309	-6,0	36,0
2	21 02 21,22670	107 20 00,32843	240,311	-4,0	16,0
3	21 02 21,22664	107 20 00,32846	240,310	-5,0	25,0
...
418	21 02 21,22665	107 20 00,32836	240,320	5,0	25,0
419	21 02 21,22662	107 20 00,32839	240,318	3,0	9,0
TB	20 02 23,17754	107 19 57,49378	240,315	0,0	3142,00
Độ lệch chuẩn $\delta_H = \pm 0,0027$ mm					

Bảng 9. Độ cao và độ lún của các mốc quan trắc.

Chu kỳ	Thời gian quan trắc	Mốc quan trắc lún									
		P1		P2		P3		P4		P5	
		Độ cao; độ lệch chuẩn (m)	Độ lún (mm)	Độ cao; độ lệch chuẩn (m)	Độ lún (mm)	Độ cao; độ lệch chuẩn (m)	Độ lún (mm)	Độ cao; độ lệch chuẩn (m)	Độ lún (mm)	Độ cao; độ lệch chuẩn (m)	Độ lún (mm)
1	16/7/2023	253,815; $\pm 0,0025$		253,446; $\pm 0,0032$		247,637; $\pm 0,0035$		240,325; $\pm 0,0037$		240,315; $\pm 0,0027$	
			-18		-16		-15		-26		-27
2	13/8/2023	253,797; $\pm 0,0031$		253,430; $\pm 0,0027$		247,622; $\pm 0,0032$		240,299; $\pm 0,0034$		240,288; $\pm 0,0029$	
			-15		-18		-14		-25		-25
3	17/9/2023	253,782; $\pm 0,0028$		253,412; $\pm 0,0026$		247,608; $\pm 0,0029$		240,274; $\pm 0,0029$		240,263; $\pm 0,0036$	
			-16		-15		-16		-24		-24
4	15/10/2023	253,766; $\pm 0,0035$		253,397; $\pm 0,0033$		247,592; $\pm 0,0031$		240,250; $\pm 0,0031$		240,239; $\pm 0,0035$	
			-15		-14		-13		-20		-25
5	19/11/2023	253,751; $\pm 0,0032$		253,383; $\pm 0,0029$		247,579; $\pm 0,0028$		240,230; $\pm 0,0030$		240,214; $\pm 0,0028$	
			-14		-13		-12		-19		-21
6	17/12/2023	253,737; $\pm 0,0029$		253,370; $\pm 0,0035$		247,567; $\pm 0,0034$		240,211; $\pm 0,0028$		240,193; $\pm 0,0027$	

chuyển về dữ liệu theo định dạng tiêu chuẩn NMEA-0183. Dữ liệu quan trắc được phân tích và xử lý qua 6 bước và được thực hiện bằng phần mềm tự phát triển đã nâng cao được độ chính xác độ cao cho các điểm quan trắc đến mm.

Để đánh giá độ chính xác của hệ thống quan trắc, một thực nghiệm quan trắc mô phỏng độ lún được tiến hành ở khu vực thành phố Cẩm Phả. Thực nghiệm với số liệu thực tế được thực hiện trên bờ mỏ của mỏ than Cọc Sáu với 5 trạm quan trắc thực hiện trong 6 chu kỳ đo mỗi chu kỳ cách nhau 30 ngày. Dữ liệu quan trắc được xử lý và xác định được độ cao của các mốc quan trắc với độ lệch chuẩn nhỏ hơn 4 mm. Trên cơ sở độ cao của các mốc ở các chu kỳ đo đã xác định được độ lún cho các mốc quan trắc. Vì vậy có thể sử dụng máy thu GNSS này vào trong công tác quan trắc độ lún bờ mỏ lộ thiên.

Đóng góp của tác giả:

Phạm Công Khải, Nguyễn Văn Hải - xây dựng ý tưởng nghiên cứu, viết bản thảo bài báo; Phạm Công Khải, Võ Ngọc Dũng, Đinh Thanh Tuấn, Phạm Văn Chung - lựa chọn phương pháp nghiên cứu, thiết kế xây dựng hệ thống quan trắc; Phạm Công Khải, Nguyễn Văn Hải, Võ Ngọc Dũng - quan trắc thực nghiệm và xử lý số liệu.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được hoàn thành với sự giúp đỡ của Phòng Trắc địa - Địa chất, Công ty Cổ phần than Cọc Sáu (TKV) trong việc khảo sát, lựa chọn khu vực quan trắc, xây dựng mốc quan trắc. Các tác giả xin chân thành cảm ơn Ban lãnh đạo Công ty Cổ phần than Cọc Sáu (TKV) đã tạo mọi điều kiện thuận lợi cho nhóm nghiên cứu.

Tài liệu tham khảo

Bao, S., Yuanhao, H., Li, W., Qin, Z., Xinrui, L., Xuanyu, Q., Guanwen, H., Wei, Q. (2023). Real-time high-precision landslide displacement monitoring based on a GNSS CORS network. *Measurement* 217, 113056.

Bian, H. F., Zhang, S. B., Zhang, Q. Z., & Zheng, N. S. (2014). Monitoring large-area mining subsidence by GNSS based on IGS stations. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 24(2). 514-519.

Gao, J. X., Hu, H., (2009). Advanced GNSS technology of mining deformation monitoring. *Procedia Earth and Planetary Science* 1, 1081-1088.

Hoàng, N. H và Trương, Q. H. (2003). Cơ sở toán học xử lý số liệu trắc địa. *Nhà xuất bản Giao thông vận tải*, Hà Nội.

<https://oemgnss.trimble.com/productsupport/trimble-bd970-receiver-module-support/>.

Hwang, J., Yun, H., Park, S. K., Lee, D., Hong, S. (2012). Optimal methods of RTK-GPS/Accelerometer integration to monitor the displacement of structures. *Sensors* 12, 1014-1034.

Jinsang, H., Hongsik, Y., Yongcheol, S., Jeongho, C., Dongha, L. (2012). Development of an RTK-GPS Positioning Application with an Improved Position Error Model for Smartphones. *Sensors* 12, 12988-13001; doi:10.3390/s12 1012988.

Khoo, V. H., Tor, Y. K., & Ong, G. (2010, April). Monitoring of high rise building using real-time differential GPS. *In Proceedings of FIG Congress-Facing the Challenges-Building the Capacity*, Sydney, Australia.

Lee, H. K. (2010). An integration of GPS with INS sensors for precise long-baseline kinematic positioning. *Sensors* 10, 9424-9438.

Liu, C., Zhou, F., Gao, J., Wang, J. (2012). Some problems of GPS RTK technique application to mining subsidence monitoring. *International Journal of Mining Science and Technology*, Volume 22, Issue 2, March 2012, Pages 223-228.

Nan, S., Liang, C., Ruizhi, C. (2022). Displacement detection based on Bayesian inference from GNSS kinematic positioning for deformation monitoring. *Mechanical Systems and Signal Processing* 167, 108570.

National Marine Electronics Association: <http://www.nmea.org>.

Phạm C. K. (chủ nhiệm) (2023). 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 hợp kết quả nghiên cứu đề tài cấp thành phố, mã số 01C-

- 01/02-2020-3. *Sở Khoa học và Công nghệ Hà Nội*, 289 trang.
- Pham, C. K., Nguyen, G. T., Nguyen, V. H., Tran T. X. (2021). Research and Development of Real-time High-precision GNSS Receivers: A Feasible Application for Surveying and Mapping in Vietnam. *Journal of the Polish Mineral Engineering Society*, Page 391-404. DOI.org/10.29227/IM-2021-02-36.
- Pham, C. K., Tran, d. T., Nguyen, V. H. (2020). GNSS/CORS-Based Technology for Real-Time Monitoring of Landslides on Waste Dump - A Case Study at the Deo Nai South Dump, Vietnam. *Journal of the Polish Mineral Engineering Society*, Page 181-189. DOI.org/10.29227/IM-2020-02-23.
- Quesada-Olmo, N., Jimenez-Martinez, M. J., Farjas-Abadia, M. (2018). Real-time high-rise building monitoring system using global navigation satellite system technology. *Measurement*, 123, 115-124.
- Takasu, T., Yasuda, A. (2008, November). Evaluation of RTK-GPS performance with low-cost single-frequency GPS receivers. *In Proceedings of international symposium on GPS/GNSS* (pp. 852-861).
- Trajkovski, K. K., Sterle, O., Stopar, B. (2010). Study positioning with high sensitivity GPS sensors under adverse conditions. *Sensors* 10, 8332-8347.
- Wan, A., Aziz, W. M. A., Shu, K. K., Zulkarnaini M. A. (2012). High Rise Building Deformation Monitoring With GPS. *Department of Geomatic Engineering Faculty of Geoinformation Science & Engineering University Teknologi Malaysia*, 81310 Skudai, Johor Malaysia.
- Wang, J., Peng X., Xu, C. H. (2011). Coal mining GPS subsidence monitoring technology and its application. *China Mining Science and Technology*, Volume 21, Issue 4, July 2011, Pages 463-467.
- Wang, P., Liu, H., Nie, G., Yang, Z., Wu, J., Qian, C., & Shu, B. (2022). Performance evaluation of a real-time high-precision landslide displacement detection algorithm based on GNSS virtual reference station technology. *Measurement*, 199, 111457.
- Wisniewski, B., Bruniecki, K., Moszyński, M. (2013). Evaluation of RTKLIB's Positioning Accuracy Using low-cost GNSS Receiver and ASG-EUPOS. *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 7(1), 79-85.