# Phương pháp chuyển đổi tự động bản đồ LiDAR hầm lò từ hệ tọa độ cục bộ sang hệ tọa độ quốc gia

*Automatic transformation of underground LiDAR maps from a local coordinate frame to the national reference system*

**Tóm tắt**

Bản đồ LiDAR thu nhận trong quá trình UAV bay trong hầm lò thường được xây dựng trong hệ tọa độ cục bộ của thuật toán định vị và lập bản đồ đồng thời. Để sử dụng dữ liệu này trong khảo sát và quản lý mỏ, cần xác định quan hệ với hệ tọa độ và hệ độ cao quốc gia. Bài báo đề xuất phương pháp chuyển đổi tự động dựa trên trạng thái tham chiếu của UAV tại khu vực cửa hầm, nơi có thể quan trắc GNSS RTK. Vị trí, tư thế và quan hệ lắp đặt giữa các cảm biến được kết hợp với quỹ đạo cục bộ để xác định ma trận chuyển bản đồ; sau đó dữ liệu được chuyển sang VN-2000 và hệ độ cao quốc gia theo cấu hình khu đo. Quy trình phân biệt chuyển hệ của bản đồ đã ghép với xử lý điểm LiDAR thô, đồng thời kiểm soát đồng bộ thời gian, cải chính lệch tâm, biến dạng phép chiếu và độ chính xác lưu trữ tọa độ. Thực nghiệm ngoài trời ngày 04/07/2026 cung cấp 944 thời điểm có đủ ba GNSS đạt điều kiện xử lý; RMS khớp hình học trung vị là 0,018 m và phân vị 95% là 0,049 m. Kết quả xác nhận khả năng tạo một phần tham số hình học đầu vào. Độ chính xác bản đồ quốc gia sau chuyển đổi cần được kiểm chứng bằng dữ liệu bay trong hầm và các điểm kiểm tra độc lập.

*Từ khóa: LiDAR; bản đồ hầm lò; chuyển hệ tọa độ tự động; VN-2000; GNSS RTK; UAV*

**Abstract**

Underground LiDAR maps generated from UAV flights are commonly expressed in the local frame of the mapping system. Their use in mine surveying requires a defined relationship with the national horizontal and vertical reference systems. This paper proposes an automatic transformation method based on a reference UAV pose established near the tunnel entrance using RTK GNSS observations, attitude estimates and sensor mounting geometry. The reference pose is paired with the corresponding local trajectory pose to determine the map transformation, followed by conversion to VN-2000 coordinates and national normal heights. The workflow distinguishes an assembled local map from raw LiDAR scans and addresses time alignment, lever arms, map projection and numerical storage precision. An outdoor experiment conducted on 4 July 2026 provided 944 epochs with three accepted GNSS observations. The reported median and 95th-percentile geometric fit RMS values were 0.018 m and 0.049 m. These results support the reference-parameter stage; end-to-end mapping accuracy still requires underground flight data and independent surveyed checkpoints.

*Keywords: LiDAR; underground mapping; automatic coordinate transformation; VN-2000; RTK GNSS; UAV*

## 1 Đặt vấn đề

Bản đồ địa hình hầm lò cần thể hiện hình dạng và vị trí của đường lò trong cùng hệ quy chiếu với lưới khống chế mỏ, cửa lò và các công trình trên mặt đất. Khi UAV mang LiDAR và IMU bay trong hầm, các quan trắc chủ yếu xác định chuyển động tương đối và hình học của không gian đã quét. Bản đồ thu được có thể thể hiện rõ nền, vách và nóc lò nhưng vẫn nằm trong hệ tọa độ cục bộ do phần mềm thiết lập. Nếu chưa xác định quan hệ với hệ tọa độ quốc gia, dữ liệu chưa thể được chồng ghép thống nhất với bản đồ nền và hồ sơ đo đạc của khu mỏ.

LiDAR kết hợp cảm biến quán tính cung cấp cơ sở định vị và lập bản đồ trong vùng không có GNSS. LIO-SAM kết hợp quan trắc tương đối, quan trắc tuyệt đối và đóng vòng trong một đồ thị nhân tố [1]; FAST-LIO2 sử dụng đăng ký trực tiếp điểm LiDAR với bản đồ để ước lượng chuyển động [2]. Các phương pháp này cung cấp bản đồ và quỹ đạo cần thiết cho bài toán chuyển hệ. Quan hệ của bản đồ với hệ tọa độ quốc gia vẫn phải được xác lập bằng thông tin tham chiếu bên ngoài. Nghiên cứu định vị hợp tác UAV–UGV cũng cho thấy khả năng phối hợp nền mặt đất với nền bay trong môi trường ngầm [3]. Đối với khảo sát mỏ, yêu cầu tiếp theo là đưa kết quả định vị đó vào một quy trình chuyển hệ có thể kiểm tra và lặp lại.

Việc chuyển đổi thủ công từng đám mây điểm đòi hỏi người xử lý lựa chọn điểm tương ứng, xác định góc quay, độ dịch và quy ước độ cao. Khi thực hiện nhiều chuyến bay, sự không thống nhất về gốc bản đồ, trục tọa độ hoặc tham số phép chiếu có thể làm các sản phẩm lệch nhau dù hình học của từng bản đồ có vẻ phù hợp. Tự động hóa cần bắt đầu từ việc xác định đầy đủ các đại lượng quan trắc tạo nên phép chuyển đổi, sau đó áp dụng cùng một quy trình cho toàn bộ điểm và lưu lại căn cứ tính toán.

Bài báo đặt mục tiêu xây dựng phương pháp chuyển đổi tự động bản đồ LiDAR cục bộ của chuyến bay trong hầm lò sang hệ tọa độ quốc gia. Trong cấu hình xem xét, AGV mang UAV tại khu vực còn có GNSS để xác lập trạng thái tham chiếu trước hoặc sau chuyến bay. UAV mang LiDAR và IMU thực hiện nhiệm vụ quét trong hầm. Ba GNSS RTK, dữ liệu tư thế và thông số lắp đặt được sử dụng để tính vị trí, hướng của hệ cảm biến tại trạng thái tham chiếu; quỹ đạo SLAM cung cấp trạng thái tương ứng trong hệ bản đồ cục bộ.

Nội dung nghiên cứu gồm mô hình toán học nối hai hệ, quy trình đưa thông số đo vào phần mềm và bước chuyển từ hệ không gian trung gian sang tọa độ VN-2000 cùng hệ độ cao quốc gia. Phần thực nghiệm đánh giá việc xác lập tham số tại khu vực ngoài trời. Bài báo đồng thời xác định những phép kiểm tra cần thực hiện trên bản đồ hầm sau chuyển đổi để đánh giá đầy đủ hiệu quả của phương pháp.

## 2 Cơ sở và phương pháp chuyển đổi

### 2.1 Xác định đúng dữ liệu nguồn và hệ tọa độ đích

Ký hiệu M là hệ bản đồ cục bộ; L là hệ cảm biến LiDAR; I là hệ cảm biến quán tính dùng trong SLAM; B là hệ hình học của cụm gá khi UAV đặt trên AGV; G là hệ tọa độ Đông–Bắc–Lên, gọi tắt là ENU, được xác lập từ tọa độ tham chiếu đã biết. Hệ B có gốc tại tâm IMU được chọn làm mốc hình học của cụm gá, trục x hướng sang phải, y hướng về phía trước và z hướng lên. Quan hệ vị trí và hướng giữa B với I phải được xác định theo cấu hình lắp đặt. Đầu ra quốc gia được ký hiệu Q và biểu diễn bằng tọa độ Đông E, Bắc N và độ cao chuẩn $H^{\gamma}$.

Với mỗi điểm $p_M$ của bản đồ cục bộ, phép chuyển đổi tổng quát được viết:

$$p_Q = F_{G\to Q}(R_{GM}\, p_M + t_{GM}) \quad (1)$$

Trong (1), $R_{GM}$ và $t_{GM}$ là phép quay và tịnh tiến từ M sang G; hàm $F_{G\to Q}$ thực hiện chuyển hệ quy chiếu, phép chiếu bản đồ và chuyển hệ cao. Đối với bản đồ LiDAR có tỷ lệ mét đã được kiểm chứng, bước M sang G sử dụng phép biến đổi cứng với hệ số tỷ lệ bằng một. Các biến dạng do phép chiếu được xử lý trong $F_{G\to Q}$. Vì vậy, toàn bộ quá trình từ local đến tọa độ quốc gia không được đồng nhất với một phép tịnh tiến hoặc một ma trận quay tịnh tiến duy nhất.

Cần xác định tệp PCD đang chứa điểm LiDAR trong hệ cảm biến hay bản đồ đã được ghép trong M. Ký hiệu $T_{XY}$ là ma trận thuần nhất chuyển tọa độ từ Y sang X và dấu gạch trên p biểu diễn tọa độ thuần nhất. Đối với điểm LiDAR thô tại thời điểm t, quan hệ tạo bản đồ là:

$$\overline{p}_M = T_{MI}(t)\, T_{IL}\, \overline{p}_L \tag{2}$$

$T_{IL}$ chứa góc lắp đặt và vector lệch tâm giữa LiDAR với IMU; $T_{MI}$(t) là vị trí và tư thế IMU trong hệ bản đồ. Khi PCD đã chứa $p_M$, phần mềm chuyển hệ áp dụng trực tiếp (1). Nhân thêm $T_{IL}$ hoặc cộng lại vector LiDAR–IMU vào bản đồ đã ghép sẽ lặp phép cải chính. Nếu thuật toán SLAM xuất tư thế của LiDAR thay vì IMU, tư thế phải được quy về cùng hệ cảm biến trước khi xác định quan hệ giữa bản đồ và điểm tham chiếu.

**2.2 Xác lập vị trí và hướng tại trạng thái tham chiếu**

Tại cửa hầm hoặc khu vực ngoài trời, ba GNSS RTK cung cấp tọa độ của các điểm tham chiếu trên cụm gá. Gọi $a_i^G$ là tọa độ quan trắc thứ i trong G và $\ell_i^B$ là vector từ gốc B đến đúng điểm vật lý mà tọa độ GNSS đang biểu diễn. Quan hệ hình học có dạng:

$$a_i^G = R_{GB}\, \ell_i^B + t_{GB} + \varepsilon_i, \quad i = 1,2,3 \tag{3}$$

Ba điểm có hình học không thẳng hàng và các vector lắp đặt ba chiều đã biết cho phép xác định tư thế không gian của cụm gá. Phép khớp quay và tịnh tiến giữa các tập điểm là một dạng bài toán định hướng tuyệt đối [4]. Khi mới có kích thước mặt bằng, dữ liệu chỉ đủ cho phần hình học tương ứng; các thành phần nghiêng và độ cao phải được bổ sung bằng phép đo phù hợp. Việc sử dụng IMU để cung cấp góc nghiêng cần thống nhất hệ trục và chiều quay với mô hình.

Các log GNSS được gán vào vị trí trái, phải và sau thông qua kiểm tra các cạnh và hướng dự kiến. Với cấu hình gần cân, chỉ so sánh chiều dài cạnh có thể không phân biệt chắc chắn hai anten trước. Do đó, hướng từ IMU hoặc dấu nhận dạng gá lắp được sử dụng cùng với ràng buộc hình học để tránh đảo trái và phải. Trước khi tính cạnh, mọi tọa độ phải được đưa về cùng hệ quy chiếu, cùng hệ tính toán và cùng thời điểm.

Trong trường hợp cụm gá gần nằm ngang và baseline trái–phải song song trục x của B, gọi ΔE và ΔN là các thành phần baseline từ anten trái sang anten phải. Với góc hướng phía trước thân được đo từ Bắc theo chiều kim đồng hồ, hướng tham chiếu và chênh lệch với hướng IMU đã chuẩn hóa được xác định bởi:

$$\psi_G = \mathrm{atan2}(-\Delta N, \Delta E), \quad \delta\psi = \mathrm{wrap}(\psi_G - \psi_I) \tag{4}$$

Hàm wrap đưa hiệu góc về khoảng [−π; π). Công thức (4) sử dụng baseline ngang thân, nên không thể thay trực tiếp bằng phương vị của baseline rồi coi đó là góc hướng phía trước thân. Với định nghĩa δψ trong (4), hướng IMU được hiệu chỉnh bằng cách cộng δψ. Khi nhập tham số từ một phần mềm khác, cần kiểm tra lại định nghĩa dấu. Nếu $R_{GB}$ đã được xác định đầy đủ bằng khớp hình học GNSS thì không cộng thêm cùng độ lệch yaw lần nữa.

Khi $R_{GB}$ đã biết, vị trí gốc B được quy từ tọa độ các điểm GNSS về tâm IMU theo:

$$t_{GB} = \frac{\sum_i w_i (a_i^G - R_{GB}\, \ell_i^B)}{\sum_i w_i} \quad (5)$$

Trọng số $w_i$ thể hiện chất lượng quan trắc trong mô hình đề xuất. Phép trừ vector đã quay trong (5) chính là cải chính lệch tâm từ điểm GNSS về tâm tham chiếu. Việc lấy trung bình trực tiếp tọa độ ba anten chỉ tạo ra vị trí trọng tâm của chúng, chưa phải vị trí IMU. Yêu cầu đo vector lệch tâm phù hợp với độ chính xác định vị là một điều kiện kỹ thuật của tích hợp GNSS/INS [5]. Nếu log đã quy tọa độ về chân sào hoặc một điểm lắp đặt khác, vector $\ell_i^B$ phải kết thúc tại điểm đó; không được tiếp tục coi tọa độ là tâm anten.

### 2.3 Liên kết bản đồ cục bộ với trạng thái tham chiếu

Gọi $t_a$ là thời điểm có đồng thời trạng thái tham chiếu và tư thế trong quỹ đạo SLAM. Từ phép đo tại cụm gá, $T_{GI}(t_a)$ được xác định bằng $T_{GB}(t_a)T_{BI}$, trong đó $T_{BI}$ mô tả quan hệ vị trí và hướng giữa B với I. Nếu thiết bị quán tính ghi hướng tham chiếu khác thiết bị dùng trong SLAM, $T_{BI}$ phải bao gồm cả lệch tâm và góc lắp đặt giữa hai thiết bị. Quỹ đạo SLAM cung cấp $T_{MI}(t_a)$. Ma trận chuyển hệ của toàn bộ bản đồ là:

$$T_{GM} = T_{GI}(t_a)\,[T_{MI}(t_a)]^{-1}, \quad \overline{p}_G = T_{GM}\,\overline{p}_M \quad (6)$$

Công thức (6) là bước liên kết các thông số đo với chức năng chuyển PCD local sang PCD tham chiếu. Hai trạng thái vị trí và tư thế phải mô tả cùng cảm biến, cùng thời điểm và cùng quy ước ma trận. Không cần giả thiết gốc SLAM trùng tâm IMU lúc cất cánh. Khi hệ SLAM khởi tạo lại, đổi gốc hoặc cập nhật bản đồ sau đóng vòng, phải dùng tư thế thuộc đúng phiên bản bản đồ được xuất để tính lại $T_{GM}$.

Một trạng thái tham chiếu đầy đủ sáu bậc tự do có thể xác định quan hệ giữa hai hệ của một bản đồ cứng. Một vị trí GNSS đơn lẻ không xác định được hướng bản đồ; thông tin yaw và vị trí mặt bằng cũng chưa đủ cho phép chuyển ba chiều nếu thiếu các thành phần còn lại. Có thể kết hợp nhiều trạng thái tham chiếu để ước lượng ổn định hơn, với điều kiện chuyển động và cách bố trí quan trắc đủ thông tin để xác định các tham số cần tìm.

Dấu thời gian của GNSS, IMU và SLAM cần được quy về cùng chuẩn. Nội suy tư thế dùng biểu diễn quay phù hợp, đồng thời tránh ghép qua đoạn mất dữ liệu hoặc qua lần khởi động lại. Lưới đầu ra 1 s quy định bước lấy mẫu; độ lệch đồng hồ và độ trễ cảm biến cần được đánh giá riêng. Khi UAV chuyển động hoặc quay nhanh, độ trễ chưa được xác định có thể làm sai cả vị trí và hướng tham chiếu.

Sau khi UAV cất cánh, quan hệ giữa UAV và AGV thay đổi theo thời gian; chỉ quan hệ bản đồ với hệ tham chiếu được truyền qua quỹ đạo đã xác lập. Khi UAV quay lại, vị trí và tư thế quan trắc mới được so sánh với trạng thái dự báo $T_{GM}\ T_{MI}$(t). Muốn dùng thời điểm trở về làm điều kiện kiểm tra hoặc ràng buộc bổ sung, phải biết quan hệ gá đặt tại lần trở về. Việc đặt UAV lại trên AGV không tự bảo đảm cùng vị trí và hướng như trước chuyến bay.

### 2.4 Chuyển sang hệ tọa độ và hệ độ cao quốc gia

Hệ ENU là hệ trung gian để tính hình học trong không gian. Gọi S là hệ tọa độ địa tâm tương ứng với datum nguồn đã xác nhận; $r_{S0}$ là tọa độ địa tâm của gốc ENU và $R_{SG}$ là ma trận quay từ ENU sang S. Mỗi điểm sau (6) được đưa về hệ địa tâm theo [6]:

$$r_S = r_{S0} + R_{SG}\, p_G \quad (7)$$

Nếu hệ quy chiếu nguồn khác VN-2000, cần thực hiện phép tính chuyển phù hợp trước khi chiếu lên mặt phẳng. VN-2000 sử dụng ellipsoid có kích thước WGS-84 nhưng được định vị cho lãnh thổ Việt Nam [7]; bộ tham số tính chuyển giữa WGS-84 và VN-2000 được công bố riêng [8]. Do đó, tên cột kinh độ, vĩ độ không đủ để quyết định datum. Khi đầu thu đã xuất tọa độ trong VN-2000, không thực hiện lại cùng phép đổi datum.

Ký hiệu $D_{SV}$ là phép tính chuyển từ datum nguồn sang datum VN-2000, $geo_V$ là phép đổi tọa độ địa tâm sang tọa độ trắc địa trên ellipsoid đích. Tọa độ trắc địa và tọa độ phẳng được xác định theo:

$$\begin{aligned}(\varphi_V, \lambda_V, h_V) &= \mathrm{geo}_V\big(D_{SV}(r_S)\big)\\ (E, N) &= \Pi_V(\varphi_V, \lambda_V;\ c)\end{aligned} \tag{8}$$

Vector cấu hình c gồm kinh tuyến trục, múi chiếu, hệ số tỷ lệ, tọa độ giả và đơn vị. Những giá trị này được chọn theo hồ sơ khu đo, không suy từ tên chung VN-2000. Quy trình qua (7) và (8) xử lý quan hệ giữa phương Bắc địa phương với phương Bắc lưới chiếu, cùng biến dạng tỷ lệ của phép chiếu. Khi xuất biểu mẫu dùng ký hiệu trắc địa X và Y, cần khai báo X là tọa độ Bắc và Y là tọa độ Đông; trong PCD có thể quy ước x = E, y = N để nhất quán với phần mềm xử lý.

Hệ độ cao quốc gia Việt Nam sử dụng độ cao chuẩn với mực chuẩn gắn với Hòn Dấu [9]. Quan hệ với độ cao ellipsoid được biểu diễn bằng dị thường độ cao ζ:

$$H^{\gamma} = h_V - \zeta_V(\varphi_V, \lambda_V) \tag{9}$$

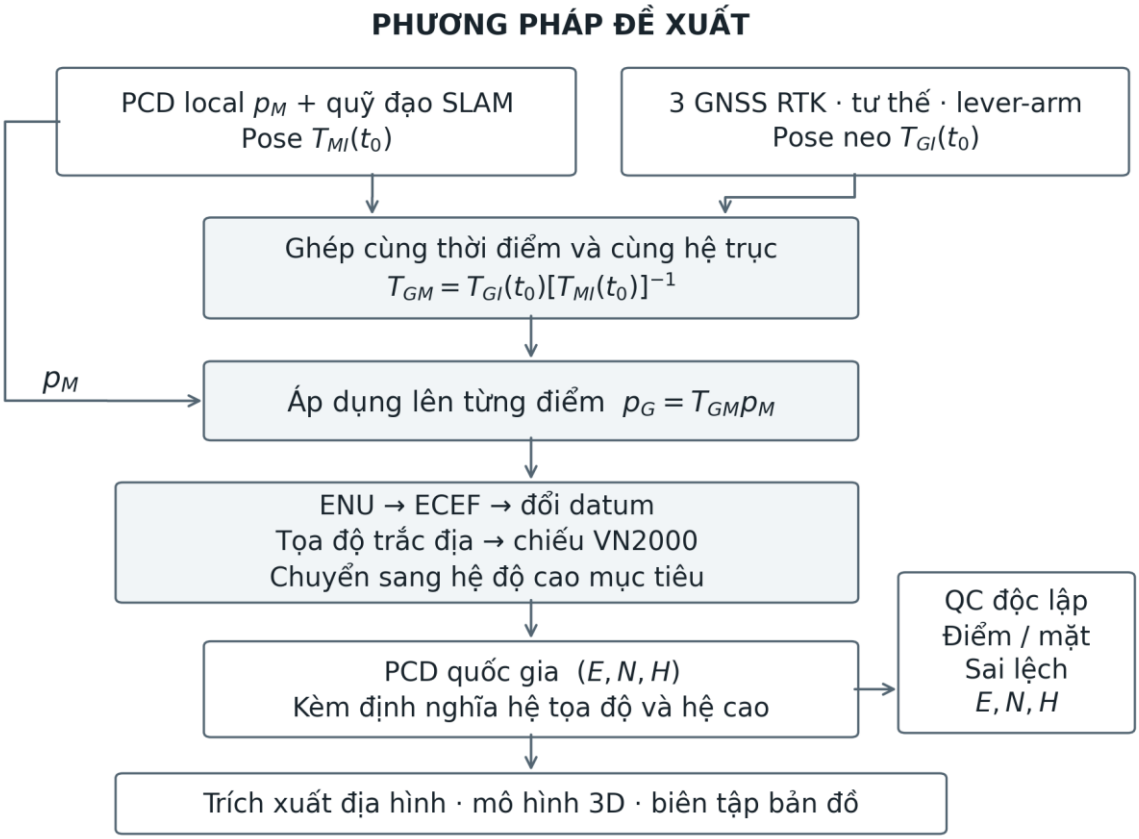
Mô hình $\zeta_V$ phải phù hợp ellipsoid, hệ quy chiếu và quy ước độ cao đang sử dụng [10]. Cần ghi rõ mô hình, phiên bản và phép kiểm tra tại các mốc độ cao của khu mỏ. Thành phần U trong ENU không đồng nhất với $H^{\gamma}$. Tương tự, việc log GNSS đã cải chính chiều cao anten chỉ xác định điểm quy chiếu của tọa độ; chưa xác nhận loại độ cao trong log. Nếu đầu vào là $H^{\gamma}$, cần phép chuyển ngược phù hợp để có h trước khi tính tọa độ địa tâm. Không cộng chiều cao anten lần thứ hai và không mặc định thay dị thường độ cao bằng độ cao geoid của một hệ khác.

## 3 Quy trình phần mềm chuyển đổi tự động

### 3.1 Tổ chức dữ liệu đầu vào

Quy trình phần mềm đề xuất tiếp nhận bộ dữ liệu bản đồ cục bộ và quỹ đạo tương ứng; quan trắc GNSS cùng dữ liệu tư thế tại các trạng thái tham chiếu; hồ sơ hình học lắp đặt; cấu hình hệ tọa độ và hệ cao đích. Hồ sơ lắp đặt ghi rõ tâm vật lý, hướng trục, đơn vị và tình trạng đã áp dụng của từng phép cải chính. Bản đồ và quỹ đạo phải có mã phiên chung để tránh sử dụng tư thế của chuyến bay khác.

Tính tự động được đặt ở các bước đọc dữ liệu, ghép thời gian, lựa chọn trạng thái hợp lệ, ước lượng ma trận, chuyển toàn bộ điểm và xuất báo cáo. Các tham số trắc địa của khu mỏ được xác nhận trước và sử dụng lại cho những lần chạy phù hợp. Phần mềm không tự gán các giá trị thiếu về datum, hệ cao hoặc điểm quy chiếu anten bằng giả định ngầm. Nếu thiếu dữ liệu để xác định một thành phần chuyển hệ, trạng thái đầu ra phải phản ánh thành phần chưa xác định.




**Hình 1. Sơ đồ phương pháp đề xuất để chuyển bản đồ LiDAR cục bộ sang hệ tọa độ quốc gia.**

### 3.2 Tính toán và áp dụng bộ tham số chuyển hệ

Trước hết, phần mềm kiểm tra hệ tọa độ, đơn vị, dấu thời gian và phiên bản dữ liệu; sau đó đưa các quan trắc tham chiếu về G. Các log GNSS được gán vào vị trí lắp đặt, sàng lọc theo chất lượng nghiệm và đối chiếu với hình học cụm gá. Vị trí và tư thế tại thời điểm tham chiếu được xác định theo các công thức (3)–(5), rồi ghép với quỹ đạo SLAM để tính (6). Chỉ những trạng thái đủ các thành phần cần thiết mới được sử dụng cho phép chuyển ba chiều.

Tiếp theo, chương trình đọc từng khối điểm trong PCD local, áp dụng $T_{GM}$ và các phép tính (7)–(9). Việc chia khối cho phép xử lý bản đồ lớn mà không cần nạp toàn bộ dữ liệu vào bộ nhớ. Các thuộc tính độc lập với hệ tọa độ, như cường độ phản hồi, được giữ cùng điểm tương ứng; các thuộc tính phụ thuộc hệ tọa độ cần được cập nhật theo phép biến đổi. Bảng 1 chỉ ra vai trò của từng nhóm thông số, qua đó liên hệ trực tiếp kết quả đo với chức năng chuyển đổi.

**Bảng 1. Thông số đầu vào và tác dụng trong phần mềm chuyển đổi**

| Nhóm thông số | Phép tính sử dụng | Tác dụng đối với bản đồ |
|---|---|---|
| Tọa độ GNSS và vector từ tâm IMU đến điểm GNSS | Mô hình (3) và cải chính (5) | Đưa vị trí tham chiếu từ điểm GNSS về đúng tâm IMU. |
| Hướng GNSS và quan hệ hướng với IMU | Xác định phép quay trong (3)–(4) | Định hướng bản đồ theo hệ ENU; kiểm tra dấu góc và đảo trục. |
| Quan hệ lắp đặt LiDAR với IMU | Tạo bản đồ theo (2) hoặc đổi hệ của tư thế SLAM | Thống nhất tâm và trục cảm biến; tránh cải chính lặp với PCD đã ghép. |
| Thời điểm và hai tư thế tương ứng | Xác lập ma trận theo (6) | Xác định phép quay và tịnh tiến áp dụng cho bản đồ local. |
| Gốc ENU và datum nguồn | Hoàn nguyên địa tâm theo (7) | Gắn vị trí bản đồ với hệ quy chiếu đã biết. |
| Datum đích và cấu hình phép chiếu | Tính chuyển và chiếu theo (8) | Tạo tọa độ phẳng VN-2000 của từng điểm. |
| Loại độ cao và mô hình chuyển cao | Tính độ cao chuẩn theo (9) | Đưa thành phần cao về cùng hệ với mốc độ cao quốc gia. |

Tệp cấu hình kết quả cần lưu ma trận chuyển hệ, quy ước chiều biến đổi, dấu góc, mã trạng thái tham chiếu, nguồn tham số và các chỉ tiêu chất lượng. Khi sửa ngoại chuẩn LiDAR–IMU hoặc hiệu chỉnh quỹ đạo SLAM, bản đồ phải được dựng lại nếu hình học nội bộ đã thay đổi; sau đó mới xác định lại ma trận chuyển hệ của phiên bản mới. Chuyển hệ một bản đồ đã ghép không thay thế việc hiệu chỉnh sai số hình thành trong quá trình dựng bản đồ.

### 3.3 Lưu trữ kết quả và tạo sản phẩm bản đồ

Đầu ra trực tiếp là đám mây điểm có tọa độ quốc gia, quỹ đạo đã chuyển hệ và báo cáo kiểm tra. PCD cho phép khai báo trường tọa độ kiểu số thực 4 byte hoặc 8 byte và có trường VIEWPOINT mô tả vị trí, hướng thu nhận [11]. Chức năng chuyển hệ phải cập nhật tọa độ của từng điểm. Chỉ sửa VIEWPOINT hoặc đổi tên tệp chưa thực hiện phép chuyển đổi. Định nghĩa hệ tọa độ, hệ cao, thứ tự trục và các tham số xử lý được lưu trong hồ sơ dữ liệu đi kèm.

Độ chính xác biểu diễn số cần được kiểm soát khi tọa độ quốc gia có trị số lớn. Nếu lưu trực tiếp bằng số thực float32, khoảng cách giữa hai số liên tiếp quanh 500.000 m là 0,03125 m; quanh 2.300.000 m là 0,25 m. Đây là kết quả tính từ cấu trúc biểu diễn số, không phải sai số đo thực nghiệm. Do đó, quy trình tính toán và lưu tọa độ tuyệt đối nên sử dụng float64 khi phần mềm nhận hỗ trợ, hoặc lưu tọa độ đã trừ gốc cùng một gốc float64 và quy tắc khôi phục tọa độ quốc gia. Cần kiểm tra cả kiểu dữ liệu trong bộ nhớ, vì kiểu PointXYZ thông dụng của PCL dùng các trường float [12].

Từ đám mây điểm đã gắn tọa độ, bước thành lập bản đồ lựa chọn các đối tượng cần biểu diễn theo nhiệm vụ khảo sát. Nền lò được sử dụng để xây dựng bề mặt địa hình; vách và nóc lò phục vụ mô hình không gian, mặt cắt và kiểm tra tiết diện. Những đường lò chồng lớp theo phương đứng cần giữ quan hệ ba chiều, vì một bề mặt chỉ chứa một độ cao tại mỗi vị trí mặt bằng không thể biểu diễn đầy đủ cấu trúc này. Ranh giới đối tượng, ký hiệu, mức khái quát và độ chính xác bản đồ được kiểm tra theo yêu cầu sản phẩm. Như vậy, chuyển PCD sang tọa độ quốc gia tạo cơ sở tọa độ cho công tác biên tập bản đồ địa hình hầm lò.

## 4 Thực nghiệm xác lập tham số và đánh giá

### 4.1 Dữ liệu và điều kiện thực nghiệm

Thực nghiệm ngày 04/07/2026 được thực hiện khi UAV đặt trên AGV tại khu vực ngoài trời. Ba anten bố trí ở bên trái phía trước, bên phải phía trước và phía sau. Trong mặt bằng B, tọa độ lắp đặt ban đầu lần lượt là (−0,23; 0,32), (0,22; 0,32) và (0,00; −0,15) m; LiDAR có tọa độ danh định (0,00; 0,32) m. Đây là ràng buộc hình học ban đầu, chưa phải bộ ngoại chuẩn ba chiều đã được kiểm định.

**Bảng 2. Số lượng bản ghi GNSS trong phiên thực nghiệm**

| Log | Tổng số bản ghi | Bản ghi FIX | Vị trí được nhận dạng |
|---|---|---|---|
| a | 1.804 | 1.754 | Trái phía trước |
| b | 1.383 | 1.084 | Phía sau |
| c | 2.174 | 2.031 | Phải phía trước |

Dữ liệu tư thế gồm 86.772 bản ghi tư thế ước tính. Khoảng xử lý từ 16:34:50 đến 17:14:18, với lưới đầu ra 1 s. Hai log GNSS khai báo tọa độ phẳng theo kinh tuyến trục 105°00′ và log còn lại theo 107°45′. Trường hợp này cho thấy việc dùng trực tiếp tọa độ phẳng trong các tệp để tính hình học có thể gây sai lệch. Quy trình sử dụng tọa độ địa lý để chuẩn hóa về hệ tính toán chung, với điều kiện datum và loại độ cao được xác nhận nhất quán trước khi chuyển đổi ba chiều.

### 4.2 Kết quả và ý nghĩa đối với chuyển bản đồ

Kết quả xử lý nhận dạng anten trái là log a, anten phải là log c và anten sau là log b. Các chỉ tiêu chính được tổng hợp trong Bảng 3. Số thời điểm có đủ ba GNSS và số điểm quỹ đạo là hai tập dữ liệu khác nhau; số điểm quỹ đạo không phải số điểm LiDAR đã được chuyển sang hệ quốc gia.

**Bảng 3. Kết quả xác lập tham số tham chiếu ngoài trời**

| Chỉ tiêu | Giá trị | Ý nghĩa sử dụng |
|---|---|---|
| Thời điểm có đủ ba GNSS tốt | 944 | Tập thời điểm hỗ trợ kiểm tra hình học đầy đủ. |
| Điểm quỹ đạo hợp lệ sau xử lý | 1.917 | Sản phẩm quỹ đạo tham chiếu của phiên xử lý. |
| Yaw offset do phần mềm báo cáo | −4,107° | Thông tin chênh lệch hướng cần kiểm tra quy ước dấu trước khi áp dụng. |
| RMS fit trung vị | 0,018 m | Mức phù hợp nội bộ của hình học anten. |
| Phân vị 95% của RMS fit | 0,049 m | Mô tả phân bố chỉ tiêu khớp hình học. |
| Độ dư trung vị khi khóa hướng theo IMU | 0,025 m | Chỉ tiêu đối chiếu khi hướng bị ràng buộc. |

Giá trị yaw offset là kết quả báo cáo của phiên xử lý. Trước khi đưa vào (4), cần xác minh định nghĩa hiệu góc trong chương trình đã tạo kết quả; không suy chiều cộng hoặc trừ chỉ từ dấu âm. Thông số này cung cấp thông tin về hướng tham chiếu, nhưng không thay thế ba góc

lắp đặt LiDAR–IMU. Tương tự, khoảng cách mặt bằng 0,32 m từ IMU đến LiDAR là tham số cấu hình đầu vào; nó không tự xác định các thành phần lệch tâm và góc xoay còn lại.

Các chỉ tiêu RMS trong Bảng 3 đánh giá mức phù hợp của hình học anten trong phiên xử lý. Sai số chung của các nghiệm GNSS có thể ít làm thay đổi hình dạng tam giác, vì vậy chỉ tiêu khớp nhỏ chưa đủ kết luận vị trí tuyệt đối có cùng độ chính xác. Việc so sánh định lượng RMS giữa các thuật toán còn cần thống nhất số chiều, mẫu số và tập quan trắc dùng tính chỉ tiêu. Những giá trị này được sử dụng để sàng lọc và đánh giá tham số tham chiếu, chưa được dùng làm sai số bản đồ trong hầm.

Đối với phần mềm chuyển PCD, ánh xạ anten xác định đúng điểm tương ứng trong (3); các vector lắp đặt phục vụ phép quy tâm (5); hướng tham chiếu tham gia phép quay của $T_{GI}$. Sau khi bổ sung vị trí và tư thế SLAM tại cùng thời điểm và các thành phần ba chiều còn thiếu, các đại lượng này mới tạo được $T_{GM}$ theo (6). Kết hợp $T_{GM}$ với cấu hình VN-2000 và mô hình độ cao sẽ hoàn chỉnh chuỗi biến đổi tại (1). Đây là cách sử dụng trực tiếp bộ thông số đo trong chức năng tự động chuyển bản đồ.

### 4.3 Kiểm tra độ chính xác của sản phẩm quốc gia

Độ nhạy của phép chuyển phụ thuộc vị trí điểm trong bản đồ. Với sai lệch hướng nhỏ $\delta\psi$, sai lệch ngang do quay tại khoảng cách r tính gần đúng bằng $r|\delta\psi|$. Khi hướng được xác định từ baseline có chiều dài d và sai lệch ngang tương đối $\delta b_{\perp}$, quan hệ gần đúng là:

$$|\delta\psi| \approx \frac{|\delta b_{\perp}|}{d}, \quad e_{\perp} \approx r\,|\delta\psi| \tag{10}$$

Ví dụ, với d = 0,45 m và $\delta b_{\perp}$ = 0,01 m, sai lệch hướng xấp xỉ 1,27°; tại r = 20 m, sai lệch ngang tương ứng khoảng 0,44 m. Ví dụ tính toán này cho thấy hướng tham chiếu cần được kiểm tra theo yêu cầu bản đồ và cự ly khảo sát. Các số trên không phải sai số quan trắc của đám mây điểm trong thực nghiệm; cũng không thể thay RMS fit trong Bảng 3 trực tiếp cho $\delta b_{\perp}$.

Phép quay tịnh tiến của một bản đồ cứng không loại bỏ độ trôi biến đổi dọc tuyến của SLAM. Trạng thái tham chiếu trước và sau chuyến bay có thể cung cấp điều kiện kiểm tra độ khép. Nếu sử dụng chúng để hiệu chỉnh quỹ đạo, cần một mô hình bình sai hoặc tối ưu quỹ đạo thích hợp, sau đó dựng lại đám mây điểm từ các quét hoặc khung dữ liệu còn giữ liên kết thời gian. Một PCD gộp không còn thông tin thời gian không đủ để phân bố duy nhất độ trôi cho từng đoạn hầm.

Kiểm chứng toàn bộ phương pháp cần một chuyến bay có PCD local, quỹ đạo tương ứng, trạng thái tham chiếu và các điểm đo kiểm tra trong hầm. Các điểm kiểm tra được xác định trong cùng hệ tọa độ và hệ cao bằng phương pháp trắc địa độc lập, đồng thời không tham gia ước lượng phép chuyển. Điểm kiểm tra nên phân bố theo chiều dài, cao độ và các vị trí đổi hướng của tuyến để phản ánh sai lệch cục bộ. Với n điểm, sai số mặt bằng và độ cao được tính riêng:

$$\mathrm{RMSE}_{EN} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\left[\left(\hat{E}_j - E_j\right)^2 + \left(\hat{N}_j - N_j\right)^2\right]} \tag{11}$$

$$\mathrm{RMSE}_{H} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\left(\hat{H}_j^{\gamma} - H_j^{\gamma}\right)^2} \tag{12}$$

Dấu mũ chỉ tọa độ từ bản đồ sau chuyển đổi, còn tọa độ không có dấu mũ là giá trị kiểm tra độc lập. Cùng với RMSE, cần báo cáo sai lệch lớn nhất, phân vị sai lệch và phân bố theo vị trí tuyến. Giới hạn chấp nhận được xác lập từ tỷ lệ, mục đích và yêu cầu kỹ thuật của sản phẩm.

Hiệu quả tự động hóa được đánh giá bằng thời gian xử lý, số thao tác can thiệp và khả năng lặp lại trên cùng dữ liệu; các đại lượng này cần được đo trong thử nghiệm hoàn chỉnh.

Dữ liệu thực nghiệm hiện có mới hỗ trợ khâu xác lập tham số tham chiếu ngoài trời. Chưa có bộ PCD local và PCD quốc gia cùng các điểm kiểm tra trong hầm để tính (11) và (12). Vì vậy, kết quả hiện tại xác nhận vai trò và khả năng tạo một phần đầu vào cho chuỗi tự động; chưa xác lập độ chính xác cuối cùng hoặc thời gian xử lý của toàn bộ quá trình thành lập bản đồ.

## 5 Kết luận

Bài báo đề xuất phương pháp chuyển đổi tự động bản đồ LiDAR thu từ chuyến bay UAV trong hầm lò sang hệ tọa độ và hệ độ cao quốc gia. Quan hệ giữa bản đồ cục bộ và hệ tham chiếu được xác định bằng hai trạng thái vị trí và tư thế của cùng cảm biến tại cùng thời điểm. Ma trận thu được chuyển toàn bộ bản đồ sang hệ ENU; các phép tính trắc địa tiếp theo đưa từng điểm về VN-2000 và độ cao chuẩn quốc gia. Cách tổ chức này xác định rõ đầu vào, thứ tự xử lý và sản phẩm của phần mềm.

Các thông số đo có chức năng cụ thể trong chuỗi chuyển đổi. Tọa độ GNSS cùng vector lắp đặt quy vị trí về tâm IMU; hướng tham chiếu và quan hệ trục xác định phép quay; quỹ đạo SLAM cung cấp quan hệ với bản đồ local; cấu hình datum, phép chiếu và mô hình độ cao xác định hệ đích. Thông số LiDAR–IMU được dùng tại bước tạo bản đồ hoặc quy đổi tư thế cảm biến và phải tránh áp dụng lặp cho PCD đã ghép. Kết quả ngoài trời với 944 thời điểm đủ ba GNSS và RMS khớp trung vị 0,018 m cung cấp bằng chứng cho khâu tạo tham số hình học đầu vào.

Để hoàn thiện sản phẩm bản đồ địa hình hầm lò, cần tích hợp bộ tham số với dữ liệu bay, kiểm soát độ trôi quỹ đạo, thực hiện chuyển đổi toàn bộ PCD và đánh giá trên điểm kiểm tra độc lập. Đám mây điểm sau chuyển hệ được sử dụng để xây dựng bề mặt nền lò, mặt cắt và các lớp đối tượng trong cùng hệ quy chiếu với bản đồ khu mỏ. Độ chính xác bản đồ được kết luận từ kiểm tra sản phẩm này, cùng với mức độ đầy đủ của cấu trúc địa hình được thể hiện.

## Tài liệu tham khảo

[1] Shan, T., Englot, B., Meyers, D., Wang, W., Ratti, C. và Rus, D. (2020). LIO-SAM: Tightly-coupled Lidar Inertial Odometry via Smoothing and Mapping. IEEE/RSJ IROS, 5135–5142. DOI: 10.1109/IROS45743.2020.9341176.

[2] Xu, W., Cai, Y., He, D., Lin, J. và Zhang, F. (2022). FAST-LIO2: Fast Direct LiDAR-Inertial Odometry. IEEE Transactions on Robotics, 38(4), 2053–2073. DOI: 10.1109/TRO.2022.3141876.

[3] Akhihiero, D., Olawoye, U., Das, S. và Gross, J. (2024). Cooperative Localization for GNSS-Denied Subterranean Navigation: A UAV–UGV Team Approach. NAVIGATION, 71(4), navi.677. DOI: 10.33012/navi.677.

[4] Horn, B. K. P. (1987). Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions. Journal of the Optical Society of America A, 4(4), 629–642. DOI: 10.1364/JOSAA.4.000629.

[5] NovAtel (2026). Importance of lever arms. OEM7 Documentation, D100402 v6A. Truy cập ngày 19/11/2026. Tài liệu trực tuyến

[6] Sanz Subirana, J., Juan Zornoza, J. M. và Hernández-Pajares, M. (2011). Transformations between ECEF and ENU coordinates. ESA Navipedia. Truy cập ngày 19/11/2026. Tài liệu trực tuyến

[7] Tổng cục Địa chính (2001). Thông tư 973/2001/TT-TCĐC ngày 20/06/2001 hướng dẫn áp dụng Hệ quy chiếu và Hệ tọa độ quốc gia VN-2000. Tài liệu trực tuyến

[8] Bộ Tài nguyên và Môi trường (2007). Quyết định 05/2007/QĐ-BTNMT ngày 27/02/2007 về sử dụng hệ thống tham số tính chuyển giữa Hệ tọa độ quốc tế WGS-84 và Hệ tọa độ quốc gia VN-2000. Tài liệu trực tuyến

[9] Bộ Tài nguyên và Môi trường (2008). QCVN 11:2008/BTNMT Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về xây dựng lưới độ cao, ban hành kèm Quyết định 11/2008/QĐ-BTNMT ngày 18/12/2008. Tài liệu trực tuyến

[10] Hà Minh Hòa (2019). Nâng cao độ chính xác của mô hình Quasigeoid quốc gia nhờ xây dựng hệ quy chiếu không gian quốc gia. Tạp chí Khoa học Đo đạc và Bản đồ, 40, 1–10. DOI: 10.54491/jgac.2019.40.305.

[11] Point Cloud Library. The PCD Point Cloud Data file format. Tài liệu chính thức PCL. Truy cập ngày 19/11/2026. Tài liệu trực tuyến

[12] Point Cloud Library. Adding your own custom PointT type. Tài liệu chính thức PCL. Truy cập ngày 19/11/2026. Tài liệu trực tuyến