

NGHIÊN CỨU PHƯƠNG PHÁP GIÁM SÁT TÍNH TOÀN VỆ CỦA PPP CHO CÁC ỨNG DỤNG ITS THỜI GIAN THỰC

RESEARCH ABOUT THE INTEGRITY MONITORING METHOD
OF PPP FOR REAL-TIME ITS APPLICATIONS

Nguyễn Mai Anh^{1,*},
Trần Quang Bách¹, Nguyễn Phương Anh²

DOI: <http://doi.org/10.57001/huiv5804.2024.264>

TÓM TẮT

Việc triển khai công nghệ hệ thống giao thông thông minh (ITS) được kỳ vọng sẽ cải thiện đáng kể an toàn giao thông đường bộ và hiệu quả vận tải. Một trong những thành phần quan trọng của ITS là định vị xe chính xác. Định vị với độ chính xác từ decimet đến từng mét là yếu tố quan trọng trong việc tự lái và các ứng dụng tự động khác. Hệ thống vệ tinh dẫn đường toàn cầu (GNSS) định vị điểm chính xác (PPP) là một cách tiếp cận định vị hấp dẫn cho ITS do chi phí tương đối thấp và khả thi. Tuy nhiên, GNSS PPP dễ bị ảnh hưởng bởi một số lỗi, đặc biệt là những vấn đề gây ra bởi môi trường đô thị đầy thách thức. Để đáp ứng các yêu cầu về tính toàn vẹn cao của các ứng dụng ITS, cần phải phân tích cẩn thận các lỗi và thất bại tiềm ẩn của PPP và nghiên cứu các phương pháp giám sát tính toàn vẹn có liên quan. Bài báo này trình bày về các lỗi hỏng của GNSS PPP từ đó đề xuất phương pháp giám sát tính toàn vẹn của PPP.

Từ khóa: Định vị điểm chính xác, hệ thống vệ tinh dẫn đường toàn cầu.

ABSTRACT

The implementation of the Intelligent Transportation System (ITS) is expected to greatly improve road safety and transport efficiency. One of the key components of ITS is precise positioning of vehicles. Positioning with the accuracy within a decimeter to a meter is essential in self-driving and other automated applications. The Global Navigation Satellite System (GNSS) and the Precise Point Positioning (PPP) is a viable approach for ITS due to the relatively low cost and possibility. However, GNSS PPP is vulnerable to a number of bugs and errors, especially those caused by the urban environment. To meet the high requirements of the ITS applications, it's necessary to thoroughly analyze the hidden errors and failures and research about integrity monitoring methods. This paper, the potential vulnerabilities of GNSS PPP will be presented, thereby suggesting possible methods to monitor the integrity of PPP.

Keywords: Precise point positioning, global navigation satellite system.

¹Khoa Điện tử, Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp

²Trường Cao đẳng Điện tử - Điện lạnh Hà Nội

*Email: nmanh@uneti.edu.vn

Ngày nhận bài: 15/3/2024

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 28/4/2024

Ngày chấp nhận đăng: 27/8/2024

1. GIỚI THIỆU

Công nghệ hệ thống giao thông thông minh (ITS) dựa vào một hoặc nhiều hệ thống vệ tinh dẫn đường toàn cầu (GNSS) để định vị tuyệt đối. Những gì được yêu cầu là một chi phí thấp, kỹ thuật định vị chính xác đến decimet, với khả năng thời gian thực cho phép tự động hóa điều hướng các phương tiện [1]. Các kỹ thuật định vị GNSS khả thi có thể được sử dụng trong ITS bao gồm Real Time Kinematic (RTK) và Network RTK (NRTK). RTK và NRTK đều là các công nghệ định vị khác nhau yêu cầu một hoặc nhiều vùng lân cận liên tục vận hành trạm tham chiếu GNSS [2]. Ngược lại, PPP là một kỹ thuật định vị tuyệt đối có thể được áp dụng bất cứ nơi nào trên thế giới. Phương pháp định vị điểm chính xác (PPP) [3] là một phương pháp nổi tiếng và được sử dụng rộng rãi để định vị bằng cách sử dụng các quan sát sai phân bằng 0. Phương pháp này được sử dụng để tính toán tọa độ của một trạm mà không cần đến trạm tham chiếu gần đó làm trạm điều khiển. Nó đã được sử dụng trong nhiều ứng dụng khoa học; cụ thể là định vị tính chung [4] cho mạng cục bộ

hoặc toàn cầu, định vị động học [5] truyền thời gian [6]. Độ chính xác của PPP đạt mức cao nhất sau khi sự mơ hồ về pha sóng mang được giải quyết - gọi là PPP-AR (PPP với độ phân giải mơ hồ) hoặc PPP số nguyên ít phổ biến hơn (IPPP). Với sự lựa chọn phát triển của các tín hiệu GNSS mới, các chòm sao GNSS mới và cơ sở hạ tầng, PPP với cảnh báo phân giải các điểm mơ hồ theo thời gian thực (AR) là một giải pháp thay thế hấp dẫn cho các kỹ thuật định vị GNSS.

Hơn nữa, sự tích hợp của PPP với các công nghệ khác, chẳng hạn như hệ thống dẫn đường quán tính (INS) [1], có thể rút ngắn thời gian hội tụ và cải thiện tính khả dụng của định vị [7], làm cho PPP được áp dụng nhiều hơn, ngay cả trong môi trường đô thị. Một trong những vấn đề quan trọng đối với công nghệ ITS là an toàn, một trong những yếu tố đó chính là đảm bảo định vị đáng tin cậy. Tuy nhiên, do vệ tinh GNSS tín hiệu yếu, phép đo GNSS dễ bị ảnh hưởng bởi các mối đe dọa và lỗi do vệ tinh hoặc máy thu cũng như môi trường [2, 8], đặc biệt là trong các khu vực đô thị nơi có nhu cầu công nghệ ITS nhiều nhất. Hơn nữa, không giống như các kỹ thuật định vị khác như RTK và NRTK, PPP chỉ dựa vào các thông số đo lường từ bộ thu của người dùng [9, 10]. Kỹ thuật này ảnh hưởng bởi nhiều nguồn lỗi, chẳng hạn như đồng hồ vệ tinh, bộ thu sai lệch... Kết quả là, PPP bị ảnh hưởng nhiều hơn bởi các lỗi như vậy. Hiểu rõ về các đặc điểm của lỗi hồng PPP, các phương pháp giảm thiểu lỗi là điều cần thiết để cải thiện độ tin cậy và tính toàn vẹn của PPP. Mục tiêu là xem xét các lỗi và mối đe dọa tiềm ẩn trong GNSS PPP cũng như các phát triển nghiên cứu và đề xuất phương pháp để nâng cao giám sát tính toàn vẹn của PPP.

2. CÁC LỖI HỒNG VÀ PHÂN TÍCH LỖI TOÀN VỆ TRONG PPP

PPP là một kỹ thuật sử dụng các quan sát không phân biệt tần số kép, giả khoảng cách, hiệu chỉnh quỹ đạo và đồng hồ vệ tinh GNSS được tạo ra từ mạng lưới các trạm tham chiếu toàn cầu mức độ chính xác cao chế độ tĩnh hoặc định vị điểm động học [3]. Sử dụng phương pháp tiếp cận PPP để tính toán vị trí máy thu, độ lệch đồng hồ máy thu, độ trễ thiên đỉnh tầng đối lưu. Tuy nhiên, điều quan trọng cần lưu ý là phương pháp này sử dụng mạng lưới các trạm tham chiếu toàn cầu để tính toán quỹ đạo và đồng hồ vệ tinh cần thiết cho việc triển khai. Một trong những công cụ xử lý web để định vị điểm chính xác (PPP) được gọi là NRCAN. Công cụ CSRS-PPP của NRCAN cho phép tính toán các vị trí có độ chính xác cao hơn của dữ liệu GNSS thô. Thông tin lịch thiên văn vệ tinh, được truyền bởi các vệ tinh, được sử dụng để tính toán vị trí đã

hiệu chỉnh với độ chính xác tuyệt đối cao không đổi của máy thu. Điều này được thực hiện bằng cách tải lên dữ liệu RINEX từ bộ thu tần số kép hoặc RINEX tần số kép mới được tạo từ tần số đơn trên trang web. Trang web xử lý dữ liệu ở chế độ tĩnh (bộ thu cố định) và chế độ động học (bộ thu chuyển động). Sau khi các chỉnh sửa được tính toán, chúng sẽ được gửi đến người dùng cuối qua internet. Những hiệu chỉnh này được máy thu sử dụng, dẫn đến việc định vị có độ chính xác cao mà không cần đến trạm gốc. Ngoài ra, các quan sát cũng được sửa lỗi do độ nghiêng tương đối, bộ thu tập trung tâm pha (PCO), biến thể trung tâm pha (PCV), tầng đối lưu, thủy triều trái đất, tải trọng của thủy triều đại dương, và sai lệch phần cứng [11]. Các nguồn lỗi khác bao gồm lỗi tầng điện ly, lỗi đa đầu nhọn, lỗi không nhìn thẳng (NLOS) và trượt chu kỳ vẫn là thách thức nhất đối với các ứng dụng ITS thời gian thực. Các lỗi này góp phần vào hầu hết các vết lõm đối với PPP được thực hiện trong môi trường đô thị. Để cải thiện định vị chính xác và toàn vẹn, cần thiết phải điều tra cẩn thận tất cả các nguồn lỗi này.

Để cải thiện hiệu suất định vị GNSS thì việc phân tích các chế độ lỗi có thể giúp xác định các yêu cầu tích hợp GNSS, ngăn ngừa và bảo vệ khỏi những mối đe dọa có thể xảy ra. Trong bài báo này, các lỗi tiềm ẩn được xem xét và được trình bày bởi phương pháp phân tích lỗi đại diện là chế độ lỗi và phân tích lỗi (FMEA). FMEA thường liên quan đến việc xác định tất cả các lỗi tiềm ẩn ở các chế độ, nguyên nhân và đặc điểm của chúng tác động lên người dùng, xác suất xảy ra và phương pháp giảm thiểu. Các chế độ thất bại tiềm ẩn của PPP được tóm tắt trong bảng 1 [11] và được phân loại thành 5 nhóm: vệ tinh và tín hiệu, bầu khí quyển, sản phẩm (hiệu chỉnh), môi trường làm việc và người dùng. Các mô hình toán học cho các lỗi khác nhau được liệt kê trong bảng 2 [12].

Bảng 1. Tổng hợp các chế độ lỗi của GNSS PPP

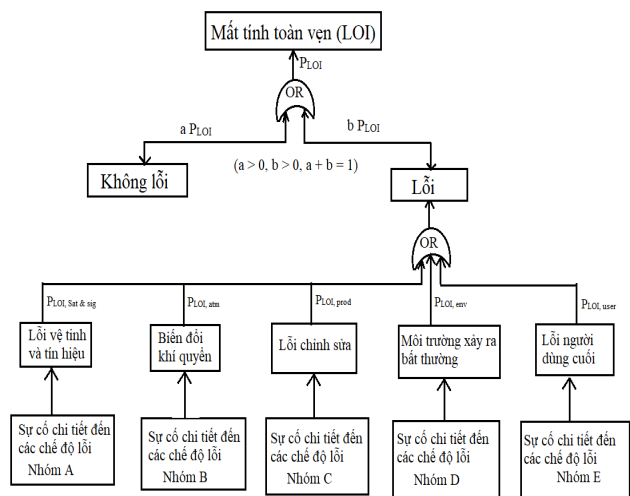
Sự thất bại	Kiểu lỗi	Xác suất	Nhận xét
A. Vệ tinh và tín hiệu			
Dữ liệu điều hướng tải lên xấu	Bước/ lỗi dốc	$\leq 1.10^{-5}$ /h cho mỗi vệ tinh	Bao gồm biến dạng tín hiệu, dao động, phân kỳ sóng mang mã không chuẩn (NSC)
Đồng hồ vệ tinh nhảy và trôi	Bước/ lỗi dốc		
Quỹ đạo bất thường và không ổn định	Bước/ lỗi dốc		

Tín hiệu xấu được tạo hoặc truyền đi	Bước/ lỗi dốc/ nhiễu ngẫu nhiên		
Sự cố không gian	Bước/ lỗi dốc		
B. Bầu khí quyển			
Hiện tượng nhấp nháy và biến đổi hình cầu	Bước/ lỗi dốc/ nhiễu ngẫu nhiên	UI (Under Investigation) Dưới sự nghiên cứu	
Biến thiên tầng đối lưu	Bước/ lỗi dốc	UI	
C. Sản phẩm			
Lỗi trong quỹ đạo và đồng hồ chính xác	Bước/ lỗi dốc	$1.10^{-6} \rightarrow 1.10^{-5}/h$ cho mỗi vệ tinh	Ước tính thực nghiệm về hiệu chỉnh nhỏ RTX
Lỗi trong hiệu chỉnh tầng điện ly thời gian thực	Bước/ lỗi dốc/ nhiễu ngẫu nhiên	$\sim 1.10^{-5}/h$ cho mỗi vệ tinh	
Lỗi trong hiệu chỉnh tầng đối lưu thời gian thực	Bước/ lỗi dốc	$\sim 1.10^{-6}/h$ cho mỗi vệ tinh	
Thông số định hướng trái đất không chính xác	Bước/ lỗi dốc	UI	Chòm sao - lỗi rộng
Mô hình không chính xác của trung tâm pha, anten vệ tinh	Dao động	UI	
Mô hình không chính xác của trung tâm pha máy thu	Dao động	UI	
Xu hướng mã không chính xác	Chịu ảnh hưởng	UI	
Xu hướng pha không chính xác	Chịu ảnh hưởng	UI	
D. Từ môi trường			
Mã đa pha	Lỗi bước/ nhiễu ngẫu nhiên	Phụ thuộc vào môi trường và máy thu	
Mã NLOS	Lỗi bước/ nhiễu ngẫu nhiên	Phụ thuộc vào môi trường	
Đa pha sóng mang	Nhiều nhiễu ngẫu nhiên	Phụ thuộc vào môi trường và máy thu	
Sóng mang, pha NLOS	Lỗi bước/ nhiễu ngẫu nhiên	Phụ thuộc vào môi trường	
Can thiệp không chủ ý	Lỗi bước/ nhiễu ngẫu nhiên	Phụ thuộc vào môi trường	

Gây nhiễu và giả mạo	Lỗi bước/ nhiễu ngẫu nhiên	Phụ thuộc vào môi trường	
Trượt chu kỳ	Lỗi bước	Phụ thuộc vào môi trường	
E. Người dùng			
Lỗi máy thu và anten	Lỗi bước/ nhiễu ngẫu nhiên	Phụ thuộc vào máy thu	Có thể gây ra sự dịch chuyển doppler cao, dẫn đến tăng tiếng ồn hoặc mất khả năng theo dõi tín hiệu
Cơ năng cao	Lỗi bước/ nhiễu ngẫu nhiên		

Bảng 2. Mô hình toán học của lỗi

Kiểu lỗi	Mô hình toán học của lỗi	Ghi chú
Lỗi bước	$f(t) = A u(t-t_0)$	Trong đó: $f(t)$ là giá trị của lỗi tại thời điểm t $u(t)$ là hàm bước đơn vị và t_0 là thời gian bắt đầu lỗi A là mức độ lỗi R là độ dốc của lỗi θ là độ lệch pha. $N(m, V)$: mô tả theo phân bố Gaussian, với m là giá trị trung bình lỗi, V là phương sai $a(t)$ là một biến ngẫu nhiên có phân bố Gaussian
Lỗi đoạn/chậm	$f(t) = R(t-t_0) u(t-t_0)$	
Lỗi ngẫu nhiên	$f(t) = A_k u(t-t_0)$ trong đó: $A_k \sim \begin{cases} N(0, \Sigma_k) & k < t_0 \\ N(h(k, t_0), \Sigma_k) & k \geq t_0 \end{cases}$ Gồm nhiều loại lỗi, từ sự nhấp nháy tầng điện ly và các biến đổi tầng đối lưu, sai số trong các điều kiện ban đầu,	
Dao động	$f(t) = A \sin(t-\theta) u(t-t_0)$	
Bước ngẫu nhiên	$f(t) = a(t)/\sqrt{dt} u(t-t_0)$	



Hình 1. Ví dụ về cây lỗi toàn vẹn

Rủi ro về tính toàn vẹn do các sai lệch được trình bày ở hình 1, phân tích thành các xác suất của các loại lỗi, như là lỗi vệ tinh và tín hiệu, khí quyển sự bất thường, lỗi của sản phẩm, sự bất thường của môi trường hoạt động và lỗi của người dùng cuối [13]. Tính toàn vẹn là một yêu cầu quan trọng đối với điều hướng và định vị thời gian thực, cho cả các ứng dụng quan trọng về an toàn và trách nhiệm pháp lý vì các mối đe dọa và lỗi tiềm ẩn đối với định vị GNSS có thể gây hậu quả nghiêm trọng. Nó bao gồm những khả năng cung cấp các cảnh báo hợp lệ và kịp thời cho người dùng khi hệ thống bị các mối đe dọa và các lỗi gây nên.

Tính toàn vẹn có thể được đặc trưng các đặc điểm chính sau [14]:

- Giới hạn cảnh báo (AL): Vị trí tối đa chấp nhận được lỗi, vượt quá mức thì một cảnh báo sẽ được kích hoạt. Nó có thể được đặc trưng thêm là AL nằm ngang (HAL) và AL dọc (VAL).

- Thời gian cảnh báo (TTA): Thời gian tối đa cho phép trước khi đưa ra cảnh báo vì hệ thống vượt quá mức độ cho phép.

- Rủi ro toàn vẹn (IR): Xác suất (trên một đơn vị thời gian) mà lỗi vị trí vượt quá AL.

- Mức bảo vệ (PL): Ước tính giới hạn trên lỗi vị trí với xác suất không lớn hơn IR yêu cầu. Nó có thêm đặc trưng PL ngang (HPL) và PL dọc (VPL).

AL, TTA và IR thường được quy định là tính toàn vẹn yêu cầu, PL được tính toán bởi người dùng hoặc bởi hệ thống giám sát. PL được tính toán sau đó được so sánh với AL và lỗi vị trí thực tế (nếu biết) để xác định xem:

- (a) Hệ thống không khả dụng (khi PL > AL)
- (b) Một sự kiện toàn vẹn xảy ra (khi AL > PL)

3. CÁC PHÉP ĐO TỪ MÁY THU ĐẾN VỆ TINH

Sử dụng kỹ thuật PPP để cải thiện độ chính xác trong định vị, để làm được điều đó đầu tiên là việc sử dụng các mô tả chính xác về quỹ đạo vệ tinh và hoạt động đồng hồ của chúng so với những mô tả có trong các thông báo điều hướng. Dữ liệu đó được cung cấp bởi dịch vụ GNSS quốc tế (IGS) thông qua mạng lưới theo dõi và trung tâm phân tích toàn cầu của nó.

Giờ đây, đúng là người dùng có thể có được độ chính xác cao trong định vị GPS bằng cách sử dụng kỹ thuật vi sai trong đó dữ liệu từ một hoặc nhiều trạm gốc hoặc trạm tham chiếu được kết hợp với dữ liệu từ máy thu người dùng. Tuy nhiên, bằng cách sử dụng các sản phẩm chính xác và mô hình GPS, kỹ thuật PPP không còn yêu cầu về trạm gốc được truy cập trực tiếp. Ngoài ra PPP sử dụng các

phép đo pha sóng mang thay vì các khoảng cách giả vì các phép đo pha sóng mang thường có độ nhiễu rất thấp so với phép đo khoảng cách giả, các phép đo sóng mang có độ chính xác tốt hơn so với phép đo khoảng giả. Các phép đo mã và pha được tính toán như sau:

$$P_{r,i}^s = \rho_r^s + c\Delta t + T_r^s + I_r^s + b_i^s + b_{r,i} + E_{r,i}^s \quad (1)$$

$$P_{r,j}^s = \rho_r^s + c\Delta t + T_r^s + \frac{f_i^2}{f_j^2} I_r^s + b_j^s + b_{r,j} + E_{r,j}^s \quad (2)$$

$$L_{r,i}^s = \lambda_i \varphi_{r,i}^s = \rho_r^s + c\Delta t + T_r^s - I_r^s + \lambda_i N_{r,i}^s + \lambda_i W_r^s + \beta_i^s + \beta_{r,i} + \varepsilon_{r,i}^s \quad (3)$$

$$L_{r,j}^s = \lambda_j \varphi_{r,j}^s = \rho_r^s + c\Delta t + T_r^s - \frac{f_i^2}{f_j^2} I_r^s + \lambda_j N_{r,j}^s + \lambda_j W_r^s + \beta_j^s + \beta_{r,j} + \varepsilon_{r,j}^s \quad (4)$$

Trong đó:

$P_{r,i}^s, P_{r,j}^s$: Phép đo mã tại máy thu r từ vệ tinh s trên tần số i hoặc j (m);

$L_{r,i}^s, L_{r,j}^s$: Phép đo pha tại máy thu r từ vệ tinh s trên tần số i hoặc j (m);

ρ_r^s : Khoảng cách giữa máy thu và vệ tinh (m);

Δt ($\Delta t = \delta t_r - \delta t^s$): Hiệu chỉnh đồng hồ giữa vệ tinh (δt^s) và máy thu δt_r ;

T_r^s : Độ trễ của tầng đối lưu (m);

I_r^s : Độ trễ tầng điện ly (m);

$E_{r,i}^s, E_{r,j}^s$: Các lỗi đo mã tại máy thu r từ vệ tinh s trên tần số i hoặc j (m) bao gồm tất cả các nguồn lỗi mã: đa đường và nhiễu;

f_i, f_j : Tần số sóng mang i hoặc j (Hz);

c: Tốc độ ánh sáng trong chân không (m/s);

λ_i, λ_j : Bước sóng của tần số sóng mang i hoặc j (m);

$\varphi_{r,i}^s, \varphi_{r,j}^s$: Phép đo pha sóng mang tại máy thu r từ vệ tinh s trên tần số i hoặc j (chu kỳ);

$N_{r,i}^s, N_{r,j}^s$: Độ mơ hồ pha sóng mang số nguyên tại máy thu r từ vệ tinh s trên tần số i hoặc j;

W_r^s : Chu kỳ pha sóng mang ảnh hưởng của gió;

b^s, b_r : Độ lệch pha mã của vệ tinh và máy thu (m);

β^s, β_r : Độ lệch pha sóng mang của vệ tinh và máy thu (m);

$\varepsilon_{r,i}^s, \varepsilon_{r,j}^s$: là sai số đo pha sóng mang tại máy thu r từ vệ tinh s trên tần số i hoặc j (m) bao gồm tất cả các nguồn lỗi pha, độ lệch tâm pha và tâm pha còn lại chưa được hiệu chỉnh biến thiên, đa đường và nhiễu.

Từ bốn phương trình (1)-(4), có thể hình thành tổ hợp tuyến tính Melbourne-Wübbena có đặc tính giảm nhiễu

đo lường và loại bỏ mọi số hạng hình học, tầng điện ly và đồng hồ:

$$\begin{aligned}
 MW_r^S &= \lambda_{wl} \varphi_r^S \\
 &= \left(\frac{f_i}{f_i - f_j} L_{r,i}^S - \frac{f_j}{f_i - f_j} L_{r,j}^S \right) - \left(\frac{f_i}{f_i - f_j} P_{r,i}^S + \frac{f_j}{f_i - f_j} P_{r,j}^S \right) \\
 &= \lambda_{wl} \left(N_{r,i}^S - N_{r,j}^S - \mu^S + \mu_r(t) \right) \\
 &= \lambda_{wl} \left(N_{wl,r}^S - \mu^S + \mu_r(t) \right) \quad (5)
 \end{aligned}$$

Trong đó:

MW_r^S : Tổ hợp tuyến tính Melbourne-Wübbena tại máy thu r từ vệ tinh s (m);

λ_{wl} ($\lambda_{wl} = c/f_i - f_j$) = $\lambda_i \lambda_j / (\lambda_j - \lambda_i)$: Bước sóng làn rộng (WL) (m);

$N_{wl,r}^S$ ($N_{wl,r}^S = N_{r,i}^S - N_{r,j}^S$): Độ mơ hồ WL tại máy thu r từ vệ tinh s;

μ^S : Độ trễ đến từ vệ tinh;

$\mu_r(t)$: Độ trễ đến từ máy thu.

Người ta quan sát thấy rằng đối với hệ thống GPS, μ^S ổn định trong thời gian dài và có thể được coi là không đổi trong ít nhất một ngày [15]. Đối với hệ thống Galileo, chúng ổn định trong thời gian dài hơn; lên tới hàng tháng [16]. Độ trễ $\mu_r(t)$ được coi là thay đổi theo thời gian vì nó phụ thuộc vào hoạt động của mỗi máy thu.

Sau khi xác định được $N_{wl,r}^S$, bước tiếp theo là hình thành một tổ hợp tuyến tính không có tầng điện ly có đặc tính triệt tiêu bậc một của các hiệu ứng tầng điện ly. Những sự kết hợp này sử dụng phương trình ở hai tần số, trong đó áp dụng cho chúng một hệ số: α_i đối với tần số i và α_j đối với tần số j tương ứng [17].

$$\alpha_i = \frac{f_j^2}{f_i^2 - f_j^2} \quad (6)$$

$$\alpha_j = \frac{-f_i^2}{f_i^2 - f_j^2} \quad (7)$$

Sử dụng các hệ số và phương trình (6) và (7) ở trên, các tổ hợp tuyến tính không có tầng điện ly đối với pha mã và sóng mang trở thành:

$$P_{r,IF}^S = \alpha_i P_{r,i}^S + \alpha_j P_{r,j}^S = \rho_r^S + c\Delta t + T_r^S + E_{r,IF}^S \quad (8)$$

$$\begin{aligned}
 L_{r,IF}^S &= \alpha_i L_{r,i}^S + \alpha_j L_{r,j}^S \\
 &= \rho_r^S + c\Delta t + T_r^S + \frac{c}{f_i^2 - f_j^2} (f_i N_{r,i}^S - f_j N_{r,j}^S) \\
 &\quad + \frac{c}{f_i^2 - f_j^2} (f_i W_r^S - f_j W_r^S) + \varepsilon_{r,IF}^S \\
 &= \rho_r^S + c\Delta t + T_r^S + \lambda_{nl} N_{r,i}^S + \frac{\lambda_{nl} \lambda_{wl}}{\lambda_j} N_{wl,r}^S \\
 &\quad + \lambda_{nl} W_r^S + \varepsilon_{r,IF}^S \quad (9)
 \end{aligned}$$

Trong đó:

$P_{r,IF}^S$: Phép đo mã phi tầng điện ly tại máy thu r từ vệ tinh s (m);

$E_{r,IF}^S$: Lỗi đo mã phi tầng điện ly tại máy thu r từ vệ tinh s (m);

$L_{r,IF}^S$: Phép đo sóng mang không có tầng điện ly tại máy thu r từ vệ tinh s (m);

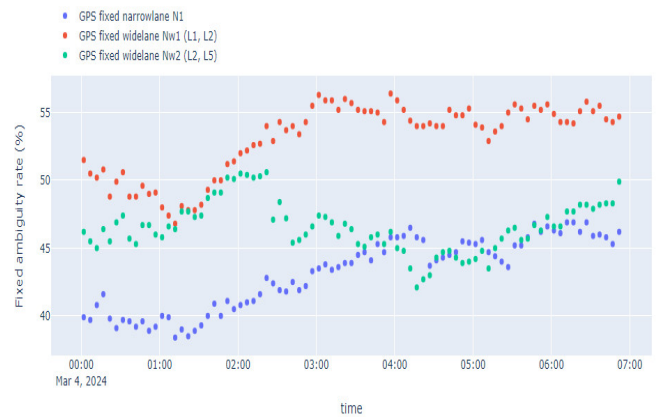
$\varepsilon_{r,IF}^S$: Sai số đo sóng mang không có tầng điện ly tại máy thu r từ vệ tinh s (m);

λ_{nl} ($\lambda_{nl} = c/f_i + f_j$) = $\lambda_i \lambda_j / (\lambda_i + \lambda_j)$: Bước sóng làn đường hẹp (NL) (m).

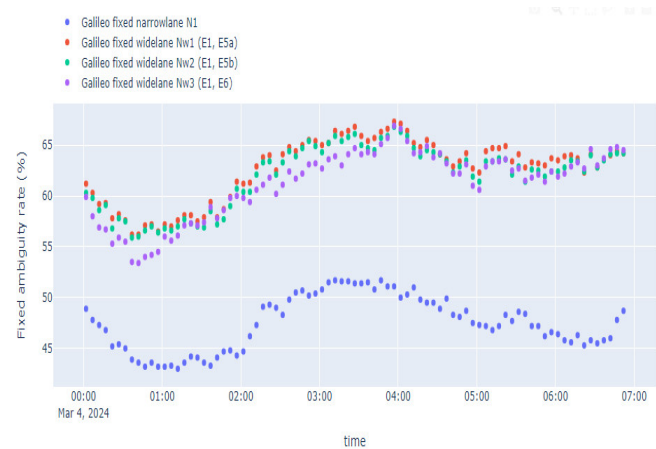
Bảng 3. Các giá trị cho bước sóng làn rộng và làn hẹp

Tần số GNSS	λ_{wl} (m)	λ_{nl} (m)
GPS (L1, L2)	0,862	0,107
Galileo (E1, E5a)	0,751	0,109

Các quan sát về tỷ lệ mơ hồ cố định đối với GPS và Galileo như thể hiện trên hình 2, 3.



Hình 2. Tỷ lệ mơ hồ cố định chỉ có GPS



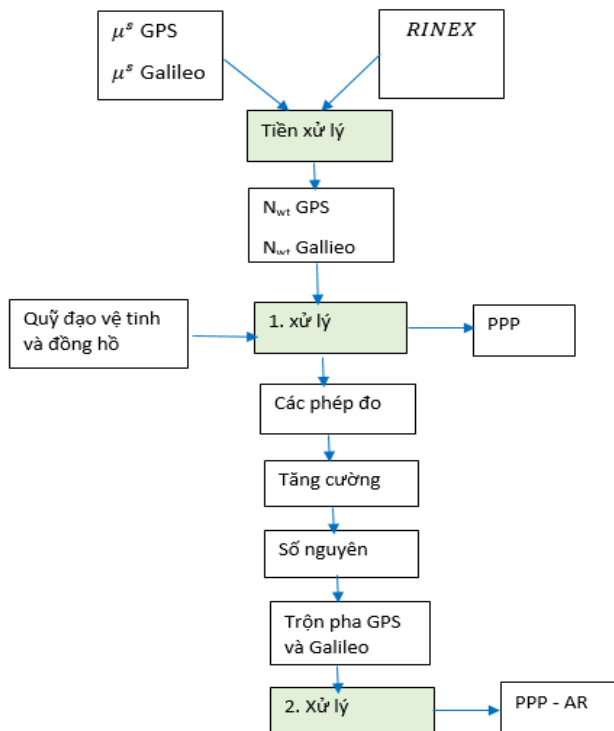
Hình 3. Tỷ lệ mơ hồ cố định chỉ có Galileo

Đây là một trong hai loại đo lường chính được sử dụng bởi tất cả các máy thu GNSS. Về cơ bản, nó là pha tức thời

của sóng mang tín hiệu GNSS, một sóng điện từ cố định biên độ và tần số (khi được truyền đi), được điều chế (tùy chọn) bằng một mã khoảng cách và một tín hiệu hướng. Nó được đo bằng radian, độ hoặc chu kỳ và có thể được chuyển đổi thành độ sai lệch phạm vi giữa anten của máy thu và vệ tinh bằng cách nhân giá trị theo chu kỳ với bước sóng mang tính bằng mét [14].

4. GIẢI PHÁP MULTI - GNSS KẾT HỢP

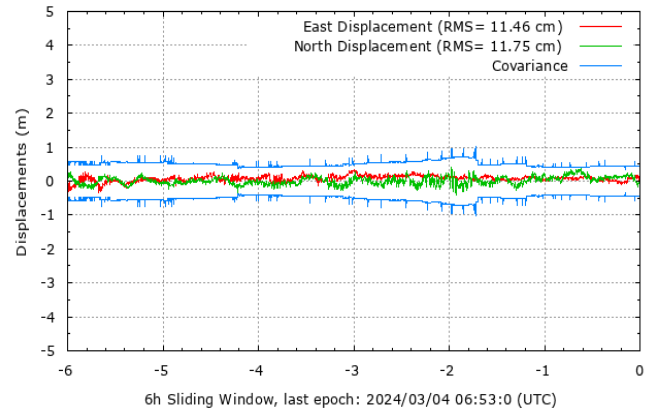
Trong những năm qua, nhiều kỹ thuật đã được phát triển để sử dụng các phép đo pha sóng mang để định vị, đáng chú ý nhất là trong định vị vi sai trong đó một hoặc nhiều trạm tham chiếu được sử dụng để định vị người dùng máy thu. Tuy nhiên, một vấn đề tiếp tục cản trở việc áp dụng rộng rãi hơn của nó là thời gian hội tụ cần thiết để sự mơ hồ của pha sóng mang được giải quyết hoàn toàn sao cho ngưỡng độ chính xác 10cm [10]. Vì vậy xem xét việc sử dụng các phép đo từ sự kết hợp GPS và Galileo có thể hữu ích.



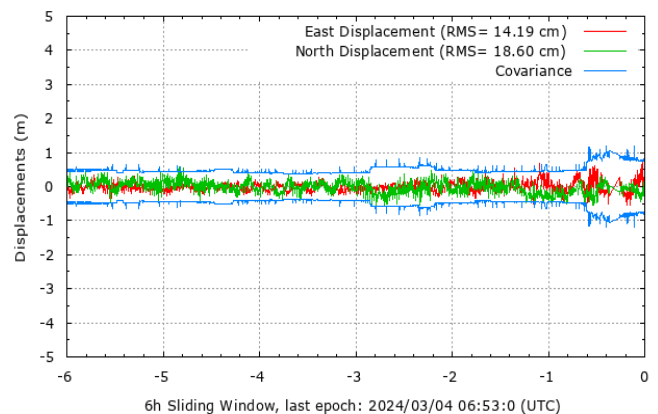
Hình 4. Quy trình thực hiện định vị điểm chính xác (PPP) và PPP-AR của giải pháp kết hợp (GPS + Galileo)

Hình 4 đưa ra hình ảnh tổng quan về phương pháp PPP và PPP-AR được sử dụng. IGS biên soạn 1 bộ dữ liệu hiệu chỉnh về trung tâm pha anten (APC), biến thiên trung tâm pha (PCV) cho trạm mặt đất và vệ tinh, được cung cấp dưới tệp ANTEX. Đây là những dữ liệu quan trọng để tính toán khoảng cách giữa vệ tinh và máy thu tần số. Ban đầu, cần có các μ^s cùng với tệp RINEX của trạm. Giai đoạn tiền

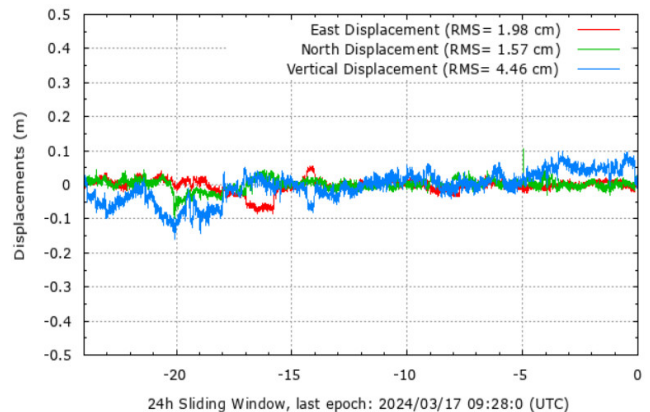
xử lý sử dụng MW_r^s quan sát được hình thành từ các quan sát RINEX riêng lẻ và độ lệch GPS và Galileo μ^s để tìm $N_{w,l,r}^s$. Sau đó, các sản phẩm $N_{w,l,r}^s$ quỹ đạo vệ tinh và đồng hồ quỹ đạo được sử dụng làm đầu vào để hình thành các phép đo cho quá trình xử lý đầu tiên. Hệ phương trình được giải cho giải pháp PPP. Trong trường hợp giải pháp PPP-AR, quy trình tiếp tục sau khi đã cố định $N_{r,i}^s$ thành số nguyên. Trong quá trình xử lý thứ hai này chủ yếu là phép đo sóng mang không có sự mơ trong tầng điện ly được sử dụng cho GPS và Galileo.



Hình 5. Giải pháp PPP chỉ sử dụng GPS



Hình 6. Giải pháp PPP chỉ sử dụng Galileo



Hình 7. Giải pháp PPP-AR sử dụng GPS - Galileo

Hình 5, 6, 7 đã đưa ra giải pháp PPP và PPP-AR dành cho chỉ Galileo, chỉ GPS và sự kết hợp của chúng. Có thể thấy rằng mức độ chính xác của các giải pháp chỉ dùng Galileo và GPS gần như tương đương nhau. Nhận thấy một số điểm bất thường nhất định trong PPP gần như biến mất trong giải pháp PPP-AR. Một số bước nhảy trong giải pháp PPP không còn xuất hiện khi thực hiện xử lý PPP-AR. Chế độ PPP-AR được thể hiện mượt mà và tuyến tính hơn chế độ PPP. Điều này có nghĩa là việc kết hợp GPS và Galileo sẽ cải thiện hiệu suất định vị ở chế độ PPP.

5. KẾT LUẬN

Chúng tôi đã nghiên cứu hiệu suất của PPP và PPP-AR bằng GPS, Galileo và các phép đo kết hợp của hai hệ thống trên một mạng toàn cầu. Các giải pháp Multi - GNSS cho kết quả tốt hơn nhiều so với hai hệ thống sử dụng riêng biệt. Kết hợp nhiều chòm sao và sử dụng nhiều tần số cho phép để cải thiện hiệu suất giải quyết sự mơ hồ. Kết hợp Galileo và GPS cho phép các giải pháp PPP và PPP-AR ở cấp độ cm và hội tụ đầy đủ trong vòng một vài chu kỳ. Chúng tôi hy vọng rằng tính mạnh mẽ và chính xác của của giải pháp trên sẽ được cải thiện trong tương lai, với sự tăng số lượng vệ tinh đa tần số và trạm mặt đất, các tần số bổ sung được cung cấp bởi BeiDou và các hệ thống vệ tinh sẽ tăng tốc độ hội tụ hơn nữa. Trong vòng một vài năm, PPP rất có thể trở thành một phương thức thiết thực thay thế RTK cho nhiều ứng dụng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. J. Kouba, F. Lahaye, P. Tétreault, *Precise Point Positioning*. Chapter 25 in Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems, edited by P.J.G. Teunissen and O. Montenbruck, published by Springer International Publishing AG, Cham, Switzerland, 2017.
- [2]. O. Montenbruck, C. Rizos, R. Weber, G. Weber, R. Neilan, U. Hugentobler, "Getting a Grip on Multi-GNSS - The International GNSS Service MGEX Campaign," *GPS World*, 24, 7, 44- 49, 2013.
- [3]. Zumbege J. F., Heflin M. B., Jefferson D. C., Watkins M. M., Webb F. H., "Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks," *J. Geophys. Res.*, 102, 5005-5017, 1997.
- [4]. Lescarmonnier L., Legrésy B., Coleman R., Perosanz F., Mayet C., Testut L., "Vibrations of Mertz Glacier ice tongue, East Antarctica," *J. Glaciol.*, 58, 665-676, 2012.
- [5]. Fund F., Perosanz F., Testut L., Loyer S., "An Integer Precise Point Positioning technique for sea surface observations using a GPS buoy," *Adv. Space Res.*, 51, 1311-1322, 2013.
- [6]. Petit G., Kanj A., Loyer S., Delporte J., Mercier F., Perosanz F., "1 × 10–16 frequency transfer by GPS PPP with integer ambiguity resolution," *Metrologia*, 52, 301-309, 2015.

[7]. Benedetti E., Branzanti M., Biagi L., Colosimo G., Mazzoni A., Crespi M., "Global Navigation Satellite Systems seismology for the 2012 Mw 6.1 Emilia earthquake: exploiting the VADASE algorithm," *Seismological Research Letters*, 85, 649-656, 2014.

[8]. Xiaohong Zhang, Xiaodong Ren, Jun Chen, Xiang Zuo, Dengkui Mei, Wanke Liu, "Investigating GNSS PPP-RTK with external ionospheric constraints," *Satell Navig* 3, 6, 2022. <https://doi.org/10.1186/s43020-022-00067-1>.

[9]. Baocheng Zhang, Pengyu Hou, Jiuping Zha, Teng Liu, " PPP-RTK functional models formulated with undifferenced and uncombined GNSS observations," *Satell Navig*, 3, 2022. <https://doi.org/10.1186/s43020-022-00064-4>.

[10]. Pan Li, Bobin Cui, Jiahuan Hu, Xuexi Liu, Xiaohong Zhang, Maorong Ge, Harald Schuh, "PPP-RTK considering the ionosphere uncertainty with cross-validation," *Satell Navig*, 3, 2022. <https://doi.org/10.1186/s43020-022-00071-5>.

[11]. Bofeng Li, Haibo Ge, Yuhang Bu, Yanning Zheng, Leitong Yuan, "Comprehensive assessment of real-time precise products from IGS analysis centers," *Satell Navig*, 3, 2022. <https://doi.org/10.1186/s43020-022-00074-2>

[12]. Chen J., Wang J., Zhang Y., Yang S., Chen Q., Gong X., "Modeling and assessment of GPS/BDS combined precise point positioning," *Sensors*, 16, 1151, 2016.

[13]. P. J. G. Teunissen, *Carrier Phase Integer Ambiguity Resolution*. Chapter 23 in Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems, edited by P.J.G. Teunissen and O. Montenbruck, published by Springer International Publishing AG, Cham, Switzerland, 2017.

[14]. Qile Zhao, Jing Guo, Sijing Liu, Jun Tao, Zhigang Hu, Gang Chen, "A variant of raw observation approach for BDS/GNSS precise point positioning with fast integer ambiguity resolution," *Satell Navig*, 2, 29, 2021. <https://doi.org/10.1186/s43020-021-00059-7>.

[15]. Mercier F., Laurichesse D., "Receiver/Payload hardware biases stability requirements for undifferenced Wideband ambiguity blocking," In *Proceedings of the Scientific and Fundamental Aspects of the Galileo Program*, Toulouse, France, 1-4 October 2007.

[16]. Katsigianni G., Perosanz F., Loyer S., Gupta M., "Galileo millimeter-level kinematic precise point positioning with ambiguity resolution," *Earth Planets Space*, 71-76, 2019.

[17]. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Wasle E., *GNSS-Global Navigation Satellite Systems GPS, GLONASS, Galileo and More*. Springer: Vienna, Austria, p. 59, 2008.

AUTHORS INFORMATION

Nguyen Mai Anh¹, Tran Quang Bach¹, Nguyen Phuong Anh²

¹Faculty of Electronic Engineering, University of Economics - Technology for Industries, Vietnam

²Hanoi College of Electronic and Electro - Refrigeratory Technics, Vietnam