



Original Article

# Application of GNSS Reflectometry in Water Level Monitoring using Low-cost GNSS Antenna: A Case Study in Tam Giang Lagoon, Thua Thien Hue Province

Vu Phuong Lan<sup>1</sup>, Ha Minh Cuong<sup>1,2,\*</sup>, Nguyen Phuong Bac<sup>2</sup>,  
Dinh Thi Bao Hoa<sup>1</sup>, Pham Van Manh<sup>1</sup>, Doan Quang Cuong<sup>1</sup>, Nguyen Huu Duy<sup>1</sup>

<sup>1</sup>VNU University of Science, 334 Nguyen Trai, Thanh Xuan, Hanoi, Vietnam

<sup>2</sup>VNU University of Engineering and Technology, 144 Xuan Thuy, Cau Giay, Hanoi, Vietnam

Received 07 June 2022

Revised 22 August 2022; Accepted 09 September 2022

**Abstract:** Extreme hydrological events become increasingly unpredictable due to climate change and sea-level rise, highlighting the importance of coastal sea level monitoring. This study aims to develop a Global Navigation Satellite System (GNSS) reflectometry technology that uses low-cost multi-frequency antennas to measure water levels. A multi-frequency GNSS antenna was installed in the Tam Giang lagoon area, Thua Thien Hue province, to collect data of GPS/GLONASS/Galileo/Beidou satellites at 1Hz from April 10 to April 29, 2022. Water level elevation is calculated from GNSS reflectometry data using Interference Pattern Technical (IPT) based on Signal-to-Noise Ratio (SNR). After filtering, the water level results are validated by data from the water level sensor located in the same location. The Root Mean Square Error between the water level from the GNSS - Reflectometry (GNSS-R) and the in situ measurement is 0,049 m and the correlation coefficient reaches 0,93 when combining different frequencies. The study results demonstrate that the multi-frequency GNSS-R station can be used as an additional method to measure water levels with an accuracy comparable to that of a standard tidal gauge. In addition, the study results also show the sensitivity of the GNSS reflected signal to weather conditions and the state of the sea surface, which is the basis for forecasting and early warning of storm surge extremes from GNSS reflectometry data.

**Keywords:** GNSS-R, IPT, Tam Giang lagoon, water level.

\* Corresponding author.

E-mail address: [cuonghm@vnu.edu.vn](mailto:cuonghm@vnu.edu.vn)

<https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuées.4878>

# Ứng dụng công nghệ phản xạ GNSS-R trong đo cao mực nước sử dụng ăng-ten GNSS giá thành thấp: thử nghiệm tại phá Tam Giang, tỉnh Thừa Thiên Huế

Vũ Phương Lan<sup>1</sup>, Hà Minh Cường<sup>1,2,\*</sup>, Nguyễn Phương Bắc<sup>2</sup>,  
Đinh Thị Bảo Hoa<sup>1</sup>, Phạm Văn Mạnh<sup>1</sup>, Đoàn Quang Cường<sup>1</sup>, Nguyễn Hữu Duy<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội,  
334 Nguyễn Trãi, Thanh Xuân, Hà Nội, Việt Nam

<sup>2</sup>Trường Đại học Công nghệ, Đại học Quốc gia Hà Nội, 144 Xuân Thủy, Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

Nhận ngày 07 tháng 6 năm 2022

Chỉnh sửa ngày 22 tháng 8 năm 2022; Chấp nhận đăng ngày 09 tháng 9 năm 2022

**Tóm tắt:** Các hiện tượng thủy văn cực đoan ngày càng diễn biến khó lường do tác động của biến đổi khí hậu và mực nước biển dâng cao cho thấy sự cần thiết phải theo dõi mực nước biển. Mục tiêu của nghiên cứu này là phát triển công nghệ phản xạ GNSS sử dụng ăng-ten đa tần giá thành thấp để đo cao mực nước. Một trạm thu GNSS đa tần đã được lắp đặt tại khu vực phá Tam Giang, tỉnh Thừa Thiên Huế để thu dữ liệu của các vệ tinh GPS/GLONASS/Galileo/Beidou ở tần số 1Hz từ ngày 10 tháng 4 đến ngày 29 tháng 4 năm 2022. Độ cao mực nước được tính từ dữ liệu phản xạ GNSS-R sử dụng kỹ thuật mẫu giao thoa Interference Pattern Technical (IPT) dựa trên tín hiệu nhiễu Signal-to-Noise Ratio (SNR). Độ cao mực nước sau khi lọc nhiễu được xác nhận bằng dữ liệu từ cảm biến đo mực nước đặt cùng vị trí. Sai số trung phương giữa mực nước từ GNSS-R và phép đo tại chỗ là 0,049 m và hệ số tương quan đạt 0,93 khi kết hợp các tần số khác nhau. Kết quả của nghiên cứu đã chứng minh trạm GNSS-R đa tần có thể được sử dụng như một phương pháp bổ sung để đo mực nước với độ chính xác tương đương đồng hồ đo thủy triều tiêu chuẩn. Ngoài ra, kết quả của nghiên cứu còn cho thấy sự nhạy cảm của tín hiệu phản xạ GNSS với điều kiện thời tiết và trạng thái của bề mặt nước biển, là cơ sở cho việc dự báo và cảnh báo sớm các sự kiện nước dâng cực đoan từ dữ liệu phản xạ GNSS-R.

*Từ khóa:* GNSS-R, IPT, phá Tam Giang, độ cao mực nước.

## 1. Mở đầu

Hiện nay, mực nước biển trung bình toàn cầu đang tăng với tốc độ  $3,58 \pm 0,48$  mm/năm, chủ yếu do sự ấm lên của đại dương (sự giãn nở nhiệt của nước) và quá trình tan băng ở hai cực (IPCC, 2019). Mực nước biển dâng cao cùng với biến đổi khí hậu làm gia tăng các hiện tượng thủy văn

cực đoan (như bão, lũ lụt, triều cường,...) ảnh hưởng lớn đến sinh kế, cơ sở hạ tầng và môi trường sống, đặc biệt là vùng ven biển [1, 2]. Do đó, mạng lưới cảm biến mực nước ven biển là cần thiết để xác định nhanh chóng sự thay đổi của mực nước biển giúp mô hình hóa chính xác hơn các hiện tượng thủy văn cực đoan cũng như lập kế hoạch giảm thiểu rủi ro và thích ứng

\* Tác giả liên hệ.

Địa chỉ email: cuonghm@vnu.edu.vn

<https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.4878>

[3, 4]. Rất nhiều các thiết bị đã được sử dụng để theo dõi mực nước với độ chính xác và chi phí khác nhau nhưng chủ yếu sử dụng các trạm đo thủy triều ven biển. Hệ thống các trạm quan sát mực nước biển toàn cầu GLOSS (<https://www.sonel.org>) sử dụng máy đo âm thanh hoặc máy đo áp suất để theo dõi mực nước với độ chính xác vài cm và có chi phí tương đối cao từ 1000 đến 10000 USD. Tuy nhiên, đồng hồ đo áp suất có thể bị trôi theo thời gian [5, 6] và đồng hồ đo sóng âm khó lắp đặt ở các vùng sâu vùng xa. Thiết bị đo radar và đồng hồ đo bọt khí cũng thường được sử dụng để theo dõi mực nước nhưng những dụng cụ này đắt hơn so với bộ chuyển đổi áp suất và đồng hồ đo sóng âm. Mặc dù các trạm này cho phép đo liên tục nhưng hạn chế về mặt không gian và chi phí lớn. Công nghệ đo cao vệ tinh ra đời và phát triển mạnh từ những năm 1990 mở ra kỷ nguyên đo độ cao chính xác với nguồn dữ liệu mở. Công nghệ này đánh dấu một bước ngoặt trong các nghiên cứu về mực nước đại dương và các lưu vực sông lớn [7-9]. Tuy nhiên, hạn chế của phương pháp là chu kỳ lặp dài và gặp nhiều bất lợi khi nghiên cứu vùng nước trong lục địa và ven biển do ảnh hưởng của đất liền. Để khắc phục hạn chế của những phương pháp trên, mạng lưới trạm thu của hệ thống vệ tinh dẫn đường toàn cầu (GNSS) ven biển ở độ cao dưới 300 m đã được phát triển với mục đích theo dõi sự thay đổi mực nước bằng cách ghi lại các tín hiệu phản xạ từ mặt biển [10-12], hay còn được gọi là công nghệ phản xạ GNSS (GNSS-R). Công nghệ phản xạ GNSS-R được ứng dụng trong nhiều nghiên cứu khác như theo dõi biến đổi trữ lượng nước trên lục địa [13, 14], đo độ sâu của tuyết [15], đo độ ẩm đất [16, 17], nước dâng do bão [18, 19] và tính hàm lượng nước của thảm thực vật [20]. Trong các nghiên cứu trước đây, phép đo mực nước truy xuất từ GNSS-R có thể đạt độ chính xác vài cm [21-27]. Chi phí để có một trạm đo mực nước GNSS tiêu chuẩn cũng tương đương với một trạm đo sử dụng cảm biến âm thanh hoặc áp suất nhưng không bị các vấn đề tương tự và có ưu điểm là nhỏ gọn, dễ lắp đặt. Gần đây, các thiết bị GNSS chi phí thấp hơn được sử dụng để theo dõi mực nước như ăng-ten GNSS tích hợp trên máy

tính bằng sử dụng phương pháp phân tích quang phổ dựa trên biểu đồ Lomb – Scargle [28]. Các ăng-ten GNSS đa tần chi phí thấp được sử dụng bởi [29, 30] đã cho thấy là phù hợp hơn so với các ăng-ten tiêu chuẩn trắc địa vì các ăng-ten tiêu chuẩn trắc địa được thiết kế để giảm nhiễu đa đường (tín hiệu được sử dụng để truy xuất độ cao mực nước). Mặt khác, các ăng-ten GNSS đa tần sử dụng mô hình khuếch đại đẳng hướng nên có thể sử dụng các tín hiệu từ vệ tinh GNSS ở các góc cao vệ tinh lớn trong khi các ăng-ten tiêu chuẩn trắc địa chỉ sử dụng tín hiệu ở góc cao vệ tinh thấp để thực hiện phép đo mực nước [11, 12]. Điều này đặc biệt hữu ích vì tín hiệu ở góc cao vệ tinh lớn ít bị ảnh hưởng bởi tầng đối lưu (hoặc khúc xạ khí quyển) so với tín hiệu ở góc cao vệ tinh thấp [31-33]. Theo [33], độ lệch đo độ cao do ảnh hưởng của tầng đối lưu thay đổi từ 3 đến 5 cm đối với ăng-ten cao hơn 10 m so với bề mặt phản xạ khi sử dụng góc cao vệ tinh lớn hơn 20°. Purnell và cộng sự [27] đã sử dụng nhiều ăng-ten GNSS đa tần chi phí thấp đặt cùng vị trí để loại bỏ ảnh hưởng của nhiễu ngẫu nhiên trong tín hiệu SNR và cải thiện độ chính xác của phép đo mực nước với chi phí chỉ bằng một phần nhỏ so với chi phí của một ăng-ten tiêu chuẩn trắc địa.

Hiện nay, ở Việt Nam, việc giám sát sự thay đổi mực nước chủ yếu sử dụng dữ liệu đo tại các trạm thủy văn/thủy triều truyền thống. Các trạm này sử dụng hệ thống thiết bị công kênh và đội ngũ nhân viên vận hành với chi phí không nhỏ. Tuy nhiên, dữ liệu thu được chỉ mang tính cục bộ tại vị trí đo. Tính đến nay, mới chỉ có một vài nghiên cứu ứng dụng tín hiệu phản xạ GNSS-R trong việc đo cao mực nước tại Việt Nam [18, 34, 24]. Các nghiên cứu này đều sử dụng ăng-ten GNSS tiêu chuẩn của các hãng như Leica, Trimble với chi phí lớn. Vì vậy, trong nghiên cứu này, chúng tôi đã thử nghiệm sử dụng một ăng-ten GNSS đa tần chi phí thấp để đo cao mực nước, thực nghiệm tại phá Tam Giang - tỉnh Thừa Thiên Huế vào tháng 4 năm 2022. Nghiên cứu đã phát triển một hệ thống phần cứng và phần mềm cho cảm biến GNSS-R dựa trên SNR của một ăng-ten chi phí thấp và chứng minh hiệu quả của nó để đo mực nước. Các kết quả ban đầu

cho thấy sự tương quan tốt giữa số liệu thực đo từ cảm biến và các ước tính dựa trên GNSS-R. Hiện tại, trạm vẫn đang hoạt động ổn định để theo dõi mực nước liên tục theo thời gian.

## 2. Khu vực nghiên cứu và dữ liệu sử dụng

### 2.1. Khu vực nghiên cứu

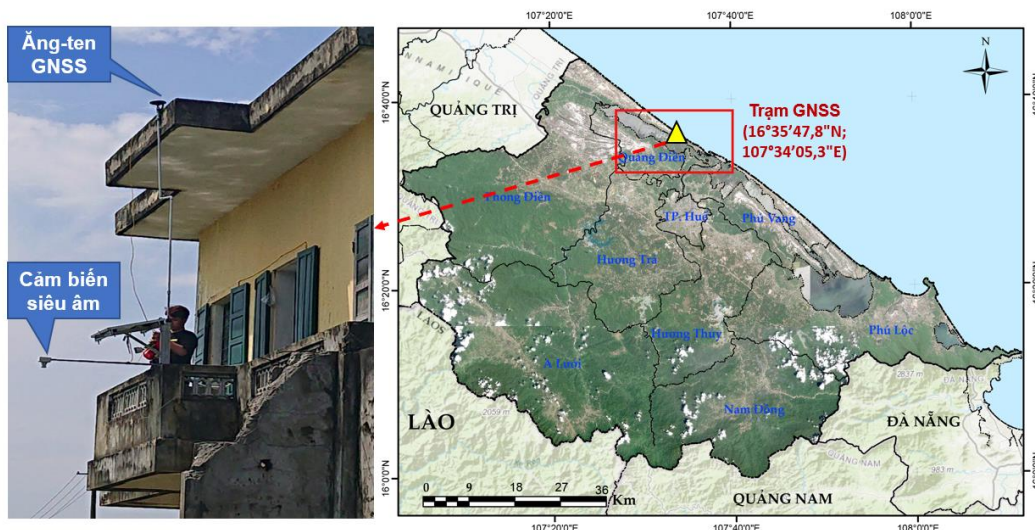
Khu vực nghiên cứu được lựa chọn là Phá Tam Giang kéo dài từ cửa sông Ô Lâu đến cầu Thuận An với chiều dài 25 km, là một phá nằm trong hệ đầm phá Tam Giang - Cầu Hai, thuộc tỉnh Thừa Thiên Huế. Diện tích mặt nước khoảng 52 km<sup>2</sup>, là một phá lớn của Việt Nam, chiếm khoảng 11% diện tích đầm phá ven bờ của cả nước. Phá Tam Giang có độ sâu từ 2 đến 7 m, có lạch sâu đến 10 m [35]. Khí hậu được phân thành hai mùa rõ rệt: Mùa khô từ tháng 3 đến tháng 8, chịu ảnh hưởng của gió Tây Nam nên không khí khô nóng và oi bức. Mùa mưa từ tháng 9 năm trước đến tháng giêng năm sau và bão thường xuất hiện vào khoảng tháng 9-10 hàng năm. Do vị trí đặc biệt, đầm phá Tam Giang thường xuyên chịu ảnh hưởng trực tiếp của các trận bão lũ đổ bộ vào tỉnh Thừa Thiên Huế. Theo dữ liệu thống kê của tỉnh năm 2021, từ năm 1952 đến 2020 đã có 47 trận bão và áp thấp nhiệt đới ảnh hưởng

trực tiếp đến tỉnh Thừa Thiên Huế, trung bình mỗi năm có 4-5 trận lũ, trong đó có 2-3 trận trên báo động III, gây nhiều thiệt hại về người và tài sản.

### 2.2. Dữ liệu sử dụng

#### 2.2.1. Dữ liệu GNSS-R từ máy thu đa tần chi phí thấp

Trạm GNSS được lắp đặt tại đầm phá Tam Giang có tọa độ  $16^{\circ}35'47,8''\text{N}$ ,  $107^{\circ}34'05,3''\text{E}$  (dữ liệu thu từ ngày 10/04/2022 đến ngày 29/04/2022 ở tần số 1 Hz). Ăng-ten được lắp đặt ở độ cao 7,84 m so với mực nước biển (Hình 1). Thiết bị sử dụng là bộ thu GNSS Alpha+30 Polaris chi phí thấp (giá thành chỉ bằng 1/10 so với các thiết bị đo tiêu chuẩn), có khả năng thu nhận tín hiệu đa tần từ các hệ thống vệ tinh dẫn đường hiện có (GPS, GLONASS, Galileo, /Compass/Beidou), hai hệ thống dẫn đường khu vực IRNSS, QZSS và SBAS). GNSS Alpha+30 Polaris cho phép thu tối đa 230 kênh ở một hoặc cả hai băng tần L1 và L2 với độ chính xác tương đối cao. Ngoài ra thiết bị còn tiêu thụ nguồn điện thấp 5V, tiết kiệm năng lượng với tốc độ cập nhật tới 10 Hz. Dữ liệu nhật ký của máy thu GNSS Alpha+30 Polaris hỗ trợ các chuẩn phổ biến như RTCM3 và NMEA và SkyTraQ.



Hình 1. Khu vực nghiên cứu và vị trí trạm thu GNSS tại đầm phá Tam Giang, Thừa Thiên Huế ( $16^{\circ}35'47,8''\text{N}$ ;  $107^{\circ}34'05,3''\text{E}$ ).

2.2.2. Dữ liệu mực nước từ cảm biến

Dữ liệu mực nước tham chiếu được thu thập cùng thời điểm với dữ liệu GNSS-R (tháng 4 năm 2022) dựa trên kỹ thuật đo khoảng cách bằng sóng siêu âm sử dụng mô-đun ME007-ULA lắp đặt tại trạm GNSS-R. Mô-đun này có khả năng chống bụi, chống nước, thích hợp cho việc đo đạc trong thời gian dài liên tục ở môi trường ven biển. ME007-ULA đo ở tần số 40KHz, và được cài đặt để đo cao mực nước với độ chính xác đã được kiểm nghiệm. Tất cả các dữ liệu sử dụng trong thực nghiệm và kết quả được quy về chuẩn thời gian (Timestamp) của GPS.

3. Phương pháp nghiên cứu

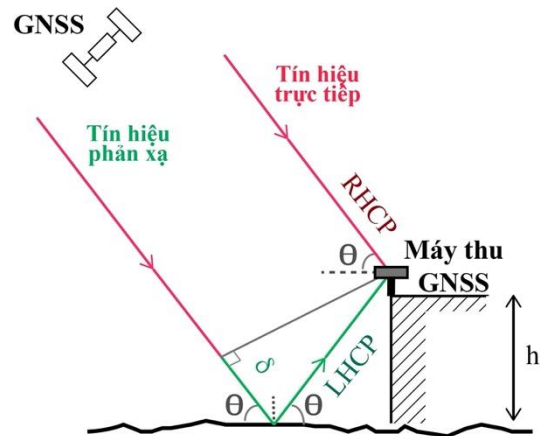
3.1. Kỹ thuật mô hình mẫu giao thoa IPT (Interference Pattern Technique) sử dụng ăng-ten đơn

Bộ thu GNSS trong nghiên cứu này sử dụng một ăng-ten đơn (Hình 1). Tín hiệu trực tiếp được thu bởi bán cầu trên của ăng-ten, trong khi tín hiệu phản xạ thu nhận bởi bán cầu dưới (mô phỏng như Hình 2). Vì vậy, tín hiệu phản xạ sẽ gây nhiễu tín hiệu trực tiếp tại vị trí ăng-ten và ảnh hưởng đến các phép đo định vị. Ngược lại, trong phép đo phản xạ GNSS, việc phân tích các giao thoa này sẽ cung cấp thông tin hữu ích về các đặc tính của bề mặt phản xạ. Kỹ thuật đo phản xạ theo mẫu giao thoa (IPT) của tín hiệu GNSS cũng giống như của các dạng sóng, dựa trên sự tán xạ tĩnh vì máy phát và máy thu được tách biệt về mặt vật lý. Trong mô hình IPT, phần lớn tín hiệu đi thẳng đến ăng-ten và địa hình xung quanh cũng phản ánh một phần tín hiệu tới.

Kỹ thuật đo phản xạ này yêu cầu kết quả đầu ra của máy thu GNSS là mối tương quan giữa tín hiệu “trực tiếp/phản xạ” và bản sao cục bộ do máy thu tạo ra. Kết quả xử lý được lưu trữ trong tệp RINEX tiêu chuẩn. Trong trường hợp này, tổng tỷ số tín hiệu trên nhiễu (SNR<sub>t</sub>) là một hàm của SNR trực tiếp (SNR<sub>d</sub>) và SNR phản xạ (SNR<sub>r</sub>) được ghi lại bởi ăng-ten.

Tín hiệu SNR là một trong những khả năng quan sát cổ điển của máy thu GNSS và chủ yếu

được dùng để định lượng chất lượng của các phép đo GNSS. SNR thường được ghi lại ở mỗi bước đo và cho mỗi tần số được đo bởi máy thu. Một số thiết bị ghi lại nó ở dạng nhị phân (bằng 1 khi chất lượng của các phép đo đủ để thiết lập tính toán vị trí và bằng 0 khi nhiễu quá lớn), nhưng hầu hết các máy thu hiện nay đều ghi nó ở dạng thập phân. Do đó SNR định lượng biên độ của tín hiệu nhận được và thường được lấy từ vòng theo dõi sóng mang của tín hiệu GNSS tại máy thu. Vòng lặp theo dõi có thể được ghi lại [36-38] như mối quan hệ giữa các thành phần I (trong pha) và Q (trong phương vuông góc) của tín hiệu nhận được (Hình 3). Nếu xem xét trong trường hợp lý tưởng, không có bất kỳ đa đường nào, thì biểu đồ pha trong Hình 3 sẽ chỉ có sự đóng góp của tín hiệu trực tiếp, tức là chỉ có pha biên độ  $A_d$ , tương đương với SNR. Pha sóng mang tương ứng với góc  $\phi_d$ .



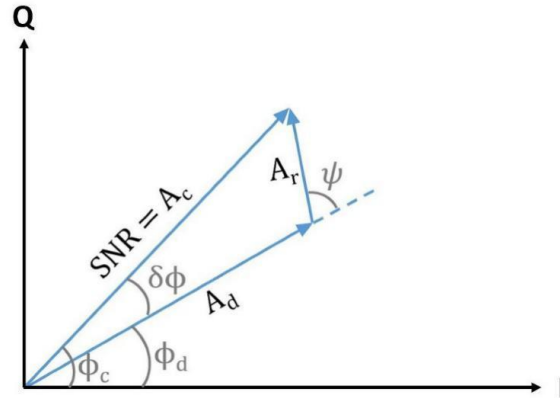
Hình 2. Nguyên lý của máy đo GNSS-R sử dụng 1 ăng-ten đơn. Trong đó  $\theta$  là góc cao vệ tinh,  $h$  là độ cao của bề mặt phản xạ.

Mặt khác, với sự hiện diện của đa đường, một (hoặc nhiều) pha biên độ  $A_r$  trong Hình 3 được thêm vào biểu đồ. Do đó, tín hiệu của máy thu là vectơ tổng của tất cả các pha, chứa cả tín hiệu trực tiếp và tín hiệu phản xạ.

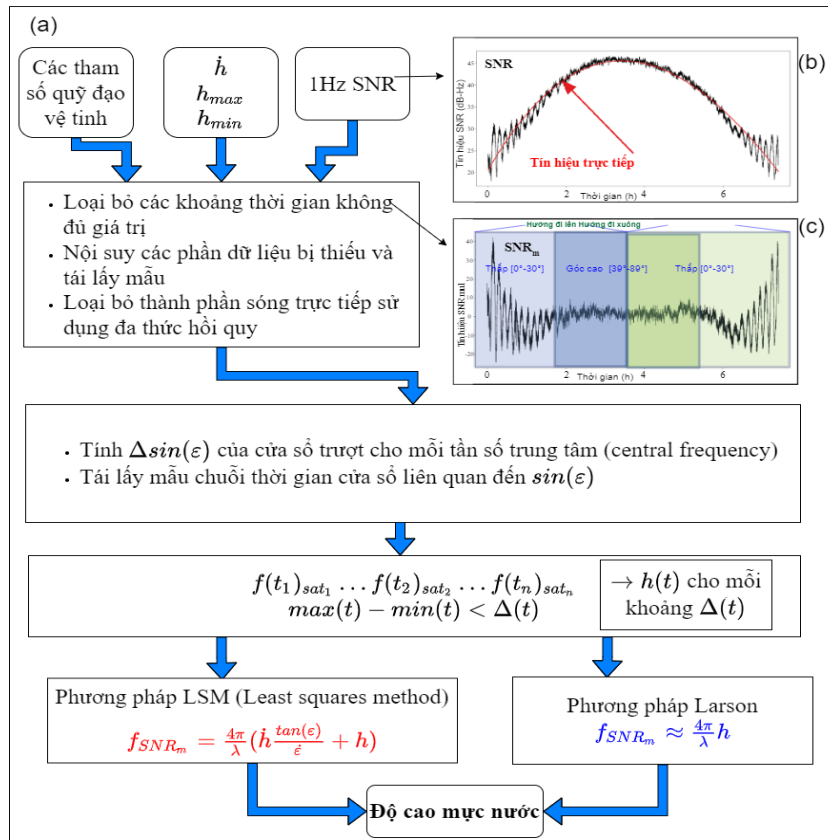
Từ biểu đồ Hình 3 ta có:

$$SNR^2 = A_c^2 = A_d^2 + A_r^2 + 2A_d A_r \cos(\psi) \quad (1)$$

Trong đó:  $A_d$  và  $A_r$  là biên độ của tín hiệu trực tiếp và tín hiệu phản xạ tương ứng.  $\psi$  là độ lệch pha giữa hai tín hiệu.



Hình 3. Biểu đồ pha của tín hiệu GNSS nhận được thể hiện mối quan hệ giữa các thành phần pha (I) và vuông góc (Q) của tín hiệu.



Hình 4. a) Quy trình xử lý dữ liệu SNR để tính chuỗi thời gian mực nước; b) Ví dụ về chuỗi thời gian của dữ liệu SNR thô (dữ liệu đầu vào); c) Ví dụ về chuỗi thời gian dữ liệu SNR với phần tăng dần và phần giảm dần.  $\dot{h} = dh/dt$  là tốc độ biến đổi độ cao của bề mặt phân xạ và  $\dot{\theta}$  là tốc độ biến thiên của góc cao vệ tinh.

Giả định rằng  $A_r \ll A_d$ , SNR có thể được biểu diễn dưới dạng:

$$SNR^2 = A_d^2 + 2A_d A_r \cos(\psi) \quad (2)$$

Công thức (2) cho thấy tín hiệu SNR chủ yếu được quyết định bởi tín hiệu trực tiếp, tín hiệu này thể hiện các biến thể chỉ liên quan đến góc cao vệ tinh. Mặt khác, tín hiệu phản xạ tạo ra một tín hiệu bổ sung ở tần số cao và biên độ nhỏ so với tín hiệu trực tiếp. Các tín hiệu phản xạ chủ yếu được nhìn thấy đối với các góc cao vệ tinh thấp [39]. Giả sử mặt biển tương ứng với phản xạ gương, góc pha tương đối có thể được tính toán từ độ trễ  $\delta$  của tín hiệu phản xạ [40]:

$$\psi = \frac{2\pi}{\lambda} \delta = \frac{4\pi h}{\lambda} \sin(\theta) \quad (3)$$

Trong đó,  $\lambda$  là bước sóng của tín hiệu,  $\theta$  góc cao vệ tinh và  $h$  khoảng cách giữa tâm pha ăng-ten và bề mặt phản xạ (Hình 2). Công thức (3) có thể suy ra tần số của dao động đa đường [41]:

$$f_\psi = \frac{d\psi}{dx} = \frac{4\pi h}{\lambda} \sin(\theta) + \frac{4\pi h}{\lambda} \cos(\theta) \theta' \quad (4)$$

Phương trình 4 có thể được đơn giản hóa bằng cách thay đổi một biến  $x = \sin(\theta)$ :

$$\tilde{f} = \frac{d\psi}{dx} = \frac{4\pi}{\lambda} (h \frac{\tan(\theta)}{\theta'} + h) \quad (5)$$

Trong đó:  $\tilde{f}$  là tần số của dao động đa đường

### 3.2. Ước tính chuỗi thời gian mực nước từ dữ liệu GNSS-R

Phương trình 5 chỉ ra rằng nếu chúng ta coi một bề mặt phản xạ là tĩnh ( $\dot{h} \approx 0$ ), khi đó  $\tilde{f}$  là hằng số và tỷ lệ với chiều cao của ăng ten. Trong trường hợp động  $\dot{h} \neq 0$  (do sóng, thủy triều, bão...),  $\tilde{f}$  khi đó phụ thuộc vào góc cao vệ tinh  $\theta$ , tốc độ biến thiên của nó  $\theta'$  và tốc độ biến đổi độ cao của mặt phản xạ  $\dot{h}$ . Khi đó, phương trình 5 chỉ có hai ẩn số là:  $h$  và  $\dot{h}$ . Từ đó, chuỗi thời gian mực nước từ dữ liệu SNR được tính theo quy trình như Hình 4.

Để loại bỏ các hiệu ứng parabol của tín hiệu trực tiếp trên các bản ghi SNR, phần dư đa đường  $SNR_m$  được sử dụng để tính chiều cao của mực nước [17]:

$$SNR_m = A \cos\left(\frac{4\pi h}{A} \sin(\epsilon) + \psi_m\right) \quad (6)$$

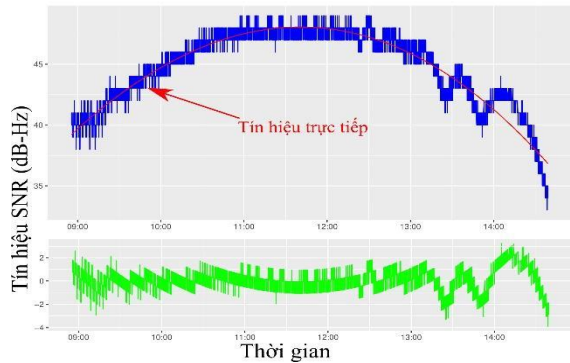
Trong đó  $A$  là biên độ và  $\psi_m$  là độ lệch pha. Khi  $\tilde{f}(t)$  được xác định cho mỗi vệ tinh quan sát, quy trình trong hình 4 được áp dụng khi xem xét ba tham số sau:

- $h_{min}(m)$ : chiều cao nhỏ nhất của ăng-ten so với bề mặt phản xạ trong thời gian đo;
- $h_{max}(m)$ : chiều cao lớn nhất của ăng-ten so với bề mặt phản xạ trong thời gian đo;
- $\dot{h}$  (m/s): vận tốc dịch chuyển theo phương thẳng đứng của bề mặt phản xạ.

Sau khi loại bỏ đóng góp của tín hiệu trực tiếp bằng cách sử dụng phương pháp đa thức được xác định bởi [42], tần số dao động  $\tilde{f}$  được ước tính cho mỗi cửa sổ chuyển động bằng cách sử dụng biểu đồ chu kỳ Lomb Scargle (LSP) [43, 44].

## 4. Kết quả và thảo luận

### 4.1. Kết quả xử lý dữ liệu $SNR_m$



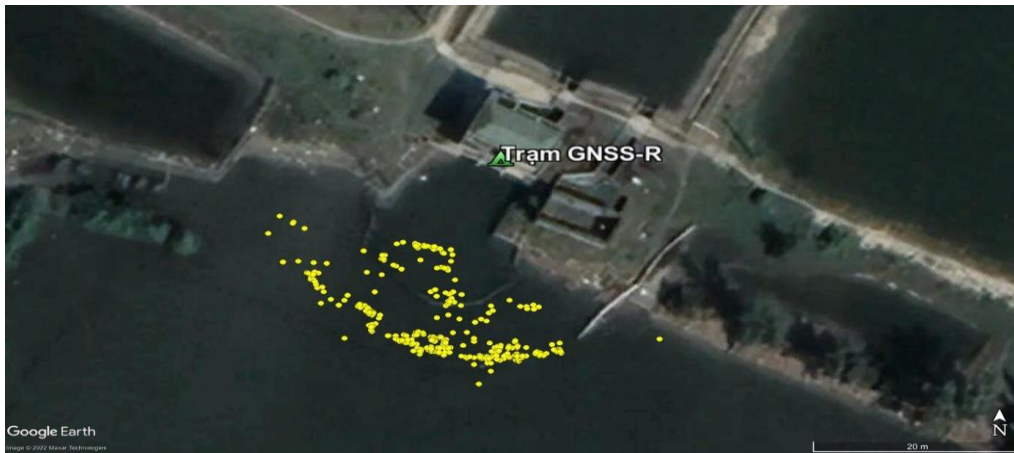
Hình 5. Tách tín hiệu đa đường (màu xanh) từ tín hiệu  $SNR_t$  (màu đỏ) của vệ tinh GPS.

Tín hiệu đa đường  $SNR_m$  được tách ra khỏi tín hiệu tổng  $SNR_t$  (SNR tổng được thu bởi máy thu) bằng cách loại bỏ tín hiệu trực tiếp  $SNR_d$  (đường parabol được xác định bởi đa thức bậc 2 đối với  $SNR_t$  – Hình 5) và được thực hiện thông qua bộ mã hoá trên nền tảng ngôn ngữ R. Sau khi phân tích thu được kết quả biên độ  $A_m$ , pha  $\psi_m$  và tần số  $f$  (Bảng 1 – kết quả thu ngày 17/04/2022). Vị trí các điểm phản xạ từ bề mặt nước được mô phỏng với các dữ liệu vệ tinh thu được (Hình 6). Trong đó, các điểm phản xạ

không nằm trên vùng nước đã được loại bỏ. Về lý thuyết, độ chính xác của tâm phase antenna ảnh hưởng đến độ chính xác tính toán khoảng cách từ tâm phase đến bề mặt phản xạ [45]. Tuy nhiên, trong nghiên cứu này, bề mặt phản xạ có dạng ellip và những điểm phản xạ không nằm trên mặt nước đã được loại bỏ. Đồng thời, kết quả cuối cùng là trị đo mực nước, chính vì vậy độ chính xác về khoảng cách từ tâm phase antenna đến bề mặt phản xạ không ảnh hưởng đến độ chính xác của giá trị mực nước thu được.

Do thiết bị sử dụng trong nghiên cứu này là thiết bị thu GNSS giá thành thấp nên các trị đo SNR thu được là các số nguyên. Vì vậy, để tăng thêm số lượng trị đo, chúng tôi đã kết hợp hai tín hiệu  $SNR_{L1}$ ,  $SNR_{L2}$  để tạo tín hiệu  $SNR_{com}$  bằng cách sử dụng mô hình bổ sung tín hiệu rời rạc theo công thức:

$$SNR_{com} = SNR_{L1} \text{ and } SNR_{L2} \\ = 10 \log_{10} \left( 10^{\frac{SNR_{L1}}{10}} + 10^{\frac{SNR_{L2}}{10}} \right) \text{ dB} \quad (7)$$

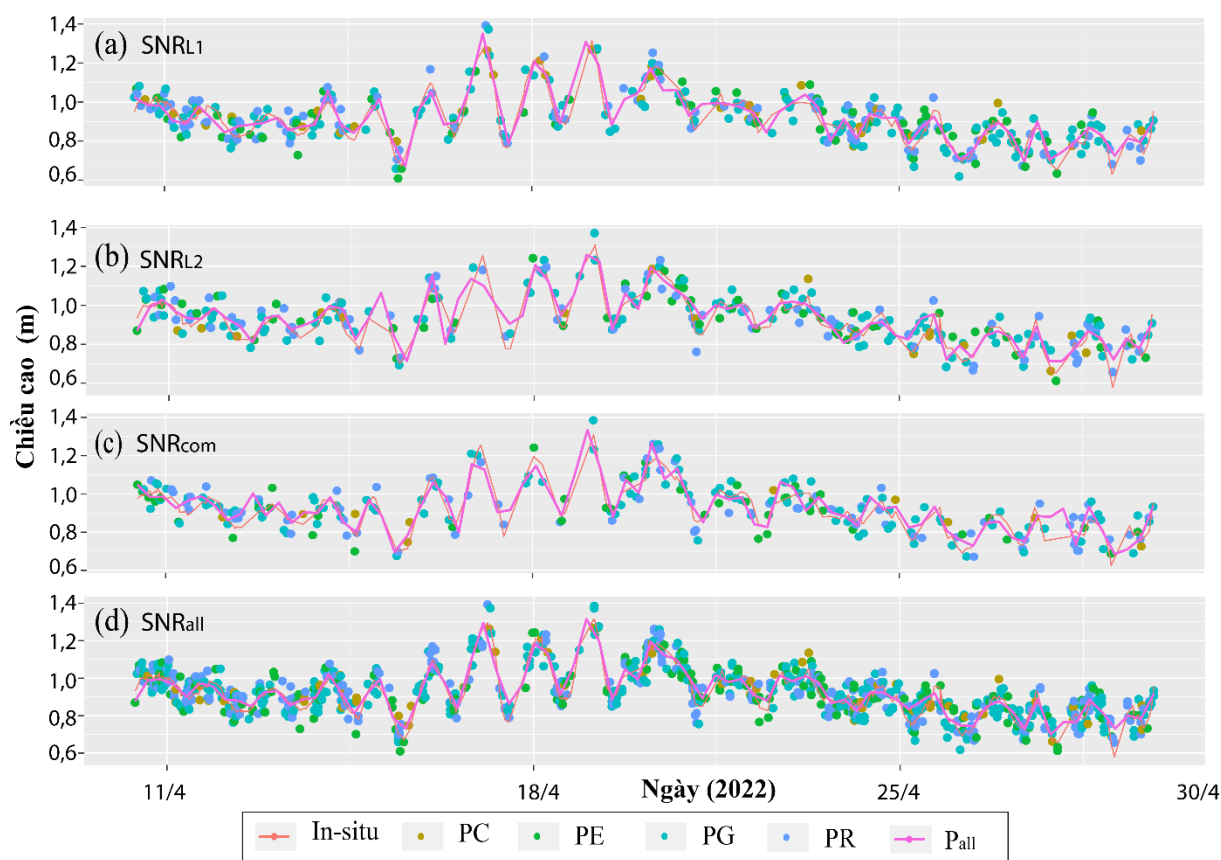


Hình 6. Mô phỏng điểm phản xạ GNSS tại khu vực nghiên cứu (ngày 12/04/2022).

Bảng 1. Bảng kết quả tính  $A_m$ ,  $\psi_m$  và  $f$  bằng phương pháp IPT ngày 17/04/2022 khu vực đầm phá Tam Giang – Thừa Thiên Huế

Thời gian	Số hiệu vệ tinh PRN	Tín hiệu	Góc cao vệ tinh ( $\theta$ )	$\theta'$	Góc phương vị	Biên độ ( $A_m$ )	Pha ( $\psi_m$ )	Tần số $f$ (Hz)
2022-04-17 22:53:34	PC11	S1I	0,348	6,59E-5	2,385	4,426	1,321	83,949
2022-04-17 22:53:34	PC11	S7I	0,348	6,59E-5	2,385	7,886	0,410	68,817
2022-04-17 12:51:35	PE03	S1C	0,541	1,01E-4	3,642	2,572	0,175	85,500
2022-04-17 12:51:35	PE03	S7Q	0,541	1,01E-4	3,642	6,427	6,159	62,562
2022-04-17 10:51:45	PE05	S1C	0,567	1,03E-4	3,086	4,017	2,213	86,048
2022-04-17 10:51:45	PE05	S7Q	0,567	1,03E-4	3,086	2,343	4,968	62,517
2022-04-17 15:13:43	PE08	S1C	0,372	5,79E-5	4,201	4,074	1,853	79,903
2022-04-17 15:13:43	PE08	S7Q	0,372	5,79E-5	4,201	9,743	0,628	60,760
2022-04-17 23:35:03	PE21	S1C	0,341	5,09E-5	4,274	4,609	5,938	85,996
2022-04-17 23:35:03	PE21	S7Q	0,341	5,09E-5	4,274	7,805	1,869	64,875
2022-04-17 21:22:23	PE27	S1C	0,609	9,58E-5	3,757	2,741	5,852	73,452
2022-04-17 21:22:23	PE27	S7Q	0,609	9,58E-5	3,757	6,401	4,538	63,568
2022-04-17 00:17:50	PG08	S1C	0,555	1,33E-4	3,363	1,866	5,204	85,062





Hình 7. Kết quả chuỗi thời gian mực nước từ dữ liệu phản xạ (a)  $SNR_{all}$ , (b)  $SNR_{L1}$ , (c)  $SNR_{L2}$ , (d)  $SNR_{com}$  tại khu vực thực nghiệm. PC, PE, PG, PR tương ứng là các vệ tinh BeiDOU, Galileo, GPS, Glonass.

#### 4.2. Phân tích và đánh giá độ chính xác chuỗi thời gian mực nước từ dữ liệu GNSS-R tại đầm phá Tam Giang, Thừa Thiên Huế

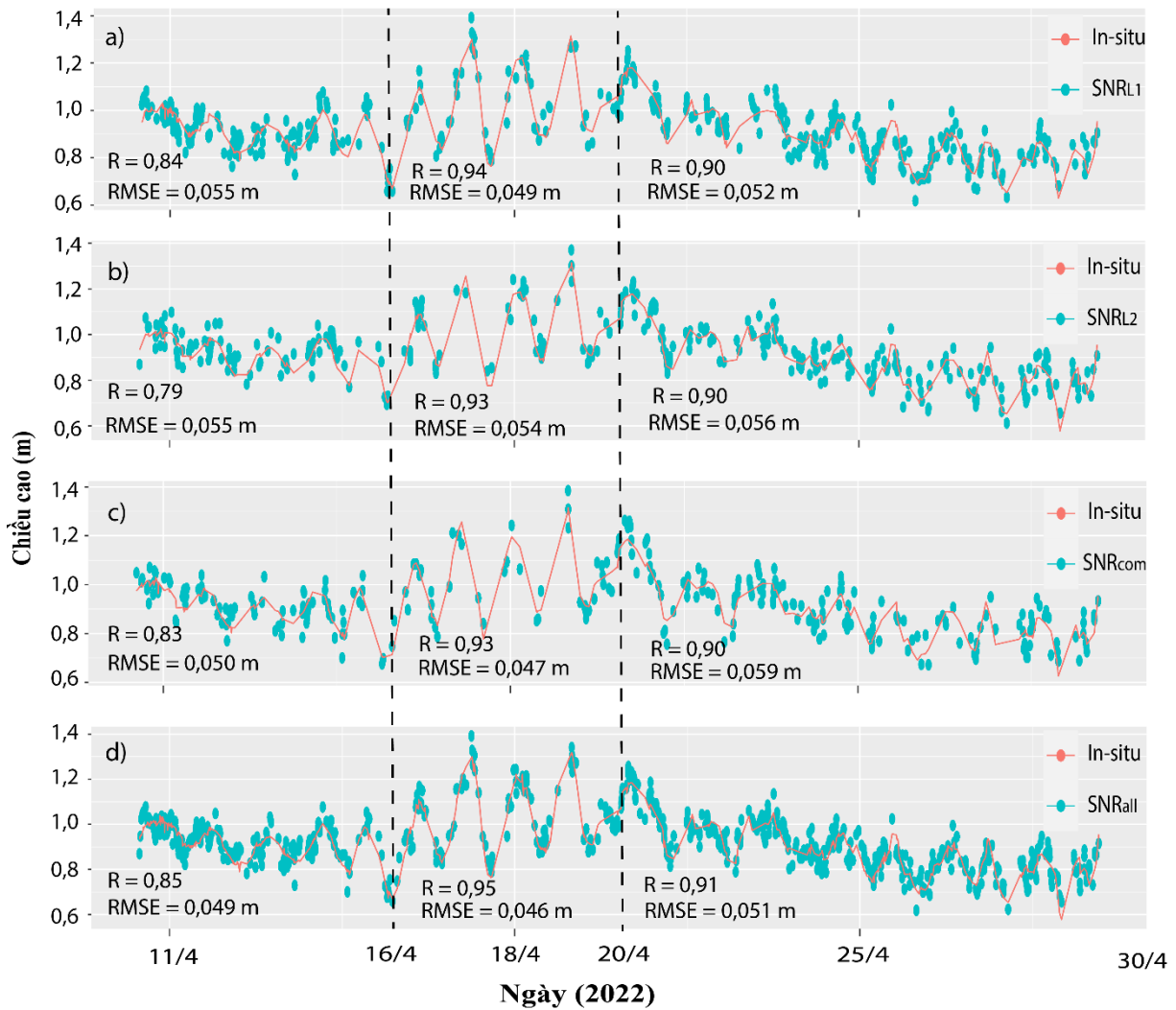
Hình 7 thể hiện kết quả chuỗi thời gian mực nước từ  $SNR_{L1}$ ,  $SNR_{L2}$ ,  $SNR_{com}$  và  $SNR_{all}$  (kết hợp cả ba tín hiệu  $SNR_{L1}$ ,  $SNR_{L2}$  và  $SNR_{com}$ ) của các vệ tinh GPS, Glonass, Galileo, BeiDOU tại trạm đo từ ngày 10/04 đến 29/04/2022. Trong đó, PC, PE, PG và PR lần lượt là dữ liệu SNR của các vệ tinh BeiDOU, Galileo, GPS, GIONASS tương ứng. Kết quả cho thấy, khi kết hợp các tần số, số lượng trị đo của cả 4 vệ tinh đều tăng gấp 3 lần so với việc sử dụng tín hiệu riêng lẻ.

Các chỉ số thống kê như hệ số tương quan Pearson (R), độ lệch (Bias) và sai số trung phương (RMSE) được sử dụng để đánh giá độ

chính xác giữa chuỗi thời gian mực nước thu được từ GNSS-R và giá trị thực đo của cảm biến. Trong nghiên cứu này, thuật toán Spline được sử dụng để xác định đường trung bình sau khi lọc nhiễu. Kết quả so sánh giữa mực nước thu được từ  $SNR_{L1}$ ,  $SNR_{L2}$ ,  $SNR_{com}$  và  $SNR_{all}$  trước khi lọc với giá trị mực nước đo được từ cảm biến cho độ tương quan rất thấp (Bảng 2). Điều này có thể giải thích là do các điểm phản xạ từ bề mặt đất xung quanh cũng tham gia vào nên gây ra sai số rất lớn. Sau khi áp dụng các phương pháp lọc để loại bỏ nhiễu từ đất liền và tổng hợp cả ba băng tần để tính chuỗi thời gian mực nước sử dụng phương pháp LSM cho độ chính xác cao với hệ số tương quan tăng lên 0,93, độ lệch bias là 0,009 và sai số RMSE là 0,048m khi sử dụng tất cả các vệ tinh.

Bảng 2. Kết quả so sánh chuỗi thời gian mực nước ước tính từ công nghệ GNSS-R và mực nước tham chiếu

GNSS-R	SNR <sub>m</sub>	Số trị đo	R	Bias	RMSE
Chưa lọc nhiễu	SNR <sub>L1</sub>	997	0,25	0,049	0,243
	SNR <sub>L2</sub>	976	0,25	0,114	0,279
	SNR <sub>com</sub>	858	0,23	0,113	0,294
	SNR <sub>all</sub>	2831	0,24	0,091	0,272
Sau khi lọc nhiễu	SNR <sub>L1</sub>	1513	0,91	0,007	0,052
	SNR <sub>L2</sub>	1279	0,91	0,012	0,055
	SNR <sub>com</sub>	1165	0,90	0,004	0,054
	SNR <sub>all</sub>	1848	0,93	0,009	0,049



Hình 8. So sánh chuỗi thời gian mực nước từ GNSS-R sử dụng phương pháp LSM (đường màu xanh) và mực nước đo bằng cảm biến (đường màu đỏ) từ ngày 10/04 đến 29/04: (a) SNR<sub>L1</sub>, (b) SNR<sub>L2</sub>, (c) SNR<sub>com</sub>, (d) SNR<sub>all</sub>.

Trong khoảng thời gian quan sát, tại khu vực nghiên cứu xảy ra hai giai đoạn mưa từ ngày 10 đến ngày 15 và từ ngày 21 đến ngày 29 tháng 4. Để đánh giá ảnh hưởng của thời tiết đến kết quả đo, chuỗi thời gian mực nước được chia thành 3 giai đoạn: 1) Từ 10 đến 15 tháng 4; 2) Từ 16 đến 20 tháng 4 và 3) Từ 21 đến 29 tháng 4 tương ứng với các thời điểm mưa và không mưa. Hình 8 thể hiện kết quả so sánh giữa chuỗi thời gian mực nước từ GNSS-R (sử dụng tất cả các vệ tinh với các tần số khác nhau) sau khi lọc nhiễu và dữ liệu thực đo tại khu vực nghiên cứu từ ngày 10 đến ngày 29 tháng 4 năm 2022 với 3 giai đoạn trên và kết quả tính sai số RMSE và hệ số tương quan tương ứng. Kết quả phân tích cho thấy, mực nước ở giai đoạn 1 và giai đoạn 3 có biên độ không đồng đều và thấp hơn so với các ngày không mưa (giai đoạn 2). Nguyên nhân là do ảnh hưởng của mưa và nước từ thượng nguồn đổ về khiến cho mực nước trong đầm dao động mạnh và tăng lên nhanh chóng. Giá trị tương quan giữa hai chuỗi trị đo ở giai đoạn 1 đối với dữ liệu  $SNR_{L1}$ ,  $SNR_{L2}$ ,  $SNR_{com}$  và  $SNR_{all}$  lần lượt là 0,84; 0,79; 0,83 và 0,85; sai số RMSE lần lượt là 0,055 m; 0,055 m; 0,050 m và 0,049 m tương ứng. Trong giai đoạn 3, giá trị tương quan giữa hai chuỗi trị đo lần lượt là 0,90; 0,90; 0,90 và 0,91; sai số RMSE lần lượt là 0,052 m; 0,056 m; 0,059 m và 0,051 m tương ứng với dữ liệu  $SNR_{L1}$ ,  $SNR_{L2}$ ,  $SNR_{com}$  và  $SNR_{all}$ . Ngược lại, ở giai đoạn 2, trời không mưa, mặt nước tương đối phẳng lặng nên giá trị tương quan giữa hai chuỗi dữ liệu này tăng lên đáng kể, tương ứng lần lượt là 0,94; 0,93; 0,93 và 0,95; sai số RMSE lần lượt là 0,049 m; 0,054 m; 0,047 m và 0,046 m với dữ liệu  $SNR_{L1}$ ,  $SNR_{L2}$ ,  $SNR_{com}$  và  $SNR_{all}$ . Độ dao động của mặt nước lớn hơn do chịu tác động của mưa dông đã gây ra nhiễu cho tín hiệu phản xạ GNSS và làm giá trị độ cao mực nước tính toán được bị lệch đi so với mực nước trung bình, điều này đã cho thấy rõ sự ảnh hưởng của thời tiết đến kết quả chuỗi thời gian mực nước, hay nói cách khác dữ liệu chuỗi thời gian mực nước dựa trên tín hiệu phản xạ GNSS nhạy cảm với điều kiện thời tiết. Kết quả cũng chỉ ra rằng khi kết hợp các tần số và sử dụng tất cả các vệ tinh quan sát được,

số lượng trị đo và độ chính xác của chuỗi thời gian mực nước tăng lên đáng kể.

Về nguyên lý, đo mực nước bằng cảm biến và GNSS-R đều sử dụng sóng phản xạ. Tuy nhiên do cảm biến không bị ảnh hưởng sóng, thủy triều và các điều kiện tác động khách quan xung quanh khu vực trạm. Thêm nữa, sự không đồng nhất trong không gian của chiều cao bề mặt xung quanh trạm cũng là một yếu tố không nhỏ ảnh hưởng tới kết quả chuỗi thời gian mực nước thu được, một số trị đo GNSS-R gần bờ hoặc gần các ruộng nuôi trồng hải sản có xu hướng phản xạ mạnh hơn do có đóng góp của thực vật vào tín hiệu SNR. Điều này có thể làm giảm độ chính xác của dữ liệu mực nước ước tính bằng GNSS-R.

## 5. Kết luận

Trong nghiên cứu này, một kỹ thuật đảo ngược của SNR thu được từ một máy thu GNSS đa tần chi phí thấp được sử dụng để ước tính độ cao mực nước. Phương pháp mới này được thực hiện với dữ liệu SNR thu được từ một ăng-ten GNSS ở độ cao 7,84 m so với mực nước biển tại phá Tam Giang - Thừa Thiên Huế. Mực nước tính từ dữ liệu SNR sau kết hợp cả hai băng tần L1, L2 và lọc nhiễu đã cho kết quả với độ chính xác cao. So sánh dữ liệu đo từ cảm biến và dữ liệu từ GNSS-R cho thấy mối tương quan tốt với độ tương quan đạt 0,93 và sai số trung bình bình phương gốc là 0,048 m trong toàn bộ thời gian quan sát. Kết quả ban đầu của nghiên cứu đã chứng minh được tiềm năng của việc sử dụng thiết bị thu GNSS đa tần chi phí thấp trong việc đo cao mực nước. Kết quả này góp phần bổ sung dữ liệu cho những khu vực ít trạm đo thủy văn, thủy triều với ưu điểm nhỏ gọn, kinh tế và dễ lắp đặt. Ngoài việc ước tính độ cao mực nước, kết quả của nghiên cứu này cho thấy sự nhạy cảm của tín hiệu phản xạ GNSS với điều kiện thời tiết và trạng thái của bề mặt nước biển, là cơ sở cho việc dự báo, cảnh báo sớm các sự kiện nước dâng cực đoan, lũ lụt từ dữ liệu mực nước dựa trên GNSS-R.

## Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển Khoa học và Công nghệ Quốc gia (NAFOSTED), với đề tài mã số 105.08-2020.17.

## Tài liệu tham khảo

- [1] H. M. Fritz et al., Hurricane Katrina Storm Surge Distribution and Field Observations on the Mississippi Barrier Islands Estuarine, Coastal and Shelf Science, Vol. 74, Iss. 1-2, 2007, pp. 12-20, <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2007.03.015>.
- [2] N. Chen et al., Hurricane Sandy Storm Surges Observed by HY-2A Satellite Altimetry and Tide Gauges Journal of Geophysical Research: Oceans, Vol. 119, No. 7, 2014, pp. 4542-4548, <https://doi.org/10.1002/2013JC009782>.
- [3] S. Fardin et al., Assessment of the Accuracy of Recent Empirical and Assimilated Tidal Models for the Great Barrier Reef, Australia, Using Satellite and Coastal Data Remote Sensing, Vol. 11, 2019, <https://doi.org/10.3390/rs11101211>.
- [4] J. C. M. Dullaart et al., Advancing Global Storm Surge Modelling Using the New ERA5 Climate Reanalysis, Climate Dynamics, Vol. 54, 2020, pp. 1007-1021, <https://doi.org/10.1007/s00382-019-05044-0>.
- [5] B. M. Míguez, B. P. Gómez, E. A. Fanjul, The ESEAS-RI Sea Level Test Station: Reliability and Accuracy of Different Tide Gauges The International Hydrographic Review, Vol. 6, No. 1, 2005, pp. 44-53.
- [6] S. Pytharouli, S. Chaikalis, S. C. Stiros, Uncertainty and Bias in Electronic Tide-Gauge Records: Evidence from Collocated Sensors Measurement, Vol. 125, 2018, pp. 496-508, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.05.012>.
- [7] F. Frappart et al., Evaluation of the Performances of Radar and Lidar Altimetry Missions for Water Level Retrievals in Mountainous Environment: The Case of the Swiss Lakes Remote Sensing, Vol. 13, No. 11, 2021, <https://doi.org/10.3390/rs13112196>.
- [8] F. Frappart et al., Principles and Applications in Earth Sciences in Satellite Altimetry, In Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering; Publisher: John Wiley & Sons, Inc., 2017, <https://doi.org/10.1002/047134608X.W1125.pub2>.
- [9] S. Biancamaria et al., Satellite Radar Altimetry Water Elevations Performance Over A Hundred Meter Wide River: Evaluation Over the Garonne River" Advances in Space Research, Vol. 1, No. 1, 2017, pp. 128-146, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.10.008>.
- [10] K. M. Larson et al., Dynamic Sea Level Variation from GNSS: 2020 Shumagin Earthquake Tsunami Resonance and Hurricane Laura Geophysical Research Letters, Vol. 48, No. 4, 2020, <https://doi.org/10.1029/2020GL091378>.
- [11] N. Roussel et al., Sea Level Monitoring And Sea State Estimate Using A Single Geodetic Receiver Remote Sensing of Environment, 2015, pp. 261-277, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.10.011>.
- [12] K. M. Larson et al., Coastal Sea Level Measurements Using A Single Geodetic GPS Receiver Advances in Space Research, Vol. 51, 2013, pp. 1301-1310, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.04.017>.
- [13] J. Zhongshan et al., Characterizing Spatiotemporal Patterns of Terrestrial Water Storage Variations Using GNSS Vertical Data in Sichuan, China Journal of Geophysical Research: Solid Earth, Vol. 126, No. 12, 2021, <https://doi.org/10.1029/2021JB022398>.
- [14] J. Zhongshan et al., Monitoring Time-Varying Terrestrial Water Storage Changes Using Daily GNSS Measurements in Yunnan, Southwest China Remote Sensing of Environment, Vol. 254, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112249>.
- [15] J. Shuanggen, Q. Xiaodong, K. Hakan, Snow Depth Variations Estimated from GPS-Reflectometry: A Case Study in Alaska from L2P SNR Data Remote Sensing, Vol. 8, No. 1, 2016, <https://doi.org/10.3390/rs8010063>.
- [16] C. Chew, E. E. Small, K. M. Larson, An Algorithm for Soil Moisture Estimation Using GPS-Interferometric Reflectometry for Bare and Vegetated Soil, GPS Solutions, Vol. 20, No. 3, 2015, <https://doi.org/10.1007/s10291-015-0462-4>.
- [17] K. M. Larson et al., GPS Multipath and Its Relation to Near Surface Soil Moisture Content, IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, Vol. 3, No. 1, 2010, pp. 91-99, <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2009.2033612>.
- [18] V. P. Lan et al., Identifying 2010 Xynthia Storm Signature in GNSS-R-Based Tide Records, Remote Sensing, Vol. 11, No. 7, 2019, <https://doi.org/10.3390/rs11070782>.
- [19] J. Park, S. K. Kim, Monitoring a Storm Surge During Hurricane Harvey Using Multi-Constellation GNSS-Reflectometry, GPS

- Solutions, Vol. 25, 2021, <https://doi.org/10.1007/s10291-021-01105-2>.
- [20] W. Wan, K. M. Larson, E. E. Small, C. C. Chew, J. J. Braun, Using Geodetic GPS Receivers to Measure Vegetation Water Content GPS Solutions, Vol. 19, 2015, pp. 237-248, <https://doi.org/10.1007/s10291-014-0383-7>.
- [21] M. M. Neira et al., The P ARIS Concept: An Experimental Demonstration of Sea Surface Altimetry Using GPS Reflected Signals, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 39, 2001, pp. 142-150, <https://doi.org/10.1109/36.898676>.
- [22] S.T. Lowe et al., 5-cm-Precision Aircraft Ocean Altimetry Using GPS Reflections Geophysical Research Letters, Vol. 29, 2002, pp. 131-134, <https://doi.org/10.1029/2002GL014759>.
- [23] S. Tabibi et al., SNR-Based GNSS-R for Coastal Sea-Level Altimetry, Geosciences, Vol. 11, 2021, <https://doi.org/10.3390/geosciences11090391>.
- [24] H. M. Cuong et al., GNSS-R for Detection of Extreme Hydrological Events, 20<sup>th</sup> EGU General Assembly, Proceedings from the Conference Held, 2018, pp. 16912.
- [25] X. Wang et al., A Correction Method of Height Variation Error Based on One SNR Arc Applied in GNSS-IR Sea-Level Retrieval Remote Sensing, Vol. 14, 2021, <https://doi.org/10.3390/rs14010011>.
- [26] S. Tabibi, F. G. Nievinski, O. Francis, T. V. Dam, Tidal Analysis of GNSS Reflectometry Applied For Coastal Sea Level Sensing in Antarctica and Greenland Remote Sensing of Environment, Vol. 248, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111959>.
- [27] D. Purnell et al., Quantifying the Uncertainty in Ground-Based GNSS Reflectometry Sea Level Measurements, IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, Vol. 13, 2020, pp. 4419-4428, <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.3010413>.
- [28] J. Strandberg, R. Haas, Can We Measure Sea Level With a Tablet Computer?, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, Vol. 17, 2019, <https://doi.org/10.1109/LGRS.2019.2957545>.
- [29] M. Fagundes et al., An Open-Source Low-Cost Sensor for SNR-Based GNSS Reflectometry: Design and Long-Term Validation Towards Sea-Level Altimetry, GPS Solutions, Vol. 25, 2021, <https://doi.org/10.1007/s10291-021-01087-1>.
- [30] S. D. P. Williams, P. S. Bell, D. L. M. Cann, R. Cooke, C. Sams, Demonstrating the Potential of Low-Cost GPS Units for the Remote Measurement of Tides and Water Levels Using Interferometric Reflectometry, Journal of Atmospheric and Oceanic Technol, Vol. 27, 2020, pp. 1925-1935, <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-20-0063.1>.
- [31] A. S. Gómez, C. Watson, Remote Leveling of Tide Gauges Using GNSS Reflectometry: Case Study at Spring Bay, Australia, GPS Solutions, Vol. 21, 2017, pp. 451-459, 2017, <https://doi.org/10.1007/s10291-016-0537-x>.
- [32] S. D. P. Williams, F. G. Nievinski, Tropospheric Delays in Ground-Based GNSS Multipath Reflectometry - Experimental Evidence From Coastal Sites Journal of Geophysical Research: Solid Earth, Vol. 122, 2017, <https://doi.org/10.1002/2016JB013612>.
- [33] T. Nikolaidou, M. C., Santos, S. D. P. Williams, F. G. Nievinski, Raytracing Atmospheric Delays in Ground-Based GNSS Reflectometry, Journal of Geodesy, Vol. 94, 2020, pp. 1-12, <https://doi.org/10.1007/s00190-020-01390-8>.
- [34] J. Beckheinrich et al., Water Level Monitoring of the Mekong Delta Using GNSS Reflectometry Technique, IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium., 2014, <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2014.6947311>.
- [35] Thua Thien Hue Portal, General Characteristics of The Tam Giang – Cau Hai Lagoon System, <https://thuathienhue.gov.vn/vi-vn/Thong-tin-du-dia-chi/tid/>, 2022 (accessed on: May 10<sup>st</sup>, 2022).
- [36] P. Georgiadou, A. Kleusberg, on Carrier Signal Multipath Effects in Relative Gps Positioning Manuscripta Geodaetica, Vol. 13, No. 3, 1988, pp. 172-179.
- [37] P. W. Ward et al., Understanding GPS: Principles and Applications in Satellite Signal Acquisition Tracking and Data Demodulation, Artech House, 2005, pp. 153-243.
- [38] A. Bilich, K. M. Larson, Mapping the GPS Multipath Environment Using the SNR Radio Science, Vol. 42, No. 6, 2007, <https://doi.org/10.1029/2007RS003652>.
- [39] J. S. Löfgren, R. Haas, H. Scherneck, M. S. Bos, Three Months of Local Sea Level Derived from Reflected Gns Signals, Radio Science, Vol. 46, No. 6, 2011, pp. 1-12, <https://doi.org/10.1029/2011RS004693>.
- [40] K. M. Larson et al., Using GPS Multipath to Measure Soil Moisture Fluctuations: Initial Results GPS Solutions, Vol. 12, No. 3, 2008, pp. 173-177, <https://doi.org/10.1007/s10291-007-0076-6>.
- [41] N. Roussel, Application De La Réflectométrie GNSS À L'étude Des Redistributions Des Masses D'eau À La Surface De La Terre, Université Paul Sabatier Toulouse III, 2015b, <https://tel.archives->

- ouvertes.fr/tel-01417284 (accessed on: May 10<sup>st</sup>, 2022).
- [42] K. M. Larson et al., Use of GPS Receivers As A Soil Moisture Network For Water Cycle Studies Geophysical Research Letters, Vol. 35, No. 24, 2008b, <https://doi.org/10.1029/2008GL036013>.
- [43] N. R. Lomb, Least-Squares Frequency Analysis of Unequally Spaced Data, Astrophysics and Space Science, Vol. 39, No. 2, 1976, pp. 447-462, <https://doi.org/10.1007/BF00648343>.
- [44] J. D. Scargle, Studies In Astronomical Time Series Analysis, II Statistical Aspects of Spectral Analysis of Unevenly Spaced Data, Astrophysical Journal, Vol. 263, 1982, pp. 835-853, <https://doi.org/10.1086/160554>.
- [45] A. Rius, E. Cardellach, M. M. Neira, Altimetric Analysis of the Sea-Surface GPS-Reflected Signals, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 8, No. 4, 2010, pp. 2119-2127, <https://doi.org/10.1109/TGRS.2009.2036721>.