

KHAI THÁC DỮ LIỆU VỆ TINH JASON-2 ĐỂ QUAN TRẮC MỨC NƯỚC HỒ CHỨA NƯỚC PHÚ NINH, TỈNH QUẢNG NAM

APPLYING SATELLITE RADAR ALTIMETRY JASON-2 DATA TO MONITOR PHU NINH RESERVOIR WATER LEVEL

Phạm Thành Hưng, Nguyễn Chí Công

Trường Đại học Bách khoa, Đại học Đà Nẵng; hungptbk@gmail.com

Tóm tắt - Quan trắc mực nước trong hệ thống các công trình thủy lợi đóng vai trò hết sức quan trọng trong việc vận hành hồ chứa nhằm cấp nước kịp thời cho sản xuất. Tuy nhiên, phương pháp này gặp rất nhiều khó khăn như tầm nhìn bị hạn chế hoặc mưa to, gió lớn. Trong khi đó, phương pháp đo tự động có chi phí rất cao. Trong những năm gần đây, việc ứng dụng dữ liệu miễn phí của vệ tinh đo cao để quan trắc mực nước trong các sông và hồ chứa lớn đang được ứng dụng rộng rãi trên thế giới. Tuy nhiên, phương pháp này chưa được sử dụng nhiều tại Việt Nam. Mục tiêu nghiên cứu này là khai thác dữ liệu đo cao mực nước từ vệ tinh Jason-2 (với chu kỳ lặp lại 10 ngày) để đo mực nước tại hồ chứa Phú Ninh. Kết quả nghiên cứu cho thấy, mực nước đo đạc dùng vệ tinh Jason-2 từ năm 2008 đến năm 2016 cho kết quả khá giống với mực nước thực đo tại hồ chứa Phú Ninh, với hệ số tương quan tương đối cao $R^2 = 0,995$.

Từ khóa - mực nước hồ chứa; Jason-2; vệ tinh đo cao; hồ chứa Phú Ninh; ảnh vệ tinh Landsat TM 7

Abstract - Water level monitoring in reservoirs play an important role in developing operation rules. It is used to manage water supply and flood controls. Conventional methods are difficult to measure in flood events, while costs of automatic measurement systems are very high. Currently, application of satellite radar altimetry in water level monitoring at large rivers or reservoirs has received increasing attention. However, this application is still limited in Vietnam. This study aims to explore satellite radar altimetry Jason-2 (10-day) to measure water levels at Phu Ninh Reservoir. The results indicate that satellite altimetry-derived water levels have a good agreement with the *in-situ* water levels at the reservoir ($R^2=0,995$). This reveals a potential application of satellite radar altimetry data to complement the *in-situ* data in this reservoir.

Key words - Water level; Jason-2; satellite radar altimetry; Phu Ninh reservoir; Landsat TM 7

1. Đặt vấn đề

Vấn đề quản lý tài nguyên nước dưới tác động của biến đổi khí hậu và sự gia tăng dân số ngày càng trở thành vấn đề thu hút sự quan tâm trên thế giới. Một trong những công tác quản lý tài nguyên nước là việc xây dựng quy trình vận hành hiệu quả các hồ chứa phục vụ công tác cấp nước và điều tiết lũ. Để đáp ứng được yêu cầu đó, số liệu đo đạc mực nước tại các hồ chứa đóng vai trò hết sức quan trọng. Hiện nay, mực nước tại hồ chứa thường được đo đạc theo phương pháp truyền thống. Tuy nhiên, phương pháp này gặp nhiều khó khăn đặc biệt trong điều kiện thời tiết mưa lũ.

Trong những năm gần đây, số liệu đo cao vệ tinh (*satellite radar altimetry*) đã và đang được áp dụng rộng rãi trong việc quan trắc mực nước trong các sông lớn và các hồ chứa [1, 2]. Một trong các vệ tinh đo cao là vệ tinh ENVISAT, được vận hành bởi cơ quan vũ trụ châu Âu ESA (*European Space Agency*) với bước thời gian quan trắc là 35 ngày [3]. Khác với quỹ đạo của vệ tinh ENVISAT, các vệ tinh T/P (Topex/Poseidon), Jason-1 và Jason-2 được vận hành bởi cơ quan hàng không vũ trụ Mỹ NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) và Trung tâm Nghiên cứu Vũ trụ Quốc gia Pháp CNES (*Centre National d'études Spatiales*) với quỹ đạo quan trắc 10 ngày. Số liệu của các vệ tinh đã và đang được khai thác để quan trắc mực nước ở các lưu vực sông lớn chảy qua biên giới đa quốc gia, như sông Mêkông [4], sông Ganges-Brahmaputra tại Băng-la-đét [5]. Ngoài ra, các vệ tinh này còn được khai thác để quan trắc mực nước các sông và hồ chứa lớn [6, 7].

Ở Việt Nam, Đoàn Văn Chinh [8] đã ứng dụng số liệu đo cao của vệ tinh Jason-1 và T/P để quan trắc sự thay đổi mực nước biển. Hiện nay, việc khai thác sử dụng số liệu

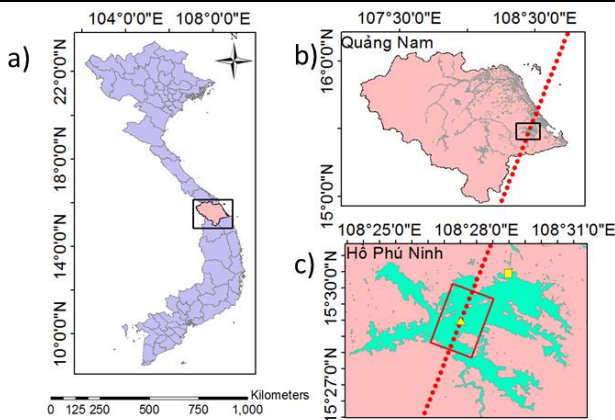
miễn phí từ vệ tinh đo cao để quan trắc mực nước trong các sông và hồ chứa tại Việt Nam là một cách tiếp cận hoàn toàn mới. Mục đích của nghiên cứu này là khai thác số liệu đo cao của vệ tinh Jason-2 để quan trắc mực nước hồ chứa Phú Ninh, tỉnh Quảng Nam.

Nghiên cứu sử dụng ảnh vệ tinh Landsat TM7 để xác định phần mặt nước hồ chứa Phú Ninh. Căn cứ vào vị trí đường quan trắc (*Pass 077*) của vệ tinh Jason-2 trên mặt đất (*ground-tracks Pass 077*) và phần mặt nước hồ chứa Phú Ninh để xác định khu giao cắt. Khu giao cắt này được gọi là trạm ảo (*virtual station*). Mực nước quan trắc bằng vệ tinh đo cao Jason-2 sẽ được tính toán tại vị trí trạm ảo vừa được xác định. Kết quả mực nước quan trắc bằng vệ tinh đo cao Jason-2 có tương quan khá chặt chẽ với mực nước thực đo tại hồ chứa Phú Ninh.

2. Giới thiệu vùng nghiên cứu và dữ liệu

2.1. Vùng nghiên cứu

Hồ chứa nước Phú Ninh thuộc tỉnh Quảng Nam, được khởi công xây dựng từ năm 1977, hoàn thành năm 1986 với dung tích 344 triệu m^3 nước, nhằm cung cấp nước tưới cho 23.000 ha đất nông nghiệp của các huyện: Phú Ninh, Tam Kỳ, Núi Thành, Thăng Bình, Quế Sơn và Duy Xuyên (Hình 1). Mực nước tại hồ được đo qua công trình tràn nằm sát đập chính (điểm hình vuông màu vàng ở Hình 1c). Vị trí đường quan trắc số 77 (*Pass 77*) của vệ tinh đo cao Jason-2 (đường chấm đứt màu đỏ) cắt qua phần mặt nước của hồ chứa Phú Ninh (Hình 1b và 1c). Phần giao cắt này gọi là trạm ảo, được ký hiệu bằng khung chữ nhật màu đỏ (ở giữa), và trọng tâm của trạm ảo được ký hiệu bằng tam giác màu vàng (Hình 1c).



Hình 1. a) Vị trí tỉnh Quảng Nam, b) Vị trí hồ chứa Phú Ninh, c) Vị trí đường quan trắc số 77 của Jason-2

2.2. Vệ tinh đo cao Jason-2

Nghiên cứu này khai thác số liệu đo cao của vệ tinh Jason-2 vì vệ tinh này có bước thời gian đo đạc (10 ngày) ngắn hơn vệ tinh ENVISAT (35 ngày). Vệ tinh Jason-2 được phóng lên quỹ đạo vào năm 2008 và vẫn đang hoạt động để thu thập số liệu quan trắc mực nước toàn cầu [9]. Nghiên cứu sử dụng sản phẩm S-GDR (*Sensor-Geophysical Data Records*) với tần suất sóng radar là 20 Hz tương ứng với khoảng cách giữa hai điểm đo là gần 300m. Thông số kỹ thuật của vệ tinh Jason-2 trình bày ở Bảng 1. Số liệu của Jason-2 S-GDR có thể tải miễn phí tại <ftp://ftp.nodc.noaa.gov/pub/data.nodc/jason2/>.

Bảng 1. Thông tin đặc tính của vệ tinh đo cao Jason-2

Tên vệ tinh	Sản phẩm	Chu kỳ lặp lại	Độ phân giải	Độ chính xác đo cao	Giai đoạn đo
Jason-2/OSTM	S-GDR (20hz)	10 ngày	300 m x 315 km	2,5 cm	2008- hiện tại

2.3. Dữ liệu ảnh vệ tinh Landsat TM7

Ảnh viễn thám quang học (*optical remote sensing*) với độ phân giải cao Landsat TM 7 (*Thematic Mapping*) được sử dụng để xác định ranh giới đường mặt nước của hồ chứa. Landsat TM 7 có tổng cộng 8 kênh (*band*) đánh số thứ tự từ 1 đến 7 và một kênh toàn sắc (*panchromatic*). Trong đó vùng bức xạ nhìn thấy gồm kênh 1, 2 và 3. Vùng hồng ngoại với độ phân giải 30 m gồm có kênh 4, 5 và 7. Kênh số 6 thuộc vùng hồng ngoại nhiệt có độ phân giải 60 m. Kênh toàn sắc có độ phân giải 15m. Ảnh vệ tinh Landsat TM 7 có thể tải miễn phí từ trang web của USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov>).

2.4. Mực nước đo tại hồ Phú Ninh

Mực nước thực đo tại hồ Phú Ninh được quan trắc tại vị trí tràn xả lũ. Mực nước được đo 2 lần một ngày và được đo từ năm 2008 đến nay. Số liệu cao độ mực nước thực đo tại hồ chứa được cung cấp bởi Công ty TNHH MTV Thủy lợi Quảng Nam.

3. Phương pháp

3.1. Mực nước đo bằng vệ tinh đo cao Jason-2

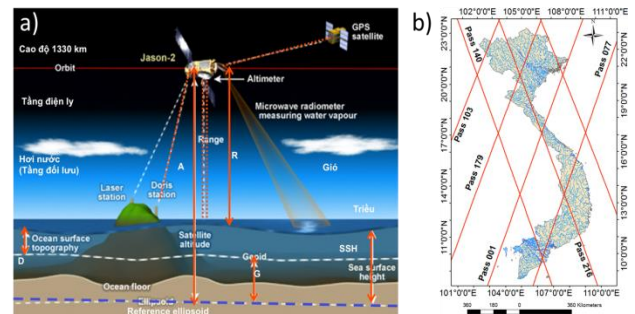
Vệ tinh đo cao Jason-2 với mục đích chính là đo cao độ mực nước biển (Hình 2a). Cao độ mực nước biển được tính toán dựa theo nguyên lý được trình bày bởi Fu and Cazenave [10]. Cao độ mực nước so với mặt chuẩn (H)

được tính toán như sau:

$$H = A - R + C \quad (1)$$

Trong đó, A là độ cao của vệ tinh so với mặt chuẩn (*reference ellipsoid*), R là khoảng cách giữa vệ tinh và mực nước biển, C là các giá trị hiệu chỉnh sai số gây ra do ảnh hưởng của tầng đối lưu, tầng điện ly, và thủy triều.

Khi áp dụng nguyên lý này để tính toán mực nước trong sông và hồ chứa, sai số hiệu chỉnh chỉ kể đến là sai số ở tầng đối lưu (*dry troposphere*, *wet troposphere*), tầng điện ly (*ionosphere*), và thủy triều (*solid earth* và *pole tides*). Các sai số khác được áp dụng cho tính toán cao độ mực nước biển được bỏ qua khi tính toán mực nước sông và hồ chứa trên đất liền [11]. Hình 2b thể hiện các đường quan trắc của vệ tinh đo cao Jason-2 cắt qua các hệ thống sông trên phần đất liền Việt Nam.



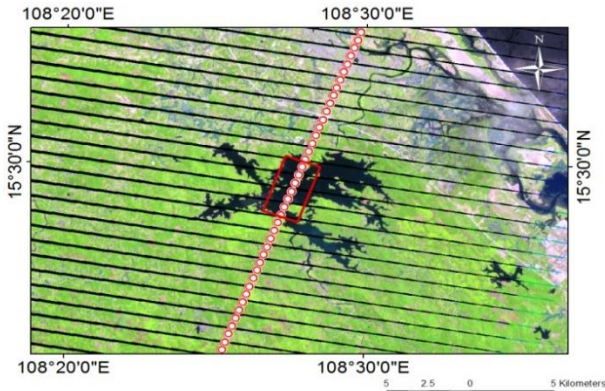
Hình 2. (a) Nguyên lý đo đạc cao độ mực nước biển của vệ tinh Jason-2 và các yếu tố ảnh hưởng đến sai số đo đạc, (b) Đường quan trắc trên bề mặt trái đất (*ground-tracks*) của vệ tinh Jason-2 cắt qua hệ thống sông Việt Nam

Khi vệ tinh đo cao độ mực nước trên đại dương, các sóng tín hiệu phát ra từ vệ tinh đến mặt biển và phản xạ lại vệ tinh không bị ảnh hưởng nhiều bởi tầng phủ mặt đất (rừng cây, bụi cỏ hay mặt đất). Tuy nhiên, khi vệ tinh đo cao độ mực nước trong sông và hồ trên đất liền, sóng radar thu và phát ra từ vệ tinh sẽ bị nhiễu bởi lớp phủ thực vật, các cồn cát (đụn cát) trong sông, hoặc các đảo trong hồ chứa. Vì vậy không thể áp dụng trực tiếp các tham số đo đạc của vệ tinh đo cao Jason-2 cho đại dương vào tính toán mực nước trong sông và hồ trên đất liền.

Do đó, Bamber [12] đã phát triển thuật toán Ice-1 để theo dõi và phân tích lại dạng sóng (*waveform re-tracker*) phân xạ từ mặt đất liền để ước tính các tham số cao độ và sai số hiệu chỉnh khi quan trắc mực nước trên đất liền. Nghiên cứu này sử dụng các tham số ước tính từ thuật toán Ice-1 để tính toán cao độ mực nước cho hồ chứa Phú Ninh.

Đầu tiên, dữ liệu của các kênh 5, 4, và 3 của vệ tinh Landsat TM7 được tổ hợp để tạo ra ảnh mô phỏng màu sắc tự nhiên (đỏ - xanh lá cây - xanh da trời) (Hình 3). Sau đó đường bao mặt nước hồ chứa được xác định dựa vào sự khác biệt về màu sắc giữa mặt nước và mặt đất. Đường quan trắc Pass 77 của vệ tinh Jason-2 thể hiện là các điểm hình vành khăn cắt qua mặt thoáng hồ chứa (Hình 3). Phần giao cắt của vệ tinh và hồ chứa (khung chữ nhật) được gọi là trạm ảo (Hình 3). Kích thước của hình chữ nhật được chọn lựa sao cho vừa đảm bảo chứa được nhiều điểm quan trắc của vệ tinh nhất và đồng thời ít bị ảnh hưởng của phần mặt đất và cây cối nhất. Sau khi xây dựng được trạm ảo, cao độ mực nước được tính toán dựa theo công thức (1) tại các điểm quan trắc

thuộc bên trong hình chữ nhật (trạm ảo). Cao độ mực nước hồ chứa tại một thời điểm quan trắc nhất định được xác định bằng cách tính trung vị (median) của các điểm đo đã được lựa chọn tại trạm ảo [13]. Cuối cùng, các điểm ngoại lai (outliers) được loại bỏ từ chuỗi số liệu quan trắc bằng cách so sánh các giá trị quan trắc với khoảng tin cậy 95% (confidence interval of 95%) của toàn bộ chuỗi quan trắc.



Hình 3. Ảnh màu tự nhiên của hồ chứa Phú Ninh tạo ra từ ảnh vệ tinh Landsat TM7. Đường chấm vành khăn là đường quan trắc Pass 77 của vệ tinh Jason-2

3.2. Phương pháp đánh giá

Vị trí trạm thực đo tại hồ chứa Phú Ninh được bố trí tại vị trí tràn xả lũ. Trong khi đó, vị trí trọng tâm của trạm ảo nằm về phía thượng lưu của hồ, cách vị trí trạm thực đo tại tràn gần 5,6 km. Do khác nhau về vị trí quan trắc nên hai chuỗi số liệu mực nước sẽ có chênh lệch độ cao gây ra bởi độ dốc đường mặt nước trong hồ chứa. Để có thể so sánh và đánh giá độ chính xác của mực nước quan trắc bằng vệ tinh đo cao so với mực nước thực đo tại trạm, nghiên cứu sử dụng phương pháp thu phóng (công thức 2) để chuyển hai chuỗi số liệu mực nước về cùng một tỷ lệ để có thể so sánh. Công thức thu phóng như sau

$$MN_{\text{thu phóng}} = (MN_{\text{quan trắc}} - MN_{\min}) / (MN_{\max} - MN_{\min}) \quad (2)$$

Trong đó, $MN_{\text{thu phóng}}$ là mực nước sau khi thu phóng, $MN_{\text{quan trắc}}$ là mực nước quan trắc bằng vệ tinh hoặc trạm đo, $MN_{\max}$ và $MN_{\min}$ tương ứng là mực nước lớn nhất và bé nhất của chuỗi số liệu quan trắc bằng vệ tinh hoặc bằng trạm đo.

Hai chuỗi số liệu mực nước sau khi được thu phóng sẽ được so sánh đánh giá dựa theo các tiêu chí về độ tương quan (R^2), sai số quân phương (RMSE), và độ thiên lệch (Bias)

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (y_i^0 - \bar{y}^0)(\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i^0 - \bar{y}^0)^2 \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})^2}} \right]^2 \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i^0 - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (4)$$

$$\text{Bias} = \left(\frac{\bar{\hat{y}}}{\bar{y}^0} - 1 \right) \quad (5)$$

Trong đó, y_i^0 là mực nước thực đo tại trạm, $\hat{y}_i$ là mực nước quan trắc bằng vệ tinh. $\bar{y}^0$ và $\bar{\hat{y}}$ lần lượt là giá trị trung bình của chuỗi mực nước đo tại trạm và mực nước quan trắc bằng vệ tinh.

3.3. Phương trình quan hệ giữa mực nước thực đo và mực nước quan trắc của vệ tinh

Để có thể sử dụng mực nước quan trắc bằng vệ tinh

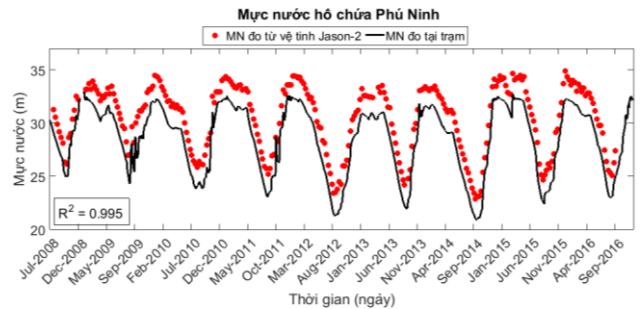
trong việc ước tính mực nước tại trạm đo của hồ chứa, phương trình hồi quy tuyến tính bậc nhất được áp dụng để xây dựng quan hệ giữa hai chuỗi số liệu mực nước.

$$Y = a + bX \quad (6)$$

Trong đó, a và b là hai hệ số của phương trình tuyến tính bậc nhất. X là số liệu mực nước quan trắc bằng vệ tinh (10 ngày). Y là số liệu mực nước ước tính tại vị trí trạm thực đo tại cùng thời điểm tương ứng.

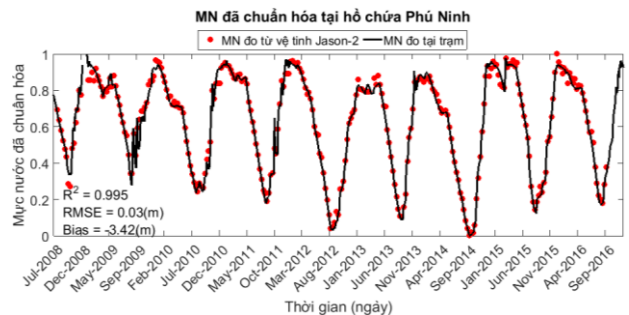
4. Kết quả và bàn luận

Kết quả cho thấy mực nước quan trắc bằng vệ tinh có quan hệ rất chặt chẽ với mực nước đo tại trạm với hệ số tương quan rất cao $R^2=0,995$ (Hình 4). Mực nước quan trắc bằng vệ tinh thể hiện khá rõ dao động mực nước theo mùa (mùa khô và mùa mưa). Sự chênh lệch về độ lớn của hai chuỗi mực nước trong Hình 4 là do ảnh hưởng của độ dốc đường mặt nước trong hồ giữa hai vị trí đo đạc (cách nhau gần 5,6 km).



Hình 4. Chuỗi số liệu mực nước đo tại hồ (đường nét liền) và mực nước quan trắc bằng vệ tinh Jason-2 (điểm tròn)

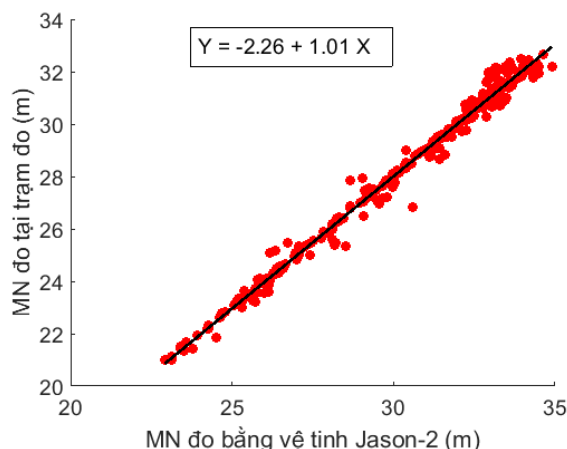
Hai chuỗi số liệu mực nước sau khi được thu phóng về cùng tỷ lệ (từ 0 đến 1) được thể hiện trong Hình 5. Kết quả cho thấy rằng mực nước quan trắc bằng vệ tinh gần như mô tả chính xác dao động của mực nước thực đo với độ lệch quân phương $RSME = 3$ cm. Mực nước quan trắc bằng vệ tinh Jason-2 bé hơn mực nước thực đo tại hồ là 0,03 m (Hình 5). Nguyên nhân dẫn đến độ lệch này là do gió Tây Nam tạo ra độ dềnh mực nước trong hồ chứa.



Hình 5. Số liệu mực nước thu phóng từ mực nước đo tại trạm (đường nét liền) và mực nước thu phóng từ số liệu quan trắc vệ tinh (điểm tròn)

Để có thể dự báo mực nước hồ chứa từ dữ liệu vệ tinh đo cao Jason-2, phương trình hồi quy tuyến tính được thiết lập dựa vào số liệu quan trắc mực nước từ vệ tinh và số liệu thực đo tại hồ (Hình 6). Hệ số độ dốc của phương trình (b) gần như bằng 1, do đó trị số $a = -2,26$ m thể hiện sự chênh lệch độ cao mực nước giữa hai điểm đo. Hiện tại, do chưa có số liệu thực đo về độ dốc đường mực nước trong hồ nên nghiên

cứu này tạm thời chưa đánh giá độ lệch mực nước giữa trạm thực đo và trạm ảo. Tuy nhiên, kết quả cho thấy tiềm năng trong việc sử dụng số liệu đo cao của vệ tinh Jason-2 trong việc hỗ trợ quan trắc mực nước hồ chứa Phú Ninh.



Hình 6. Phương trình quan hệ giữa mực nước đo tại trạm và mực nước quan trắc bằng vệ tinh Jason-2 (đường nét liền), các giá trị mực nước quan trắc (điểm tròn)

5. Kết luận

Hiện nay, chưa có một nghiên cứu nào sử dụng số liệu vệ tinh đo cao Jason-2 để quan trắc mực nước hồ chứa và sông tại Việt Nam. Nghiên cứu này đã chỉ ra khả năng ứng dụng của vệ tinh đo cao Jason-2 trong quan trắc mực nước các hồ chứa Phú Ninh. Kết quả cho thấy mực nước quan trắc bằng vệ tinh có tương quan chặt chẽ với mực nước đo tại trạm ($R^2 = 0,995$) và sai số khá nhỏ 3 cm. Phương trình tương quan hồi quy tuyến tính có thể được sử dụng để ước tính mực nước tại hồ chứa từ số liệu quan trắc của vệ tinh đo cao Jason-2.

Với chu kỳ lặp lại là 10 ngày, số liệu vệ tinh Jason-2 có thể được áp dụng cho việc xây dựng kế hoạch cấp nước của hồ vào mùa khô. Tuy nhiên, số liệu mực nước quan trắc bằng vệ tinh hiện tại chưa thể áp dụng cho việc điều tiết lũ của hồ. Do đó, việc tạo ra số liệu mực nước hằng ngày từ số liệu mực nước 10 ngày của vệ tinh đo cao Jason-2 là một hướng nghiên cứu có nhiều tiềm năng. Nghiên cứu hiện tại dừng lại ở việc đánh giá dựa trên toàn bộ chuỗi số liệu, việc

phân tích theo mùa nằm ngoài phạm vi đối tượng nghiên cứu của bài báo này. Do đó, việc đánh giá độ chính xác của số liệu đo cao từ vệ tinh theo mùa mưa và mùa khô là hướng nghiên cứu tiếp theo của nhóm tác giả.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] C. M. Birkett and B. Beckley, "Investigating the Performance of the Jason-2/OSTM Radar Altimeter over Lakes and Reservoirs", *Marine Geodesy*, vol. 33, pp. 204-238, 2010.
- [2] J.-F. Crétaux and C. Birkett, "Lake studies from satellite radar altimetry", *Comptes Rendus Geoscience*, vol. 338, pp. 1098-1112, 2006.
- [3] S. Calmant and F. Seyler, "Continental surface waters from satellite altimetry", *Comptes Rendus Geoscience*, vol. 338, pp. 1113-1122, 2006.
- [4] K.-T. Liu, K.-H. Tseng, C. Shum, C.-Y. Liu, C.-Y. Kuo, G. Liu, et al., "Assessment of the Impact of Reservoirs in the Upper Mekong River Using Satellite Radar Altimetry and Remote Sensing Imagery", *Remote Sensing*, vol. 8, p. 367, 2016.
- [5] S. Biancamaria, F. Hossain, and D. P. Lettenmaier, "Forecasting transboundary river water elevations from space", *Geophysical Research Letters*, vol. 38, 2011.
- [6] F. Papa, S. K. Bala, R. K. Pandey, F. Durand, V. Gopalakrishna, A. Rahman, et al., "Ganga-Brahmaputra river discharge from Jason-2 radar altimetry: An update to the long-term satellite-derived estimates of continental freshwater forcing flux into the Bay of Bengal", *Journal of Geophysical Research: Oceans*, vol. 117, 2012.
- [7] A. K. Dubey, P. K. Gupta, S. Dutta, and R. P. Singh, "An improved methodology to estimate river stage and discharge using Jason-2 satellite data", *Journal of Hydrology*, vol. 529, pp. 1776-1787, 2015.
- [8] B. T. K. T. Đoàn Văn Chính, Li Dawei, "Sử dụng số liệu đo vệ tinh Topex/Poseidon và Jason-1 khảo sát sự thay đổi của nước biển", *Tuyển tập Hội nghị khoa học thường niên- Đại học Thủy lợi*, pp. 131-133, 2013.
- [9] J. Dumont, V. Rosmorduc, N. Picot, S. Desai, H. Bonekamp, J. Figa, et al., "OSTM/Jason-2 products handbook", CNES: SALP-MU-M-OP-15815-CN, EUMETSAT: EUM/OPS-JAS/MAN/08/0041, JPL: OSTM-29-1237, NOAA/NESDIS: Polar Series/OSTM J, vol. 400, 2009.
- [10] L.-L. Fu and A. Cazenave, *Satellite altimetry and earth sciences: a handbook of techniques and applications* vol. 69: Academic Press, 2000.
- [11] J. G. Leon, S. Calmant, F. Seyler, M. P. Bonnet, M. Cauhopé, F. Frappart, et al., "Rating curves and estimation of average water depth at the upper Negro River based on satellite altimeter data and modeled discharges", *Journal of Hydrology*, vol. 328, pp. 481-496, 2006.
- [12] J. L. Bamber, "Ice sheet altimeter processing scheme", *International Journal of Remote Sensing*, vol. 15, pp. 925-938, 1994.
- [13] F. Frappart, F. Seyler, J.-M. Martinez, J. G. León, and A. Cazenave, "Floodplain water storage in the Negro River basin estimated from microwave remote sensing of inundation area and water levels", *Remote Sensing of Environment*, vol. 99, pp. 387-399, 2005.

(BBT nhận bài: 22/05/2017, hoàn tất thủ tục phản biện: 02/06/2017)