



Ứng dụng ảnh vệ tinh Sentinel 2 trong ước tính độ sâu vùng biển ven bờ Phú Tân - Tân Phú Đông - Tiền Giang

Nguyễn Minh Hải^{1,*}, Trần Thanh Hà¹, Trần Thị Hoà¹, Nguyễn Minh Ngọc², Trần Trường Giang¹

¹Trường Đại học Mỏ - Địa chất, 18 Phố Viên, Đông Ngạc, Hà Nội, Việt Nam

²Viện Công nghệ vũ trụ, 18 Hoàng Quốc Việt, Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

Email tác giả liên hệ: nguyenminhhai@hmg.edu.vn

<https://doi.org/10.5281/zenodo.18788372>

Tóm tắt:

Vùng biển ven bờ không chỉ là nơi tiếp giáp về mặt địa lý giữa biển và đất liền mà còn đóng vai trò là cửa ngõ giao thương, thúc đẩy hội nhập kinh tế quốc tế. Trong đó thông tin về độ sâu đáy biển có ý nghĩa quan trọng trong phát triển các tuyến giao thông đường thủy, quy hoạch phát triển nuôi trồng thủy sản. Có rất nhiều phương pháp xác định độ sâu như sử dụng LiDAR bathymetry, sonar,... cho độ chính xác cao nhưng chi phí thực hiện lớn. Ước tính độ sâu vùng biển ven bờ bằng phương pháp viễn thám với dữ liệu ảnh vệ tinh đa phổ là một hướng tiếp cận mới, mang lại hiệu quả kinh tế nhất định. Việc xuất hiện dữ liệu ảnh vệ tinh Sentinel-2 với 13 kênh phổ không những hỗ trợ nâng cao năng lực và hiệu quả trong công tác quản lý tài nguyên thiên nhiên, mà còn mở ra các hướng nghiên cứu mới. Nghiên cứu này sử dụng ảnh vệ tinh Sentinel-2 và các mô hình ước tính độ sâu bằng thuật toán tỷ số kênh phổ, hồi quy đa biến, với hệ số xác định $R^2 = 0,9047$ thuật toán hồi quy đa biến cho độ chính xác tốt nhất tại khu vực thử nghiệm xã Phú Tân- Tân Phú Đông - Tiền Giang.

Từ khóa: Hồi quy đa biến, độ sâu, biển ven bờ, Sentinel 2.

Ngày nhận bài: 15/12/2025 Ngày sửa lại: 10/01/2026 Ngày chấp nhận đăng: 12/01/2026 Ngày xuất bản: 28/02/2026

Research on assessing Sentinel 2 to estimate coastal water depth in the region of Phu Tan – Tan Phu Dong – Tien Giang

Nguyễn Minh Hải^{1,*}, Trần Thanh Hà¹, Trần Thị Hoà¹, Nguyễn Minh Ngọc², Trần Trường Giang¹

¹Hanoi University of Mining and Geology, 18 Vien Street, Dong Ngac, Ha Noi, Viet Nam

²Space Technology Institute, 18 Hoang Quoc Viet, Cau Giay, Ha Noi, Viet Nam

Corresponding Author Email: nguyenminhhai@hmg.edu.vn

Abstract:

The coastal zone represents not only a geographical interface between land and sea but also plays a strategic role as a gateway for maritime trade and a catalyst for international economic integration. Among the key geospatial variables, bathymetric information is particularly significant for the development of inland waterway transport networks and the planning of aquaculture zones. Although several high precision methods such as LiDAR bathymetry and sonar have been widely applied, their operational costs remain considerably high. In this context, satellite remote sensing, particularly the use of multispectral imagery, offers a promising and cost-effective alternative for estimating shallow-water bathymetry in coastal areas. The availability of Sentinel-2 data, featuring 13 spectral bands, not only enhances the capabilities of natural resource monitoring and management but also opens new avenues for research and application. This study utilizes Sentinel -2 data in combination with band ration and multivariate regression algorithms for bathymetric estimation. Among the tested approaches, the multivariate regression model achieved the highest performance, with a coefficient of determination R^2 equals 0.9047, in the experimental area of Phu Tan commune, Tan Phu Dong district, Tien Giang province.

Keywords: Multivariate Regression, Water Depth, Coastal Water, Sentinel - 2.

Submission received: 15/12/2025

Revised: 10/01/2026

Accepted: 12/01/2026

Published: 28/02/2026



1. Mở đầu

Theo Tổng cục Biển và Hải đảo Việt Nam, 2021 có đề cập đến Vùng biển ven bờ là khu vực biển tiếp giáp với đất liền, kéo dài từ đường bờ ra ngoài khơi đến ranh giới của vùng đặc quyền kinh tế (EEZ) hoặc giới hạn do pháp luật quốc gia quy định [1]. Độ sâu vùng biển ven bờ thường dao động từ 0 đến khoảng 200 mét, với đáy biển thoải dần. Đây là phần của thềm lục địa - nơi có địa hình tương đối bằng phẳng, nước nông và chịu ảnh hưởng trực tiếp từ đất liền.

Các phương pháp đo độ sâu truyền thống, như sử dụng LiDAR bathymetry hoặc sonar, thường có độ chính xác cao nhưng thời gian khảo sát dài và không thể bao phủ trên diện rộng [2]. Trong khi đó, ảnh vệ tinh cung cấp một giải pháp thay thế hiệu quả, cho phép ước tính độ sâu với phạm vi không gian rộng, tần suất quan sát cao và chi phí thấp hơn [3]. Các mô hình phổ biến như phương pháp tỷ số kênh phổ (Ratio Model) [4], hồi quy đa biến, hoặc phương pháp học máy (Machine Learning) đã được áp dụng thành công để xác định độ sâu ở nhiều vùng biển khác nhau [5]–[7].

Với ưu điểm của dữ liệu viễn thám có thể kết hợp với các mô hình số (GIS mô hình thủy động lực để tăng độ chính xác và ứng dụng đa mục đích (quy hoạch, cảnh báo thiên tai...), công nghệ viễn thám được ứng dụng rộng rãi trong nghiên cứu môi trường biển [8], đặc biệt là trong việc theo dõi biến động đường bờ [9], [10] và ước tính độ sâu vùng biển ven bờ [5], [11], [12]. Các nghiên cứu trước đây đã sử dụng ảnh vệ tinh để đánh giá diễn biến địa hình đáy biển tại nhiều khu vực khác nhau [3], [6], [13]. Những nghiên cứu này đã chứng minh tính hiệu quả của ảnh vệ tinh trong việc cung cấp dữ liệu nhanh chóng và chính xác về sự biến đổi địa hình đáy biển [14].

Ngoài ra, thông tin về độ sâu còn giúp đánh giá sự thay đổi địa hình đáy biển, hỗ trợ quy hoạch giao thông đường thủy, bảo vệ rạn san hô và ứng phó với biến đổi khí hậu [9]. Trong bối cảnh biến đổi khí hậu và nước biển dâng, việc giám sát độ sâu vùng ven biển và cửa sông ngày càng trở nên cấp thiết để đánh giá tác động xói lở bờ biển và bảo vệ các hệ sinh thái nhạy cảm [8].

Với vị trí giáp biển Đông và cửa sông Mê Kông, kinh tế của xã Phú Tân chủ yếu dựa vào nông nghiệp và ngư nghiệp. Việc quy hoạch, phát triển các hoạt động khai thác và nuôi trồng thủy sản là rất cần thiết đối với khu vực. Để xác định độ sâu đáy biển phục vụ công tác quy hoạch trước đây thường sử dụng các phương pháp

truyền thống chưa đem lại hiệu quả cao về kinh tế. Để khắc phục những hạn chế này, sử dụng ảnh vệ tinh là một phương án khả thi.

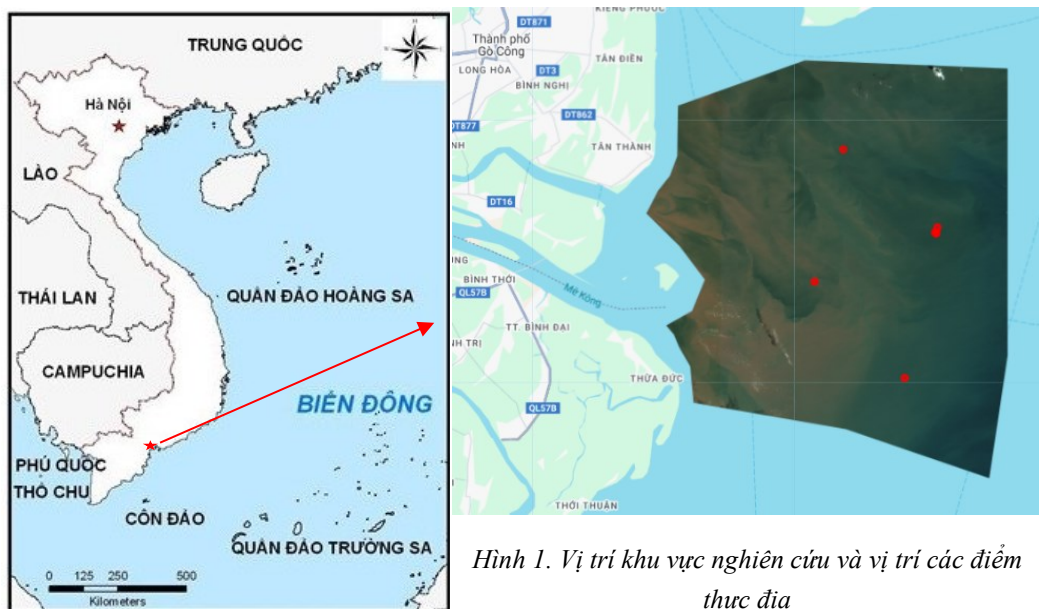
2. Phương pháp nghiên cứu

2.1 Khu vực nghiên cứu

Xã Phú Tân nằm ở phía đông của huyện Tân Phú Đông, tỉnh Tiền Giang, thuộc vùng Đồng bằng sông Cửu Long. Vị trí địa lý của xã giáp biển Đông ở phía Đông, giáp xã Phú Đông ở phía Tây, giáp tỉnh Bến Tre ở phía Nam, giáp huyện Gò Công Đông ở phía Bắc.

Với bờ biển dài khoảng 12 km, xã Phú Tân là nơi có tiềm năng phát triển du lịch biển. Các hoạt động trải nghiệm và thể thao trên biển, góp phần thúc đẩy phát triển du lịch, đóng góp vào kinh tế địa phương. Bên cạnh đó các hoạt động khai thác và nuôi trồng thủy sản cũng là nguồn kinh tế chính của xã.

Hình 1 thể hiện sơ đồ vị trí khu vực nghiên cứu và vị trí các điểm đo sâu thực tế bằng tàu chuyên dụng.



Hình 1. Vị trí khu vực nghiên cứu và vị trí các điểm đo sâu thực địa

2.2 Dữ liệu sử dụng

2.2.1 Dữ liệu ảnh vệ tinh

Nghiên cứu này sử dụng dữ liệu ảnh vệ tinh Sentinel-2 - vệ tinh được nghiên cứu và phát triển bởi Cơ quan Hàng không vũ trụ châu Âu (ESA). Ảnh Sentinel-2 phủ trùm khu vực nghiên cứu vào tháng 2 năm 2019 với độ che phủ mây dưới 10%.



Bảng 1 thể hiện thông tin của ảnh Sentinel-2 ở mức 2A, bao gồm 12 kênh đa phổ từ kênh nhìn thấy đến hồng ngoại sóng ngắn, tương ứng từ B1 đến B12.

Bảng 1. Thông tin kênh đa phổ của ảnh Sentinel-2 Level 2A

Kênh (Band)	Tên	Bước sóng trung tâm (nm)	Độ rộng phổ (nm)	Độ phân giải (m)
Band 1	Coastal/Aerosol	443	20	60
Band 2	Blue	490	65	10
Band 3	Green	560	35	10
Band 4	Red	665	30	10
Band 5	Red Edge 1	705	15	20
Band 6	Red Edge 2	740	15	20
Band 7	Red Edge 3	783	20	20
Band 8	Near Infrared (NIR)	842	115	10
Band 8A	Narrow NIR	865	20	20
Band 9	Water Vapor	945	20	60
Band 10	SWIR - Cirrus	1375	30	60
Band 11	SWIR 1	1610	90	20
Band 12	SWIR 2	2190	180	20

2.2.2 Dữ liệu thực địa

Dữ liệu thực địa là những dữ liệu đo đặc độ sâu trong khu vực nghiên cứu. Dữ liệu độ sâu được xác định bằng phương pháp đo sâu sử dụng máy đo sâu hồi âm CHC D230. Máy đo sâu hồi âm CHC D230 là thiết bị nhỏ gọn, phù hợp cho các công tác khảo sát dưới nước với độ chính xác $\pm 0.01 m + 0.1\% \times H$ (H là độ sâu nước) [15].

Các dữ liệu này được sử dụng để kiểm chứng độ chính xác và tin cậy của mô hình ước tính độ sâu từ dữ liệu ảnh vệ tinh. Thông tin chi tiết về dữ liệu thực địa được mô tả trong Bảng 2 dưới đây, vị trí của các điểm đo được thể hiện ở Hình 1:

Bảng 2. Dữ liệu thực địa (đơn vị độ sâu: m)

Tên	Vĩ độ	Kinh độ	Độ sâu	Thời gian đo
ND09-1	10,24127	106,96968	10	27/02/2019
ND09-2	10,24122	106,96967	11	27/02/2019
ND09-3	10,24440	106,97077	9	27/02/2019
77	10,29547	106,90760	10	27/02/2019

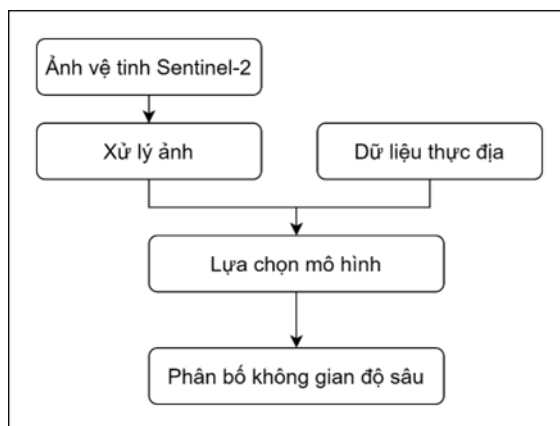
78	10,20868	106,88815	4	27/02/2019
ND09-4	10,24113	106,96963	9	27/02/2019
ND09-5	10,24108	106,96962	10	27/02/2019
ND09-6	10,24052	106,96987	9	27/02/2019
81	10,14503	106,94890	9	27/02/2019

2.3 Phương pháp nghiên cứu

Xác định độ sâu bằng ảnh vệ tinh, hay còn gọi là Satellite-Derived Bathymetry (SDB), dựa trên nguyên tắc rằng ánh sáng truyền qua nước bị hấp thụ và tán xạ theo các mức độ khác nhau tùy thuộc vào độ sâu và loại đáy biển [3], [16].

Trong nghiên cứu của mình tác giả Stumpf và cộng sự năm 2003 [3] đã đề xuất sử dụng mô hình đảo ngược độ sâu phi tuyến tính dựa vào tỷ lệ kênh phổ đã biến đổi logarit. Khi ánh sáng mặt trời chiếu xuống mặt nước, một phần bị hấp thụ bởi nước và các chất hòa tan trong nước, phần còn lại phản xạ từ đáy trở lại cảm biến vệ tinh. Lượng ánh sáng phản xạ này có thể được sử dụng để ước tính độ sâu của nước dựa trên các mối quan hệ quang học [17].

Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả xây dựng quy trình ước tính độ sâu theo sơ đồ thể hiện ở Hình 2, trong đó, kết quả xử lý dữ liệu ảnh vệ tinh sẽ được kết hợp với dữ liệu thực địa để giúp cho việc lựa chọn mô hình ước tính (bước 3) được chính xác hơn.



Hình 2. Sơ đồ quy trình công nghệ xác định độ sâu sử dụng ảnh vệ tinh Sentinel- 2

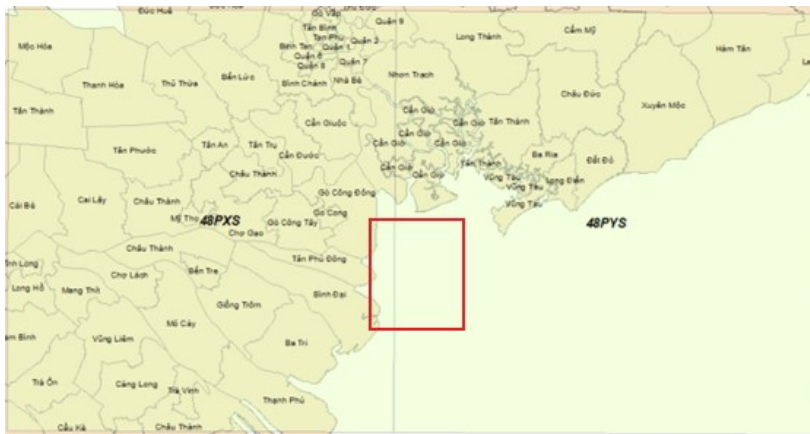
(1) Thu nhận ảnh vệ tinh Sentinel-2

Nhóm tác giả đã sử dụng ảnh của vệ tinh Sentinel- 2 có thời gian thu nhận ảnh cùng với thời gian đo thực địa để áp dụng tính toán cho khu vực thực nghiệm. Hình

3 và Bảng 3 thể hiện vị trí tương quan của khu vực nghiên cứu và ảnh viễn thám sử dụng, cụ thể như sau:

Bảng 3. Bảng thông tin ảnh vệ tinh Sentinel- 2 sử dụng trong nghiên cứu

TT	Tên cảnh	Phiên hiệu cảnh	Thời gian chụp
1	20190227T030651	T48PYS	27/02/2019
2	20190227T030651	T48PXS	27/02/2019



Hình 3. Khu vực nghiên cứu (ô tứ giác màu đỏ), nằm trên hai cảnh ảnh Sentinel- 2 là 48PXS và 48PYS

(2). Xử lý dữ liệu ảnh đầu vào

Dữ liệu ảnh vệ tinh Sentinel 2 sau khi thu thập được tiến hành hiệu chỉnh khí quyển, hiệu chỉnh hình học, tăng cường chất lượng ảnh, hiệu chỉnh bức xạ và cắt ảnh theo ranh giới khu vực nghiên cứu [18]. Dữ liệu sau khi xử lý được sử dụng làm dữ liệu đầu vào cho các mô hình ước tính độ sâu ở bước tiếp theo.

(3). Xác định thông tin và vị trí dữ liệu thực địa

Nghiên cứu đã sử dụng 09 điểm đo sâu thực địa trong khu vực nghiên cứu (chi tiết trong Bảng 2 và Hình 1). Dữ liệu này được sử dụng cùng với các thông tin chiết xuất mẫu bức xạ ở các kênh ảnh của dữ liệu đầu vào giúp lựa chọn ra mô hình thích hợp nhất cho khu vực nghiên cứu.

(4). Lựa chọn mô hình

Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả đã sử dụng mô hình đơn biến và mô hình đa biến trong ước tính độ sâu bằng ảnh Sentinel 2. Với ưu điểm nổi bật của mô hình đơn biến là cấu trúc đơn giản, dễ xây dựng và vận hành. Việc sử dụng chỉ một kênh

phổ giúp quá trình xử lý dữ liệu nhanh chóng, tiết kiệm thời gian cũng như chi phí. Tuy nhiên, mô hình đa biến lại phát huy hiệu quả khi tận dụng đồng thời nhiều kênh phổ, giúp tăng độ chính xác nhờ khai thác tối đa các thông tin quang học của ảnh vệ tinh. Mô hình đa biến cũng thích nghi tốt hơn với các điều kiện môi trường phức tạp và giảm ảnh hưởng của các yếu tố gây nhiễu. Nhờ đó, việc kết hợp cả hai loại mô hình sẽ góp phần nâng cao hiệu quả và độ tin cậy trong công tác ước tính độ sâu vùng ven biển.

a. Mô hình đơn biến (Single-Band Model): Đây là phương pháp sử dụng giá trị phản xạ tại một kênh phổ cụ thể để ước tính độ sâu của môi trường nước, đặc biệt là trong các nghiên cứu đo độ sâu vùng nước nông (Shallow Water Bathymetry). Mô hình này hoạt động dựa trên nguyên lý hấp thụ và tán xạ ánh sáng khi truyền qua nước, trong đó phản xạ ở các kênh có bước sóng khác nhau sẽ thay đổi theo độ sâu [16].

Các kênh phổ trong vùng ánh sáng khả kiến (Visible) như kênh xanh dương (Blue) và lục (Green) thường được sử dụng vì chúng có khả năng xuyên sâu hơn trong nước. Mối quan hệ giữa phản xạ và độ sâu thường được biểu diễn thông qua phương trình hồi quy tuyến tính hoặc phi tuyến [3]. Tuy nhiên, độ chính xác của mô hình phụ thuộc vào độ trong của nước và hiệu chỉnh ảnh hưởng của đáy biển.

b. Mô hình tỷ số kênh phổ (Ratio Model) kết hợp hồi quy đa biến

- Mô hình tỷ số kênh phổ (Ratio Model) do Stumpf và cộng sự năm 2003 [3] đề xuất là phương pháp phổ biến được sử dụng để ước tính độ sâu nước nông từ dữ liệu viễn thám. Phương pháp này dựa trên tỷ số phản xạ của hai kênh phổ khác nhau, giúp giảm thiểu các sai số do thay đổi độ chiếu sáng và ảnh hưởng của môi trường nước.

Xuất phát từ nguyên lý sử dụng mô hình đảo ngược độ sâu phi tuyến tính dựa vào tỷ lệ kênh phổ đã biến đổi logarit trong nghiên cứu của tác giả Stumpf và cộng sự năm 2003 [3] đã đề xuất. Theo đó, nhóm tác giả nghiên cứu đề xuất sử dụng nhiều tỉ số kênh phổ kết hợp với phương pháp hồi quy đa biến để xác định các tham số cho biến độc lập là tập hợp các điểm của tỉ lệ các kênh phổ. Công thức Stumpf được sử dụng tại khu vực nghiên cứu như sau:

$$Z = a \frac{\ln B_2}{\ln B_3} + b \frac{\ln B_2}{\ln B_4} + c \frac{\ln B_3}{\ln B_4} + d \quad (1)$$

Trong đó:



Z - Độ sâu ước tính (m)

B2, B3, B4 - phản xạ phổ tại các kênh Blue (B2), Green (B3), Red (B4).

a, b, c, d - là các tham số được xác định qua hiệu chỉnh với dữ liệu đo thực tế

- Hồi quy đa biến [17] là một phương pháp thống kê được sử dụng để xác định mối quan hệ giữa một biến phụ thuộc và nhiều biến độc lập. Phương pháp này giúp hiểu rõ hơn về cách các yếu tố khác nhau ảnh hưởng đến biến kết quả, đồng thời cho phép dự đoán giá trị của biến phụ thuộc dựa trên các biến độc lập.

Để xác định các tham số a, b, c, d sử dụng phương pháp Hồi quy đa biến:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon \quad (2)$$

Trong đó:

Y- Biến phụ thuộc (độ sâu đo thực địa)

X_1, X_2, \dots, X_n - Các biến độc lập (tỷ số kênh phổ của ảnh)

ε - sai số ngẫu nhiên

(5). Xây dựng sơ đồ phân bố không gian độ sâu

Từ kết quả của bước trên, chọn các điểm trên ảnh và sử dụng mô hình nội suy Kriging tính toán độ sâu cho toàn khu vực. Mô hình Kriging cho phép nội suy giá trị độ sâu có tính đến khoảng cách và mối tương quan không gian giữa các điểm, qua đó xác định được các điểm đặc trưng hoặc sự biến thiên của độ sâu. Sơ đồ phân bố không gian độ sâu ước tính từ ảnh vệ tinh trình bày với các mức phân chia độ sâu 0,5m cho khu vực nghiên cứu.

3. Kết quả và thảo luận

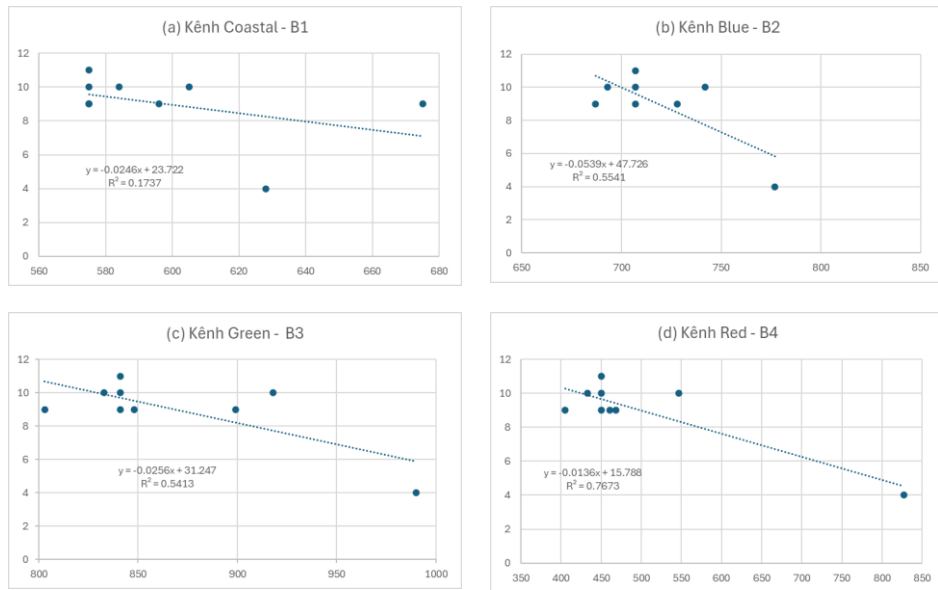
3.1. Ước tính độ sâu với mô hình đơn biến

Để xác định thông số đầu vào và lựa chọn kênh ảnh cho mô hình đơn biến, nhóm nghiên cứu đã sử dụng các kênh 1, 2, 3, 4 của dữ liệu ảnh Sentinel-2 để xác định tính tương quan với giá trị đo sâu thực tế với năng lượng bức xạ theo hàm tuyến tính đơn biến, kết quả được minh họa như ở Hình 4.

Hình 4 cho thấy: kênh 4(Red) có tương quan tốt nhất với giá trị đo sâu thực địa với $R^2 = 0,7673$. Trong khi đó, kênh 1 (Coastal), kênh 2 (Blue) và kênh 3 (Green) là các kênh có mức độ phản xạ mạnh tương quan sẽ thấp hơn. Từ đó, lựa

chọn các tham số cho phương trình tính giá trị độ sâu theo kênh 4 (Red) từ ảnh vệ tinh tương ứng như sau:

$$Y = 15.788 - 0.0136 * R_{red} \quad (3)$$



Hình 4. Tương quan của từng kênh ảnh với dữ liệu thực địa

Kết quả tính toán đối chiếu từ công thức (3) so với giá trị đo thực tế được minh họa trong Bảng 4 dưới đây:

Bảng 4. Độ sâu thực địa và độ sâu tính theo phương trình bậc 1 cho kênh Red từ ảnh vệ tinh (đơn vị: m)

Tên	Độ sâu thực địa	Độ sâu tính toán
ND09-1	10	9,899
ND09-2	11	9,668
ND09-3	9	9,518
77	10	8,349
78	4	4,541
ND09-4	9	9,668
ND09-5	10	9,668
ND09-6	9	10,280
81	9	9,423

Để đánh giá độ chính xác, và phù hợp của công thức tính toán trong ước tính độ sâu, các giá trị và chỉ số thường được sử dụng là R2, RMSE, MAE [19]. Bảng 5 thể hiện đánh giá độ chính xác khi ứng dụng hàm đơn biến dành cho từng kênh đơn.



Kết quả cho thấy bức xạ ở kênh đỏ có sự tương quan tương đối cao với độ sâu (khoảng 76.7%), kênh Blue có độ tương quan thấp nhất, khoảng 17.3%.

Bảng 5. Thống kê sai số cho các kênh phổ sử dụng phương trình bậc 1

Kênh phổ	R ²	RMSE	MAE
Kênh Coastal – B1	0,1737	1,7141	1,2247
Kênh Blue - B2	0,5541	1,9726	1,5149
Kênh Green - B3	0,5413	1.2772	1,0570
Kênh Red - B4	0,7673	0,9096	0,7607

Trong đó:

R²- Hệ số tương quan

RMSE- căn sai số trung phương

MAE- sai số trung bình tuyệt đối

3.2. Ước tính độ sâu với mô hình tỷ số kênh phổ

Bảng 6. Kết quả khi tính toán hồi quy đa biến

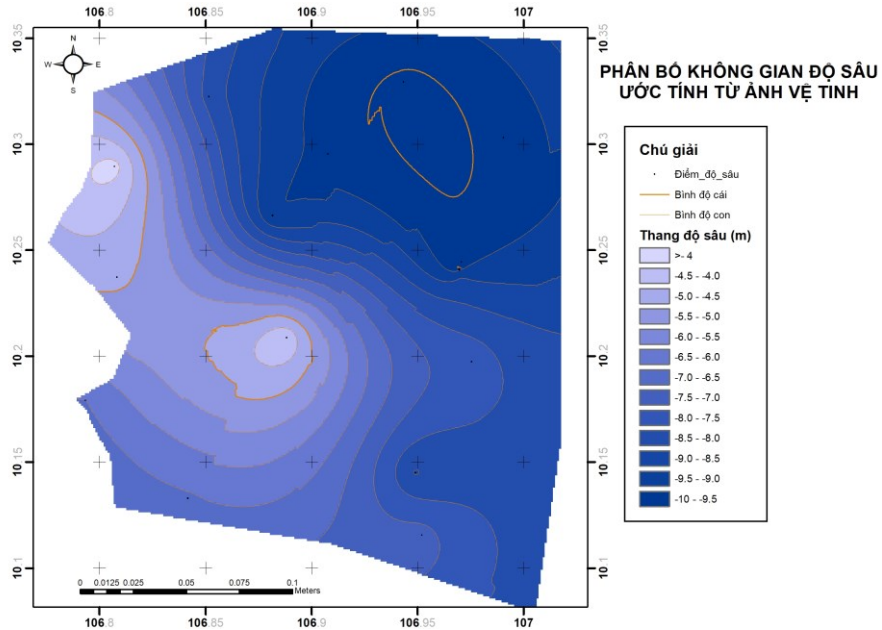
<i>Regression Statistics</i>	
Multiple R	0,95116
R Square	0,90470
Adjusted R Square	0,84752
Standard Error	0,78098
Observations	9

Kết quả tính toán của phương pháp Hồi quy đa biến xác định được các tham số: a = 12446; b = -11381; c = 11071; d = -12096 trong công thức (2). Từ các tham số này tính toán giá trị độ sâu từ ảnh vệ tinh tương ứng với các điểm thực địa, thu được như trong Bảng 7 với các sai số RMSE = 0,58211; MAE = 0,45367 và phân bố không gian độ sâu được trình bày trong Bảng 7.

Bảng 7. Độ sâu thực địa và độ sâu tính theo tỷ số kênh phổ từ ảnh vệ tinh (đơn vị : m)

Tên	Độ sâu thực địa	Độ sâu tính toán
ND09-1	10	10.091
ND09-2	11	9.926
ND09-3	9	9.769
77	10	9.561
78	4	4.096
ND09-4	9	9.926

ND09-5	10	9.926
ND09-6	9	9.160
81	9	8.547



Hình 5. Phân bố không gian độ sâu ước tính từ ảnh vệ tinh sử dụng mô hình Kriging cho khu vực thực nghiệm

Kết quả thử nghiệm áp dụng ảnh vệ tinh Sentinel-2 trong ước tính độ sâu vùng biển ven bờ tại khu vực Phú Tân - Tân Phú Đông, tỉnh Tiền Giang đã cho thấy tiềm năng ứng dụng của phương pháp này trong các khu vực biển ven bờ. Dữ liệu đa phổ từ Sentinel-2, sau khi được xử lý và phân tích thông qua phương pháp hồi quy đa biến, đã cung cấp các ước tính độ sâu biển với độ chính xác tương đối cao, đặc biệt trong các vùng nước có độ trong cao.

Bảng 8. Bảng so sánh các giá trị sai số của mô hình

Mô hình	R ²	RMSE	MAE
Mô hình hồi quy đa biến kết hợp tỉ số kênh phổ	0,9047	0,5821	0,4537
Mô hình đơn biến (sử dụng từng kênh phổ đơn lẻ - Kênh Red)	0,7673	0,9096	0,7607

Dựa vào Bảng 8 hệ số phương sai $R^2 = 0,9047$ cho mô hình hồi quy đa biến kết hợp tỉ số kênh phổ cho thấy 90,47% giá trị độ sâu có thể được dự đoán từ các tỉ số các kênh phổ, trong khi đối mô hình đơn biến (sử dụng kênh Red) chỉ có thể dự đoán được 76,73%. Điều đó giải thích được sai số RMSE của mô hình hồi quy đa biến và mô hình đơn biến.

Một yếu tố đáng chú ý là sự tương quan giữa các kênh phổ khác nhau của ảnh vệ tinh Sentinel-2 và độ sâu tại vùng biển ven bờ. Một số kênh phổ, như xanh lam



và xanh lá, thể hiện mối liên hệ mạnh mẽ với độ sâu của nước biển, trong khi các kênh hòng ngoại gần lại có mối liên hệ yếu hơn. Kết quả này phù hợp với lý thuyết về tương tác ánh sáng với nước biển, và đồng thời cũng đặt ra hướng nghiên cứu tiếp theo trong việc tối ưu hóa lựa chọn kênh phổ phù hợp.

Ngoài ra, việc xử lý dữ liệu ảnh vệ tinh cũng cho thấy một số thách thức cần giải quyết. Nhiều trong dữ liệu thô, đặc biệt là từ các vùng có độ trong thấp, yêu cầu áp dụng các kỹ thuật lọc và chuẩn hóa tiên tiến để cải thiện chất lượng đầu vào cho mô hình.

4. Kết luận

Nghiên cứu về ứng dụng ảnh vệ tinh Sentinel-2 trong ước tính độ sâu vùng biển ven bờ tại khu vực Phú Tân - Tân Phú Đông, tỉnh Tiền Giang đã mang lại những kết quả khả quan, khẳng định tiềm năng của công nghệ viễn thám trong việc nghiên cứu và quản lý môi trường biển. Kết quả thử nghiệm trên các mô hình khác nhau cho thấy mô hình hồi quy đa biến kết hợp tỉ số kênh phổ ($R^2 = 0,9047$; $RMSE = 0,5821$) có độ chính xác cao hơn mô hình đơn biến (sử dụng từng kênh phổ đơn lẻ $R^2 = 0,7673$; $RMSE = 0,9096$).

Bên cạnh đó, những thách thức về thu thập dữ liệu ảnh viễn thám, dữ liệu đo thực địa,...(dữ liệu ảnh phải không có mây, thời gian thu ảnh và thời gian đo thực địa không được lệch nhau quá xa,..) và sai số trong các khu vực có đặc điểm phức tạp của môi trường biển vẫn cần được nghiên cứu sâu hơn để tối ưu hóa mô hình. Kết quả của nghiên cứu không chỉ góp phần hoàn thiện công nghệ viễn thám mà còn mở ra cơ hội áp dụng rộng rãi tại các vùng biển ven bờ khác ở Việt Nam, từ đó hỗ trợ các hoạt động bảo vệ hệ sinh thái biển, phát triển kinh tế và quản lý tài nguyên.

Nghiên cứu này đã chứng minh hiệu quả của ảnh vệ tinh Sentinel- 2 trong việc cung cấp một phương pháp tiếp cận khoa học và bền vững cho việc ước tính độ sâu vùng biển ven bờ. Đây là tiền đề để tiếp tục triển khai các nghiên cứu và ứng dụng công nghệ viễn thám trong các lĩnh vực liên quan đến phát triển bền vững môi trường biển.

Lời cảm ơn

Các phương pháp sử dụng trong nghiên cứu này được cung cấp từ đề tài cấp cơ sở mã số T25-37, thuộc Trường Đại học Mở - Địa chất, do thạc sỹ Nguyễn Minh Hải làm chủ nhiệm.

Cam kết của các tác giả

Tất cả các tác giả có tên trong bài báo cam kết sự đồng thuận và không có xung đột lợi ích trong công bố khoa học tại bài báo này.

Tài liệu tham khảo

- [1] Tổng cục Biển và Hải đảo, “Báo cáo Hiện trạng Môi trường biển và hải đảo Quốc gia giai đoạn 2016 - 2020,” Hà Nội, 2021.
- [2] B. M. Costa, T. A. Battista, and S. J. Pittman, “Comparative evaluation of airborne LiDAR and ship-based multibeam SoNAR bathymetry and intensity for mapping coral reef ecosystems,” *Remote Sens. Environ.*, vol. 113, no. 5, pp. 1082–1100, May 2009, doi:



- 10.1016/j.rse.2009.01.015.
- [3] R. P. Stumpf, K. Holderied, and M. Sinclair, “Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types,” *Limnol. Oceanogr.*, vol. 48, no. 1part2, pp. 547–556, Jan. 2003, doi: 10.4319/lo.2003.48.1_part_2.0547.
- [4] G. A. M. Narciso, A. M. Tamondong, and A. C. Blanco, “INTEGRATION OF STUMPF’S RATIO MODEL AND RANDOM FOREST FOR SATELLITE-DERIVED BATHYMETRY ESTIMATION,” *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, vol. XLVIII-4/W, pp. 387–393, Apr. 2024, doi: 10.5194/isprs-archives-XLVIII-4-W8-2023-387-2024.
- [5] M. Al Najjar *et al.*, “Coastal Bathymetry Estimation from Sentinel-2 Satellite Imagery: Comparing Deep Learning and Physics-Based Approaches,” *Remote Sens.*, vol. 14, no. 5, p. 1196, Feb. 2022, doi: 10.3390/rs14051196.
- [6] S. S. J. D. Mudiyansele, A. Abd-Elrahman, B. Wilkinson, and V. Lecours, “Satellite-derived bathymetry using machine learning and optimal Sentinel-2 imagery in South-West Florida coastal waters,” *GIScience Remote Sens.*, vol. 59, no. 1, pp. 1143–1158, Dec. 2022, doi: 10.1080/15481603.2022.2100597.
- [7] T. Sagawa, Y. Yamashita, T. Okumura, and T. Yamanokuchi, “Satellite Derived Bathymetry Using Machine Learning and Multi-Temporal Satellite Images,” *Remote Sens.*, vol. 11, no. 10, p. 1155, May 2019, doi: 10.3390/rs11101155.
- [8] Victor Klemas, “Remote Sensing of Coastal and Ocean Currents: An Overview,” *J. Coast. Res.*, vol. 28, no. 3, p. 576, Apr. 2012, doi: 10.2112/JCOASTRES-D-11-00197.1.
- [9] T. Thanh Tùng and T. Đăng Hùng, “Nghiên cứu ứng dụng ảnh Sentinel 2 đánh giá diễn biến đường bờ và biến đổi địa hình đáy biển khu vực cửa Nhật Lệ, Quảng Bình,” *Vietnam J. Hydrometeorol.*, vol. 1, no. 745, pp. 1–11, Jan. 2023, doi: 10.36335/VNJHM.2023(746).1-11.
- [10] Đ. Xuân Tinh, T. Thanh Tùng, and T. Đăng Hùng, “Phân tích biến đổi địa hình đáy biển ven bờ khu vực cửa Tiên Châu, tỉnh Phú Yên sử dụng ảnh Sentinel-2,” *Vietnam J. Hydrometeorol.*, vol. 4, no. 760, pp. 29–40, Apr. 2024, doi: 10.36335/VNJHM.2024(760).29-40.
- [11] A. K. Mavraeidopoulos, A. Pallikaris, and E. Oikonomou, “Satellite Derived Bathymetry (SDB) and Safety of Navigation,” *Int. Hydrogr. Rev.*, vol. 17, 2017.
- [12] J. Gao, “Bathymetric mapping by means of remote sensing: methods, accuracy and limitations,” *Prog. Phys. Geogr. Earth Environ.*, vol. 33, no. 1, pp. 103–116, Feb. 2009, doi: 10.1177/0309133309105657.
- [13] A. Muzirafuti *et al.*, “The Contribution of Multispectral Satellite Image to Shallow Water Bathymetry Mapping on the Coast of Misano Adriatico, Italy,” *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 8, no. 2, p. 126, Feb. 2020, doi: 10.3390/jmse8020126.
- [14] H. T. T. Đông Nguyễn Hải, Thảo Đỗ Thị Phương, Hòa Doãn Thị Thái, “Kết hợp sử dụng ảnh viễn thám Landsat và Sentinel - 2 trong giám sát biến động bờ biển khu vực tỉnh Quảng Nam,” *Tạp chí Khoa học Tài nguyên và Môi trường*, vol. 28, pp. 16–26, 2019, [Online]. Available: <https://tapchikhtnmt.hunre.edu.vn/index.php/tapchikhtnmt/article/view/194/196>
- [15] CHC, “CHC D230 Depthfinder User Manual,” Shanghai, China, 2015. [Online]. Available: www.chcnav.com
- [16] David R. Lyzenga, “Passive remote sensing techniques for mapping water depth and bottom features,” *Opt. Publ. Gr.*, vol. 17, no. 3, pp. 379–383, 1978.
- [17] I. Caballero and R. Stumpf, “Towards Routine Mapping of Shallow Bathymetry in Environments with Variable Turbidity: Contribution of Sentinel-2A/B Satellites Mission,” *Remote Sens.*, vol. 12, no. 3, p. 451, Feb. 2020, doi: 10.3390/rs12030451.
- [18] M. A. Warren *et al.*, “Assessment of atmospheric correction algorithms for the Sentinel-2A MultiSpectral Imager over coastal and inland waters,” *Remote Sens. Environ.*, vol. 225, pp. 267–289, May 2019, doi: 10.1016/j.rse.2019.03.018.
- [19] X. Zhang and M. R. Al Shehhi, “Bathymetry estimation for coastal regions using self-attention,” *Sci. Rep.*, vol. 15, no. 1, p. 970, Jan. 2025, doi: 10.1038/s41598-024-83705-9.

