



Original Article

Assimilation of Sea Surface Temperature data for Central Vietnam's Water Using Regional Ocean Modeling System (ROMS)

Nguyen Kim Cuong*

VNU University of Science, 334 Nguyen Trai, Thanh Xuan, Hanoi, Vietnam

Received 15 September 2020

Revised 26 January 2021; Accepted 15 February 2021

Abstract: This paper presents the preliminary results of SST data assimilation for the Central Vietnam's water using Regional Ocean Modeling System (ROMS). ROMS was used to assimilate with high-resolution SST from satellite with 4D-PSAS assimilation technique. Multi-scale Ultra-high Resolution (Mur) SST dataset which combines satellite and microwave data was used. ROMS has been set up based on the HYCOM products with the forcing from ECMWF. The results showed that the HYCOM SST and MurSST has significant difference in temperature which could be up to 1°C. Assimilated SST and hydrodynamic structures have been discussed. The impact of assimilation is mostly on the surface layer (less than 50 m). It's possible to produce the best estimated initial fields with high resolution for the Central Vietnam water to further investigations.

Keywords: Data assimilation, SST, ROMS model, 4DVar, 4DPSAS.

* Corresponding author.

E-mail address: cuongnk@hus.edu.vn

<https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.4689>

Nghiên cứu đồng hóa trường nhiệt mặt biển khu vực ven bờ miền Trung Việt Nam sử dụng mô hình ROMS

Nguyễn Kim Cương*

*Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội,
334 Nguyễn Trãi, Thanh Xuân, Hà Nội, Việt Nam*

Nhận ngày 15 tháng 9 năm 2020

Chỉnh sửa ngày 26 tháng 01 năm 2021; Chấp nhận đăng ngày 15 tháng 02 năm 2021

Tóm tắt: Bài báo này trình bày các kết quả nghiên cứu thử nghiệm đồng hóa trường nhiệt mặt biển khu vực ven bờ Việt Nam bằng mô hình số trị với kỹ thuật đồng hóa 4DVar. Mô hình hải dương học khu vực (ROMS) sẽ được áp dụng để đồng hóa trường nhiệt dựa trên cơ sở dữ liệu độ phân giải cao. Cơ sở dữ liệu này là sản phẩm kết hợp giữa số liệu từ cảm biến hồng ngoại và microwave trên các vệ tinh. Mô hình số được triển khai dựa trên các trường tác động tái phân tích và các trường thủy động lực được tính toán từ mô hình HYCOM cho toàn cầu. Các kết quả đồng hóa số liệu đã chỉ ra rằng trường nhiệt mặt biển đã được đồng hóa tốt cả về định lượng cũng như đảm bảo được các đặc trưng vật lý của các trường thủy động lực. Đáng chú ý là trường nhiệt thu được từ vệ tinh và từ mô hình HYCOM có sự khác biệt lớn về giá trị (hơn 1°C) khu vực ven biển Việt Nam. Trường nhiệt đồng hóa đã đưa ra được sự tương đồng với các kết quả từ vệ tinh và cũng đã đưa ra bức tranh tổng thể về phân bố và cấu trúc trường nhiệt. Trường dòng chảy mặt cũng đã được phân tích thông qua sản phẩm đồng hóa số liệu. Từ các kết quả đó, có thể đưa ra được các trường số liệu ban đầu cũng như số liệu tái phân tích độ phân giải cao cho khu vực ven bờ Việt Nam.

Từ khoá: Đồng hóa số liệu, SST, mô hình ROMS, 4DVar, 4DPSAS.

1. Mở đầu

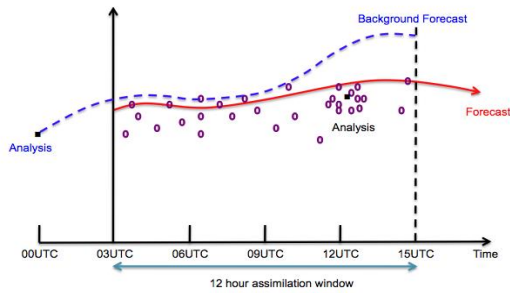
Đồng hóa số liệu là kỹ thuật nhằm thu được các xấp xỉ tốt nhất của trạng thái tại một thời điểm nhất định của hệ thống khí quyển hay đại dương,... Đây là phương pháp đã được các nhà nghiên cứu khí tượng đưa ra và phát triển từ những năm giữa thế kỷ 20 [1]. Tùy vào các thuật toán khác nhau, có thể chia thành các dạng đồng hóa: đồng hóa số liệu tùy biến (variational data assimilation) như 3DVar hay 4DVar và đồng hóa số liệu tuần tự (sequential data assimilation) như OI, KF và EnKF,... Mục đích của đồng hóa số liệu là xác định trạng thái của đại dương sử dụng toàn bộ các thông tin có thể sử dụng được bao

gồm chế độ thủy động lực và các số liệu quan trắc (trạm phao, vệ tinh, tàu nghiên cứu,...). Các hệ thống dự báo biển hiện đại dựa vào đồng hóa số liệu để xác định trường số liệu ban đầu, số liệu biên, nội suy vùng không có số liệu đo đạc hoặc làm trơn các số liệu đo đạc rời rạc. Các sản phẩm đồng hóa dữ liệu ngày nay được sử dụng khá phổ biến như các cơ sở dữ liệu tái phân tích toàn cầu của các trường khí tượng - hải văn. Các cơ sở dữ liệu tái phân tích như HYCOM, ECMWF, NCEP,... đã sử dụng các kỹ thuật đồng hóa đưa ra các trường khí tượng - hải văn dựa trên mạng lưới đo đạc trên toàn cầu.

* Tác giả liên hệ.

Địa chỉ email: cuongnk@hus.edu.vn

<https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.4689>



Hình 1. Sơ đồ đồng hóa và dự báo [ECMWF].

Trong khí tượng, số liệu từ mạng lưới các trạm quan trắc liên tục phục vụ phân tích và dự báo thời tiết được sử dụng làm đầu vào cho đồng hóa số liệu phục vụ tái tạo các trường số liệu tái phân tích và kiểm soát chất lượng quan trắc (Hình 1). Trong hải dương học, các quan trắc trong những năm gần đây tăng rất nhanh về số lượng cũng như chất lượng quan trắc thông qua các hệ thống phao, vệ tinh, trạm, tàu quan trắc,... Đồng hóa số liệu cũng đã được nghiên cứu và triển khai trên các mô hình mã nguồn mở như ROMS với kỹ thuật đồng hóa 4DVar. Mô hình ROMS 4DVar đã được mô tả chi tiết trong các nghiên cứu [2-6] và đã được áp dụng cho dòng chảy California [5, 6], dòng chảy Đông nước Úc [2], dòng chảy Vịnh Mid-Atlantic [6],... và đã thu được các kết quả rất đáng ghi nhận. Zavala-Garay & cs [2] đã áp dụng phương pháp IS4DVar trong mô hình ROMS đồng hóa các trường mực biển (SSH), trường nhiệt mặt biển (SST) cũng như số liệu quan trắc từ thiết bị đo nhiệt độ XBT.

Tại Việt Nam, trong nghiên cứu khí tượng và dự báo thời tiết, các mô hình đồng hóa số liệu đã được áp dụng tương đối sớm và đã thu được các kết quả tương đối tốt phục vụ dự báo thời tiết [7-8]. Tuy nhiên, các sản phẩm đồng hóa các trường thủy động lực biển ở quy mô khu vực vẫn còn rất hạn chế mặc dù rất cấp thiết và cũng là một trong những đầu vào cho các mô hình dự báo khí tượng.

Nghiên cứu đồng hóa trường thủy động lực đã được triển khai khá nhiều trong những năm gần đây. Tại Việt Nam, liệu độ cao sóng đã được nghiên cứu triển khai đồng hóa từ số liệu

vệ tinh và số liệu radar biển ứng dụng mô hình SWAN [9-10].

Nhiệt độ là một yếu tố hải dương học quan trọng trong nghiên cứu các trường thủy động lực cũng như các ứng dụng trong hải dương học như: nghiên cứu sự phân bố của các loài cá, nghiên cứu cấu trúc các khối nước trong biển, tương tác biển - khí quyển cũng như ảnh hưởng của lớp biên lên sự thay đổi của các xoáy thuận (bão, áp thấp,...). Trường nhiệt mặt biển là đầu vào quan trọng trong mô hình khí tượng đặc biệt trong các điều kiện cực trị cũng như trong các nghiên cứu cấu trúc các khối nước trên biển. Trường nhiệt mặt biển cũng là trường vật lý trên biển được quan trắc nhiều nhất ngay từ khi các vệ tinh bắt đầu được triển khai. Các cơ sở số liệu tái phân tích toàn cầu đã áp dụng phương pháp đồng hóa số liệu với độ phân giải tốt nhất khoảng 10km. Hiện nay, tại Việt Nam, phương pháp đồng hóa số liệu nhiệt cũng như dòng chảy, độ muối vẫn còn đang là thách thức không nhỏ. Chính vì điều đó, vấn đề nghiên cứu thử nghiệm đồng hóa số liệu từ trường nhiệt độ mặt biển đã được đặt ra trong nghiên cứu này nhằm mở ra các nghiên cứu chi tiết cho các khu vực ven biển Việt Nam cũng như làm tiền đề cho các nghiên cứu đồng hóa các trường thủy động lực khác như: độ muối, dòng chảy,...

Nghiên cứu này trình bày các mô phỏng 3 chiều từ mô hình hải dương học khu vực (Regional Ocean Modeling System - ROMS), cơ sở dữ liệu ảnh vệ tinh độ phân giải cao và thử nghiệm đồng hóa trường nhiệt mặt biển bằng mô hình ROMS cho khu vực ven biển miền Trung Việt Nam. Nghiên cứu sử dụng phương pháp 4DVar dựa trên thuật toán PSAS (Physical-space Statistical Analysis System) [11] trong mô hình ROMS để đồng hóa với các số liệu nhiệt mặt biển từ vệ tinh độ phân giải cao, thử nghiệm cho khu vực miền Trung Việt Nam.

2. Phương pháp đồng hóa và triển khai mô hình ROMS

2.1. Mô hình ROMS

Mô hình hải dương học khu vực (Regional Ocean Modeling System- ROMS) là mô hình mã

nguồn mở được xây dựng dựa trên các mô hình thủy lực SPEM và SCRUMS đang được cộng đồng nghiên cứu biển hiện nay sử dụng rộng rãi. Đây là mô hình giải hệ phương trình nguyên thủy, mật tự do được sử dụng cho các ứng dụng phong phú trong biển và đại dương [12, 13]. Mô hình ROMS được xây dựng trên cơ sở các nghiên cứu số trị bậc cao, giải các phương trình thủy động lực thủy tĩnh và bề mặt tự do cho các địa hình phức tạp trên hệ lưới cong trục giao theo phương ngang và tọa độ sigma theo phương thẳng đứng. Sơ đồ sai phân trung tâm bậc hai trên lưới Arakawa C được sử dụng cho phương ngang với các điều kiện biên trượt tự do, trượt một phần hoặc điều kiện dính trong khi sử dụng sai phân xen kẽ bậc hai theo phương thẳng đứng.

2.2. Cơ sở dữ liệu nhiệt độ mặt biển từ vệ tinh

Cơ sở dữ liệu nhiệt độ mặt biển độ phân giải cao từ vệ tinh (Multi-scale Ultra-high Resolution SST - MurSST) thu được từ CSDL của NASA (<https://mur.jpl.nasa.gov>) đã được sử dụng trong nghiên cứu này. Đây là cơ sở dữ liệu tổng hợp được từ số liệu các trạm phao, các tàu và các vệ tinh với bước sóng hồng ngoại và microwave. Cảm biến hồng ngoại cung cấp các số liệu độ phân giải cao (1 km) nhưng bị hạn chế bởi sự che phủ của mây trong khi cảm biến microwave không phụ thuộc vào mây nhưng độ phân giải thấp hơn (25 km). Với sự kết hợp của các nguồn số liệu và các thuật toán MurSST, các số liệu nhiệt được cung cấp hàng ngày với độ phân giải 1km và không phụ thuộc nhiều vào độ che phủ của mây. Từ những năm 1980, các số liệu nhiệt mặt biển từ vệ tinh đã phổ biến và cập nhật hơn

số liệu đo đạc trên mặt. Bảng 1 liệt kê các nguồn số liệu đã được sử dụng trong cơ sở dữ liệu nhiệt vệ tinh trong CSDL MurSST.

2.4. Triển khai mô hình đồng hóa nhiệt mặt biển

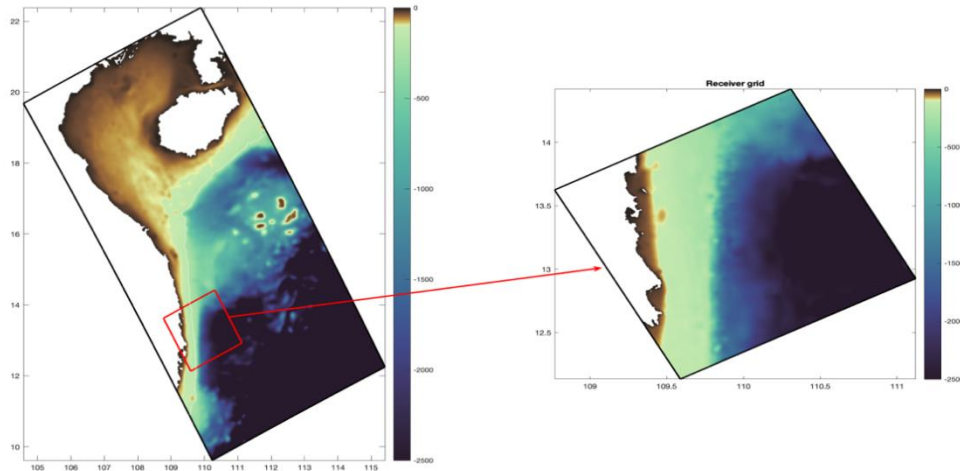
Mô hình ROMS đã được sử dụng với 02 miền tính (Hình 2): miền ven biển Việt Nam có độ phân giải 2,3 km và miền ven biển khu vực Phú Yên với độ phân giải 465 m. Cả hai miền đều được tính với 40 lớp theo chiều thẳng đứng với điều kiện ban đầu và điều kiện biên thu được từ mô hình HYCOM (HYbrid Coordinate Ocean Model) mô phỏng cho toàn cầu với độ phân giải 1/12 độ, 40 lớp và cung cấp với độ phân giải thời gian 3h. Trường độ sâu được lấy từ số liệu SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) trong khi các tác động thu được từ cơ sở dữ liệu của Trung tâm Dự báo Hạn vừa Châu Âu (ECMWF). CSDL này cung cấp các tác động trên mặt biển với độ phân giải 0,125 độ kinh - vĩ cho từng 3h một trường số liệu. Các tác động sử dụng trong mô hình bao gồm:

- Trường vận tốc gió (U, V) tại 10m trên mặt biển;
- Trường bức xạ sóng dài (lwrad);
- Trường bức xạ sóng ngắn (swrad);
- Trường nhiệt độ không khí (Tair);
- Trường áp mặt biển (Pair);
- Trường lượng mưa trên mặt biển;
- Trường độ ẩm không khí trên mặt biển (Qair).

Trong nghiên cứu này, 9 sóng triều đã được tính toán với cơ sở dữ liệu Atlas thủy triều toàn cầu TPX08-Atlas [14] bao gồm: M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1 và M4.

Bảng 1. Thông tin các cơ sở dữ liệu từ các thiết bị, cảm biến hồng ngoại và microwave

STT	Thiết bị	Loại cảm biến/quỹ đạo	Độ phân giải	Sai số
1	MODIS	Hồng ngoại/Cực	1 km	0,5 °C
2	AVHRR	Hồng ngoại/Cực	9 km	0,4 °C
3	AMSR-E	Microwave/Cực	25 km	0,5 °C
4	AMSR2	Microwave/Cực	25 km	0,5 °C
5	WindSat	Microwave/Cực	25 km	0,5 °C
6	Các trạm phao/tàu	Thực đo	Biến đổi	0,6 °C



Hình 2. Các miền tính phục vụ đồng hóa số liệu nhiệt mặt biển.

Nghiên cứu này đồng hóa số liệu trường nhiệt mặt biển tháng 4/2018. Mô hình ROMS đã được chạy cho giai đoạn tháng 3-5 trong 3 năm 2016, 2017, 2018 phục vụ tính toán độ lệch chuẩn theo không gian của trường nhiệt mặt biển (Hình 3c).

3. Kết quả và thảo luận

Hình 3 trình bày các phân bố trường nhiệt từ mô hình (Hình 3a), từ vệ tinh (Hình 3b), độ lệch chuẩn và sản phẩm đồng hóa. Với các tính toán trong 3 năm 2016-2018, trường nhiệt khu vực miền Trung Việt Nam có độ lệch chuẩn khoảng từ 0,15-0,3 °C. Giá trị độ lệch chuẩn lớn nhất khu vực sát bờ biển, trong các vũng - vịnh và giảm dần ra khu vực ngoài khơi. Có thể nhận thấy sự khác biệt đáng kể ở giá trị trường nhiệt mặt biển và phân bố khu vực ven bờ. Trước khi đồng hóa, trường nhiệt mặt biển tính toán từ các trường số liệu thu được từ mô hình toàn cầu HYCOM có giá trị trong khoảng 24-26,5 °C trong khi tại cùng thời điểm giá trị này xấp xỉ 25-27,5 °C từ cơ sở dữ liệu vệ tinh. Sự khác biệt này là do mô hình HYCOM tính toán mô phỏng toàn cầu với độ phân giải khá thô và chưa được đồng hóa. Các số liệu vệ tinh có độ phân giải cao với cấu trúc địa phương tương đối rõ nét. Phương pháp đồng hóa 4D-PSAS từ mô hình ROMS đã được áp dụng

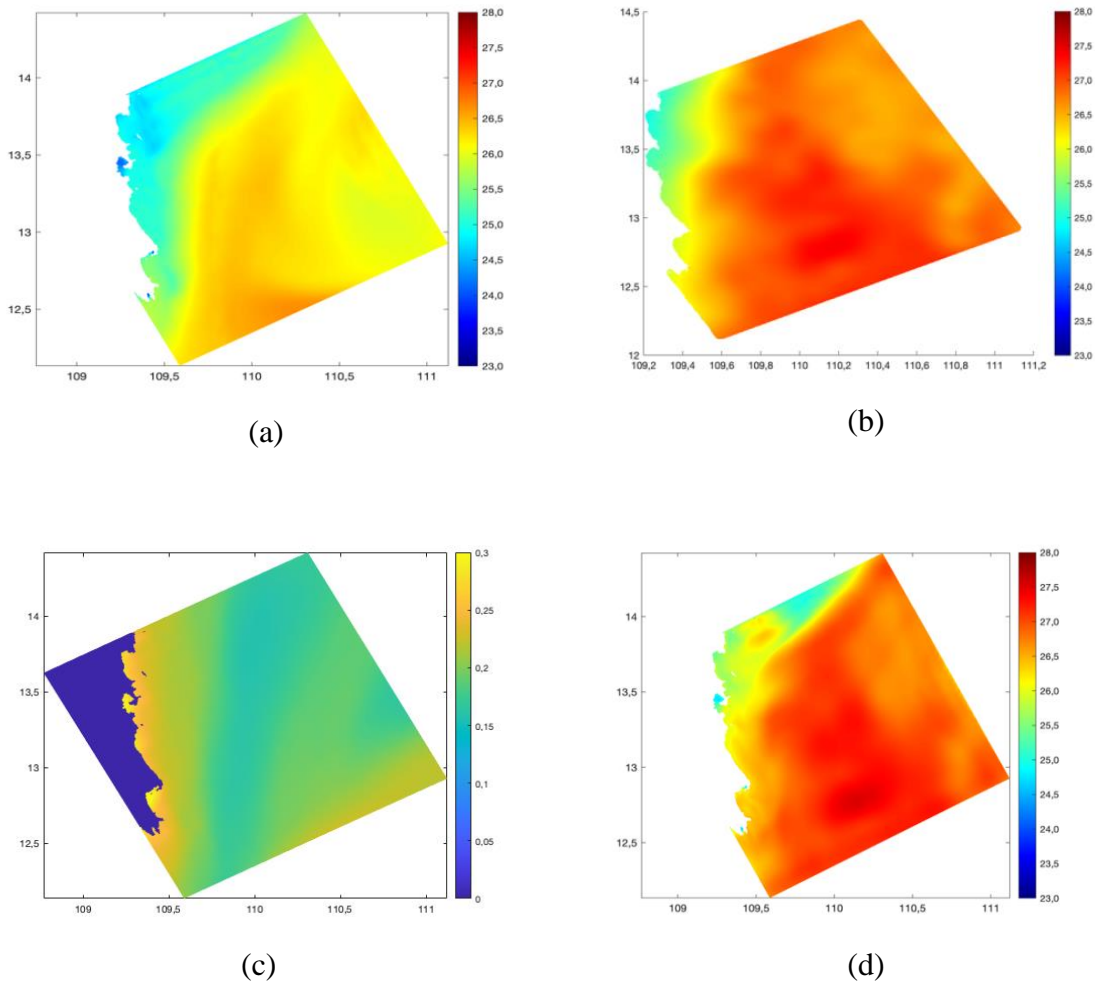
với độ phân giải cao (400 m) (Hình 3d). Kết quả đồng hóa cho thấy, nền nhiệt chung đã thể hiện đúng khoảng giá trị như nền số liệu từ vệ tinh nhưng vẫn thể hiện được các cấu trúc địa phương như khu vực ven bờ, trong các vịnh ven bờ. Một điểm đáng chú ý đó là sau khi đồng hóa, khu vực phía Bắc miền tính xuất hiện 1 dải nước lạnh hơn với giá trị nhiệt độ khoảng 25 °C. Xu thế này thể hiện rõ trên mô phỏng mô hình từ số liệu HYCOM. Mặc dù vậy, các cấu trúc ngoài khơi khu vực phía nam và phía đông có sự thay đổi đáng kể không chỉ về giá trị mà còn về xu thế của các cấu trúc cục bộ.

Để đánh giá ảnh hưởng, tác động của phương pháp đồng hóa tới cấu trúc 3 chiều của nhiệt độ, tiến hành phân tích các cấu trúc 3 chiều từ các sản phẩm đồng hóa thông qua hai mặt cắt dọc và ngang trung tâm miền tính (Hình 4). Có thể nhận thấy với phương pháp đồng hóa, trường nhiệt đã thay đổi cấu trúc tương đối lớn trong khoảng độ sâu tới 50 m. Đồng thời, các trường vật lý khác như: độ muối, trường dòng chảy 3 chiều cũng đã có những thay đổi không nhỏ nhằm đáp ứng giảm thiểu sự khác biệt giữa mô hình và các số liệu vệ tinh. Trường dòng chảy trên mặt vẫn giữ được cấu trúc chủ yếu tại thời điểm tính toán gồm một xoáy nghịch ở trung tâm miền tính và hướng chủ đạo của dòng chảy đó là chảy về phía nam (Hình 5). Một điểm đáng chú ý đó là khu vực phía bắc miền tính có một dòng chảy chủ đạo đi

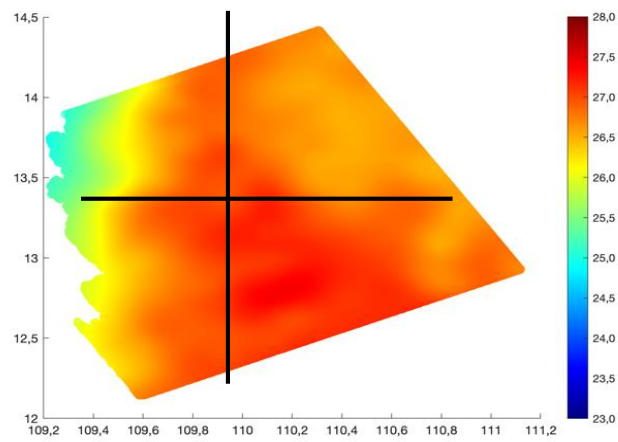
từ bờ ra khơi. Sau khi đồng hóa, hướng của dòng chảy không biến đổi nhưng vận tốc dòng chảy đã thay đổi đáng kể. Ở phía bắc, dòng chảy đi từ bờ ra khơi có xu thế tăng vận tốc từ 0,2 lên 0,3 m/s trong khi tại các miền còn lại vận tốc không có sự thay đổi đáng kể.

Các kết quả thu được chứng tỏ phương pháp đồng hóa (4D-PSAS) đã được áp dụng thành công trong hệ thống mô hình ROMS với trường nhiệt mặt biển. Phương pháp này có thể được áp dụng để mô phỏng các cấu trúc 3 chiều của các khối nước, độ sâu lớp hoạt động,... và các kết quả này có thể được sử dụng làm đầu vào cho các hệ thống mô hình dự báo độ phân giải cao

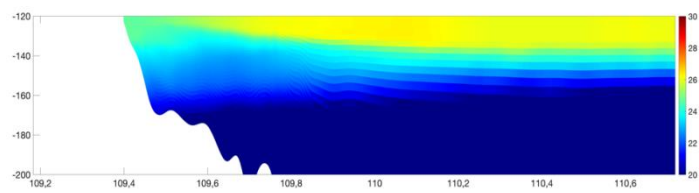
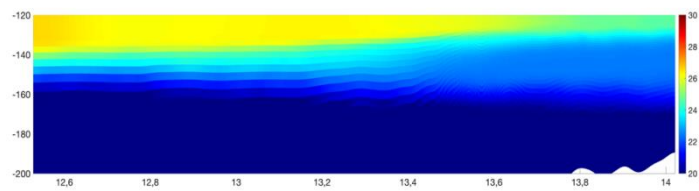
nhằm nâng cao chất lượng các sản phẩm dự báo từ hệ thống mô hình tích hợp. Trong nghiên cứu thử nghiệm này, tác giả ước tính khi sử dụng 100 cpu để đồng hóa 394.382 điểm có giá trị nhiệt từ vệ tinh từng ngày, mô hình ROMS đã hoàn thành kết quả đồng hóa với thời gian 6h/ngày. Tính toán đồng hóa yêu cầu khá cao về hệ thống tính toán và thời gian nhưng với kết quả thử nghiệm này, trường nhiệt độ mặt biển có thể được đồng hóa và làm điều kiện đầu vào kịp thời trong các nghiên cứu dự báo bão cũng như ảnh hưởng của trường nhiệt mặt biển lên quỹ đạo, cường độ các cơn bão.



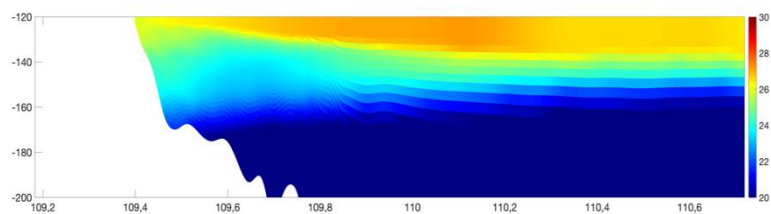
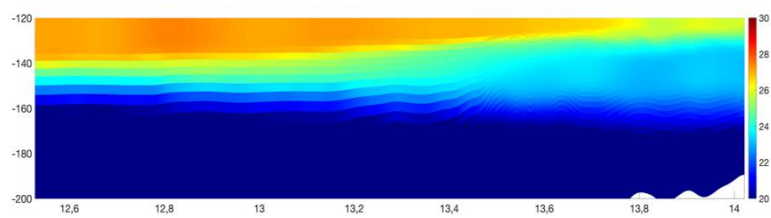
Hình 3. Các trường nhiệt mặt biển ($^{\circ}\text{C}$): (a) từ mô hình ROMS; (b) từ số liệu vệ tinh; (c) độ lệch chuẩn; (d) trường nhiệt mặt biển sau khi đã đồng hóa lúc 7h ngày 04/4/2018.



(a)

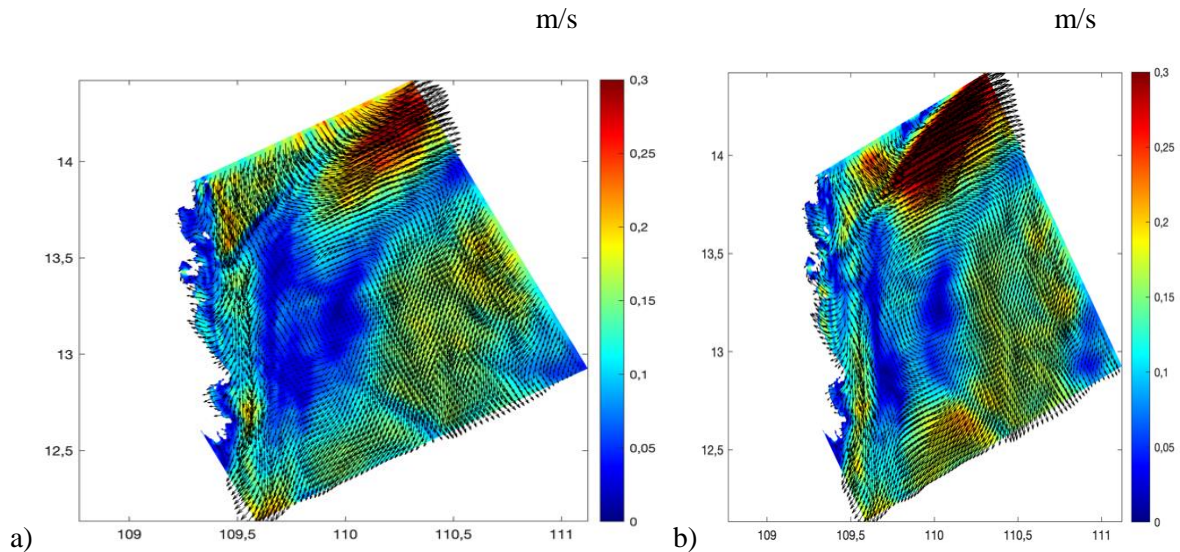


(b)



(c)

Hình 4. Mặt cắt của trường nhiệt dọc kinh tuyến 109,9E và vĩ tuyến 13,27N: (a) Các mặt cắt; (b) kết quả mô hình; (c) kết quả đồng hóa



Hình 5. So sánh kết quả trường dòng chảy lúc 7h ngày 04/4/2018: mô phỏng (a) và sau đồng hóa (b)

4. Kết luận

Bài báo này đã trình bày các kết quả nghiên cứu thử nghiệm kỹ thuật đồng hóa trường nhiệt mặt biển từ cơ sở dữ liệu nhiệt từ vệ tinh tháng 4 năm 2018. Các kết quả đồng hóa đã cải thiện rõ nét các tính toán mô phỏng từ trường nhiệt mặt biển toàn cầu từ mô hình HYCOM so sánh với trường nhiệt thu được từ vệ tinh. Kết quả đồng hóa số liệu nhiệt mặt biển đã thay đổi tương đối cấu trúc trường nhiệt cũng như các trường thủy động lực ở lớp trên của mặt biển (đến độ sâu khoảng 50 m). Điều đó đã khẳng định khả năng áp dụng mô hình ROMS đồng hóa trường nhiệt mặt biển nhằm nâng cao chất lượng dự báo trường nhiệt cũng như các trường thủy động lực. Kết quả đồng hóa trường nhiệt đã thay đổi đáng kể về nhiệt mặt biển cũng như cấu trúc của các trường vật lý. Nghiên cứu này có thể tiếp tục mở rộng với các trường thủy động lực khác như: dòng chảy, độ muối,... với số liệu đo đạc tại các trạm, trạm phao hay số liệu từ các radar độ phân giải cao. Với các kết quả đồng hóa độ phân giải cao khu vực ven bờ, trường nhiệt mặt biển có thể được đồng hóa phục vụ làm đầu vào cho các nghiên cứu về dự báo bão, áp thấp nhiệt đới hoặc ngư trường.

Lời cảm ơn

Bài báo được hoàn thành với sự tài trợ kinh phí của đề tài KC09.14/16-20; các tính toán mô hình được chạy trên hệ thống tính toán hiệu năng cao của Trung tâm Động lực học Thủy khí Môi trường - Trường Đại học Khoa học Tự nhiên. Tác giả chân thành cảm ơn những hỗ trợ này.

Tài liệu tham khảo

- [1] E. Linacre, B. Geerts, *Climates and Weather Explained*, 1st Edition, Routledge, 1997.
- [2] J. Z. Garay, J. L. Wilkin, H. G. Arango, Predictability of Mesoscale Variability in the East Australian Current Given Strong-Constraint Data Assimilation, *Journal of Physical Oceanography*, Vol. 42, No. 9, 2012, pp. 1402-1420, <https://doi.org/10.1175/JPO-D-11-0168.1>.
- [3] A. M. Moore, H. G. Arango, G. Broquet, B. S. Powell, J. Z. Garay, A. T. Weaver, The Regional Ocean Modeling System (ROMS) 4-Dimensional Variational Data Assimilation Systems. I: System Overview and Formulation. *Progress in Oceanography*, Vol. 91, No. 1, 2011, pp. 34-49, <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2011.05.004>.
- [4] A. M. Moore, H. G. Arango, G. Broquet, C. A. Edwards, M. Veneziani, B. S. Powell, D. Foley, J. D. Doyle, D. Costa, P. Robinson, The

- Regional Ocean Modeling System (ROMS) 4-Dimensional Variational Data Assimilation Systems. II: Performance and Application to the California Current System. *Progress in Oceanography*, Vol. 91, No. 1, 2011, pp. 50-73, <http://dx.doi.org/10.1016/j.pocean.2011.05.003>.
- [5] A. M. Moore, H. G. Arango, G. Broquet, C. A. Edwards, M. Veneziani, B. S. Powell, D. Foley, J. D. Doyle, D. Costa, P. Robinson, The Regional Ocean Modeling System (ROMS) 4-Dimensional Variational Data Assimilation Systems. Part III – Observation Impact and Observation Sensitivity in the California Current System, *Progress in Oceanography*, Vol. 91, No. 1, 2011, pp. 74-94, <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2011.05.005>.
- [6] J. Levin, J. L. Wilkin, N. Fleming, J. Z. Garay, Mean Circulation of Mid-Atlantic Bight from a Climatological Data Assimilative Model, *Ocean Modeling*, Vol. 128, 2018, pp. 1-14, <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2018.05.003>.
- [7] T. T. Tien, D. N. Q. Hoa, Experiments on Using WRF Model Data Assimilation of Coupled 3DVAR – LETKF in Predicting the Geneses of Tropical Cyclones in the Vietnamese East Sea, *VNU Journal of Science: Earth and Environmental Sciences*, Vol. 34, No. 1S, 2018, pp. 77-89, <https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.4338> (in Vietnamese).
- [8] L. L. Phuong, P. Q. Nam, T. Q. Duc, P. V. Tan, An Experiment for Assimilating Different Type of Data Observations in Forecasting Heavy Rainfall over Central Highlands Region Due to the Impact of Hurricane Damrey, *VNU Journal of Science: Earth and Environmental Sciences*, Vol. 35, No. 4, 2019, pp. 121-129, <http://dx.doi.org/10.25073/25881094/vnuees.4478> (in Vietnamese).
- [9] N. T. Thanh, N. M. Huan, T. Q. Tien, Application of Data Assimilation Method for Wave Height in Eastern Vietnam Sea by The Ensemble Kalman Filter, *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 18, No. 4, 2018, pp. 358-367, <https://doi.org/10.15625/1859-3097/18/4/12474>.
- [10] T. Q. Tien, N. T. Trang, Experiment of Wave Height Assimilation with Radar Data Using SWAN Model, *Vietnam Journal of Hydro-Meteorology*, Vol. 647, 2014, pp. 31-35 (in Vietnamese).
- [11] My ROMS: PSAS Tutorial, https://www.myroms.org/wiki/PSAS_Tutorial, (accessed on: December 1st, 2019).
- [12] D. B. Haidvogel, H. Arango, W. P. Budgell, B. D. Cornuelle, E. Curchitser, E. Di Lorenzo, K. Fennel, W. R. Geyer, A. J. Hermann, L. Lanerolle, J. Levin, J. C. McWilliams, A. J. Miller, A. M. Moore, T. M. Powell, A. F. Shchepetkin, C. R. Sherwood, R. P. Signell, J. C. Warner, J. Wilkin, Ocean Forecasting in Terrain-Following Coordinates: Formulation and Skill Assessment of the Regional Ocean Modeling System, *Journal of Computational Physics*, Vol. 227, No. 7, 2008, pp. 3595-3624, <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2007.06.016>.
- [13] J. L. Wilkin, H. G. Arango, D. B. Haidvogel, C. S. Lichtenwalner, S. M. Durski, K. S. Hedstrom, A Regional Ocean Modeling System for the Long-term Ecosystem Observatory, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 110, 2005, C06S91, <https://doi.org/10.1029/2003JC002218>.
- [14] http://volkov.oce.orst.edu/tides/tpxo8_atlas.html, (accessed on: December 1st, 2019).