

ĐẠI HỌC QUỐC GIA HÀ NỘI
TRƯỜNG ĐẠI HỌC KHOA HỌC TỰ NHIÊN

NGUYỄN TRUNG THÀNH

NGHIÊN CỨU ỨNG DỤNG PHƯƠNG PHÁP ĐỒNG HOÁ SỐ
LIỆU PHỤC VỤ MÔ HÌNH DỰ BÁO SÓNG

Chuyên ngành: Hải dương học

Mã số: 62.44.02.28

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ HẢI DƯƠNG HỌC

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC

1. PGS.TS. Nguyễn Minh Huấn
2. TS. Trần Quang Tiến

Hà Nội - 2019

Công trình được hoàn thành tại Khoa Khí tượng Thủy văn và Hải dương học, Trường Đại học Khoa học Tự Nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội

Người hướng dẫn khoa học:

1. PGS.TS. Nguyễn Minh Huân
2. TS. Trần Quang Tiến

Phản biện 1:

Phản biện 2:

Phản biện 3:

Luận án được bảo vệ trước Hội đồng cấp Đại học Quốc gia chấm luận án tiến sĩ họp tại Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội vào hồi giờ ngày tháng năm 2019

Có thể tìm hiểu luận án tại:

Thư viện Quốc gia Việt Nam

Trung tâm Thông tin Thư viện, Đại học Quốc gia Hà Nội

MỞ ĐẦU

1. Tính cấp thiết của luận án

Từ lâu sóng biển đã được nghiên cứu trên nhiều phương diện khác nhau, kiến thức và dữ liệu đã tích lũy được về sóng biển ngày càng phong phú và chi tiết. Trong nghiệp vụ tính toán, dự báo sóng biển, đóng góp lớn nhất và hiệu quả nhất là việc ứng dụng công nghệ, phương pháp hiện đại để giải bằng phương pháp số các mô hình động lực sóng biển và quản lý dữ liệu đầu vào và đầu ra. Phương pháp này đã thay thế phương pháp Synop và phương pháp kinh nghiệm trong dự báo sóng biển, các phương pháp này đang được dùng phổ biến ở nhiều nước trên thế giới.

Ở Việt Nam, việc nghiên cứu tính toán dự báo sóng bằng mô hình số trị đã được thực hiện ở nhiều cơ quan, đơn vị, viện nghiên cứu, trường đại học... Tuy nhiên, các nghiên cứu và ứng dụng này mới chỉ tập trung vào việc hiệu chỉnh tham số mô hình mà chưa quan tâm nhiều tới việc sử dụng các số liệu đo đạc để đưa vào đồng hoá số liệu (ĐHSL) nhằm nâng cao độ tin cậy dự báo sóng bằng mô hình số trị, cũng như trong công tác tái phân tích nhằm có được bộ số liệu chi tiết và chính xác hơn.

Các nghiên cứu về quy trình tính toán và dự báo sóng có áp dụng các phương pháp ĐHSL khác nhau đã được sử dụng ở nhiều nơi trên thế giới và cũng đã mang lại kết quả khả quan. Trong khi đó, vấn đề ĐHSL vẫn còn khá mới mẻ ở Việt Nam.

Xuất phát từ những lý do đã nêu trên, việc lựa chọn đề tài luận án “*Nghiên cứu ứng dụng phương pháp đồng hoá số liệu phục vụ mô hình dự báo sóng*” sẽ góp phần vào việc gia tăng độ chính xác trong công tác tính toán, dự báo sóng biển ở Việt Nam.

2. Luận điểm bảo vệ của luận án

1. Phương pháp hiệu chỉnh mô hình tự động bên cạnh việc cho phép hiệu chỉnh đồng thời nhiều tham số với nhiều loại số liệu quan trắc khác nhau ở nhiều vị trí trên miền tính còn cho phép lựa chọn được bộ tham số phù hợp nhất với các số liệu quan trắc đó một cách khách quan.

2. Bằng việc áp dụng phương pháp hiệu chỉnh mô hình tự động SWAN-CI trong khu vực Biển Đông đã đưa ra được bộ tham số ρ_{wk} - tỉ lệ giữa số sóng thông thường với số sóng trung bình và tham số ρ_{cutfr} - tỉ lệ giữa tần số sóng cực đại và tần số sóng trung bình ít ảnh hưởng đến kết quả tính toán còn các tham số CDS2 - tốc độ tiêu tán sóng do sóng bạc đầu và tham số ρ_{wst} - tỉ lệ giữa độ dốc phổ sóng thông thường với độ dốc phổ sóng Pierson-Moskowitz lại có ảnh hưởng rất lớn đến kết quả tính toán. Nghiên cứu này cũng chỉ ra rằng SWAN-CI là công cụ hiện đại và hữu ích không chỉ nâng cao hiệu quả trong việc lựa chọn tham số cho mô hình SWAN một cách khách quan mà còn làm giảm sai số tính toán và cải thiện được chất lượng dự báo.

3. Phương pháp Lọc Kalman tổ hợp là phương pháp không những làm giảm thiểu tính không hoàn thiện của mô hình số trị mà còn cho phép tăng cường các thông tin quan trắc vào trường điều kiện biên và điều kiện ban đầu của mô hình một cách khách quan.

4. Chất lượng dự báo sóng không chỉ phụ thuộc vào việc lựa chọn tham số của mô hình mà còn chịu tác động của các điều kiện biên và điều kiện ban đầu đưa vào mô hình. Bằng việc áp dụng phương pháp lọc Kalman tổ hợp (EnKF) và mô hình sóng SWAN ở khu vực Biển Đông cho nhiều loại số liệu quan trắc, đo đạc từ nhiều nguồn khác nhau đã đưa ra được bộ các tham số tốt nhất trong

ĐHSL không chỉ làm giảm sai số tính toán trong giai đoạn ĐHSL mà còn làm tăng độ chính xác của dự báo trong khoảng 24 giờ cũng như tiếp tục ảnh hưởng đến kết quả dự báo trong 48 giờ.

3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu của luận án

Đối tượng nghiên cứu của luận án là việc ứng dụng phương pháp hiệu chỉnh mô hình tự động, phương pháp ĐHSL vào mô hình dự báo sóng và áp dụng thử nghiệm cho khu vực Biển Đông.

Phạm vi nghiên cứu: khu vực Biển Đông và biển Việt Nam.

Phương pháp nghiên cứu: Luận án sử dụng phương pháp SWAN-CI và lọc Kalman tổ hợp (EnKF) và mô hình sóng SWAN nhằm làm giảm sai số của mô hình trong cả tính toán tái phân tích số liệu cũng như gia tăng độ chính xác cho công tác dự báo sóng biển.

4. Những đóng góp mới của luận án

1. Đóng góp thứ nhất của luận án: đã đề xuất được dải giá trị các tham số chung cho mô hình SWAN ở khu vực Biển Đông và đề xuất được các giá trị cụ thể cho các tham số này đối với các loại số liệu khác nhau ở các giai đoạn khác nhau. Các kết quả cho thấy SWAN-CI có thể hiệu chỉnh đồng thời nhiều tham số mô hình với nhiều loại số liệu khác nhau trên khu vực Biển Đông hiệu quả và tin cậy.

2. Đóng góp thứ hai của luận án: đã lựa chọn và thử nghiệm thành công phương pháp lọc Kalman tổ hợp vào mô hình SWAN và đưa ra được bộ tham số ĐHSL nhằm cập nhật lại điều kiện ban đầu và các điều kiện biên gió thông qua đánh giá khách quan trường sóng tính toán và số liệu quan trắc. Kết quả cho thấy chất lượng tính toán được cải thiện trong giai đoạn ĐHSL và làm tăng độ chính xác của dự báo trong khoảng 24 giờ cũng như tiếp tục ảnh hưởng đến kết quả dự báo trong 48 giờ.

5. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của luận án

Ý nghĩa khoa học: Kết quả của luận án đã góp phần bổ sung và hoàn thiện quy trình dự báo sóng.

Ý nghĩa thực tiễn: Kết quả của luận án có thể được áp dụng để nâng cao chất lượng tính toán tái phân tích trường sóng và chất lượng dự báo sóng cho khu vực Biển Đông và vùng biển Việt Nam.

6. Cấu trúc của luận án

Luận án gồm 120 trang, 17 bảng, 41 hình vẽ, bao gồm: Mở đầu: 4 trang; Chương 1: Tổng quan tình hình nghiên cứu đồng hóa số liệu sóng biển: 14 trang; Chương 2: Phương pháp nghiên cứu: 31 trang; Chương 3: Áp dụng thử nghiệm ĐHSL cho khu vực Biển Đông và biển Việt Nam: 62 trang; Kết luận–Kiến nghị: 2 trang; Tài liệu tham khảo gồm 10 tài liệu tiếng Việt, 57 tài liệu tiếng Anh.

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN TÌNH HÌNH NGHIÊN CỨU ĐỒNG HÓA SỐ LIỆU SÓNG BIỂN

1.1. Tổng quan về việc nghiên cứu tính toán và dự báo sóng

1.1.1. Các nghiên cứu trên thế giới

Từ năm 1947 việc nghiên cứu dự báo sóng gió đã được Sverdrup và Munk[53] thực hiện trong chiến tranh thế giới thứ II dựa trên mối quan hệ thực nghiệm giữa các đặc trưng của gió và sóng để dự báo điều kiện sóng. Đến năm 1955, Pierson và nnk [49] mô phỏng sóng biển hiệu quả và thuận tiện hơn dựa trên việc chồng chập một số sóng điều hòa ngẫu nhiên. Gelci và nnk [29] đưa ra khái niệm về phương trình cân bằng năng lượng dạng phổ hay còn gọi là mô hình sóng thể hệ I vào năm 1957.

Những nghiên cứu về quá trình tạo sóng gió của Phillips [48] và Miles [44] vào năm 1957 cung cấp cơ sở cho việc mô tả trường gió

đầu vào. Hơn nữa, việc đạo hàm hàm tương tác sóng-sóng phi tuyến của Hasselmann [31] vào năm 1962 và các kết quả thực nghiệm phổ JONSWAP của Hasselmann và nnk [32] năm 1973 đã cho thấy tầm quan trọng của số hạng này đối với sự phát triển của phổ sóng.

Năm 1985, Hasselmann và Hasselmann [34] đã phát triển thuật toán để tính xấp xỉ tương tác sóng-sóng phi tuyến (DIA) gọi là các mô hình phổ sóng thế hệ III. Các mô hình này đang được dùng phổ biến ở nhiều nước trên thế giới như: EMC, NOAA, Mỹ [64]; Trung tâm Dự báo Hạn vừa Châu Âu (ECMWF) [67]; Trung tâm Dịch vụ Thông tin Đại dương của Ấn Độ [62]; Trung tâm Khí tượng Biển của Thái Lan [68]; Trung tâm Thời tiết Bureau, Đài Loan [66]...

1.1.2. Các nghiên cứu ở Việt Nam

Ở Việt Nam, việc nghiên cứu dự báo sóng biển bằng mô hình số trị cũng đã được đặt ra từ lâu và cũng đã đạt được nhiều thành tựu đáng kể và được nhiều cơ quan, đơn vị, viện nghiên cứu áp dụng như: Trường Đại học Khoa học tự nhiên; Trung tâm Hải văn; Viện Cơ học; Đài Khí tượng - Thủy văn khu vực Nam Bộ; Viện Khoa học Thủy lợi Miền Nam; Viện Nghiên cứu Khoa học Khí tượng - Thủy văn và Biến đổi khí hậu; Tổng công ty Tư vấn Thiết kế giao thông vận tải - TEDI; Đại học Bách Khoa thành phố Hồ Chí Minh; Viện Khoa học Thủy Lợi miền Nam.

Nhìn chung, trên thế giới và cả ở Việt Nam các mô hình số trị sử dụng cho các đề tài, dự án cụ thể cũng như cho công tác dự báo sóng tác nghiệp được áp dụng khá phổ biến, bên cạnh đó các mô hình tính toán cũng liên tục được cập nhật cải tiến theo thời gian theo hướng ngày càng hiện đại và hoàn thiện hơn.

1.2. Tổng quan về việc áp dụng phương pháp ĐHSL

1.2.1. Việc áp dụng phương pháp ĐHSL trên thế giới

Có rất nhiều tài liệu nghiên cứu về đồng hóa số liệu trong khí tượng và hải dương học: Emmanouil và nnk[22] phát triển phương pháp ASSIMDIF kết hợp với mô hình WAM sử dụng số liệu vệ tinh ENVISAT-ESA, áp dụng ở hai khu vực biển Địa Trung Hải và phía bắc Ấn Độ Dương; Yang Ming Fan và nnk[27] kết hợp phương pháp nội suy tối ưu OI-I và OI-P với mô hình SWAN cho khu vực biển phía đông Đài Loan với số liệu sóng từ các trạm phao gần bờ biển Đài Loan; George Galanis và nnk [28] sử dụng lọc Kalman và lọc Kolmogorov-Zurbenko với mô hình tính sóng WAM áp dụng thành công cho vùng biển mở Thái Bình Dương với các số liệu trạm quan trắc từ 6 phao nổi; Seongjin Yoon và nnk [60] đã xây dựng bộ sơ đồ đồng hóa dữ liệu sóng dựa trên bộ lọc Kalman kết hợp với mô hình sóng phi tuyến; Xiao-Ming Li và nnk [39] sử dụng độ cao sóng có ý nghĩa (SWH) của vệ tinh ENVISAT để kiểm định các mô hình sóng đại dương toàn cầu (WAMs). H.S.Chen[18] đã phát triển phương pháp ĐHSL độ cao sóng để dự báo sóng toàn cầu bằng mô hình NWW3 (NOAA WaveWatchIII) sử dụng số liệu quan trắc độ cao sóng của các phao nổi và vệ tinh ERS-2; Cao Lei và nnk [38] áp dụng phương pháp ĐHSL EnOI, OI và mô hình WW3 ở khu vực Biển Đông cho một số cơn bão ảnh hưởng đến khu vực Bắc bộ Việt Nam và khu vực phía Nam Trung Quốc với số liệu độ cao sóng từ 4 vệ tinh Exp, Jason-1&2, ENVISAT và số liệu tại trạm phao để tính toán; S. Almeida và nnk[10] thử nghiệm áp dụng phương pháp lọc Kalman tổ hợp EnKF để ĐHSL sóng tại 4 trạm phao khu vực ven biển Bồ Đào Nha cho mô hình tính toán sóng SWAN với 20 thành phần tổ hợp.

1.2.2. Việc áp dụng phương pháp ĐHSL ở Việt Nam

Việc áp dụng phương pháp đồng hóa số liệu ở Việt Nam cũng đã được nghiên cứu và ứng dụng trong nhiều lĩnh vực, như: Trần Tân Tiến và nnk [8] sử dụng số liệu vệ tinh MODIS để đồng hóa trường ban đầu cho mô hình WRF bằng phương pháp 3DVAR để dự báo mưa lớn cho khu vực Trung; Hoàng Đức Cường và nnk [2] dự báo thử nghiệm đồng hóa số liệu cho trường ban đầu cho mô hình WRF nhằm dự báo quỹ đạo bão; Kiều Quốc Chánh [1] đã giới thiệu bộ lọc Kalman và một số biến thể của lọc Kalman có tính áp dụng thực tiễn cao trong các bài toán dự báo thời tiết; Dư Đức Tiến và nnk [56] nghiên cứu áp dụng phương pháp lọc Kalman tổ hợp để tạo trường ban đầu cho mô hình WRF nhằm dự báo tốt hơn bão nhiệt đới; Trần Thu Hà và nnk [30] nghiên cứu áp dụng thành công phương pháp Lọc Kalman nội suy tiến triển đơn để đánh giá lan truyền các chất ô nhiễm BOD₅, COD, NH₃ dựa trên mô hình tải – khuếch tán hai chiều, thử nghiệm cho khu vực hồ Thanh Nhàn, Hà Nội.

Bên cạnh đó cũng có các nghiên cứu trong hải dương học như: Nguyễn Minh Huân [5] đã đánh giá một số phương pháp ĐHSL khác nhau như IO, KF và 4DVAR kết hợp với mô hình thủy động lực phục vụ quy trình dự báo quỹ đạo chuyển động trôi của các vật thể phục vụ công tác tìm kiếm cứu hộ, cứu nạn; Trần Quang Tiến [7] sử dụng số liệu ra đa biển tại trạm Ra đa Đồng Hới, tỉnh Quảng Bình để tính toán thử nghiệm ĐHSL bằng mô hình SWAN kết hợp với phương pháp đồng hóa lọc Kalman áp dụng cho khu vực vịnh Bắc bộ.

Qua tổng quan trong và ngoài nước có thể kết luận rằng:

Phương pháp mô hình số trị trong tính toán, dự báo sóng biển chiếm ưu thế, đã được sử dụng rộng rãi trên thế giới và Việt Nam.

Các mô hình số trị này ngày càng được phát triển và cập nhật, trong đó có đưa phương pháp đồng hóa số liệu quan trắc vào mô hình. Mô hình SWAN đã và đang được sử dụng rộng rãi tại nhiều nước và tại Việt Nam mô hình này cũng được áp dụng khá phổ biến.

Phương pháp đồng hóa số liệu quan trắc vào các mô hình số trị đã được áp dụng từ lâu trên thế giới, tuy nhiên tại Việt Nam đang còn mới mẻ. Đồng hóa số liệu quan trắc vào mô hình số trị không chỉ giúp cải thiện đáng kể chất lượng tính toán mà còn nâng cao chất lượng dự báo khí tượng, thủy hải văn nói chung và tính toán dự báo sóng biển nói riêng.

CHƯƠNG 2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Phương pháp ĐHSL

Đồng hóa số liệu là phương pháp phân tích mà trong đó thông tin quan trắc được tích hợp vào mô hình bằng cách hiệu chỉnh chúng thông qua các định luật vật lý hay sự biến thiên theo thời gian[1]. Có rất nhiều phương pháp ĐHSL khác nhau được xây dựng và phát triển cho các hệ thống mô hình động lực phi tuyến. Các phương pháp này có thể được chia thành ba nhóm chính như sau:

- Phương pháp giải trực tiếp các ma trận: Các phương pháp phát triển theo hướng này dựa trên phương pháp lọc Kalman trong đó sử dụng mô hình tiếp điểm tuyến tính và ma trận liên kết của chúng để đánh giá phương sai số tính toán. Diễn hình của phương pháp này là phương pháp lọc Kalman mở rộng (EKF). Phương pháp này cải thiện đáng kể hiệu quả tính toán của mô hình nhưng chúng lại đòi hỏi rất lớn về tài nguyên tính toán và bộ nhớ động.

- Phương pháp biến phân: phân tích biến phân tối thiểu hoá hàm chi phí thông qua việc xem xét cả sai số tính toán và sai số quan trắc.

Điển hình trong phương pháp này là biến phân ba chiều (3D-Var) và biến phân bốn chiều (4D-Var). Để tính toán biến thiên của hàm chi phí cho việc tối thiểu hoá tại tất cả các bước thời gian yêu cầu cần phải làm việc với ma trận lớn, điều này làm cho 4D-Var tính toán mất nhiều thời gian hơn.

- Phương pháp ĐHSL tổ hợp: Cách tiếp cận này sử dụng phương pháp Monte Carlo để ước tính phương sai sai số phân tích và xác định ma trận trọng số Kalman mà không cần sử dụng toán tử tuyến tính tiếp tuyến. Điển hình của phương pháp này là lọc Kalman tổ hợp – EnKF. Trong đó, EnKF có một vài ưu điểm nổi trội bao gồm 1) rút bớt các tính toán với các ma trận có số chiều lớn; 2) không cần tuyến tính hóa mô hình cũng như mô hình liên hợp; 3) cung cấp một tổ hợp các nhiễu ban đầu tối ưu hóa cho việc dự báo các ma trận sai số hiệp biến [1]. Vì vậy, nghiên cứu áp dụng phương pháp ĐHSL lọc Kalman tổ hợp để áp dụng cho bài toán tính toán ĐHSL độ cao sóng cho mô hình sóng SWAN.

2.2. Mô hình tính toán sóng SWAN

SWAN là mô hình tính toán sóng thế hệ ba [54], tính toán phổ sóng hai chiều bằng cách giải phương trình cân bằng tác động sóng.

- *Phương trình cân bằng tác động phổ:*

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} C_x N + \frac{\partial}{\partial y} C_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} C_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} C_\theta N = \frac{S}{\sigma} \quad (2.1)$$

Thành phần đầu trong vế trái là thay đổi của phổ mật độ tác động theo thời gian. Thành phần thứ hai và thứ ba là sự lan truyền của phổ mật độ tác động trong không gian địa lý (với vận tốc truyền là C_x và C_y tương ứng trong hướng x và y). Thành phần thứ tư biểu thị sự thay đổi của tần số dưới ảnh hưởng của độ sâu và dòng chảy (với vận tốc truyền là C_σ). Thành phần thứ năm biểu thị sự tác động

của độ sâu và dòng chảy đối với hiệu ứng khúc xạ. Về phải của phương trình biểu thị các nguồn năng lượng sóng được cung cấp và tiêu tán trong quá trình truyền sóng với S là hàm nguồn.

Trong mô hình SWAN, lời giải của phương trình cân bằng tác động sóng được triển khai bằng một số sơ đồ khác nhau theo cả thời gian, không gian địa lý, không gian phổ.

2.3. Hệ thống phần mềm OpenDA

OpenDA là phần mềm được phát triển bởi Verlaan và nnk[42] thuộc Đại học Delft, Hà Lan để tính toán ĐHSL, phân tích độ ổn định của mô hình và hiệu chỉnh tham số mô hình.

- Các phương pháp đánh giá tham số mô hình trong OpenDA: Phương pháp đơn(Simplex); Phương pháp độ dốc liên hợp(Conjugate Gradients); Phương pháp LBFGS(Limited memory Broyden Fletcher Goldfarb Shanno); Phương pháp Dud(Doesn't use derivative).

Phương pháp SWAN-CI[59] là công cụ được phát triển riêng cho mô hình SWAN được tích hợp trong Open DA để hiệu chỉnh các tham số của mô hình SWAN và nó có thể thực hiện hiệu chỉnh đồng thời nhiều tham số. Về cơ bản SWAN-CI cũng bao gồm các phương pháp hiệu chỉnh nêu trên.

- Các phương pháp ĐHSL trong OpenDA:

+ Lọc quân phương tổ hợp (EnSRF) dựa theo Lọc Kalman được Andrews đưa ra lần đầu tiên vào năm 1968[11], sau đó Andersson tiếp tục được xây dựng và phát triển phương pháp này thành một phương pháp ĐHSL dựa trên tổ hợp vào năm 2001[35].

+ Lọc Kalman tổ hợp địa phương hoá biến đổi (LETKF) là một dạng khác của thuật toán dựa trên tổ hợp tương tự như EnSRF. LETKF thực hiện ĐHSL trong phạm vi không gian địa phương, mỗi

trạng thái mô hình được cập nhật đồng thời với tất cả các quan trắc trong không gian con địa phương cho trước.

+ Lọc Kalman tổ hợp xác định (DEnKF) là một biến thể khác của EnKF sử dụng các quan trắc không hỗn loạn. Sơ đồ phân tích của DEnKF có thể được xem xét như một xấp xỉ tuyến tính của EnSRF và hiệp phương sai sai số phân tích.

+ Lọc Kalman tổ hợp (EnKF - Ensemble Kalman Filter), EnKF sử dụng quan trắc bị nhiễu loạn để duy trì một phạm vi hợp lý của dải tổ hợp để tránh phân kỳ của quá trình lọc [15]. EnKF tương đối ổn định hơn so với các phương pháp khác nhưng đôi khi được cho là ít tối ưu do nhiễu động quan trắc bổ sung [52]. Tuy nhiên, khi EnKF được áp dụng cho các hệ thống mô hình nhiều chiều (2 hoặc 3 chiều) thì nó ổn định hơn đáng kể do yêu cầu số thành phần tổ hợp ít hơn [47]. Chính vì vậy, nghiên cứu lựa chọn và áp dụng phương pháp lọc Kalman tổ hợp cho các tính toán trong luận án.

2.4. Số liệu sử dụng trong luận án

- Số liệu địa hình được thu thập từ nguồn số liệu ETOPO của NOAA [63] và các số liệu địa hình chi tiết tại khu vực gần bờ của các đợt điều tra khảo sát biển trong vùng nghiên cứu.

- Số liệu gió gồm: Gió tái phân tích toàn cầu CFSv2 của NCEP; Gió tái phân tích toàn cầu ECMWF; Gió dự báo 2 ngày từ Trung tâm Dự báo Khí tượng – Thủy văn Trung Ương.

- Số liệu sóng gồm: Sóng tái phân tích toàn cầu của ECMWF; Sóng tại 04 trạm phao từ năm 1999-2003; Số liệu radar Đồng Hới - Quảng Bình; Số liệu sóng tại trạm Bạch Hổ (MSP1) của VietSov-Petro; Số liệu track từ các vệ tinh (ERS-2, Geosat – Follow (G2), Jarson1, Envisat, Jarson2, HY-2A, Saral-Altica và Jarson3).

2.5. Các chỉ số đánh giá sai số

Để đánh giá sai số của các kết quả tính toán nghiên cứu dựa trên các chỉ số sau: Sai số trung bình (ME); Sai số bình phương trung bình quân phương (RMSE).

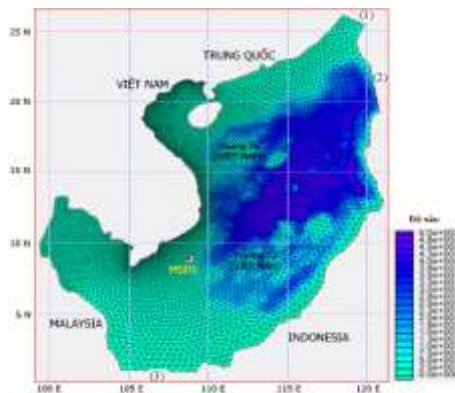
CHƯƠNG 3. ÁP DỤNG THỬ NGHIỆM ĐHSL CHO KHU VỰC BIỂN ĐÔNG VÀ BIỂN VIỆT NAM

3.1. Đặc điểm khu vực nghiên cứu

Biển Đông nằm ở phía tây của Thái Bình Dương, là một biển kín được bao bọc bởi đảo Đài Loan, quần đảo Philippin ở phía đông; các đảo Indônêxia (Borneo, Sumatra) và bán đảo Malayxia ở phía nam và đông nam, bán đảo Đông Dương ở phía tây và lục địa nam Trung Hoa ở phía bắc.

3.2. Thiết lập mô hình mô phỏng trường sóng Biển Đông

Miền tính là toàn bộ khu vực Biển Đông trải dài từ 1,5 đến 25 độ vĩ bắc và từ 99 đến 121 độ kinh. Lưới tính là lưới phi cấu trúc với bước lưới ở khu vực gần bờ là 10km và thưa dần ra ngoài khơi, tổng số ô lưới là 12.858. Có 3 biên lỏng là biên eo biển Đài Loan (1), eo biển Bashi (2) và eo biển Malacca (3).



Hình 1. Địa hình và lưới tính khu vực Biển Đông

3.3. Nghiên cứu lựa chọn tham số

3.3.1. Lựa chọn các tham số trong mô hình SWAN

Các tham số đưa vào hiệu chỉnh chỉ tập trung vào các tham số ảnh hưởng đến sóng nước sâu gồm: CDS2 - tốc độ tiêu tán sóng do sóng bạc đầu, powst - tỉ lệ giữa độ dốc phổ sóng thông thường với độ dốc phổ sóng Pierson-Moskowitz, powk - tỉ lệ giữa số sóng thông thường với số sóng trung bình và tham số cutfr - tỉ lệ giữa tần số sóng cực đại và tần số sóng trung bình.

Việc hiệu chỉnh được thử nghiệm với chuỗi số liệu 7 ngày từ 0 giờ 15/7/2014 đến 23 giờ 21/7/2014 (giờ quốc tế) và được thực hiện bằng cách giữ nguyên ba tham số và thay đổi một tham số còn lại, kết quả hiệu chỉnh các tham số như sau:

Giá trị hàm GoF thay đổi rất lớn từ 2000 xuống 1000 khi tham số CDS2 thay đổi từ $1,00 \times 10^{-5}$ đến $2,30 \times 10^{-5}$, sau đó thay đổi rất ít từ 900 đến 1000 khi CDS2 thay đổi từ $2,30 \times 10^{-5}$ đến $5,80 \times 10^{-5}$, như vậy có thể lựa chọn tham số CDS2 trong khoảng giá trị này để tính toán.

Giá trị hàm GoF thay đổi rất lớn từ 8500 xuống 1000 khi tham số powst thay đổi từ 1,00 đến 1,80, sau đó thay đổi rất ít quanh giá trị 1000 khi tham số powst thay đổi từ 1,80 đến 5,00, như vậy có thể lựa chọn tham số powst trong khoảng giá trị này để tính toán.

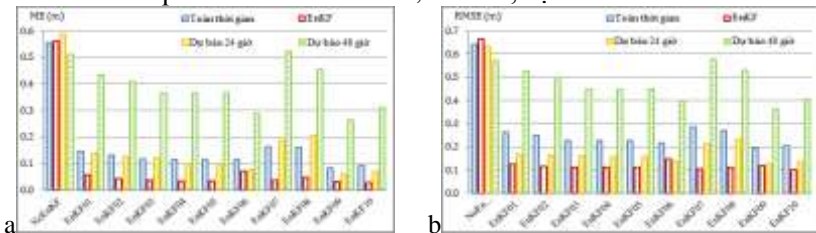
Các kết quả cho thấy việc thay đổi các tham số powk và cutfr ít ảnh hưởng đến kết quả, giá trị hàm GoF giữ nguyên ở 1060 cho dù tham số powk thay đổi từ 0,0 đến 2,0, giá trị hàm GoF thay đổi rất nhỏ khi thay đổi tham số cutfr. Vì vậy hai tham số này sẽ không được đưa vào hiệu chỉnh trong bước tiếp theo do các tham số này có tác động không đáng kể tới kết quả tính toán.

3.3.2. Lựa chọn các tham số trong ĐHSL lọc Kalman tổ hợp

Quá trình ĐHSL chịu tác động của các tham số như: Quy mô tương quan theo không gian; Độ tán gió; Quy mô tương quan theo thời gian; Số thành phần tổ hợp.

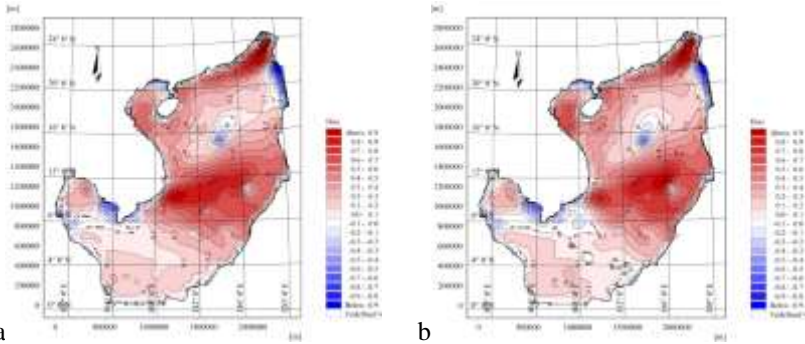
Trong các phương án ĐHSL (các phương án từ EnKF01 tới EnKF10), độ lệch chuẩn của nhiễu quan trắc được đặt bằng 0,1m, các quan trắc được cập nhật từng 01 giờ từ 0 giờ 16/9/2013 tới 23 giờ 18/9/2013 và thời gian dự báo tính từ 0 giờ 19/9/2013 tới 23 giờ 20/9/2013. Phương án không ĐHSL được ký hiệu là NoEnKF và được gán các giá trị Quy mô tương quan theo không gian bằng 200km, Độ tán gió bằng 1,5m/s, Quy mô tương quan theo thời gian bằng 24 giờ và số thành phần tổ hợp là 20.

Các kết quả đối với chỉ số ME, RMSE, cụ thể như sau:



Hình 2. So sánh chỉ số sai số giữa các phương án tính toán a-ME, b-RMSE

Trong giai đoạn ĐHSL, phương án EnKF10 cho kết quả tốt nhất ($ME=0,029m$, $RMSE=0,102m$), tuy nhiên trong giai đoạn dự báo và Toàn thời gian thì phương án EnKF09 lại cho kết quả tốt nhất (giá trị của ME lần lượt là 0,083, 0,032, 0,059 và 0,265; giá trị RMSE lần lượt là 0,194, 0,118, 0,127 và 0,364 tương ứng với các trường hợp Toàn thời gian, EnKF, dự báo 24 giờ và dự báo 48 giờ).



Hình 3. Chỉ số ME trên toàn miền tính: a. NoEnKF; b. EnKF03

Phía Nam quần đảo Hoàng Sa (~ 8N - 12N), giá trị chỉ số ME của tất cả các phương án ĐHSL đều có xu hướng thiên cao so với số liệu của ECMWF với ME dao động từ 0,4m đến 0,8m. Phía bắc quần đảo Hoàng Sa (~ 14N - 20N) và phía nam quần đảo Trường Sa (~ 2N - 8N) chỉ số ME nhỏ hơn và chỉ dao động trong khoảng $\pm 0,2m$. Trong phương án NoEnKF, chỉ số ME thay đổi từ 0,6 – 0,9m ở khu vực 8N - 12N.

Như vậy các tham số tối ưu có thể áp dụng trong các nghiên cứu tiếp theo gồm: Phạm vi hiệu chỉnh theo không gian là 200km để đảm bảo kết quả tính toán là đủ tốt, Độ phân tán gió 1,5m/s là đủ đảm bảo kết quả ĐHSL và kết quả dự báo, Phạm vi hiệu chỉnh theo thời gian khoảng 36 giờ cũng đủ đảm bảo độ chính xác của kết quả ĐHSL và kết quả dự báo và Số thành phần tổ hợp cũng đủ đảm bảo kết quả tính toán và dự báo.

3.4. Tính toán thử nghiệm với chuỗi số liệu tại trạm phao

3.4.1. Mô tả phương án tính toán

Việc tính toán thử nghiệm được thực hiện tuần tự theo 3 bước: Bước 1: tính toán với các tham số mặc định mô hình của mô hình SWAN (Phương án Mặc định). Bước 2: tính toán hiệu chỉnh mô hình

nhằm lựa chọn được bộ tham số tốt nhất cho chuỗi số liệu tính toán (Phương án Hiệu chỉnh) bằng công cụ hiệu chỉnh tự động SWAN-CI của OpenDA. Bước 3: tính toán ĐHSL và dự báo sóng với bộ tham số lựa chọn được từ bước hiệu chỉnh (Phương án EnKF) phần mềm OpenDA.

Về không gian, các trạm phao được đặt trên phạm vi khá rộng trải dài từ bắc Biển Đông xuống nam Biển Đông, các trạm này cũng có độ sâu thay đổi khá mạnh ở cả khu vực gần bờ và xa bờ. Về thời gian tính toán được phân theo nhóm: Toàn thời gian -từ 0 giờ 16/4/2001 đến 23 giờ 20/4/2001. Khoảng thời gian ĐHSL: từ 0 giờ 16/4/2001 đến 23 giờ 18/4/2001. Khoảng thời gian dự báo 24 giờ: từ 0 giờ 19/4/2001 đến 23 giờ 19/4/2001. Khoảng thời gian dự báo 48 giờ: từ 0 giờ 20/4/2001 đến 23 giờ 20/4/2001.

3.4.2. Kết quả đánh giá tham số cho mô hình SWAN

Nghiên cứu tiến hành hiệu chỉnh mô hình bằng phương pháp DUD và thu được kết quả như sau:

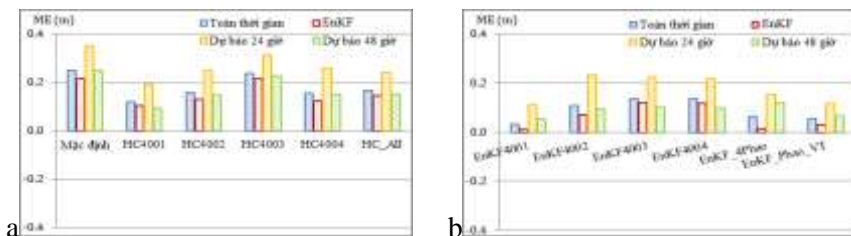
Bảng 1. Kết quả đánh giá tham số mô hình SWAN tại trạm phao

Tên phương án	Tham số	Giá trị mặc định	Giá trị tối ưu	GoF
HC4001	CDS2	$2,36 \times 10^{-5}$	$4,06 \times 10^{-5}$	324
	powst	2,00	3,71	
HC4002	CDS2	$2,36 \times 10^{-5}$	$3,34 \times 10^{-5}$	773
	powst	2,00	2,16	
HC4003	CDS2	$2,36 \times 10^{-5}$	$2,69 \times 10^{-5}$	294
	powst	2,00	2,87	
HC4004	CDS2	$2,36 \times 10^{-5}$	$3,07 \times 10^{-5}$	481
	powst	2,00	1,57	
HC_All	CDS2	$2,36 \times 10^{-5}$	$4,04 \times 10^{-5}$	1863
	powst	2,00	3,45	

Sau khi lựa chọn được các giá trị tối ưu của CDS2 và powst đối với từng trường hợp, nghiên cứu sử dụng các tham số này để thực hiện tính toán ĐHSL cho các trường hợp cụ thể.

3.4.3. Kết quả tính toán tại trạm phao 4001

Các chỉ số sai số tại trạm phao 4001, cụ thể như sau:

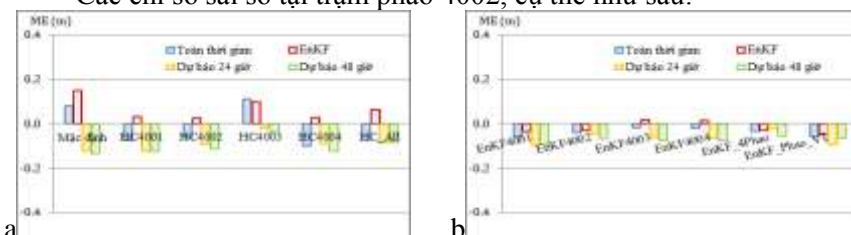


Hình 4. So sánh chỉ số ME tại trạm phao 4001 giữa các phương án hiệu chỉnh (a) và các phương án EnKF (b)

Nếu chỉ hiệu chỉnh tại trạm phao 4001 thì chỉ số $ME=0,12m$ (toàn bộ thời gian tính toán), các chỉ số này khi hiệu chỉnh tại các trạm phao khác đều cao hơn nhưng vẫn đảm bảo thấp hơn hoặc bằng so với khi tính toán với tham số mặc định. Khi ĐHSL tại trạm phao 4001, chỉ số ME giảm khá rõ rệt, $ME=0,01m$ (trong giai đoạn ĐHSL), giá trị của chỉ số này cũng tăng lên khi ĐHSL ở các trạm phao khác mà không sử dụng số liệu tại trạm phao 4001.

3.4.4. Kết quả tính toán tại trạm phao 4002

Các chỉ số sai số tại trạm phao 4002, cụ thể như sau:



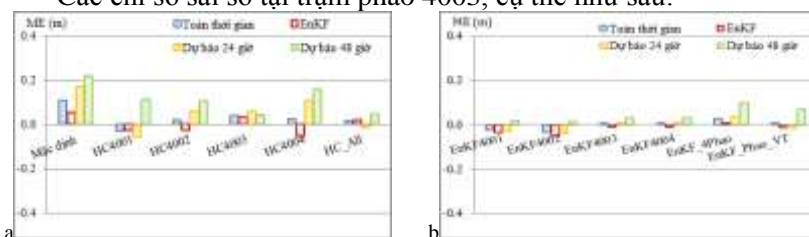
Hình 5. So sánh chỉ số ME tại trạm phao 4002 giữa các phương án hiệu chỉnh (a) và các phương án EnKF (b)

Nếu chỉ hiệu chỉnh tại trạm phao 4002 thì chỉ số $ME=-0,06m$ (toàn bộ thời gian tính toán) các giá trị này ngang bằng khi hiệu chỉnh tại trạm 4001 và 4004, đối với các trạm phao còn lại và hiệu

chỉnh đồng thời tại cả 4 trạm phao đều cao hơn nhưng vẫn đảm bảo thấp hơn hoặc bằng so với tham số mặc định. Do độ cao sóng ở trạm 4002 khá thấp vì vậy khi ĐHSL với số liệu tại trạm phao 4002, chỉ số ME thay đổi theo xu hướng giảm nhưng mức độ thay đổi khá nhỏ $ME=0,02m$ (trong giai đoạn ĐHSL), giá trị của chỉ số này cũng thay đổi khá khác biệt giữa các phương án khi ĐHSL ở các trạm phao khác mà không sử dụng số liệu tại trạm phao 4002.

3.4.5. Kết quả tính toán tại trạm phao 4003

Các chỉ số sai số tại trạm phao 4003, cụ thể như sau:

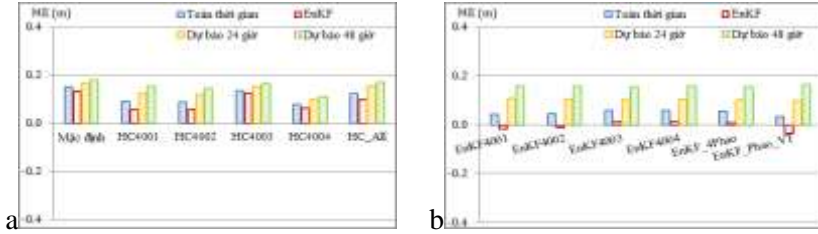


Hình 6. So sánh chỉ số ME tại trạm phao 4003 giữa các phương án hiệu chỉnh (a) và các phương án EnKF (b)

Nếu chỉ hiệu chỉnh tại trạm phao 4003 thì chỉ số $ME=0,04m$ (toàn bộ thời gian tính toán), chỉ số này khi hiệu chỉnh tại các trạm phao khác đều cao hơn nhưng vẫn đảm bảo thấp hơn hoặc bằng so với tham số mặc định. Khi ĐHSL tại trạm phao 4003, chỉ số ME đều giảm khá rõ rệt, $ME=-0,01m$ (trong giai đoạn ĐHSL), giá trị của chỉ số này cũng tăng lên khi ĐHSL ở các trạm phao khác mà không sử dụng số liệu tại trạm phao 4003, tuy nhiên chênh lệch giữa các phương án là khá nhỏ.

3.4.6. Kết quả tính toán tại trạm phao 4004

Các chỉ số sai số tại trạm phao 4004, cụ thể như sau:

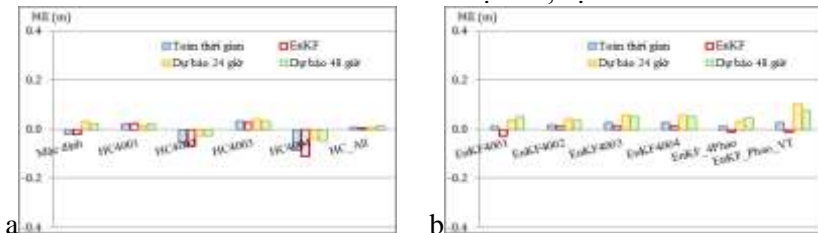


Hình 7. So sánh chỉ số ME tại trạm phao 4004 giữa các phương án hiệu chỉnh (a) và các phương án EnKF (b)

Nếu chỉ hiệu chỉnh tại trạm phao 4004 thì chỉ số ME=0,08m (toàn bộ thời gian tính toán), chỉ số này khi hiệu chỉnh tại các trạm phao khác đều cao hơn nhưng vẫn đảm bảo thấp hơn hoặc bằng so với tham số mặc định. Khi ĐHSL tại trạm phao 4004, chỉ số ME đều giảm, ME=0,01m (trong giai đoạn ĐHSL), giá trị của chỉ số này cũng tăng lên khi ĐHSL ở các trạm phao khác mà không sử dụng số liệu tại trạm phao 4004.

3.4.7. Kết quả tính toán với số liệu vệ tinh

Các chỉ số sai số đối với các điểm vệ tinh, cụ thể như sau:



Hình 8. So sánh chỉ số ME tại trạm vệ tinh giữa các phương án hiệu chỉnh (a) và các phương án EnKF (b)

Đối với các số liệu vệ tinh thì phương án hiệu chỉnh với tất cả số liệu cho kết quả tốt nhất với chỉ số ME=0,01m(toàn bộ thời gian tính toán), kết quả hiệu chỉnh với số liệu tại trạm phao 4004 xấu nhất với chỉ số ME=-0,09m(toàn bộ thời gian tính toán). Khi ĐHSL, chỉ số sai số đều giảm và khá tương đồng giữa các phương án ME dao động từ

0,01m đến -0,03m (trong giai đoạn ĐHSL). Các kết quả đối với chỉ số ME trong giai đoạn dự báo và trong toàn bộ thời gian tính đều cho kết quả tương tự.

3.5. Tính toán thử nghiệm với chuỗi số liệu radar biển

3.5.1. Mô tả phương án tính toán

Việc tính toán thử nghiệm được thực hiện tuần tự theo 3 bước như trường hợp đối với trạm phao với số liệu Radar biển và số liệu tại trạm MSP1.

3.5.2. Kết quả đánh giá tham số cho mô hình SWAN

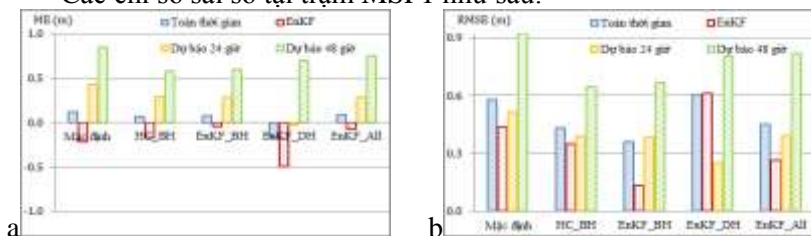
Nghiên cứu tiến hành thử nghiệm hiệu chỉnh mô hình bằng phương pháp DUD và thu được kết quả như sau:

Bảng 2. Kết quả đánh giá tham số mô hình SWAN

Tên phương án	Tham số	Giá trị mặc định	Giá trị tối ưu	GoF
HC_BH	CDS2	$2,36 \times 10^{-5}$	$2,54 \times 10^{-5}$	344
	powst	2,00	3,51	
HC_DH	CDS2	$2,36 \times 10^{-5}$	$3,35 \times 10^{-7}$	419
	powst	2,00	2,26	
HC_All	CDS2	$2,36 \times 10^{-5}$	$6,01 \times 10^{-7}$	6.813
	powst	2,00	3,19	

3.5.3. Kết quả tính toán tại trạm MSP1

Các chỉ số sai số tại trạm MSP1 như sau:

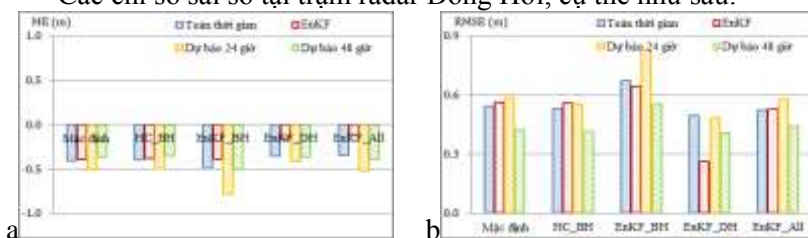


Hình 9. So sánh các chỉ số ME (a), RMSE (b) tại trạm MSP1 giữa các phương án

Các kết quả cho thấy giá trị ME trong giai đoạn ĐHSL đều có giá trị âm tức là các kết quả tính toán thiên thấp. Trong giai đoạn dự báo các kết quả tính toán lại mang giá trị dương tức là kết quả tính toán lại thiên cao. Căn cứ vào giá trị các chỉ số giữa các phương án có thể thấy việc ĐHSL đều làm giảm sai số (trừ trường hợp đồng hoá với số liệu radar).

3.5.4. Kết quả tính toán tại trạm Radar Đồng Hới

Các chỉ số sai số tại trạm radar Đồng Hới, cụ thể như sau:

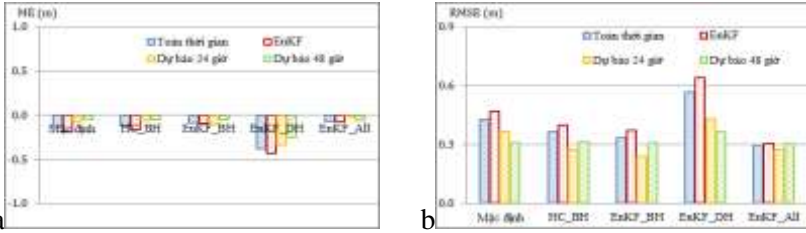


Hình 10. So sánh các chỉ số ME (a), RMSE (b) tại trạm radar Đồng Hới giữa các phương án

Các kết quả cho thấy giá trị ME trong tất cả các giai đoạn tính toán đều có giá trị âm tức là các kết quả tính toán thiên thấp. Nhìn chung việc hiệu chỉnh không cải thiện nhiều kết quả tính toán, việc ĐHSL với chuỗi số liệu tại trạm MSP1 làm gia tăng sai số. Việc ĐHSL với tất cả các loại số liệu giúp giảm sai số tính toán. Khi ĐHSL tại trạm radar thì kết quả được cải thiện cả sai số tính toán.

3.5.5. Kết quả tính toán với số liệu vệ tinh

Các chỉ số sai số đối với các số liệu vệ tinh, cụ thể như sau:



Hình 11. So sánh các chỉ số ME (a), RMSE (b) tại trạm radar Đồng Hới giữa các phương án

Các kết quả cho thấy giá trị ME trong tất cả các giai đoạn tính toán đều có giá trị âm tức là các kết quả tính toán thiên thấp. So sánh và đánh giá tất cả các chỉ số đều thấy, trong phương án đồng hoá với tất cả các số liệu thì sai số đều nhỏ nhất, các hệ số tương quan cũng lớn nhất trong trường hợp này.

KẾT LUẬN – KIẾN NGHỊ

1. Kết luận

Thông qua nghiên cứu và thử nghiệm tính toán, tác giả đưa ra một số kết luận như sau:

1. Kết quả áp dụng công cụ hiệu chỉnh mô hình tự động SWAN-CI cho thấy, đối với tính toán sóng nước sâu tham số powk - tỉ lệ giữa số sóng thông thường với số sóng trung bình và tham số cutfr - tỉ lệ giữa tần số sóng cực đại và tần số sóng trung bình trong mô hình sóng SWAN ít ảnh hưởng đến kết quả tính toán, trong khi đó, các tham số CDS2 - tốc độ tiêu tán sóng do sóng bạc đầu và tham số powst - tỉ lệ giữa độ dốc phổ sóng thông thường với độ dốc phổ sóng Pierson-Moskowitz lại có ảnh hưởng rất lớn đến kết quả tính toán.

2. Thông qua kết quả thử nghiệm với phương pháp lọc Kalman tổ hợp, nghiên cứu đã lựa chọn được các yếu tố và phạm vi ảnh hưởng của chúng đến hiệu quả của việc ĐHSL, bao gồm:

- Phạm vi hiệu chỉnh theo không gian: đây là tham số liên quan đến quy mô ảnh hưởng theo phương ngang để tính toán ma trận tương quan, tham số càng lớn thì độ chính xác của độ cao sóng có nghĩa càng lớn trong cả giai đoạn ĐHSL và giai đoạn dự báo. Tuy nhiên, chênh lệch giữa các phương án khi thay đổi phạm vi hiệu chỉnh theo không gian giữa 200km, 500km, 5000km là không lớn. Với phạm vi hiệu chỉnh theo không gian nhỏ hơn 200km thì phân bố độ cao sóng có nghĩa quanh điểm quan trắc không phản ánh đúng thực tế quá trình truyền sóng ngoài biển. Do đó, với phạm vi hiệu chỉnh theo không gian 200km cũng đủ để đảm bảo kết quả tính toán.

- Độ tán gió: tham số này liên quan đến nhiều động đưa vào trường gió điều khiển. Trong gian đoạn ĐHSL, tham số này càng lớn thì độ chính xác của kết quả càng cao nhưng trong giai đoạn dự báo thì ngược lại, tức là giá trị độ phân tán gió càng lớn thì độ chính xác của dự báo càng nhỏ. Do đó, với độ phân tán gió 1,5m/s là đủ đảm bảo kết quả ĐHSL và kết quả dự báo.

- Phạm vi hiệu chỉnh theo thời gian: tham số này liên quan tới qui mô ảnh hưởng theo thời gian đối với cập nhật nhiều trường gió. Trong giai đoạn ĐHSL tham số này càng lớn thì sai số giữa kết quả kết quả tính toán và thực đo càng lớn, tuy nhiên sai số này không khác nhau nhiều giữa các phương án. Ngược lại, trong giai đoạn dự báo thì tham số này càng lớn thì độ chính xác của dự báo càng lớn. Do đó với phạm vi hiệu chỉnh theo thời gian khoảng 36 giờ cũng đủ đảm bảo độ chính xác của kết quả ĐHSL và kết quả dự báo.

- Số thành phần tổ hợp: Số thành phần tổ hợp càng lớn thì các kết quả tính toán trong cả giai đoạn ĐHSL và giai đoạn dự báo đều chính xác hơn. Nhưng số thành phần tổ hợp càng lớn thì thời gian

tính toán càng dài, điều này sẽ gây khó khăn cho việc đảm bảo thời gian dự báo trong thực tế.

3. Quá trình ĐHSL bằng phương pháp lọc Kalman tổ hợp làm giảm đáng kể sai số trong giai đoạn ĐHSL và giảm sai số tính toán trong khoảng 24 giờ dự báo và giảm dần độ chính xác trong 48 giờ dự báo. Bên cạnh đó, việc ĐHSL không chỉ ảnh hưởng đến trường sóng quanh điểm quan trắc (điểm ĐHSL) mà còn ảnh hưởng đến toàn bộ miền tính. Mặc dù chỉ đồng hoá với số liệu độ cao sóng nhưng kết quả cho thấy việc ĐHSL cũng ảnh hưởng đến cả chu kỳ và hướng sóng.

2. Kiến nghị

- Các số liệu từ trạm phao, trạm MSP1, số liệu vệ tinh đều đã có đánh giá về độ tin cậy và các kết quả cho thấy các số liệu này phục vụ khá tốt cho việc tính toán, các số liệu từ radar biển cần tiếp tục có các nghiên cứu, hiệu chỉnh phù hợp và các đánh giá về độ tin cậy của số liệu này để phục vụ tốt hơn cho các nghiên cứu có liên quan trong khu vực.

- Nghiên cứu mới chỉ tập trung vào hiệu chỉnh mô hình và ĐHSL đối với độ cao sóng do đó trong thời gian tới tác giả sẽ tiếp tục nghiên cứu thêm đối với cả chu kỳ và hướng sóng, đồng thời cũng nghiên cứu thêm về ĐHSL đối với các mô hình dòng chảy.

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ

1. **Nguyen Trung Thanh**, Nguyen Minh Huan, Tran Quang Tien (2017), “Application of automated calibration method to calibrate parameters in SWAN model using wave height data from satellite and msp1 in Eastern Vietnam Sea”, Journal of Marine Science and Technology; Vol. 17, No. 3; 2017: DOI: 10.15625/1859-3097/17/3/9803.

2. **Nguyen Trung Thanh**, Nguyen Minh Huan, Tran Quang Tien (2018), “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: 358–367: DOI: 10.15625/1859-3097/18/4/12474.

3. **Nguyen Trung Thanh** và nnk (2019), A case study on using Ensemble Kalman Filter method to assimilate single wave height observation station to improve wave forecast over South China Sea with SWAN model, đang gửi đăng ở Tạp chí Geoscience - [https://www.mdpi.com/journal/geosciences.](https://www.mdpi.com/journal/geosciences)