

CHUYỂN ĐỔI MÔI TRƯỜNG TÍNH TOÁN SONG SONG CHO MÔ HÌNH DỰ BÁO THỜI TIẾT HRM

NGUYỄN ĐỨC LẠNG

Khoa Khoa học tự nhiên - Đại học Thái Nguyên

Abstract. In the National center for hydro-meteorological Forecasting of Vietnam, a weather forecast model named HRM (High Resolution Model) from Germany has been applied in operational forecasting. Having used the paralleled HRM code for shared memory systems with the supercomputer IBM-RISS6000, the running time was more than the requested time for an operational model. While a new shared memory supercomputer is not available because of its high cost, a distributed memory cluster seems more appropriate. The new paralleled HRM code for distributed memory systems has been developed. Domain decomposition has been done in two-dimensional spaces rather in one-dimensional spaces in the old code. With the new code, HRM can now aids the forecasters in their daily operational forecasting.

Tóm tắt. Mô hình dự báo thời tiết HRM của Đức đã được đưa vào ứng dụng nghiệp vụ tại Trung tâm Dự báo khí tượng thủy văn trung ương. Tuy nhiên khi sử dụng phiên bản HRM song song hóa cho hệ chia sẻ nhớ chạy trên siêu máy tính IBM-RISS6000, thời gian chạy mô hình lớn hơn so với thời gian cho phép của một mô hình dự báo nghiệp vụ. Đầu tư mua một siêu máy tính bộ nhớ chia sẻ mới là không khả thi do giá thành quá cao. Hướng đầu tư cho một hệ thống bộ song song phân tán nhớ tỏ ra thích hợp hơn. Một phiên bản HRM mới, song song hóa cho hệ phân tán nhớ đã được phát triển nhằm phục vụ cho hướng đầu tư mới này. Cách phân chia miền tính toán cho các bộ xử lý cũng được thực hiện mới trên không gian hai chiều thay vì không gian một chiều như trong phiên bản HRM cũ. Với phiên bản mới này, dự báo viên đã có thể sử dụng sản phẩm dự báo từ HRM cho công việc dự báo nghiệp vụ hàng ngày.

1. GIỚI THIỆU

Tại Việt Nam, ứng dụng các mô hình số trị vào dự báo thời tiết đã được bắt đầu từ năm 2000. Cho đến nay thông qua hợp tác quốc tế, chuyển giao công nghệ, đã có nhiều mô hình khác nhau được sử dụng trong nghiên cứu cũng như dự báo nghiệp vụ tại các viện, trường đại học và trung tâm nghiên cứu. Nếu chỉ sử dụng mô hình để nghiên cứu thì thời gian dự báo không có vai trò đáng kể nhưng khi đưa vào dự báo nghiệp vụ, yếu tố thời gian lại trở thành một nhân tố quyết định liệu ta có thể sử dụng được kết quả dự báo từ mô hình đó hay không. Chỉ với thời gian dự báo ngắn, mô hình mới có thể hỗ trợ tốt cho dự báo viên trong tham khảo đưa ra kết quả dự báo.

Một mô hình dự báo thời tiết muốn dự báo với chất lượng tốt đòi hỏi hai yêu cầu. Thứ nhất, các quá trình vật lý khí quyển cũng như tương tác của chúng với nhau phải được mô tả tốt trong mô hình. Thứ hai, miền tính của mô hình phải đủ lớn với độ phân giải cao. Hai nhân tố này khiến cho khối lượng tính toán trong mô hình trở nên rất lớn. Trong khi yếu tố

thứ nhất xác định số lượng phép tính tại mỗi điểm lưới thì yếu tố thứ hai cho ta tổng số các phép tính tại mỗi bước thời gian. Với một khối lượng tính toán lớn như vậy, các mô hình dự báo thời tiết luôn chiếm dụng nhiều tài nguyên máy tính với thời gian tính toán lớn.

Hiện nay trên thế giới một mô hình dự báo thời tiết luôn có ít nhất là hai phiên bản, một phiên bản tính toán tuần tự và một phiên bản tính toán song song trên hệ phân tán nhớ. Một số mô hình có thêm phiên bản song song trên hệ chia sẻ nhớ. Những phiên bản tính toán song song này ra đời từ quá trình nghiên cứu tính toán hiệu năng cao cho các bài toán động lực học chất lỏng tính toán (Computation Fluid Dynamics) mà bài toán dự báo thời tiết là một phần trong đó (xem [2, 4]). Những mô hình dự báo có phiên bản tính toán song song được sử dụng tại Việt Nam gồm có HRM, RAMS, MM5, Eta.

Mô hình khí tượng dự báo thời tiết HRM của Cộng hòa Liên bang Đức là kết quả hợp tác nghiên cứu của các nhà khí tượng Đức do tiến sĩ Detlev Majevski chủ trì. Mô hình được cung cấp miễn phí cho các trung tâm khí tượng tại các nước đang phát triển cho cả mục đích nghiên cứu cũng như nghiệp vụ. Hiện tại trên thế giới có khoảng hai mươi nước đang sử dụng mô hình này trong nghiệp vụ. Tại Việt Nam, HRM được đưa vào chạy nghiệp vụ tại Trung tâm dự báo khí tượng thủy văn trung ương từ năm 2002.

Hiện tại mô hình HRM có một phiên bản tính toán tuần tự và một phiên bản tính toán song song viết cho hệ máy tính chia sẻ nhớ. Với máy tính song song chia sẻ bộ nhớ IBM RISS6000 tại Trung tâm, thời gian chạy mô hình không đáp ứng được thời gian nghiệp vụ. Trong khi đầu tư mua một siêu máy tính bộ nhớ chia sẻ có hiệu năng tính toán cao hơn tỏ ra không khả thi, hướng giải quyết chuyển môi trường tính toán từ máy tính bộ nhớ chia sẻ sang máy tính bó song song bộ nhớ phân tán lại tỏ rõ lợi thế về mặt giá thành. Công việc mới phải thực hiện là tái cấu trúc tính toán song song và cấu trúc dữ liệu của mô hình HRM.

2. MÔ HÌNH DỰ BÁO THỜI TIẾT HRM

2.1. Hệ phương trình cơ sở

Các biến dự báo cơ bản của HRM gồm vận tốc gió vĩ hướng u , vận tốc gió kinh hướng v , áp suất bề mặt p_s , nhiệt độ T , độ ẩm riêng q_v . Nếu mô phỏng mây ta phải dự báo thêm lượng nước và băng trong mây q_c và q_i . Trong mô phỏng, HRM sử dụng hệ phương trình Navie–Stokes trên hệ tọa độ kinh vĩ địa lý theo phương ngang và tọa độ lai theo phương đứng (λ, φ, η) . Tọa độ lai η được định nghĩa thông qua áp suất p như sau

$$\begin{cases} \eta = \frac{p}{p_0}, & 0 \leq p \leq p_t, \\ \eta = \frac{p - p_t}{p_s - p_t} + \frac{p_t}{p_0} \frac{p_s - p}{p_s - p_t}, & p_t < p \leq p_s, \end{cases} \quad (2.1)$$

trong đó p_0 là áp suất chuẩn tại mực mặt biển 1000 hPa, p_s là áp suất bề mặt, p_t là áp suất chuẩn tại đỉnh tầng đối lưu 220 hPa.

Dưới đây là phương trình dự báo cho các biến khí tượng cơ bản trong HRM theo [3].

Phương trình dự báo áp suất bề mặt p_s

$$\frac{\partial p_s}{\partial t} = -\frac{1}{a \cos \varphi_0} \int_0^1 \left\{ \frac{\partial}{\partial \lambda} \left(u \frac{\partial p}{\partial \eta} \right) + \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(v \cos \varphi \frac{\partial p}{\partial \eta} \right) \right\} d\eta \quad (2.2)$$

với λ là kinh độ, φ là vĩ độ và a là bán kính trái đất. Phương trình dự báo hai thành phần vận tốc gió u, v

$$\frac{\partial u}{\partial t} = (\zeta + f)v - \frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial(\Phi + K)}{\partial \lambda} - \frac{RT_v}{a \cos \varphi} \frac{\partial \ln p}{\partial \lambda} - \eta^* \frac{\partial u}{\partial \eta} + \left(\frac{\partial u}{\partial t}\right)_{\text{sub}} - K_4 \nabla^4 u, \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -(\zeta + f)u - \frac{1}{a} \frac{\partial(\Phi + K)}{\partial \varphi} - \frac{RT_v}{a} \frac{\partial \ln p}{\partial \varphi} - \eta^* \frac{\partial v}{\partial \eta} + \left(\frac{\partial v}{\partial t}\right)_{\text{sub}} - K_4 \nabla^4 v, \quad (2.4)$$

trong đó ζ là độ xoáy, f là tham số *Coriolis*, Φ và K là thế năng và động năng tính trên một đơn vị khối lượng khí, T_v là nhiệt độ ảo, R là hằng số khí, η^* là tốc độ thẳng đứng trong hệ tọa độ lai và K_4 là hệ số rối ngang bậc bốn.

Phương trình dự báo nhiệt độ T

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{1}{a \cos \varphi} \left(u \frac{\partial T}{\partial \lambda} + v \cos \varphi \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right) - \eta^* \frac{\partial T}{\partial \eta} + \frac{RT_v}{C_p} \frac{\omega}{p} + \frac{Lc_v}{C_p} + \left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_{\text{sub}} - K_4 \nabla^4 (T - T_{\text{ref}}) \quad (2.5)$$

với ω là vận tốc thẳng đứng trong hệ tọa độ khí áp, c_v là lượng hơi nước ngưng tụ trong khí quyển, C_p là nhiệt dung riêng đẳng áp, L là nhiệt hóa hơi của nước, T_{ref} là nhiệt độ quy chiếu của khí quyển.

Do hơi nước trong khí quyển đóng một vai trò quan trọng trong điều chỉnh cân bằng năng lượng nên HRM sử dụng thêm phương trình dự báo lượng hơi nước q_v trong khí quyển

$$\frac{\partial q_v}{\partial t} = -\frac{1}{a \cos \varphi} \left(u \frac{\partial q_v}{\partial \lambda} + v \cos \varphi \frac{\partial q_v}{\partial \varphi} \right) - \eta^* \frac{\partial q_v}{\partial \eta} - c_v + \left(\frac{\partial q_v}{\partial t}\right)_{\text{sub}} - K_4 \nabla^4 q_v. \quad (2.6)$$

Hai phương trình dự báo cho lượng nước mây q_c và lượng băng trong mây q_i có dạng tương tự (cùng là phương trình bảo toàn).

Các phương trình (2.3)-(2.6) chứa các số hạng với chỉ số dưới sub. Đây là các số hạng mô tả những quá trình quy mô dưới quy mô vừa từ các vận chuyển do rối cho đến các quá trình quy mô phân tử. Để định lượng tác động của những quá trình này lên diễn biến động lực quy mô vừa của hệ thống khí quyển người ta phải thực hiện tham số hóa vật lý. Tham số hóa vật lý là một phương pháp cho phép đánh giá tác động của những quá trình quy mô nhỏ tới những quá trình quy mô lớn hơn dưới dạng một hàm số mà các biến quy mô lớn hơn trong phương trình động lực được sử dụng dưới dạng tham số. Một mô hình quy mô vừa như HRM cần tham số hóa những quá trình vật lý sau: bức xạ mặt trời, mây, quá trình sinh mưa, quá trình rối tại lớp biên và các quá trình thủy văn trên bề mặt cũng như trong đất.

2.2. Thực hiện mô phỏng trên máy tính

Hệ phương trình Navie-Stockes HRM sử dụng sẽ được giải gần đúng bằng cách xấp xỉ các đạo hàm riêng dưới dạng rời rạc, viết lại hệ phương trình vi phân đạo hàm riêng dưới dạng sai phân tức là một hệ phương trình đại số tuyến tính, sau đó sử dụng máy tính tìm nghiệm dưới dạng số. Như thế miền tính liên tục sẽ được chuyển thành một lưới rời rạc với độ phân giải đủ lớn đảm bảo không bỏ qua hiện tượng quan tâm. Tại mỗi nút lưới, ta đặt tất cả các biến dự báo cần tìm u, v, T, q_v, p_s . Như vậy trong không gian ba chiều các nút lưới sẽ được truy cập đến thông qua các chỉ số i, j, k .

Xấp xỉ của đạo hàm riêng theo kinh độ đại lượng f bất kỳ được HRM thực hiện qua sơ đồ sai phân trung tâm như sau:

$$\left(\frac{\partial f}{\partial \lambda}\right)_i \approx \frac{f_{i+1} - f_{i-1}}{2\Delta\lambda}, \quad (2.7)$$

trong đó chỉ số i cho ta vị trí của nút lưới ta muốn xấp xỉ (ở đây để đơn giản đã bỏ qua hai chỉ số j và k), $i + 1$ và $i - 1$ là hai điểm kề của điểm i . Các sai phân theo vĩ độ hay theo tọa độ lai η cũng được thực hiện tương tự.

Xấp xỉ của đạo hàm riêng theo thời gian cũng được thực hiện theo một cách tương tự nhưng do có một số khác biệt gắn liền với dự báo dựa trên các giá trị hiện tại và quá khứ nên dạng xấp xỉ này cần được xem xét riêng. Xét phương trình vi phân thường:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = F. \quad (2.8)$$

Phương trình này là phương trình đại diện cho các phương trình (2.2) - (2.6). HRM sử dụng phương pháp Leapfrog như sau:

$$\frac{f^{n+1} - f^{n-1}}{2\Delta t} = F^n \quad (2.9)$$

với chỉ số trên n xác định bước thời gian (không phải chỉ số mũ) và Δt là thời gian của một bước tích phân. Từ (2.9) ta có:

$$f^{n+1} = f^{n-1} + 2\Delta t F^n. \quad (2.10)$$

Khi xác định giá trị F^n nếu có sự xuất hiện của các đạo hàm riêng theo không gian ta sẽ xấp xỉ chúng theo (2.7).

Tuy nhiên, vấn đề phức tạp hơn khi sự xuất hiện của sóng trọng trường trong khí quyển đã giới hạn bước thời gian tích phân lại rất nhỏ. Như vậy phương pháp Leapfrog không kinh tế tính toán, mất nhiều thời gian tích phân, không đảm bảo về thời gian nghiệp vụ. Để tăng bước thời gian dự báo người ta phải dùng cách sai phân bán ẩn tức là chỉ có một phần của F được sai phân ẩn. Phần này chính là các lực vật lý sinh sóng trọng trường. Nếu tách F thành hai thành phần, F_0 chỉ thành phần thông thường và F_1 chỉ thành phần sinh sóng trọng trường, sơ đồ sai phân bán ẩn sẽ như sau

$$\frac{f^{n+1} - f^{n-1}}{2\Delta t} = F_0^n + \frac{1}{2}(F_1^{n+1} + F_1^{n-1}). \quad (2.11)$$

Viết lại phương trình này ta được

$$f^{n+1} = f^{n-1} + 2\Delta t F_0^n + \Delta t(F_1^{n+1} + 2F_1^n + F_1^{n-1}) = f_{\text{exp}}^{n+1} + \Delta t \Delta_t F_1 \quad (2.12)$$

với $f_{\text{exp}}^{n+1} = f^{n-1} + 2\Delta t F_0^n$ và $\Delta_t F_1 = F_1^{n+1} - 2F_1^n + F_1^{n-1}$.

Như vậy tích phân các phương trình cơ bản sẽ gồm hai bước: tích phân hiện và hiệu chỉnh bán ẩn sau đó. Trong bước hiệu chỉnh bán ẩn bằng những biến đổi toán học ta sẽ đưa bài toán về một hệ phương trình Helmholtz hai chiều. Cuối cùng, bằng một phép chiếu lên các véc tơ riêng ta sẽ đưa hệ này trở thành các phương trình Helmholtz hai chiều độc lập. Các phương trình này được HRM giải theo phương pháp lặp Gauss-Seidel trước đó đã đổi biến theo phép biến đổi Fourier nhanh (xem [1, 5]). Mô tả toán học của các phương trình này khá phức tạp nên ta sẽ không trình bày ở đây.

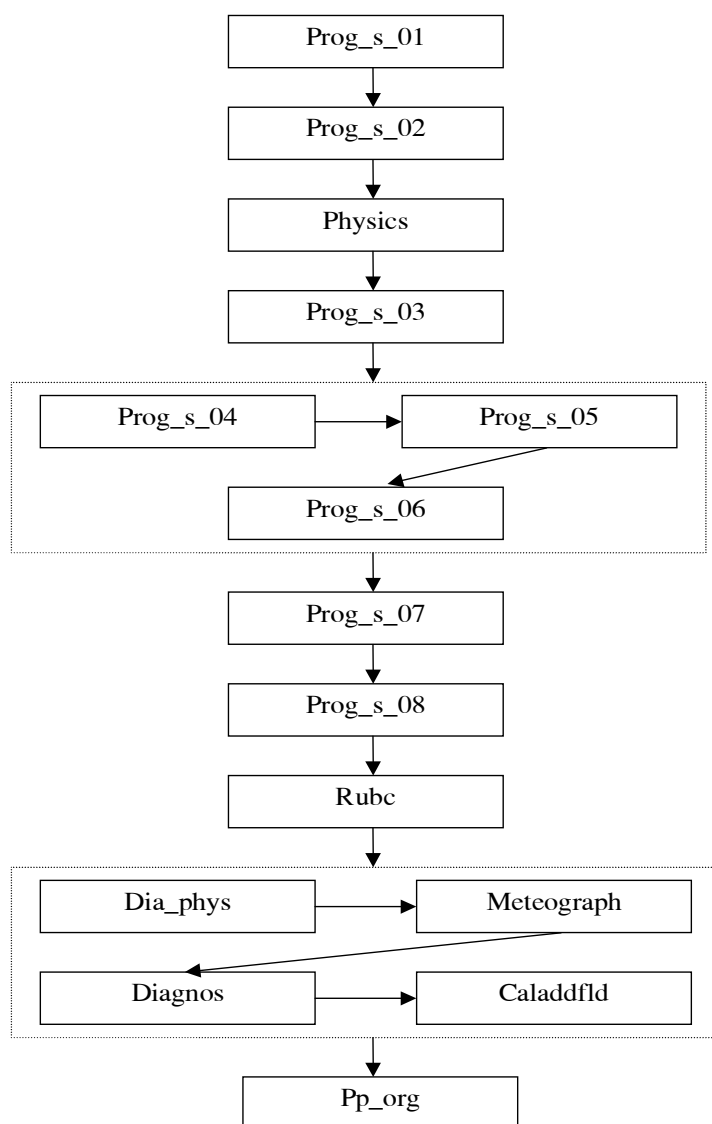
3. CHUYỂN ĐỔI MÔI TRƯỜNG TÍNH TOÁN SONG SONG CHO MÔ HÌNH HRM

3.1. Tính toán song song trong mô hình HRM

Mô hình hóa chất lưu (trong đó có chất khí) sử dụng các kỹ thuật của động lực học chất lỏng tính toán (CFD) đã đặt ra các yêu cầu song song hóa từ những hạn chế về thời gian

tính toán. Việc sai phân hiện các đạo hàm riêng không gian và thời gian trên các điểm lưới chỉ sử dụng các giá trị lân cận cho phép chia mô hình thành các phần nhỏ tương đối độc lập với nhau. Việc tính toán trên các vùng địa phương chỉ sử dụng dữ liệu địa phương và phần dữ liệu biên của các vùng địa phương khác.

Mô hình HRM phiên bản 1.5 thực hiện song song hóa theo OpenMP. Ưu điểm rõ ràng nhất của OpenMP chính là tính đơn giản khi viết chương trình bởi OpenMP hoàn toàn giữ nguyên cấu trúc lập trình tuần tự, song song hóa chỉ được thể hiện qua các cấu trúc dẫn hướng biên dịch vòng lặp. Cấu trúc chương trình chính trong HRM được thực hiện song song với OpenMP được thể hiện trên Hình 3.1.



Hình 3.1. Sơ đồ khối chương trình tích phân theo thời gian của mô hình HRM

Chức năng của mỗi chương trình con được mô tả ngắn gọn như sau:

Prog_s_01: xác định trường thế năng Φ bằng cách tích phân phương trình thủy tĩnh. Song

song song hóa được thực hiện theo hướng Bắc Nam tức là vùng tính được chia thành các dải vĩ độ song song với nhau.

Prog_s.02: xác định kết quả dự báo ban đầu của các biến dự báo $p_s, u, v, T, q_v, q_c, q_i$ từ file số liệu biên bằng phép nội suy tuyến tính giữa hai thời điểm cố định. Song song hóa được thực hiện theo hướng Bắc Nam.

Physics : tham số hóa các quá trình vật lý của mô hình. Các quá trình tham số hóa lần lượt theo trình tự bao gồm: tham số hóa quá trình giáng thủy quy mô lưới, tính độ phủ mây cùng lượng nước và băng trong mây, tham số hóa bức xạ, tham số hóa quá trình rối thẳng đứng trong khí quyển, tham số hóa quá trình rối thẳng đứng tại bề mặt, tham số hóa đối lưu, tham số hóa quá trình đất. Song song hóa cũng được thực hiện theo hướng Bắc Nam nhưng không phải trên những dải lớn mà mỗi dải chỉ tương ứng với một hàng (một vĩ độ).

Prog_s.03: dự báo hiện theo phương pháp Leapfrog các biến $p_s, u, v, T, q_v, q_c, q_i$. Song song hóa được thực hiện theo hướng Bắc Nam.

Prog_s.04: xác định vế phải của phương trình Helmholtz ba chiều rồi nhân ma trận này (dạng véc tơ cho mỗi điểm kính vĩ) với ma trận véc tơ riêng (ma trận hai chiều) của ma trận cấu trúc ta sẽ thu được véc tơ mà mỗi số hạng sẽ là vế phải của một phương trình Helmholtz hai chiều. Song song hóa được thực hiện theo hướng Bắc Nam.

Prog_s.05: giải n phương trình Helmholtz hai chiều tương ứng với n mực mô hình chịu tác động nhiễu từ sóng trọng trường mạnh nhất. Song song hóa được thực hiện bằng cách giải song song n phương trình Helmholtz hai chiều.

Prog_s.06: cộng các giá trị hiệu chỉnh tính được ở trên vào các giá trị dự báo hiện đã tính được từ phần dự báo hiện trước đó như trong công thức (2.12). Phần này kết thúc quá trình hiệu chỉnh bán ẩn. Song song hóa được thực hiện theo hướng Bắc Nam.

Prog_s.07: thực hiện biên giảm dư, lọc *Asselin* cho các biến dự báo nhằm giảm trừ nghiệm tính toán trong sơ đồ Leapfrog. Song song hóa được thực hiện theo hướng Bắc Nam.

Prog_s.08: tính trường thế năng tại mức thời gian mới, xác định các trường cảnh báo bề mặt. Song song hóa được thực hiện theo hướng Bắc Nam.

Rubc: tính vận tốc thẳng đứng tại đỉnh mô hình nếu mô hình sử dụng điều kiện biên trên phát xạ. Tính toán tuần tự.

Dia_phys: tính giá trị trung bình của các biến dự báo cùng một số đại lượng dẫn xuất sau một khoảng thời gian nhất định. Tính toán tuần tự.

Meteograph: kết xuất diễn biến thời tiết tại một địa điểm. Tính toán tuần tự.

Diagnos: tính giá trị các biến cho phép theo dõi quá trình chạy của mô hình. Tính toán tuần tự.

Caladfld: tính một số trường phụ với mục đích kết xuất gồm độ cao đỉnh đối lưu khô, độ sâu mây, độ phủ mây, độ cao mực 0°C. Song song hóa được thực hiện theo hướng Bắc Nam.

Pp_org: nội suy giá trị các biến từ mực mô hình về mực áp suất, ghi số liệu ra file dưới dạng *GRIB1* (định dạng số liệu khí tượng theo Tổ chức Khí tượng thế giới). Tính toán tuần tự.

Như vậy không kể các phân đoạn tính toán tương tác với thiết bị ngoại vi có 10 phân đoạn tính toán được song song hóa trong đó 8 phân đoạn song song theo hướng Bắc Nam, 1 phân đoạn được song song hóa theo số sóng trọng trường cần sai phân bán ẩn và 1 phân đoạn song song hóa theo từng hàng. Tất cả các đoạn mã này đều được viết theo các dẫn hướng biên dịch của OpenMP cho Fortran. Dưới đây là đoạn mã song song hóa khi chạy phân đoạn

tính toán sai phân hiện

```
!$OMP PARALLEL DO
!$OMP& PRIVATE(jt, mi2sc, mi2ec)
!$OMP& SHARED(nproc, mj2_start, mj2_end, mi1sc, mi1ec)
do jt = 1, nproc
    mi2sc = mj2_start(jt)
    mi2ec = mj2_end(jt)
    call prog_s_03(mi1sc, mi1ec, mi2sc, mi2ec)
enddo
!$OMP END PARALLEL DO
```

Đoạn mã này đặc trưng cho các phân đoạn tính toán được song song hóa theo hướng Bắc Nam. Diễn giải đoạn mã này từ ngôn ngữ song song của OpenMP ta có thể thấy như sau: trước hết dẫn hướng biên dịch PARALLEL DO và END PARALLEL DO được OpenMP sử dụng để mở đầu và kết thúc vòng lặp song song. Hai đặc tả PRIVATE và SHARED trong vòng lặp PARALLEL DO cho ta biết các biến là địa phương với mỗi tiến trình hay được dùng chung bởi các tiến trình. Cụ thể ở đây ba biến *jt* (chỉ số tiến trình), *mi2sc* (chỉ số hàng mở đầu), *mi2ec* (chỉ số hàng kết thúc) là riêng cho mỗi tiến trình. Điều này khá dễ hiểu bởi hai chỉ số *mi2sc* và *mi2ec* ứng với mỗi tiến trình sẽ xác định đoạn dữ liệu trên đó tiến trình này phải xử lý. Các biến không được các tiến trình phân biệt gồm có: *nproc* (số tiến trình), *mj2_start* (mảng chỉ số hàng mở đầu), *mj2_end* (mảng chỉ số hàng kết thúc), *mi1sc* (chỉ số cột mở đầu) và *mi1ec* (chỉ số cột kết thúc). Do chỉ song song hóa theo hướng Bắc Nam nên chỉ số cột mở đầu và kết thúc là như nhau cho mọi tiến trình.

Đoạn mã nằm giữa dẫn hướng biên dịch PARALLEL DO và END PARALLEL DO chỉ đơn giản là đoạn mã Fortran thực hiện một vòng lặp trên các tiến trình. Mỗi vòng lặp gọi tới chương trình tích phân hiện trên vùng dữ liệu được xác định bởi các chỉ số *mi1sc*, *mi1ec*, *mi2sc*, *mi2ec*. Nhờ OpenMP mà thay vì thực hiện tuần tự các vòng lặp sẽ được thực hiện song song nghĩa là các tiến trình tích phân hiện song song. Như đã nói ở trên quá trình song song được thực hiện theo hướng Bắc Nam. Bây giờ ta chuyển sang đoạn mã song song hóa khi chạy phân đoạn tham số hóa vật lý:

```
!$OMP PARALLEL DO
!$OMP& PRIVATE(jt, mi2sc, mi2ec)
!$OMP& SHARED(mi1sc, mi1ec, ig2s, ig2e)
do jt = ig2s + 1, ig2e - 1
    mi2sc = jt
    mi2ec = jt
    call physics(mi1sc, mi1ec, mi2sc, mi2ec)
enddo
!$OMP END PARALLEL DO
```

Khác với phân đoạn tích phân hiện được song song hóa theo từng dải theo hướng Bắc Nam, phân đoạn tham số hóa vật lý được song song hóa theo từng hàng. Điều này được thể hiện khi vòng lặp *do jt = ig2s + 1, ig2e - 1* cho ta biết chương trình sẽ thực hiện tính toán lặp theo từng hàng trên toàn miền tính. Kết quả là hai chỉ số hàng: mở đầu *mi2sc* và kết thúc *mi2ec* cho mỗi tiến trình sẽ trùng nhau, cùng là chỉ số của một hàng *jt*. Chính hướng song

song hóa theo từng hàng như vậy sẽ làm giảm hiệu năng tính toán của mô hình rất nhiều.

Cuối cùng là phân đoạn mã song song hóa giải hệ phương trình Helmholtz hai chiều độc lập:

```
!$OMP PARALLEL DO
!$OMP& PRIVATE(j3)
!$OMP& SHARED(nsi)
do j3 = 1, nsi
    call prog_s_05(j3)
enddo
!$OMP END PARALLEL DO
```

Ở đây *nsi* là số phương trình Helmholtz hai chiều cần được giải (ta không cần phải giải toàn bộ các phương trình Helmholtz do chỉ những phương trình tương ứng với các sóng trọng trường có vận tốc lớn mới cần được giải ẩn). Như vòng lặp $do\ j3 = 1, nsi$ cho thấy quá trình song song được thực hiện đồng thời trên *nsi* phương trình.

Với cấu trúc chương trình và mô hình tính toán song song như hiện tại, khi dự báo 6 giờ trên máy bộ nhớ chia sẻ IBM RISS6000 do Trung tâm Dự báo khí tượng thủy văn trung ương đầu tư thời gian thực chạy chương trình là 80 phút. Thời gian chạy chương trình như vậy không đáp ứng được các yêu cầu nghiệp vụ bởi với dự báo trước 2 ngày (48 giờ) thời gian cần để chạy chương trình sẽ khoảng 10 giờ. Để rút ngắn thời gian tính toán ta có thể đơn giản đầu tư mua thêm các siêu máy tính song song theo mô hình chia sẻ bộ nhớ. Tuy nhiên những máy tính như vậy có giá thành rất cao. Vừa muốn giảm giá thành lại vẫn đảm bảo hiệu năng tính toán của mô hình ta có thể hướng đến các máy tính bộ nhớ phân tán mà điển hình là hệ thống máy tính bó song song. Tuy nhiên xây dựng chương trình HRM trên hệ thống máy tính này đòi hỏi chuyển đổi mã nguồn tính toán song song của chương trình HRM từ mô hình chia sẻ bộ nhớ sang mô hình bộ nhớ phân tán. Việc tái cấu trúc chương trình và cấu trúc dữ liệu cần phải được thực hiện.

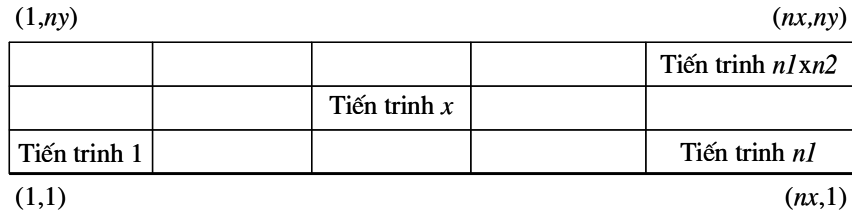
3.2. Chuyển đổi tính toán song song trong mô hình HRM

Trên môi trường tính toán song song chia sẻ nhớ, toàn bộ dữ liệu được đặt vào một vùng nhớ tập trung và duy nhất, mỗi tiến trình đều có thể truy cập trực tiếp đến vùng dữ liệu của tiến trình khác và điều lưu ý nhất của người thiết kế song song là đảm bảo không có xung đột khi truy cập nhớ và định hướng biên dịch cho các vòng lặp. Để làm được điều này người ta chia bài toán thành nhiều phân đoạn sao cho tại mỗi phân đoạn các phần nhớ có sự truy cập của nhiều tiến trình là chỉ đọc. Cho đến phiên bản HRM1.5 thì việc thiết kế và lập trình song song cho môi trường chia sẻ nhớ đã được hoàn thiện và đưa vào dùng thử ở một vài nước. Việt Nam cũng được cung cấp cùng với một máy tính IBM RISS6000.

Phân tích một bước tích phân của mô hình HRM cho thấy mỗi phân đoạn tính toán cần khoảng 15 giây, ngoại trừ *physics* do song song hóa theo hàng nên cần nhiều thời gian hơn, khoảng 50 giây. Mỗi bước như vậy sẽ mất 190 giây. Thời gian gửi nhận tối ưu cho dữ liệu giữa hai *node* tính toán theo thử nghiệm cần khoảng 1 giây trung bình. Do đó nếu chia chương trình ra khoảng 6 *node* tính toán song song các phân đoạn và 2 lần gửi truyền giữa các *node* thì thời gian tính cho một bước lập thời gian dự báo sẽ khoảng 34 giây. Tổng thời gian cho 48 giờ dự báo sẽ là 1 giờ. Và chương trình hoàn toàn đáp ứng tính năng thời gian

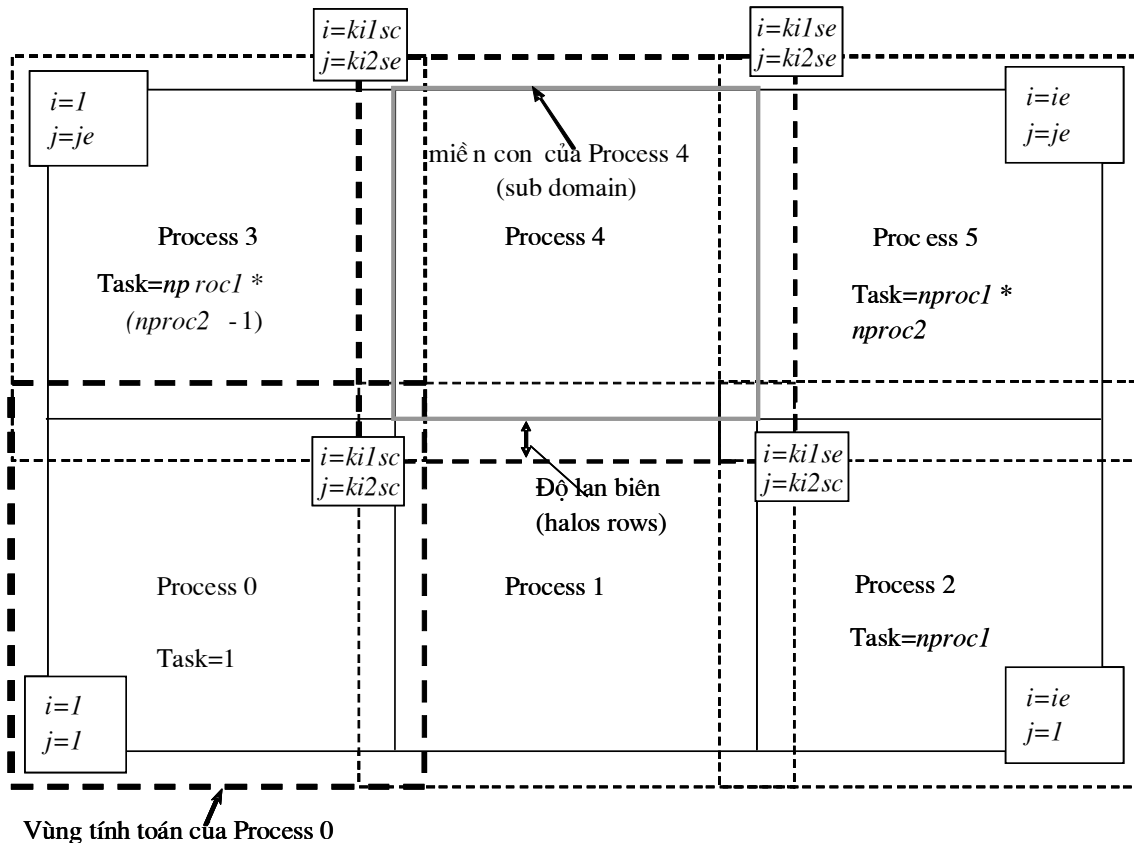
thực với đầu tư phần cứng không quá cao.

Trong tính toán song song hiện tại ở mô hình HRM, song song hóa chỉ được thực hiện một chiều theo hướng Bắc Nam. Để song song hóa theo hướng dữ liệu được thực hiện với nhiều phần tử dữ liệu hơn ta có thể song song hóa theo cả hai hướng Bắc Nam và Đông Tây. Chiến lược này được thể hiện trên Hình 3.2.



Hình 3.2. Phần tử dữ liệu trong tính toán song song của HRM với 5×3 CPU

Trong môi trường song song chia sẻ nhớ, mỗi tiến trình có vùng nhớ riêng và không thể truy cập đến phần dữ liệu của các tiến trình khác được. Việc trao đổi dữ liệu phải thông qua các hàm truyền nhận dữ liệu của các thư viện biên dịch song song. Công việc cho người thiết kế song song phức tạp hơn là phân chia làm sao để có sự độc lập tương đối về dữ liệu giữa các tiến trình tức là mỗi tiến trình truy cập đến vùng dữ liệu của tiến trình khác càng ít càng tốt và lập trình để đồng bộ dữ liệu cho các tiến trình.



Hình 3.3. Sơ đồ phân chia dữ liệu và vùng tính toán cho các tiến trình song song

Miền tính toán của mô hình sẽ được phân bố cho mỗi CPU sao cho cân bằng nhất có thể. Mỗi tiến trình sẽ dự báo cho miền dữ liệu của riêng mình. Duy nhất tiến trình 0 quản lý tất cả các chỉ số hàng và cột của miền tính. Các tiến trình khác chỉ có chỉ số hàng và cột cho riêng vùng dữ liệu của tiến trình này. Các tiến trình sẽ trao đổi với nhau thông qua hai hàng và cột ngoài cùng tại biên miền tính của miền dữ liệu của nó.

Riêng với hệ phương trình Helmholtz hai chiều quá trình song song vẫn được thực hiện giải song song các phương trình Helmholtz hai chiều độc lập.

Sơ đồ phân chia dữ liệu và vùng tính toán được cho trên Hình 3.3 trong đó *nproc1* là số tiến trình (Process) trên một hàng, *nproc2* là số tiến trình trên một cột, *ki1sc, ki1ec* là chỉ số cột bắt đầu và kết vùng tính toán của một tiến trình, *ki2sc, ki2ec* là chỉ số hàng bắt đầu và kết vùng tính toán của một tiến trình. Vùng tính toán của mỗi tiến trình được cấp phát rộng hơn vùng dữ liệu một đoạn bằng phần lan biên. Tại mỗi phân đoạn song song, mỗi tiến trình thực hiện việc tính toán trên miền con của mình và sau đó gửi các giá trị tính toán được cho các tiến trình lân cận và nhận lại dữ liệu từ các tiến trình đó. Dữ liệu mà các tiến trình phải đồng bộ với nhau là dữ liệu tại biên của các miền con. Các tiến trình có vai trò như nhau trừ tiến trình 0. Tiến trình 0 ngoài đảm nhận tính toán trên một miền con đồng thời còn đảm nhận thêm việc giữ nhịp và vào ra dữ liệu cho toàn bộ mô hình. Mỗi tiến trình có nhiều nhất là 8 lân cận là Đông, Tây, Nam, Bắc, Đông-Bắc, Đông-Nam, Tây-Bắc, Tây-Nam, những tiến trình ở gần biên thì không có đủ 8 lân cận.

Việc đồng bộ dữ liệu trong chương trình được thực hiện như sau:

Tiến trình 0 đọc điều kiện ban đầu và gửi cho tất cả các *process* khác.

Mỗi tiến trình tính toán trên miền con của nó và đồng bộ biên với các lân cận của nó.

Tại các thời điểm cập nhật giá trị biên từ mô hình toàn cầu, tiến trình 0 đọc giá trị biên và gửi cho các tiến trình khác.

Tại các thời điểm dự báo các tiến trình khác gửi dữ liệu trong miền con của mình cho tiến trình 0, tiến trình 0 tổng hợp dữ liệu thành dữ liệu của toàn bộ mô hình và ghi ra file.

Để thực hiện chiến lược song song hóa này, một số phương thức truyền thông cần được thực hiện nhằm đảm bảo trao đổi dữ liệu giữa các tiến trình. Dưới đây là các phương thức đã được thực hiện

1. *Recv_full*: gửi các trường dự báo từ tiến trình 0 tới tất cả các tiến trình tại bước thời gian đầu tiên.
2. *Recv_lb*: gửi các trường biên từ tiến trình 0 tới tất cả các tiến trình tại bước thời gian đầu tiên.
3. *Send_recv_physics*: trao đổi dữ liệu các trường liên quan đến phần tham số hóa vật lý giữa các tiến trình.
4. *Send_recv_prog_03*: trao đổi các trường cảnh báo tính được từ phần dự báo hiện cần cho sơ đồ hiệu chỉnh bán ẩn giữa các tiến trình.
5. *Send_recv_prog_04*: trao đổi các trường tính được từ chương trình *prog_s_04* cần cho bước tiếp theo trong sơ đồ hiệu chỉnh bán ẩn giữa các tiến trình.
6. *Send_recv_prog_05*: trao đổi các trường tính được từ chương trình *prog_s_05* cần cho bước tiếp theo trong sơ đồ hiệu chỉnh bán ẩn giữa các tiến trình.
7. *Send_recv_prog_08*: trao đổi các trường dự báo tính được từ chương trình *prog_s_07* giữa các tiến trình.

8. *Send_full*: gửi các trường dữ báo từ mọi tiến trình 1 cho đến n tới tiến trình 0 sau một khoảng thời gian thích hợp cần thiết cho việc kết xuất dữ liệu.

Chương trình chính của HRM bây giờ cần được thực hiện như sau:

call MPLINIT (*mpi_err*)

call MPLCOMM_RANK (MPL_COMM_WORLD, *myid*, *mpi_err*)

call MPLCOMM_SIZE (MPL_COMM_WORLD, *nproc*, *mpi_err*)

...

Đọc file chứa dữ liệu trường ban đầu

call *recv_full*()

...

Đọc hai file chứa dữ liệu biên ban đầu

call *recv_lb*()

...

call MPLBARRIER(MPL_COMM_WORLD, *mpi_err*)

Thực hiện vòng lặp tích phân

 Đọc file chứa dữ liệu biên tiếp theo

call *recv_lb*()

 Tích phân

 Kết thúc vòng lặp tích phân

call MPLBARRIER(MPL_COMM_WORLD, *mpi_err*)

call MPLFINALIZE(*mpi_err*)

Sau khi khởi động tính toán MPI với hàm MPLINIT ta sẽ xác định định danh tiến trình đang chạy và số tiến trình qua hàm MPLCOMM_RANK và MPLCOMM_SIZE. Dữ liệu ban đầu và dữ liệu biên sau khi được đọc vào bộ nhớ sẽ được tiến trình 0 gửi tới tất cả các tiến trình khác. Điều này được thực hiện qua phương thức *recv_full* và *recv_lb* trong đó có sử dụng phương thức MPL_RECV của MPI. Trước khi bắt đầu và sau khi kết thúc vòng lặp tích phân ta đồng bộ hoạt động của các tiến trình nhờ phương thức MPLBARRIER. Cuối cùng tính toán với MPI kết thúc MPLFINALIZE.

Khác với phân đoạn mã sai phân hiện song song hóa với OpenMP phân đoạn mã song song với MPI sẽ có dạng:

do *jt* = 1, *nproc*

if ((*myid* + 1) == *jt*) *then*

mi1sc = *mj1_start*(*jt*)

mi1ec = *mj1_end*(*jt*)

mi2sc = *mj2_start*(*jt*)

mi2ec = *mj2_end*(*jt*)

call *prog_s_03*(*mi1sc*, *mi1ec*, *mi2sc*, *mi2ec*)

endif

enddo

call MPLBARRIER(MPL_COMM_WORLD, *mpi_err*)

call *send_recv_prog_03*

Mỗi tiến trình sẽ tự xác định miền con tính toán của nó thông qua bốn chỉ số *mi1sc*, *mi1ec*, *mi2sc* và *mi2ec* sau đó tích phân hiện theo (2.10). Các tiến trình sau khi kết thúc phần tính toán của mình sẽ đồng bộ hoạt động từ phương thức MPLBARRIER và trao đổi

các kết quả trên biên cho nhau *send_recv_prog_03*.

Phân đoạn mã tham số hóa vật lý song song hóa với MPI có dạng sau

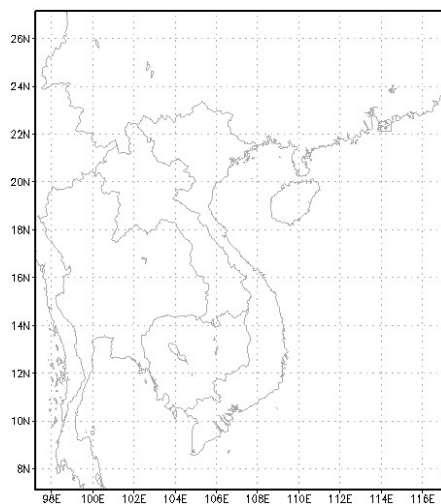
```
do jt = mj2_start(myid + 1), mj2_end(myid + 1)
  mi2sc = jt
  mi2ec = jt
  mi1sc = mj1_start(myid + 1)
  mi1ec = mj1_end(myid + 1)
  call physics(mi1sc, mi1ec, mi2sc, mi2ec)
enddo
call MPLBARRIER(MPLCOMM_WORLD, mpi_err)
```

So với phân đoạn mã song song theo MPI ở đây có một sự khác biệt với phân đoạn mã song song theo OpenMP. Mỗi tiến trình vẫn thực hiện tính toán trên miền con dữ liệu của riêng nó khác với phiên bản song song hóa theo hàng của OpenMP. Do modul tham số hóa vật lý physics chỉ thực hiện tính toán theo hàng nên mỗi tiến trình phải thực hiện tuần tự tham số hóa theo hàng từ Nam lên Bắc. Tuy vậy song song hóa vẫn hoàn toàn được thực hiện theo cả hai phương Đông Tây và Bắc Nam.

Phân đoạn mã hệ phương trình Helmholtz hai chiều độc lập song song hóa theo MPI cũng được viết lại như sau:

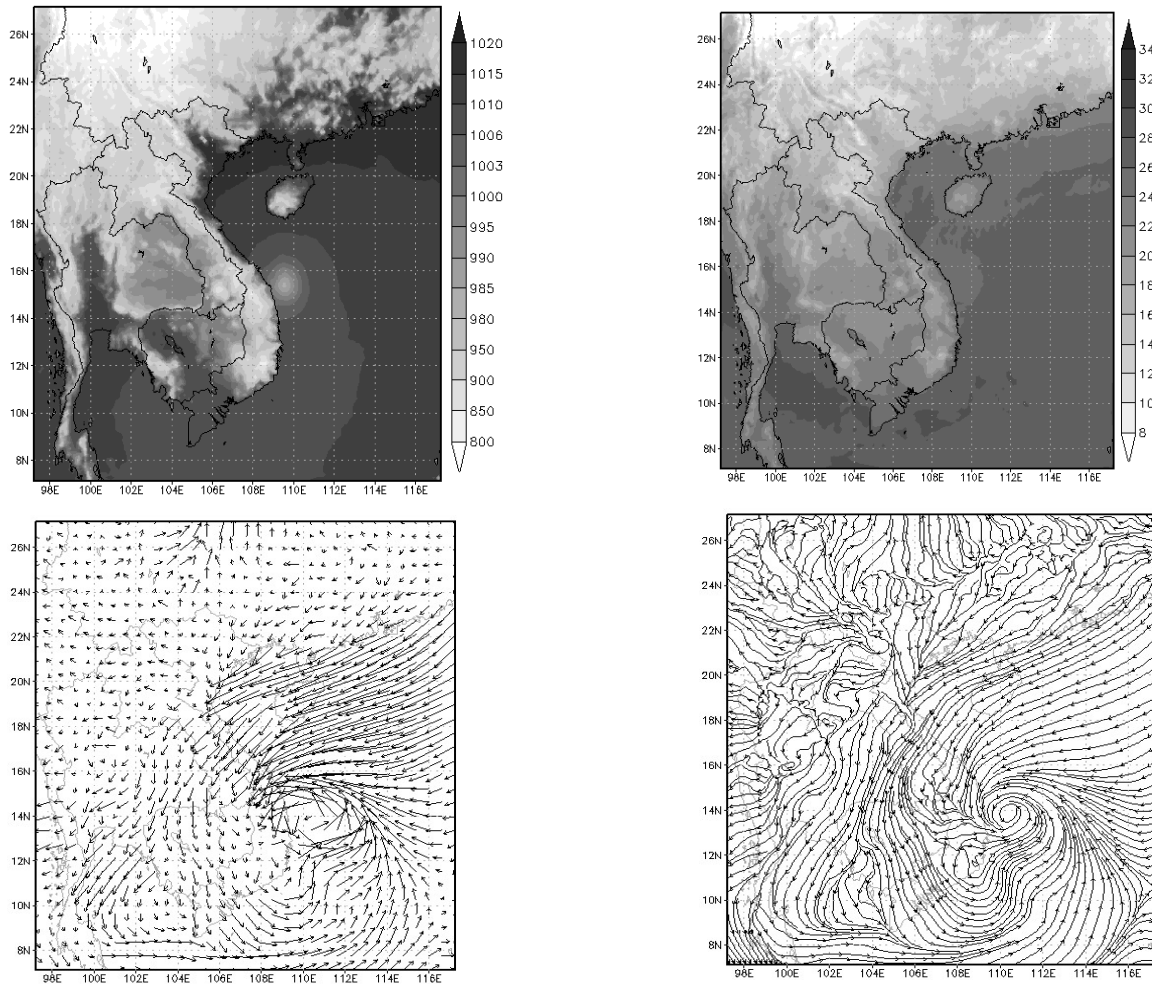
```
do j3 = mj3_start(myid + 1), mj3_end(myid + 1)
  call prog_s_05(j3)
enddo
call MPLBARRIER (MPLCOMM_WORLD, mpi_err)
call send_recv_prog_05
```

Dễ thấy phương thức thực hiện hoàn toàn tương tự như mô tả với phân đoạn mã song song với OpenMP đã nói ở phần trên. Bây giờ ta phải phân chia các tiến trình một cách hợp lý theo số các phương trình Helmholtz cần được giải. Mỗi tiến trình sẽ có được thông tin đến từ toàn bộ miền tính không chỉ riêng cho miền con dữ liệu của nó, xác định các hệ số trong phương trình mà nó sẽ giải.



Hình 3.4. Miền tính toán nghiệp vụ dự báo thời tiết cho khu vực Việt Nam

Để kiểm thử mã nguồn chương trình HRM đã được chuyển đổi, chúng tôi đã thử nghiệm chạy trên máy tính bó song song và so sánh kết quả dự báo với chương trình song song hóa của HRM trước đây theo OpenMP hoặc đơn giản chỉ chạy HRM tuần tự. Hình 3.4 cho ta miền tính toán với độ phân giải 14km cho khu vực Việt Nam được sử dụng cho kiểm thử. Đây cũng chính là miền tính toán nghiệp vụ của Trung tâm Dự báo khí tượng thủy văn trung ương khi dự báo thời tiết theo mô hình HRM. Các kết quả cho thấy một sự trùng hợp hoàn toàn giữa các trường được dự báo. Để ví dụ, trên Hình 3.5 chúng tôi biểu diễn trường dự báo 24 giờ của áp suất bề mặt, nhiệt độ bề mặt và gió cũng như trường đường dòng tại bề mặt theo phiên bản song song hóa mới. Ngày bắt đầu dự báo 00Z-31/10/2005 là lúc cơn bão Kaitak đang hoạt động ven biển các tỉnh miền Trung Việt Nam như có thể thấy trên hình vẽ. Các kết quả này chúng tôi lấy từ kết quả lưu trữ của Trung tâm Dự báo khí tượng thủy văn trung ương. Các kết quả tính toán tuần tự với HRM là tương tự nên sẽ không được biểu diễn ở đây.



Hình 3.5. Trường dự báo 24h từ mô hình HRM với phiên bản song song hóa theo MPI cho áp suất bề mặt (trái, trên), nhiệt độ bề mặt (phải trên), gió bề mặt (trái dưới) và đường dòng (phải dưới) cho dự báo chuyển động của bão Kaitak 00Z-31/10/2005.

Kiểm thử với nhiều ngày dự báo khác nhau cho thấy kết quả dự báo không bị ảnh hưởng bởi mã song song mới trong khi thời gian chạy chương trình đã được giảm đi đáng kể.

4. KẾT LUẬN

Chương trình được thực hiện sau đó đưa vào kiểm tra, đánh giá với dữ liệu thực cho thấy những kết quả sau:

+ Thiết kế song song đảm bảo tính toàn vẹn dữ liệu, không phát sinh và tích lũy sai số của bài toán nghĩa là kết quả tính toán song song và tuần tự là hoàn toàn giống nhau.

+ Chương trình được viết trên các hàm chuẩn của thư viện MPI đảm bảo biên dịch dễ dàng.

+ Tốc độ tính toán được cải thiện rõ rệt, đảm bảo thời gian thực, có thể đưa vào chạy nghiệp vụ dự báo hàng ngày. Trung tâm Dự báo khí tượng thủy văn trung ương đã lắp đặt một máy tính song song bộ nhớ phân tán và đưa chương trình HRM vào chạy nghiệp vụ phục vụ cho việc dự báo thời tiết trên cả nước. Thời gian để chạy chương trình dự báo cho 72 giờ mất khoảng 45 phút. Cho đến nay hệ thống vẫn chạy ổn định, phục vụ tốt cho công tác dự báo thời tiết của Trung tâm.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] D. M. Burridge, A split semi-implicit reformulation of the Bushby–Timpson 10-Level model, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* **101** (430) (1975) 777–792.
- [2] J. Dongarra *et al.*, *Sourcebook of Parallel Computing*, Morgan Kaufmann publishers, 2003.
- [3] D. Majewski *et al.*, *HRM - User's Guide*, Technical Report, Deutscher Wetterdienst, 2005.
- [4] A. Pollard *et al.*, *High performance computing systems and applications*, Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [5] A. J. Simmons and D. M. Burridge, An energy and angular-momentum conserving vertical finite-difference scheme and hybrid vertical coordinates, *Mon. Wea. Rev.* **109** (1981) 758–766.
- [6] T. Sterling, *Beowulf Cluster Computing with Linux*, The MIT press, 2002.

Nhận bài ngày 5-5-2006

Nhận lại sau sửa ngày 5-7-2006