

ПРИМЕНЕНИЕ ГРИД-ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ МОРСКИХ СИСТЕМ

УДК 551.46

В.В. Фомин, Д.В. Бородин, В.А. Иванов

Морской гидрофизический институт НАН Украины, г. Севастополь

ПРИМЕНЕНИЕ ГРИД-ТЕХНОЛОГИЙ В ЗАДАЧАХ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ

Рассмотрены методологические аспекты использования грид-технологий в задачах моделирования ветрового волнения. Дано описание программной реализации и технологических особенностей расчета полей волнения в среде Украинского национального грида на основе численной спектральной модели SWAN.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *грид-технологии, ветровое волнение, численное моделирование, ретроспективный анализ, ансамблевый прогноз.*

Введение. Грид представляет собой высокопроизводительную, географически распределенную, открытую и стандартизованную среду разделения вычислительных и информационных ресурсов [1]. В последнее десятилетие грид-технологии стали интенсивно использоваться при проведении фундаментальных и прикладных научных исследований, требующих предельно больших вычислительных ресурсов. В Украине существует Украинский национальный грид (УНГ) – сообщество научно-исследовательских институтов и высших учебных заведений, занимающихся разработкой и внедрением грид-технологий в науку, промышленность, финансовую, социальную и гуманитарную и другие сферы жизнедеятельности (grid.nas.gov.ua). Морской гидрофизический институт НАН Украины (МГИ НАН Украины) входит в число участников УНГ. На базе вычислительного кластера МГИ НАН Украины [2] создан грид-сайт, являющийся составной частью инфраструктуры УНГ. В настоящее время в институте группой вычислительных технологий ведутся исследования по внедрению грид-технологий в численное моделирование ветрового волнения в Азово-Черноморском бассейне.

Цель данной работы – разработать и реализовать в среде УНГ технологию расчета характеристик ветрового волнения на основе численной модели SWAN (*Simulating Waves Near Shore*) [3].

Модель SWAN базируется на уравнении баланса волновой энергии в спектральной форме [4, 5], представляющем собой дифференциальное уравнение в частных производных с пятью независимыми переменными (время, две пространственных координаты, частотная и угловая переменные). Искомой величиной является энергетический спектр ветровых волн.

© В.В. Фомин, Д.В. Бородин, В.А. Иванов, 2011

Численное решение уравнения баланса на мелких сетках и больших интервалах времени требует высокопроизводительных вычислительных ресурсов в сочетании с параллельными методами программирования. В настоящее время получила распространение параллельная версия SWAN, использующая технологию передачи сообщений *MPI (Message Passing Interface)* [6]. Параллельная версия SWAN позволяет существенно ускорить расчеты волновых полей на вычислительных кластерах. Однако в ряде случаев это ускорение оказывается недостаточным и необходимо применять распределенные системы вычислений, основанные на грид-технологиях.

Задачи ветрового волнения, допускающие использование грид. К числу ресурсоемких задач, в которых использование грид может дать ощутимое приращение производительности можно, например, отнести: многовариантный расчет полей ветрового волнения; ретроспективный анализ ветрового волнения (далее реанализ или *hindcast*); ансамблевый прогноз ветрового волнения. Для эффективного решения в гриде этих (и любых других) задач необходимо выполнить декомпозицию, заключающуюся в представлении исходной задачи в виде набора независимых (не связанных между собой) подзадач. В общем случае, количество подзадач n определяется спецификой решаемой задачи и производительностью доступных вычислительных ресурсов. Рассмотрим более подробно подходы к «гридизации» указанных задач, основанных на физических особенностях ветровых волн.

Многовариантный расчет полей ветровых волн возникает в случаях, когда необходимо решить множество однотипных задач с разными входными данными. Простейший пример – расчет стационарных полей волнения в заданной акватории для большого количества градаций скорости и направления постоянного по времени и однородного по пространству приводного ветра. Подобные задачи возникают, например, при создании баз данных модельных расчетов ветрового волнения для разных синоптических ситуаций. Такие базы данных оказываются полезными при гидрометеорологическом обеспечении проектирования гидротехнических сооружений в прибрежных зонах. Для конкретных значений скорости и направления ветра задачи полностью независимы, решать их можно в любом порядке. Таким образом, многовариантный расчет полей волнения является задачей с параллелизмом по данным, которая может быть эффективно решена в гриде.

Реанализ ветрового волнения применяется для получения статистических характеристик и климатических тенденций полей волнения [7, 8]. Его суть заключается в следующем. Для некоторой акватории имеем поля ветра из атмосферной модели за достаточно большой период времени T с некоторой дискретностью по пространству и времени. Используя эти данные в качестве форсинга, рассчитываем характеристики ветрового волнения с помощью численной модели за тот же период с некоторой другой дискретностью по пространству и времени. Далее полученные массивы данных подвергаются статистической обработке точно так, если бы это были результаты инструментальных наблюдений за волнением. Понятно, что для больших T (несколько десятков лет для получения надежных статистических оценок) задача требует больших вычислительных ресурсов.

Для решения задач реанализа в грид-среде расчетный период $t \in [0, T]$ разбивается на n интервалов переменной ширины ΔT_i , где $1 \leq i \leq n$. На

каждом интервале рассчитываются поля волнения по соответствующим этому интервалу полям ветра. Расчет в пределах каждого интервала начинается с произвольных начальных условий (например, нулевых значений высот волн). Для исключения влияния начальных условий расчетные интервалы ΔT_i для $1 < i < n$ берутся с некоторым перекрытием так, что каждый предыдущий интервал захватывает начало следующего. Такой подход основывается на том факте, что начальные условия имеют значительное влияние на прогноз волнения только в первые сутки, а ветер является наиболее доминирующим фактором на протяжении всего периода действия [9].

Перспективным классом задач с точки зрения применения грид-технологий является *ансамблевый метод прогноза ветрового волнения*. Ансамбль полей волнения создается на основе ансамбля полей приводного ветра из атмосферных моделей [10]. Прогноз, составленный на основе осреднения по ансамблю, обеспечивает в среднем более высокое качество оценок, чем прогноз, рассчитанный при одном детерминированном поле ветра. Как правило, чем больше размер ансамбля, тем выше качество прогнозов. Ансамблевый подход позволяет формулировать прогноз в вероятностной форме, дающей возможность показать, где и когда прогноз заслуживает большего или меньшего доверия. Очевидно, что метод ансамблевого прогноза можно легко реализовать в гриде, поскольку расчеты для каждого участника ансамбля полностью независимы.

Следует отметить, что имеется еще один тип ансамблевых прогнозов волнения, когда членами ансамбля являются результаты расчетов по разным волновым моделям. Пример реализации такого мульти-модельного подхода приведен в [11]. Его есть смысл применять, когда для исследуемой акватории имеется несколько вариантов оперативного прогноза волнения.

Технология расчета полей ветрового волнения в среде УНГ на основе SWAN. Продемонстрируем технологию использования SWAN в грид-среде на примере упоминаемой выше задачи многовариантного расчета полей ветровых волн. Рабочим инструментом УНГ является промежуточное программное обеспечение *Nordugrid Advanced Resource Connector (ARC)* [12], использующее специальный язык *Extended Resource Specification Language (xRSL)* [13]. Программное обеспечение ARC предоставляет пользователю команды, обеспечивающие загрузку заданий, проверку их состояния, возможность получения результата. Тексты программ на языке xRSL (так называемые xRSL-скрипты) представляют собой перечисление пар элементов (Атрибут = «Значение»). Таким образом, простейший запуск одной копии модели на выполнение в ARC происходит следующим образом: формируется xRSL-скрипт, определяющий имя и расположение исполняемой программы, ее аргументы, списки входных и выходных файлов, имена файлов стандартного потока вывода и ошибок; выполняется загрузка xRSL-скрипта в грид-среду командой *ngsub* и последующий мониторинг выполнения задания командой *ngstat*; по мере готовности результатов выполнения задания выгружается из грида командой *ngget*.

Применительно к рассматриваемой задаче, необходимо для каждой копии SWAN выполнить следующие действия: сформировать файл инициализации с параметрами расчетной сетки, значениями скорости и направления ветра; сгенерировать xRSL-скрипт; отправить задание в грид; получить результат после окончания расчетов.

В случае большого количества градаций скорости и направления ветра необходима автоматизация алгоритма. С этой целью в МГИ НАН Украины было разработано специальное программное обеспечение *SGM* (*SWAN Grid Manager*), позволяющее решать в УНГ многовариантную задачу моделирования стационарных полей волнения в заданной акватории для заданного набора значений скорости и направления постоянного по времени и однородного по пространству приводного ветра.

Алгоритм работы *SGM* приведен на рисунке. Первым этапом является создание набора файлов инициализации «*.swn» для каждой градации скорости и направления ветра. Далее для каждого файла инициализации генерируется и отправляется в грид-очередь соответствующий *xRSL*-скрипт. После выполнения всех заданий происходит получение и обработка результатов моделирования. В *SGM* предусмотрена возможность выполнять мониторинг и удаление заданий из очереди, а также подробное протоколирование выполняемых действий.

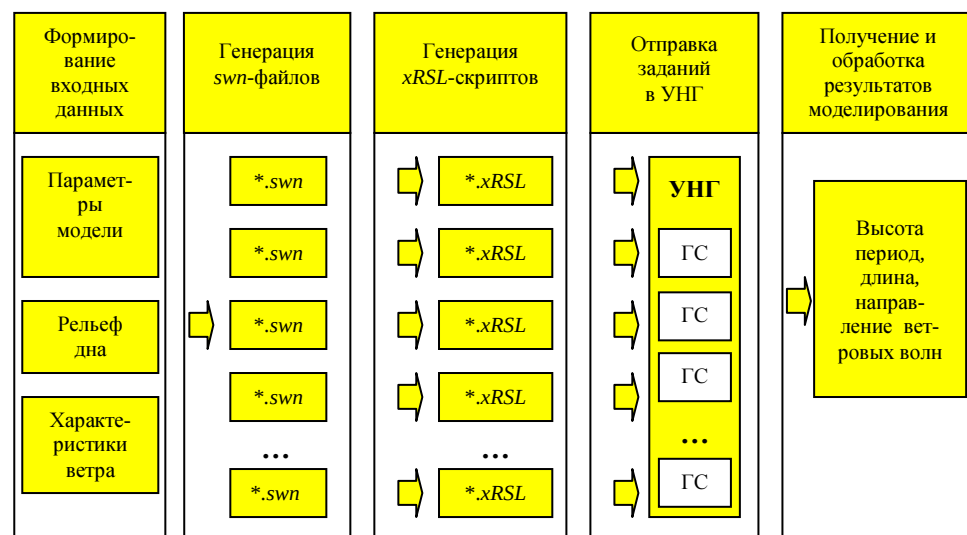


Рисунок. Блок-схема многовариантного расчета полей ветровых волн в грид-среде на основе параллельной версии модели *SWAN*. (ГС – грид-сайт).

Проблема эффективной организации вычислений в грид связана как с учетом неоднородности вычислительных ресурсов и изменчивости во времени характеристик коммуникационных каналов, так и с учетом специфики программного обеспечения каждого вычислительного ресурса. При использовании параллельной *SWAN* следует учитывать тот факт, что на грид-сайтах УНГ используются различные версии *MPI*. Установлено, что эта проблема легко решается путем создания для *SWAN* на каждом грид-сайте УНГ специальной среды окружения, в которой единообразно определены пути к загрузчику *MPI*-программ и библиотекам *MPI*.

Для тестирования *SGM* проводились расчеты характеристик ветрового волнения Азовского моря с горизонтальным разрешением ~1 км. Численные эксперименты выполнялись на грид-сайтах МГИ НАН Украины и Физико-технического института низких температур НАН Украины (г. Харьков). Шаблон файла инициализации *SWAN* содержал следующий набор команд:

```

proj 'AzovSea' 'AS'
mode stat
coord spherical
cgrid 34.7225 44.8003 0. 4.68496 2.42326 480 393 circle 72 0.0666 2. 51
input bottom 34.7225 44.8003 0. 480 393 9.761810e-03 6.164550e-03
read bottom 1. './as481x394.dat' format '(((481f8.2)))'
wind vel dir
friction madsen
num accur 0.02 0.02 0.02 98. stat 60
table 'compgrid' 'wave-vel-dir.dat' xp yp dep hs dir tm0 &
wlen rtp pdir urms
compute
stop

```

Здесь при расчетах конкретного варианта волновых характеристик идентификаторы *wvel* и *wdir* заменяются соответствующими значениями скорости и направления ветра.

Численные эксперименты показали, что при наличии свободных вычислительных ресурсов использование грида может дать ощутимое ускорение. Так с помощью *SGM* были запущены 12 копии *SWAN* из расчета 8 *CPU* (*Central processing unit* – центральное процессорное устройство) на одну копию. Пусть время выполнения всех заданий $t_0 = t_1 + \Delta t_1$, где t_1 – наибольшее время выполнения одного задания, Δt_1 – время между окончанием последнего задания и получением последнего результата. Когда выделенных *CPU* достаточно, все грид-задания заканчиваются практически одновременно, т.е. $\Delta t_1 \ll t_1$. Поэтому, в первом приближении можно считать, что $t_0 = t_1$. На кластере МГИ НАН Украины одновременный запуск на счет большого количества копий параллельной *SWAN* невозможен вследствие дефицита вычислительных ресурсов. На практике они считаются последовательно на 24 – 32 *CPU*. Как показали расчеты, на кластере одна копия *SWAN* с 24 *CPU* и входными данными, аналогичными тем, которые генерирует *SGM*, выполняется за время $t_2 \approx t_1/2,5$. Тогда для 12 вариантов *SGM* общее время счета на кластере $t_2 = 4,8 \cdot t_1$.

Заключение. Рассмотрены методологические аспекты использования грид-технологий в задачах моделирования ветрового волнения. Показано, что такие задачи ветрового волнения как многовариантный расчет волновых полей, реанализ ветрового волнения по заданным полям ветра и ансамблевый прогноз волнения могут эффективно решаться в среде грид.

Разработан и реализован алгоритм решения задачи многокомпонентного расчета стационарных полей ветровых волн в среде УНГ на основе параллельной версии и ветровых волн *SWAN*. Проведенные тестовые расчеты показали работоспособность и эффективность предложенного алгоритма. Разработанный алгоритм может быть обобщен на случай, когда поля ветра имеют пространственную неоднородность. В настоящее время ведутся работы по созданию и реализации алгоритма решения задач реанализа ветрового волнения в грид-среде.

Работа выполнена при поддержке Государственной целевой научно-технической программы внедрения и использования грид-технологий на 2009 – 2013 гг. и Программы информатизации НАН Украины на 2011 г.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Foster I., Kesselman C. and Tuecke S. The Anatomy of the Grid: Enabling Scalable Virtual Organizations // International Journal of High Performance Computing Applications. – 2001. – vol. 15, № 3. – P. 200-222.
2. Фомин В.В., Бородин Д.В., Иванов В.А. Вычислительный кластер Морского гидрофизического института НАН Украины // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2010. – С. 121-123
3. Booij. N., Ris R.C., Holthuijsen L.H. A third-generation wave model for coastal regions. Model description and validation // J. Geophys. Res. – 1999. – vol. 104, № C4. – P. 7649-7666.
4. SWAN Cycle III version 40.85. User Manual. – Delft University of Technology, Netherlands. – 2011. – 119 p.
[Электронный ресурс]. <http://www.swan.tudelft.nl> (Последнее обращение 10.12.2011)
5. Иванов В.А., Фомин В.В. Математическое моделирование динамических процессов в зоне море-суша. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2008. – 363 с.
6. Антонов А.С. Параллельное программирование с использованием технологии MPI: Учебное пособие. – М.: Изд-во МГУ, 2004. – 71 с.
7. Дьяков Н.Н., Фомин В.В., Мартынов Е.В., Гармашов А.В. Ветро-волновой режим Азовского моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика». – 2010. – вып. 22. – С. 228-239.
8. Полонский А.Б., Фомин В.В., Гармашов А.В. Характеристики ветрового волнения Черного моря // Доповіді Національної Академії наук України. – 2011. – № 8. – С. 108-112.
9. Farina L. On ensemble prediction of ocean waves // Tellus A. – 2002. – vol. 54, Issue 2. – P. 148-158
10. Астахова Е.Д. Построение ансамблей начальных полей для системы кратко- и среднесрочного ансамблевого прогнозирования погоды // Труды Гидрометцентра России. – СПб.: Гидрометеиздат. – 2008. – вып. 342. – С. 98-117.
11. Lenartz F., Beckers J.-M., Chiggiato J., Mourre B., Troupin C., Vandenbulcke L., Rixen M. Super-ensemble techniques applied to wave forecast: performance and limitations // Ocean Science. – 2011. – vol. 6. – P. 595-604.
12. Advanced Resource Connector. Сайт «NORDUGRID». [Электронный ресурс]. <http://www.nordugrid.org> (Последнее обращение 10.12.2011).
13. Extended Resource Specification Language – Reference Manual for ARC versions 0.8 and above. Сайт «NORDUGRID». [Электронный ресурс]. <http://www.nordugrid.org/documents/xrsl.pdf> (Последнее обращение 09.12.2011).

Матеріал поступив в редакцію 10.12.2011 г.

АНОТАЦІЯ Розглянуто методологічні аспекти використання ґрід-технологій в задачах моделювання вітрового хвилювання. Дано опис програмної реалізації та технологічних особливостей розрахунку полів хвилювання в середовищі Українського національного ґрїду на основі чисельної спектральної моделі SWAN.

ABSTRACT Methodological aspects of using grid technology for modeling of wind waves is presented. A description of program implementation and technological features of the calculation fields excitement among the Ukrainian National Grid on the basis of a numerical spectral model SWAN is given.