

Технология усвоения данных аэрокосмического мониторинга и измерений буев Арго методом EnOI в модели глобального океана высокого пространственного разрешения с использованием платформы SMF*

М.Н. Кауркин^{1,2,3}, Р.А. Ибраев^{1,2,3}, А.Ю. Коромыслов^{4,3}

Институт вычислительной математики РАН¹, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН², Гидрометцентр России³, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова⁴

Предлагается параллельная реализация метода обобщённой ансамблевой интерполяции (EnOI) для усвоения массовых данных наблюдений в модель Мирового океана ИВМИО высокого разрешения для прогноза состояния океана. Усвоение данных функционирует в качестве сервиса вычислительной платформы SMF 3.0 (Compact Modeling Framework). В SMF 3.0 прямой MPI-подход к коммуникациям заменен абстракцией PGAS (Partitional Global Address Space) через библиотеку Global Arrays (GA), а различные функции каплера инкапсулированы в распределенные, параллельно работающие подпрограммы-сервисы. Для оценки производительности системы усвоения представлены тесты на суперкомпьютере «Ломоносов».

Ключевые слова: моделирование Земной системы, усвоение данных, ансамблевый фильтр Калмана, ансамблевая оптимальная интерполяция, каплер.

1. Введение

Разрабатываемые в ведущих мировых прогностических центрах модели Мирового океана сверхвысокого пространственного разрешения с усвоением непрерывно поступающих данных наблюдений позволяют осуществлять оперативный прогноз трёхмерного состояния морской среды, аналогичный метеорологическим прогнозам погоды, а также являются важной составляющей в исследованиях изменения климата и системах мониторинга состояния окружающей среды.

Решение данной задачи невозможно без использования технологий распределенных вычислений в силу огромного объема получаемой и обрабатываемой информации. Количество ресурсов, необходимых для выполнения оперативных расчётов моделями высокого пространственного разрешения, исчисляется сегодня $10^2 - 10^3$ вычислительных ядер для краткосрочных прогнозов и $10^4 - 10^5$ – для средне- и долгосрочных. Уже сейчас доступны спутниковые данные наблюдений за поверхностной температурой и уровнем с разрешением 1 км (NASA Aqua). Это соответствует поступлению гигабайт информации за одни сутки. Важно эту информацию правильно и быстро усвоить, особенно когда пространственное разрешение глобальных моделей океана станет порядка километра.

Особенно критично вопрос времени вычислений встаёт, когда модель и система усвоения функционируют в оперативном режиме для построения среднесрочных и краткосрочных прогнозов. Время выдачи современных спутниковых данных наблюдений составляет всего пару часов, высокое пространственное разрешение моделей океана позволяет моделировать поведение вихревых структур, а усвоение спутниковых данных наблюдений способствует их своевременному выявлению, что, как следствие, позволяет предсказывать такие опасные природные явления, как штормы и тайфуны. Поэтому при разработке и внедрении методов

* Раздел 2 выполнен в ГМЦ РФ за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-37-00053). Разделы 3-4 выполнены в ИО им. П.П. Ширшова РАН при поддержке Программы Президиума РАН I.33П «Фундаментальные проблемы математического моделирования»

усвоения данных наблюдений нужно обращать пристальное внимание на масштабируемость используемых методов и их способность перерабатывать большие объемы информации.

В настоящее время существует несколько алгоритмов усвоения данных, которые применяются в задачах прогноза погоды и в оперативной океанологии, см. обзор в GODAE, 2012. Используемые подходы можно разделить на вариационные (3d-Var, 4d-Var) [1] и динамико-стохастические (преимущественно ансамблевые фильтры Калмана EnKF [2] и близкий к нему метод ансамблевой оптимальной интерполяции EnOI [3]). Необходимо отметить основное преимущество методов усвоения, основанных на ансамблевом фильтре Калмана (EnKF) и методе ансамблевой оптимальной интерполяции EnOI перед вариационным подходом (3d-Var, 4d-Var), которое заключается в том, что EnKF и EnOI не требуют построения сопряжённого оператора модели, что часто весьма затруднительно. Усвоение данных на основе ансамблевого подхода вообще может быть реализовано используя модель океана как «чёрный ящик». Такие методы хорошо распараллеливаются и вполне применимы для глобальных моделей, в то время как 4d-Var метод в силу вычислительной сложности на сегодняшний день не используется ни в одной глобальной модели океана высокого пространственного разрешения [4].

Цель данной работы заключается в реализации метода EnOI в качестве программного сервиса усвоения данных DAS (Data Assimilation Service) вычислительной платформы CMF 3.0 для использования в моделях высокого пространственного разрешения на массивно-параллельных компьютерах с распределённой памятью, на смену используемому ранее интегрированному в модель океана методу MVOI [5].

2. Компактная вычислительная платформа для моделирования CMF 3.0 и сервис DAS

Наряду с разработкой моделей отдельных компонентов Земной системы возникает отдельная задача развития инструментов для их координированной работы — фреймворков для совместного моделирования. Архитектура фреймворка зависит от сложности моделей, характеристик связей между ними и доступных компьютерных ресурсов.

Развитие инструментов для совместного моделирования во многом следует за эволюционированием совместных моделей океан-атмосфера. Первые системы объединяли физические компоненты напрямую и вообще не требовали дополнительного кода. По мере усложнения моделей и выделения их в отдельные программы появилась необходимость в отдельном сервисном компоненте — каплере (англ. couple — соединять), который занимался интерполяцией данных между различными модельными сетками компонентов. На первом этапе он представлял собой просто набор процедур для передачи полей через файловую систему, потом был выделен в отдельную последовательную программу, представляющую собой аналог центрального хаба для связи всех моделей. По мере увеличения разрешения сеток моделей последовательные алгоритмы каплера становились неэффективными, и на их место пришла полностью параллельная архитектура.

Компактная вычислительная платформа для моделирования CMF - это программный комплекс для совместного моделирования Земной системы и ее компонентов высокого разрешения на параллельных вычислительных системах. За счет использования абстрактных интерфейсов главная программа и каплер становятся полностью независимыми от количества подключаемых моделей — для работы в совместной системе пользователю достаточно создать производный класс своей компоненты [6].

Версия CMF 2.0 компактной вычислительной платформы для моделирования показала себя пригодной для создания моделей высокого разрешения, она имела несколько направлений для улучшения. Во-первых, хотя чистый MPI подход к коммуникациям имеет высокую скорость работы, он требует явной работы с буферами данных. Во-вторых, разработка региональных подмоделей морей, вложенных в сетку глобальной модели, становились довольно сложными при использовании только MPI-процедур. Результаты работы CMF 2.0 показали, что мы можем пожертвовать частью производительности для выбора более простой (и возможно менее эффективной) абстракции для упрощения коммуникационных алгоритмов.

2.1 PGAS-коммуникатор

В версии CMF 3.0 [7] используется библиотека Global Arrays (GA) [8], реализующая парадигму PGAS (Partitional Global Address Space). Библиотека позволяет обращаться к глобальным индексам массива, как будто он весь доступен в локальной памяти.

CMF 3.0 содержит класс Communicator, который инкапсулирует логику работы с библиотекой и предоставляет интерфейс для put/get операций частей глобальных данных различных компонентов. Оказалось, что такой подход позволяет упростить не только взаимодействие вложенных компонентов, но и предоставляет удобную замену системе обмена данными основанную на прямом MPI-подходе между компонентами и каплером.

В итоге, все обмены между частями системы реализованы с использованием класса Communicator. Он содержит хэш-таблицу для хранения всей информации о массивах, включая их состояние и метаданные. Каждый массив компонента, участвующий в обменах содержит распределенную копию, хранящуюся в виде виртуального глобального массива GA. Когда процесс должен отправить данные, он заполняет эту копию своими текущими данными. Благодаря тому, что распределение глобального массива полностью повторяет декомпозицию компонента, эта операция происходит локально.

2.2 Новая архитектура совместной модели

Поскольку сложность совместной системы растет, необходим более удобный способ объединения компонентов. Первоначально появившаяся для веб-приложений SOA (Сервис-Ориентированная Архитектура) предоставляет хороший фундамент для решения подобной задачи.

В CMF 3.0 все модели отправляют свои запросы общего вида в единую очередь сообщений (**Рис. 1**). Сервисные компоненты берут из этой очереди только сообщения, которые могут обработать, забирают данные из виртуальных глобальных массивов и выполняют соответствующие действия. Архитектура позволяет минимизировать связи между физическими и сервисными компонентами и значительно упростить разработку. Более того, поскольку все сервисы наследуют общий базовый класс Service, добавление нового сервиса не представляет сложностей. Сейчас CMF 3.0 содержит следующие независимые параллельные сервисы: CPL (операции интерполяции данных при пересылке между модельными компонентами на различных сетках), IOS/IOF (I/O Fast, I/O Slow — быстрые и медленные устройства работы с файлами), DAS (система ассимиляции данных наблюдений).

В CMF 3.0 был реализован сервис усвоения данных DAS для обеспечения работа системы усвоения данных на основе метода EnOI (раздел 3).

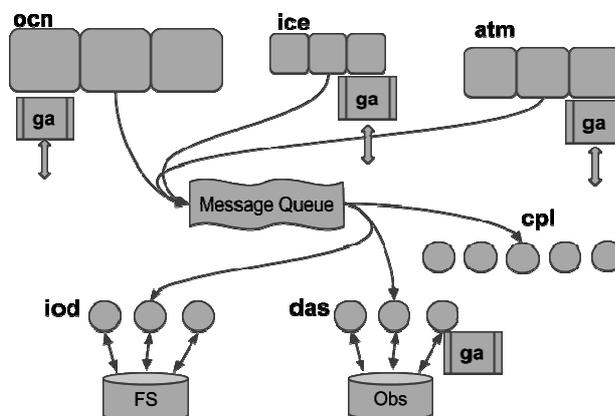


Рис. 1. Сервис усвоения данных DAS в архитектуре компактной вычислительной платформы для моделирования CMF 3.0. В данном примере: три компонента (океан, лед, атмосфера) отправляют запросы в очередь сообщений, откуда их извлекают сервисы каплера (CPL), усвоения данных (DAS) и ввода-

вывода (IOD). Сами данные передаются через механизм глобальных массивов, который также используются для межпроцессорных обменов в компонентах и в сервисе DAS.

2.3 Каплер: интерполяция

Несмотря на то, что логика работы процедур интерполяции каплера осталась той же, абстракция PGAS позволила сильно упростить код. Теперь все данные, необходимые процессу каплера, от соседей получаются с использованием класса Communicator. Недостатком такого подхода является падение производительности, связанное с невозможностью использования отложенных MPI-операций и наличия у библиотеки GA собственных издержек.

Для тестирования системы использовались оценка времени, включая отправку запроса в очередь, отправку данных, интерполяцию и передачу их принимающей стороне, то есть моделирует полную работу системы. Тесты проводились на суперкомпьютере «Ломоносов».

График показывает практически линейную масштабируемость (Рис. 2) [7]. Наконец, абсолютные значения в ~2-3 секунды затрат на каплинг (на 20-50 ядрах) для 1 дня моделирования удовлетворяют практическим запросам экспериментов.

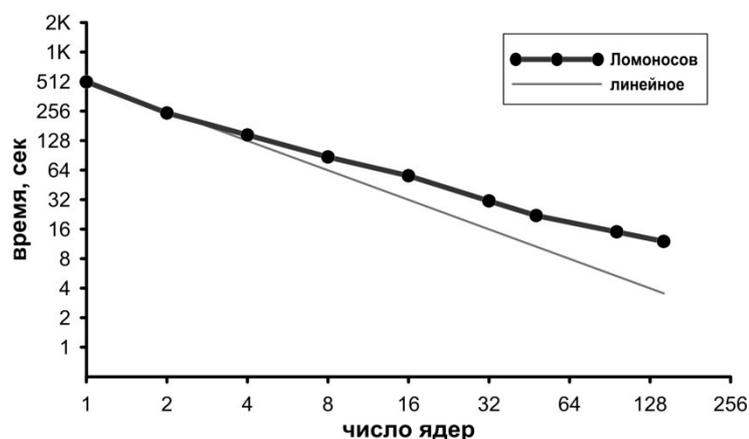


Рис. 2. Время работы теста для CMF 3.0 в секундах в зависимости от размера коммуникатора каплера (сервис CPL) на суперкомпьютере «Ломоносов» [7]. По оси X — количество ядер, используемое сервисом CPL, а по Y — время, затраченное на операцию интерполяции, выполняемую этим сервисом.

3. Описание сервиса DAS

3.1 Метод EnOI: основные уравнения

Основные уравнения методов EnOI и EnKF [2, 3] следующие:

$$\mathbf{x}_a = \mathbf{x}_b + \mathbf{K}(\mathbf{y}_{obs} - \mathbf{H}\mathbf{x}_b)$$

$$\mathbf{K} = \mathbf{B}\mathbf{H}^T(\mathbf{H}\mathbf{B}\mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1}$$

Здесь \mathbf{x}_b , \mathbf{x}_a - векторы модельного решения до и после усвоения (в английской литературе: analysis and background) размера n , где n - количество точек сетки, которое имеет порядок 10^8 (для океана с разрешением 0.1 градуса); \mathbf{y}_{obs} - вектор наблюдений размера m , где m - число точек наблюдения, имеющее порядок 10^4 ; $\mathbf{K}(n*m)$ - весовая матрица (в англ. литературе Kalman gain matrix); $\mathbf{R}(m*m)$ - ковариационная матрица инструментальных ошибок наблюдений, которая имеет диагональный вид, так как предполагается, что инструментальные ошибки не коррелированы и $\mathbf{H}(m*n)$ - матрица проектирования значений модели в пространство наблюдений. Матрица \mathbf{B} имеет специальное название ковариационной матрицы состояния модели. Ее строгое определение обычно не дается, вместо этого описывается метод ее расчета.

В методе оптимальной интерполяции (MVOI) элементы матрицы \mathbf{B} задаются функцией зависящей от расстояния между точками сетки.

Основная идея метода EnKF заключается в том, что ковариационная матрица \mathbf{V} получается из ансамбля векторов состояния модели (выборки). Пусть $\mathbf{X}_b^{en} = [\mathbf{x}_b^1 \dots \mathbf{x}_b^{en}] - [\bar{\mathbf{x}}_b \dots \bar{\mathbf{x}}_b]$ — матрица размера $n \times en$, где en — количество элементов ансамбля, (обычно не более 100), столбцы которой равны значениям состояния модели минус среднее по ансамблю. Тогда матрица ковариации модели, построенная на основании этой

$$\mathbf{V}^{en} = \frac{1}{en - 1} \mathbf{X}_b^{en} (\mathbf{X}_b^{en})^T$$

выборки:

В настоящей работе используется вычислительно дешевый метод - обобщённой ансамблевой интерполяции (EnOI), который является упрощением метода EnKF когда в качестве элементов ансамбля выступают состояния модели, полученные и сохранённые в процессе счета за предыдущие несколько лет. Технически реализована возможность использования более сложного подхода, как это делается, например, в проекте TOPAZ [9], когда модель стартует со ста (количество элементов в ансамбле) различных начальных состояний, затем на основании полученных ста прогнозов уже строится ковариационная матрица \mathbf{V} . Легко видеть, что при таком подходе вычислительные затраты пропорциональны количеству элементов в ансамбле, но эти вычисления могут выполняться параллельно, поскольку сто модельных прогнозов делаются независимо друг от друга.

3.2 Особенности параллельной реализации EnOI

Как всякий сервис программного комплекса CMF 3.0, усвоение данных выполняется на отдельных вычислительных ядрах. Это позволяет лучше структурировать систему совместного моделирования, где каждая программная компонента решает свою задачу. При этом модель океана в усвоении практически не участвует, а используются лишь модельные результаты расчётов в виде векторов-элементов ансамбля, на основе которых вычисляется ковариационная матрица модели \mathbf{V} , а точнее матрица $(\mathbf{NBNT} + \mathbf{R})$, которая имеет меньшую размерность $m \times m$. Данные от модели океана поступают в сервис (обычно раз в модельные сутки) без обращения к файловой системе, что важно, поскольку размер трехмерных массивов состояния для модели океана с разрешением 0.1° составляет несколько гигабайт.

Проблемы и причины вынесения усвоения в отдельный сервис

1. Данные наблюдений (спутниковые или данные дрейфтеров) практически всегда распределены крайне неравномерно по расчётной области океана, поэтому если для их обчёта использовать ту же двухмерную процессорную декомпозицию океана, то нагрузка на вычислительные ядра будет также распределена неравномерно.
2. Ковариационные матрицы занимают значительный объем памяти, и их лучше хранить на отдельных от модельных компонент вычислительных ядрах.

Общий алгоритм усвоения EnOI

- Строится новая 1d процессорная декомпозиция расчётной области, равномерная по данным наблюдения и имеющая вид горизонтальных полосок.
- Каждая «полоска» получает только свои данные наблюдения y_{obs} и только свою часть глобального модельного массива x_b и строится проекция модельного решения в точки наблюдения Hx_b .
- Вычисляется вектор инновации наблюдений $(y_{obs} - Hx_b)$ также локально для каждой «полоски».
- Асинхронно читается ансамбль состояний X_b , распределяется по ядрам, строится проекция в точки наблюдения $H X_b$.
- Для обращения матрицы $(\mathbf{NBNT} + \mathbf{R})$ используется ее сингулярное разложение, которое вычисляется, используя параллельную процедуру `pdegsvd` из библиотеки ScaLAPACK (пакет Intel MKL).
- Массив x_a отправляется в океан и используется как начальное условие для дальнейшей работы модели океана.

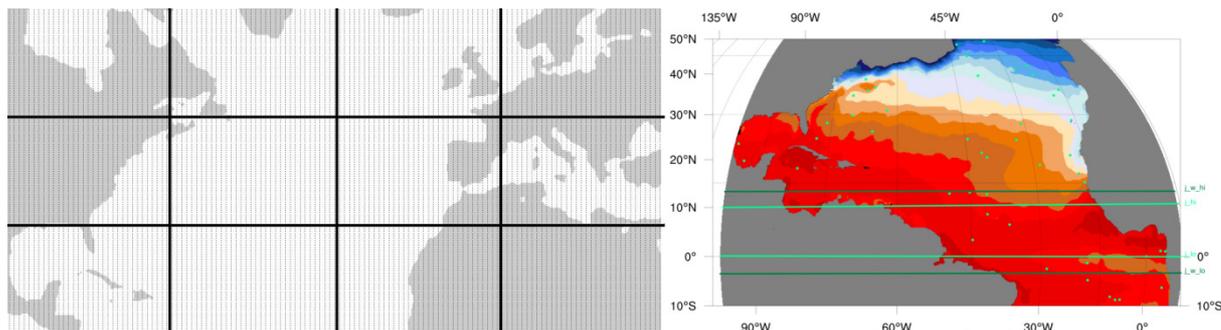


Рис. 3. Двухмерная декомпозиции области, используемый в модели Мирового океана ИВМИО и одномерная, используемая в сервисе DAS. Точками показаны данные наблюдений.

Замечания

1. Матрица **H** (используется метод билинейной интерполяции) строится каждый раз при вызове сервиса, поскольку данные наблюдений каждый раз доступны в новых точках. Как следствие каждый раз строится новая процессорная декомпозиция, равномерная по точкам наблюдений и неравномерная по точкам сетки.

2. Для реализации алгоритма, описанного выше, используются вызовы функции из пакетов BLAS и LAPACK (используя Intel MKL) через API библиотеки Global Arrays, что существенно упростило написание межпроцессорных обменов.

3.3 Тестирование сервиса DAS

Благодаря эффективной реализации метода EnOI в качестве параллельного программного сервиса DAS, решение задачи усвоения данных масштабируется практически линейно (**Рис. 4**). Так усвоение 10^4 точек наблюдений на 16 процессорных ядрах занимает около 20 секунд вместо 5 минут на одном ядре, что было бы сравнимо со временем, затрачиваемым на суточный прогноз модели океана на 200 ядрах, что неприемлемо.

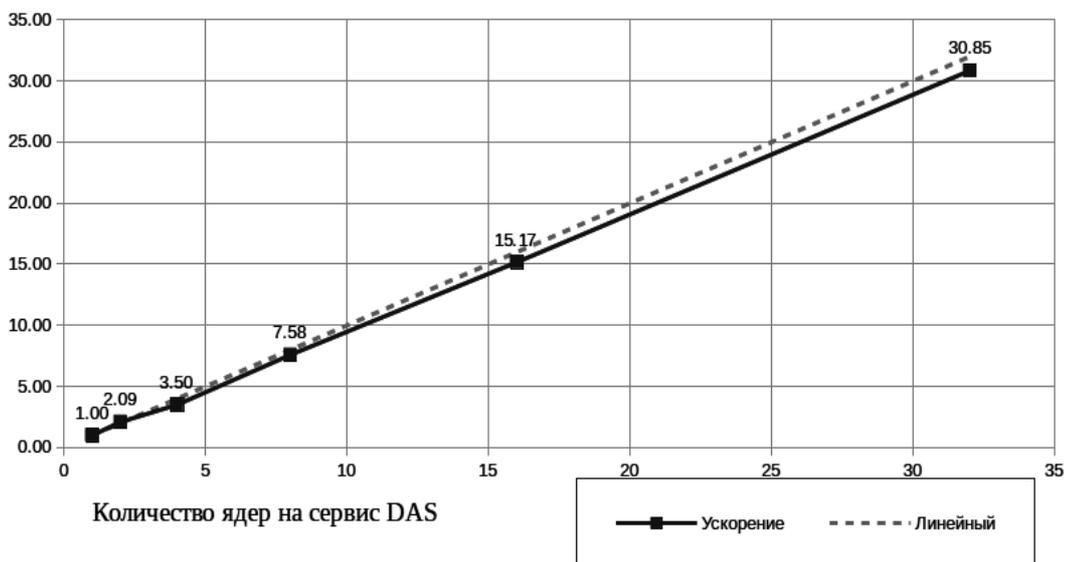


Рис. 4. Масштабируемость метода EnOI в рамках сервиса DAS при усвоении 10^4 точек на суперкомпьютере «Ломоносов».

В качестве примера ассимиляции данных наблюдений на (**Рис. 5**) показано модельное поле поверхностной температуры для Северной Атлантики без усвоения данных и с усвоением методом EnOI [10]. По анализу размеров кругов, которые пропорциональны разнице между модельной температурой поверхности океана и данными измерений, можно сделать выводы об

эффективности усвоения. Очень хорошо заметна большая разница этих кругов в районе экватора и Северо-Атлантического течения, то есть в тех областях, где динамика океана особенно выражена. Усвоение корректирует модельную температуру в правильном направлении, то есть в соответствии с данными наблюдений.

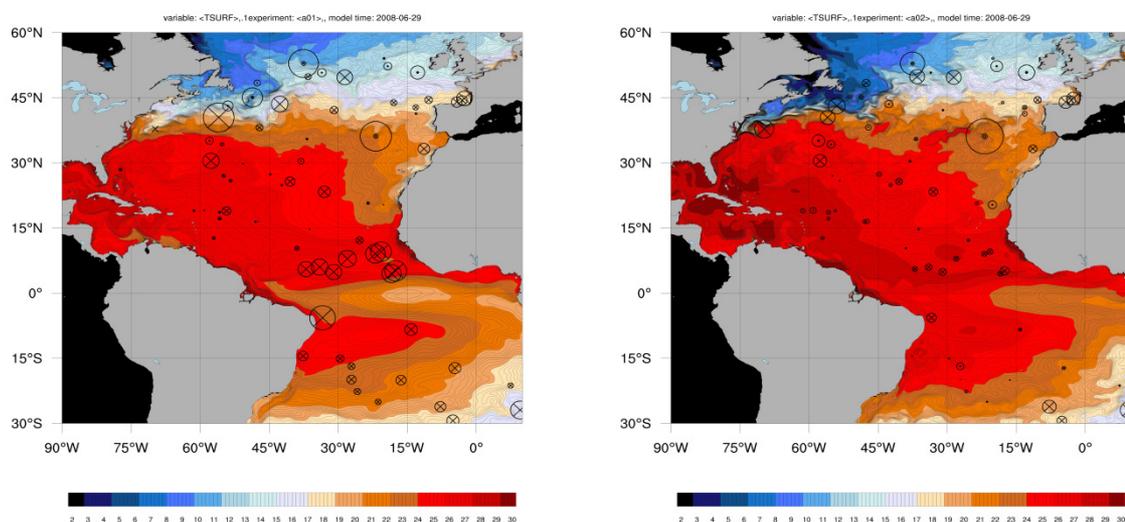


Рис. 5. Температура поверхности океана в модели Северной Атлантики за 2008-06-29 в базовом эксперименте и эксперименте с усвоением методом EnOI. Кругами показано расположение дрейфтеров АРГО, с которых поступили данные о профилях температуры и солёности за 2008-06-29. Размер кругов пропорционален разнице между температурой с дрейфтеров и модельной температурой. Крестик в круге означает, что модельная температура ниже температуры с дрейфера, точка в круге - модельная температура выше.

4. Заключение

В данной работе представлена реализация системы усвоения данных на основе ансамблевой оптимальной интерполяции EnOI в рамках оригинальной платформы SMF3.0 [7], являющаяся первой в России параллельной системой для создания совместных моделей высокого разрешения [11].

В SMF 3.0 мы разделили каплер на отдельные сервисы и сильно упростили всю систему коммуникаций за счет использования абстракции PGAS.

Для тестирования производительности системы усвоения данных и каплера были проведены тесты на суперкомпьютере «Ломоносов», которые подтвердили численную эффективность предлагаемого программного продукта.

Литература

1. Агошков В.И., Ипатова В.М., Залесный В.Б. и др. Задачи вариационной ассимиляции данных наблюдений для моделей общей циркуляции океана и методы их решения // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана, 2010, Т. 46, № 6, С. 734-770.
2. Evensen G. Data Assimilation, The Ensemble Kalman Filter 2nd ed.— Springer, 2009.
3. Xie, J. and Zhu, J.: Ensemble optimal interpolation schemes for Assimilating Argo profiles into a hybrid coordinate ocean model. // Ocean Modell, 2010, 33, P. 283–298.
4. GODAE OceanView Science Team. Work Plan 2009 –2013, <http://www.godae-oceanview.org>.
5. Кауркин М. Н., Ибраев Р. А., Беляев К. П. Усвоение данных наблюдений в модели динамики океана высокого пространственного разрешения с применением методов параллельного программирования// Метеорология и гидрология, 2016, №7, С. 47-57.

6. Калмыков В.В., Ибраев Р.А. CMF - фреймворк для модели земной системы высокого разрешения. Суперкомпьютерные дни в России: Труды международной конференции. Суперкомпьютерный консорциум университетов России, Федеральное агентство научных организаций России. 2015. С. 34-40.
7. Калмыков В.В., Ибраев Р.А. Программный комплекс совместного моделирования системы океан–лед–атмосфера–почва на массивно-параллельных компьютерах // Вычислительные методы и программирование, 2013, № 14, С. 88–95.
8. Jarek Nieplocha, Bruce Palmer, Vinod Tipparaju, Manojkumar Krishnan, Harold Trease, and Edo Apra. "Advances, Applications and Performance of the Global Arrays Shared Memory Programming Toolkit" // JHPSCA. 2006. Vol. 20, No. 2. P. 203-231.
9. Sakov, P. et al. "TOPAZ4: An Ocean-Sea Ice Data Assimilation System For The North Atlantic And Arctic" // Ocean Sci. 8.4 (2012): 633-656.
10. Кауркин М. Н., Ибраев Р. А., Беляев К. П. Усвоение данных АРГО в модель динамики океана с высоким разрешением методом ансамблевой оптимальной интерполяции (EnOI), *неопубликованная рукопись*.
11. Ибраев Р.А., Хабеев Р.Н., Ушаков К.В. Вихреразрешающая 1/10° модель Мирового океана // Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2012, № 48(1), С. 45–55.

EnOI-based data assimilation technology for satellite observations and ARGO float measurements in a high resolution global ocean model using the CMF platform

M.N. Kaurkin^{1,2,3}, R.A. Ibrayev^{1,2,3}, A.U. Koromyslov^{4,3}

Institute of Numerical Mathematics RAS¹, P.P. Shirshov Institute of Oceanology RAS², Hydrometeorological Centre of Russia³, M.V. Lomonosov Moscow State University⁴

A parallel realization of the ensemble optimal interpolation (EnOI) data assimilation method for the INMIO general circulation high resolution ocean model is presented. The data assimilation is performed by a service of the computational platform CMF 3.0 (Compact Modeling Framework). In CMF 3.0 the direct MPI approach is replaced by the PGAS communication paradigm implemented in the third-party Global Arrays (GA) toolkit, and multiple coupler functions are encapsulated in the set of simultaneously working parallel services. Performance tests for data assimilation system have been carried out on the "Lomonosov" supercomputer.

Keywords: Earth system modeling, data assimilation, EnKF, EnOI, coupler.

References

1. Agoshkov V.I., Zalesnyi V.B., Parmuzin E.I., Shutyaev V.P., Ipatova V.M. Problems of variational assimilation of observational data for ocean general circulation models and methods for their solution // *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2010. V. 46. № 6. P. 677-712.
2. Evensen G. *Data Assimilation, The Ensemble Kalman Filter* 2nd ed.— Springer, 2009.
3. Xie, J. and Zhu, J.: Ensemble optimal interpolation schemes for Assimilating Argo profiles into a hybrid coordinate ocean model // *Ocean Modell*, 2010, 33, P. 283–298.
4. GODAE OceanView Science Team. Work Plan 2009 –2013, <http://www.godae-oceanview.org>.
5. Kaurkin M.N., Ibrayev R.A., Belyaev K.P. Data assimilation into the ocean dynamics model with high spatial resolution using the parallel programming methods // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2016, №7, P. 47-57. (in Russian).
6. Kalmykov Vladimir, Ibrayev Rashit, 2015. CMF - framework for high-resolution Earth system modeling, 2015 CEUR Workshop Proceedings. Vol-1482. 2015. P. 34-40. ISSN 1613-0073 (<http://ceur-ws.org/Vol-1482/034.pdf>) (in Russian).
7. Kalmykov V.V., Ibrayev R.A. A framework for the ocean-ice-atmosphere-land coupled modeling on massively-parallel architectures // *Numerical Methods and Programming*. Section 2. Programming, 2013, 14, 88-95. (<http://num-meth.srcc.msu.ru/english/index.html>) 2013. 14. P. 88–95.
8. Jarek Nieplocha, Bruce Palmer, Vinod Tipparaju, Manojkumar Krishnan, Harold Trease, and Edo Apra. "Advances, Applications and Performance of the Global Arrays Shared Memory Programming Toolkit" // *IJHPCA*. 2006. Vol. 20, No. 2. P. 203-231.
9. Sakov, P. et al. "TOPAZ4: An Ocean-Sea Ice Data Assimilation System For The North Atlantic And Arctic" // *Ocean Sci*. 8.4 (2012) P. 633-656.
10. Kaurkin M.N., Ibrayev R.A., Belyaev K.P. Data assimilation ARGO data into the ocean dynamics model with high spatial resolution using Ensemble Optimal Interpolation (EnOI). 2016, *unpublished*.
11. Ibrayev R.A., Khabeev R.N., Ushakov K.V. Eddy-resolving 1/10° Model of the World Ocean // *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2012. V.48. N 1. P. 37-46.