3. *Kutuzov D.* Switching Element for Parallel Spatial Systems / D.Kutuzov, A.Utesheva // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2011), Proceedings. – Krasnoyarsk: Russia Siberia Section of the IEEE Siberian Federal University, september 15–16, 2011. – P. 60-62.
4. *Кутузов Д.В., Утешева А.Ю.* Схемотехническая реализация и моделирование коммутационных ячеек параллельных пространственных коммутационных систем // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологи. – Астрахань: Изд. дом «Астраханский университет». – 2010. – № 3 (11). – С. 11-16.
5. *Бахтеяров С.Д.* и др. Транспьютерная технология / Под ред. С.В. Емельянова. – М.: Радио и связь, 1993. – 302 с.
6. *Closs C.A.* A study of non-blocking switching networks // Bell Syst. Tech. J. – 1953. – Vol. 32. – № 2. – P. 406-424.
7. *Кутузов Д.В.* Параллельные устройства распределения и обработки информации / Кутузов Д.В., Осовский А.В. // Монография. LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co.KG, 2012. – 103 с.
8. *Кутузов Д.В., Осовский А.В.* Имитационное моделирование параллельной пространственной коммутационной системы // Известия Волгоградского государственного технического университета: Межвуз. сб. науч. ст. – Волгоград: ВолГТУ, 2007. – Вып. 3, № 9 (35). – С. 137-139.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н., доцент Д.М. Сурков.

Кутузов Денис Валерьевич – ФГБОУ ВПО «Астраханский государственный университет»; e-mail: d_kutuzov@mail.ru 414004, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а, к. 415; тел.: 88512541817; кафедра информационных систем; к.т.н.; доцент.

Осовский Алексей Викторович – e-mail: a_osovskiy@mail.ru; кафедра информационных систем; к.т.н.; доцент.

Моторина Екатерина Алексеевна – katerinka.90.ru@mail.ru; 414004, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а, к. 220; тел.: 88512255358; факультет математики и информационных технологий, студентка.

Kutuzov Denis Valer'evich – Astrakhan State University; e-mail: d_kutuzov@mail.ru; Tatisheva street, 20a, office 145, Astrakhan, 415414004, Russia; phone: +78512541817; the department of information systems; cand. of eng. sc.; associate professor.

Osovskiy Alexey Victorovich – e-mail: a_osovskiy@mail.ru; the department of information systems; cand. of eng. sc.; associate professor.

Motorina Ekaterina Alexeevna – e-mail: katerinka.90.ru@mail.ru; 20a, Tatisheva street, office 220, Astrakhan414004, Russia; phone: +78512255358; the faculty of mathematics and information technology; student.

УДК 681.3.07

А.Е. Бондарев

ЛОКАЛИЗАЦИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ СТРУКТУР В ПРОСТРАНСТВЕ ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ПАРАМЕТРОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Рассматривается подход, предназначенный для быстрой приближенной оценки условий возникновения нестационарных пространственно-временных структур в потоках. Этот подход основан на решении оптимизационной задачи и применении методов визуального представления для анализа многомерного массива дискретных данных, получаемого в результате вычислений. Решение задачи оптимизационного анализа реализовано с помощью параллельного алгоритма в форме многозадачного расчета. Применение этого *подхода в ряде случаев позволяет получать искомую приближенную оценку зависимости возникновения нестационарных структур в потоке от определяющих параметров задачи в виде квазианалитических соотношений.*

Оптимизация; визуализация; параллельные вычисления.

A.E. Bondarev

SPACE-TIME STRUCTURES LOCALIZATION IN THE SPACE OF CHARACTER PARAMETERS BY PARALLEL COMPUTATIONS

The paper presents an approach to be intended for fast approximate estimation of unsteady space-time structures appearance in the flows. The approach is based on combination of optimization problem computation with methods of data visual presentation. The visual presentation methods are used for analyze of multidimensional array of discrete result data. Optimization problem solution is organized by parallel computation in a multitask form. The approach allows to obtain the sought-for approximate estimation of unsteady flow structures dependence on character parameters in a quasi-analytical form for some cases.

Optimization; visualization; parallel computations.

Введение. Нестационарные процессы в задачах механики жидкости и газа характеризуются наличием изменяющихся пространственно-временных структур – отрывных зон, циркуляционных течений, вихревых дорожек и т.д. Появление и трансформации таких структур в потоке вызывают на практике многие нежелательные эффекты: снижение подъемной силы, вибрации летательных аппаратов, увеличение аэродинамического сопротивления. Поэтому тщательное изучение процессов зарождения и изменения пространственно-временных структур (ПВС) является необходимым.

В данной работе рассматривается приближенный подход, предназначенный для быстрой и грубой оценки зависимости возникновения пространственно-временных структур от определяющих параметров задачи. Этот подход основан на решении оптимизационной задачи и применении методов визуального представления для анализа многомерного массива дискретных данных, получаемого в результате вычислений. В ряде случаев, как показано ниже на конкретном примере, применение данного подхода позволяет получать искомые зависимости в виде квазианалитических соотношений.

В работах [1, 3] рассмотрены оптимизационные задачи как источник многомерных данных, приводятся общая постановка задачи, формальное описание алгоритма и пример решения конкретной задачи оптимизационного анализа пространственно-временной структуры. Там же был отмечен тот факт, что численное решение задачи оптимизационного анализа, основанное на многократном решении обратных задач, сводится к решению большого числа однотипных маленьких задач. Это давало возможность предполагать, что подход, предложенный в [1], может быть реализован в режиме параллельных вычислений на основе идеологии многозадачного параллелизма. Данная работа является продолжением работы [1] и представляет опыт реализации расчета задачи оптимизационного анализа в параллельном режиме.

Рассматриваемый приближенный подход оптимизационного анализа [1] предназначен для быстрой оценки зависимости управляющего нестационарным явлением параметра от определяющих параметров задачи. Проводится многократное решение обратных задач и получается искомая зависимость в виде многомерного массива данных. С точки зрения решения оптимизационных задач данный подход является модификацией метода исследования пространства параметров (ИПП) [2]. Обработка, анализ и визуализация данного массива помогают понять характер зависимости и аппроксимировать эту зависимость простыми геометрическими элементами, имеющими аналитическое выражение. К числу преимуществ такого приближенного подхода следует отнести быстроту и возможность реализации на достаточно грубых сетках. Из сути самого подхода следует тот факт, что весь подход применяется в определенных диапазонах изменения определяющих параметров задачи. Следовательно, результаты, полученные с его помощью, относятся не к конкретной задаче, а к классу задач. Так как подход инвариантен относительно моделируемого явления и алгоритма численного решения, то он может применяться там, где есть необходимость анализа условий возникновения события, т.е. в широком круге вычислительных задач в различных прикладных областях. Реализация приближенного подхода [1] в параллельном режиме позволяет получить быстрое и эффективное средство анализа и оценки нестационарных явлений в широком спектре прикладных задач.

1. Общая постановка задачи оптимизационного анализа. На практике, исследуя с помощью численного или экспериментального моделирования то или иное явление, мы, как правило, знаем причину возникновения явления и управляющий этой причиной количественный параметр (управляющий параметр) x. Исследование стремится к численному или экспериментальному установлению зависимостей управляющего параметра от определяющих параметров $(x_1,...,x_n)$ задачи. Построение подобных зависимостей в квазианалитическом или табличном виде является практической целью исследования.

Предположим, что имеется математическая модель нестационарного процесса и надежный численный метод для решения этой модели. В этом случае мы можем решать прямую задачу численного моделирования нестационарного процесса. Допустим, что в моделируемом процессе происходит некое событие (явление, эффект). Численное решение $F = F(x,x_1,...,x_n)$ выбранной задачи формируется в процессе математического моделирования и определяется управляющим параметром и конечным набором определяющих параметров задачи. Обозначим $\overline{X} = (x,x_1,...,x_n)$ и введем *функционал события* $\Phi(F(\overline{X}))$, который при решении задачи принимает, подобно логической переменной, два значения: 1 – если событие, интересующее исследователя, наступило (независимо от рода события) и 0 – если событие не наступило:

$$\Phi(F(\overline{X})) = 0 \text{ – событие не наступило;} \quad (1)$$
$$\Phi(F(\overline{X})) = 1 \text{ – событие наступило.}$$

Тогда общую постановку задачи можно сформулировать следующим образом: найти все значения определяющих параметров $(x_1,...,x_n)$, при которых в рассматриваемом классе задач наступает интересующее событие, т.е. выполняется условие

$$\Phi(F(\overline{X})) = 1. \quad (2)$$

Пусть x' – значение управляющего параметра, при котором наступает изучаемое явление. Тогда наша реальная задача состоит в том, чтобы, варьируя управляющий параметр, отыскать с приемлемой точностью значение x'.

В итоге мы получаем одно значение $x'(x_1^*,...,x_n^*)$ для управляющего параметра при фиксированных определяющих параметрах. Но задача исследования в целом состоит в том, чтобы построить зависимость $x'(x_1,...,x_n)$ для всех возможных значений определяющих параметров. Таким образом, если мы имеем в диапазоне разбиения каждого определяющего параметра M точек, то для того чтобы найти значения x' управляющего параметра для всех наборов $(x_1^*,...,x_n^*)$, необходимо решить M^n однотипных задач вида (2).

Рассматривая $(x_1,...,x_n)$ как набор базисных векторов, можно представить пространство определяющих параметров $L(x_1,...,x_n)$, имеющее размерность n.

Тогда в общем случае задачу оптимизационного анализа можно сформулировать как нахождение в пространстве L всех подобластей L^*, где наблюдается изучаемое событие, т.е. $\Phi(L^*)=1$.

Попутно решается задача фильтрации тех точек пространства определяющих параметров, где ожидаемое событие не наступает. Мы не можем гарантировать при выборе диапазона изменения определяющих параметров, что искомое событие наступит в каждой точке внутри выбранного диапазона. Поэтому, если для конкретной точки $(x_1,...,x_n)$ пространства определяющих параметров для любых значений управляющего параметра x событие не наступает, данная конкретная точка изымается из рассмотрения.

Общий алгоритм решения задачи оптимизационного анализа в последовательном режиме вычислений выглядит следующим образом. На предварительном этапе задается сеточное разбиение пространства определяющих параметров (ОП), формируя всевозможные фиксированные наборы ОП $(x_1^*,...,x_n^*)$. Далее в цикле по всем заданным наборам $(x_1^*,...,x_n^*)$ для каждого набора проводится решение обратной задачи (ОЗ). Обратная задача для каждого набора решается путем вариации управляющего параметра x, вплоть до нахождения с заданной точностью значения x', т.е. наступления искомого события. В процессе вариации управляющего параметра x на каждом шаге решается прямая задача моделирования при заданном значении x. В результате работы алгоритма формируется многомерный массив результатов, представляющий собой дискретную зависимость $x'(x_1,...,x_n)$. Далее к массиву результатов применяются методы анализа многомерных данных, методы понижения размерности, алгоритмы визуального представления и.т.д.

Согласно [1], для решения массы однотипных задач с варьирующимися входными параметрами логично использовать параллельные вычисления. Наиболее простым и эффективным способом распараллеливания вышеописанного алгоритма является организация параллельных расчетов однотипных ОЗ с разными фиксированными наборами ОП по принципу «один вариант ОП – один процессор».

Так как процессы решения ОЗ происходят фактически без обменов информацией между процессорами, распараллеливание здесь сводится к организации интерфейса, управляющего распределением вариантов по процессорам и сбором данных в единый массив результатов. Это позволяет ускорить расчет во столько раз, сколько процессоров может быть выделено одновременно. Таким образом, идеология параллельных вычислений в данном случае принимает форму «многозадачного параллелизма».

2. Практическое применение и результаты расчетов. Данный подход к организации параллельного расчета был применен к конкретной задаче о нестационарном взаимодействии сверхзвуковых струй [1]. В качестве события рассматривалось возникновение новой пространственно-временной структуры течения (ПВС), в качестве управляющего параметра использовалась скорость повышения нерасчетности струи V^*, а в качестве определяющих параметров были выбраны характерные числа Маха, Рейнольдса, Прандтля и Струхаля $(M_\infty, \mathbf{Re}_\infty, \mathbf{Pr}_\infty, Sh_\infty)$ для данной задачи. Рассматривались разбиения ОП по 10 точек на каждый определяющий параметр в диапазоне его изменения, что вело к необходимости расчета 10 000 обратных задач соответственно. Для проведения расчетов использовался вычислительный комплекс К100. При организации интерфейса для управления параллельным расчетом использовалась технология MPI. В результате расчетов был получен 4-мерный массив результатов $V^*(M_\infty, \mathbf{Re}_\infty, \mathbf{Pr}_\infty, Sh_\infty)$. К полученному дискретному массиву были применены методы анализа данных и визуального представления, что позволило понизить его размерность. На рис. 1 представлена зависимость $V^*(M_\infty, \mathbf{Pr}_\infty, Sh_\infty)$ в виде изоповерхностей.

По виду изоповерхностей можно предположить, что для целей грубой усредненной оценки искомую зависимость можно представить в виде плоскости, что позволяет получить квазианалитическое выражение для усредненной оценки зависимости критической скорости повышения нерасчетности от определяющих параметров задачи:

$$V^* = V^*(M_\infty, \mathbf{Pr}_\infty, Sh_\infty) = -0.1M_\infty + 0.115\,\mathbf{Pr}_\infty + 0.24Sh_\infty$$

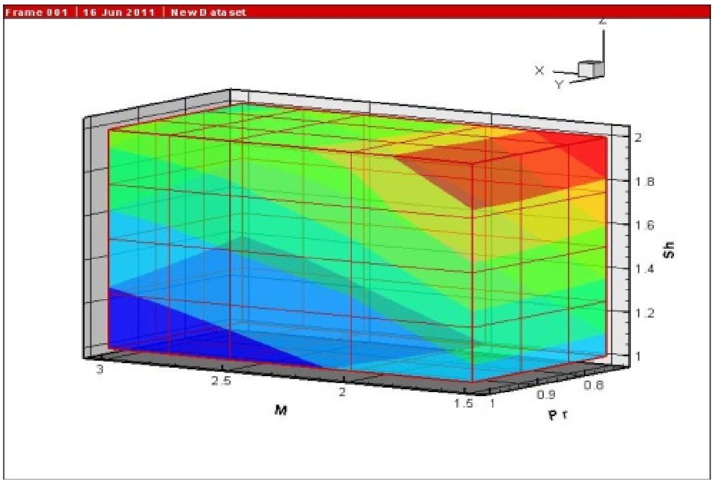

Рис. 1. Зависимость $V^*(M_\infty, \mathbf{Pr}_\infty, Sh_\infty)$

Заключение. Предложенный в работе [1] подход к решению задачи оптимизационного анализа реализован в параллельном алгоритме как многозадачный расчет. Реализация такого вида распараллеливания полностью инвариантна относительно алгоритмов как решения прямой задачи моделирования, так и обратной задачи. Следовательно, подобный подход может быть использован для решения задачи об оптимальных условиях возникновения нестационарных явлений в широком круге областей как быстрое и эффективное средство анализа и оценки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Бондарев А.Е.* Оптимизационный анализ нестационарных пространственно-временных структур с применением методов визуализации // Научная визуализация. – 2011. – № 2. – С. 1-11.

2. *Соболь И.М., Картышов С.В., Кульчицкая И.А., Левитан Ю.Л.* О многокритериальной оптимизации математических моделей // Математическое моделирование. – 1994. – № 6. – С. 85-93.
3. *Бондарев А.Е.* Решение задачи оптимизационного анализа с помощью параллельных вычислений // Новые информационные технологии в автоматизированных системах: Материалы пятнадцатого научно-практического семинара. – М.: МГИЭМ, 2012. – С. 89-94.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н. А.К. Алексеев.

Бондарев Александр Евгеньевич – Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН; e-mail: bond@keldysh.ru; 125047, г. Москва, Миусская пл., 4; тел.: 84992507817; отдел № 2; старший научный сотрудник; к.ф.-м.н.

Bondarev Alexander Evgen'evich – Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS; e-mail: bond@keldysh.ru; 4, Miusskaya sq., Moscow, 125047, Russia; phone: +74992507817; department № 2; senior researcherэ; dr. of phis.-math. sc.

УДК 519.688

С.В. Поляков, Ю.Н. Карамзин, О.А. Косолапов, Т.А. Кудряшова, С.А. Суков

ГИБРИДНАЯ СУПЕРКОМПЬЮТЕРНАЯ ПЛАТФОРМА И РАЗРАБОТКА ПРИЛОЖЕНИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МЕХАНИКИ СПЛОШНОЙ СРЕДЫ СЕТОЧНЫМИ МЕТОДАМИ[*]

Рассмотрена проблема разработки параллельных приложений для решения задач механики сплошной среды на современных вычислительных системах с гибридной архитектурой, включающей центральные и графические процессоры. Для их решения сформулирована концепция гибридных параллельных вычислений, включающая анализ особенностей гибридного вычислителя и его программного оснащения, а также предложения по реализации параллельных программ. В частности, предложены три основные модели параллельных вычислений, использующие графические вычислители эпизодически, постоянно или в тесной связке с центральными процессорами. Также рассмотрены специфические проблемы реализации сеточных численных алгоритмов на гибридных вычислителях. Приведён пример реализации конечно-объёмной схемы на неструктурированной сетке при решении систем уравнений Эйлера и Навье–Стокса на графическом ускорителе.

Механика сплошной среды; математическое моделирование; численные подходы на основе метода сеток; параллельные алгоритмы; комплексы программ для гибридных вычислительных систем.

S.V. Polyakov, Yu.N. Karamzin, O.A. Kosolapov, T.A. Kudryashova, S.A. Soukov

HYBRID SUPERCOMPUTER PLATFORM AND APPLICATIONS PROGRAMMING FOR THE SOLUTION OF CONTINUOUS MECHANICS PROBLEMS BY GRID METHODS

The developing of parallel applications for the solution of continuum mechanics problems on modern computer systems with hybrid architecture (including the central and graphical processors) was considered. For the solving of the problem the conception of hybrid parallel computations was formulated. This conception includes the analysis of both architecture of modern hybrid computer and its software and the special ways for the construction of parallel programs. In particular, three main models of the parallel calculations, using graphic processors incidentally, constantly or in a close sheaf with the central processors were offered. Specific problems of reali-

[*] Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 11-01-12086-офи-м, 12-01-00339, 12-01-00345).