

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Морозова Александра Юрьевича на тему «Алгоритмы адаптивной интерполяции для моделирования динамических систем с интервальными параметрами», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Актуальность темы диссертационного исследования

При исследовании прикладных задач химической кинетики, газовой динамики и небесной механики часто коэффициенты (параметры) моделей могут быть известны неточно, заданы границы интервалов, которым принадлежат коэффициенты (параметры) этих моделей. Моделирование динамических систем с неточно заданными (интервальными) параметрами является целью этой диссертационной работы. Для этих моделей необходимо вычислять гарантированные двусторонние оценки решений, при этом устранить экспоненциальное взаимное расхождение найденных границ. Следует отметить, что экспоненциальный рост границ оценок практически всегда сопровождается применением интервальных методов на основе интервальной арифметики, удовлетворяющей свойству монотонности по включению, при вычислении двусторонних оценок решений подобных задач. Этот экспоненциальный рост границ получил название эффекта обертывания. В диссертации развивается практический подход адаптивной интерполяции и алгоритмы его реализации на основе kd-дерева, что позволяет минимизировать границы двусторонних оценок и устранить влияние эффекта обертывания для многих задач. Поэтому результаты диссертации актуальны и имеют большое практическое значение.

Содержание работы

Во введении раскрывается актуальность диссертационного исследования. Дается обзор существующих методов и их программных реализаций. Описываются цели работы, методы исследования, научная новизна, практическая значимость и личный вклад автора.

В первой главе приводится описание интервальной арифметики и ее ключевых особенностей. Выполняется постановка задачи. Разрабатывается алгоритм адаптивной интерполяции на основе kd-дерева, и описываются его основные нюансы, а именно подходы к оценке погрешности и принципы перестроения дерева. Выполняется обоснование алгоритма: для одного дифференциального уравнения, строится теоретическая оценка погрешности алгоритма. Доказывается линейная зависимость оценки погрешности от высоты дерева. На обширном наборе задач, содержащих различное количество неточно заданных (интервальных) параметров, производится сравнение алгоритма адаптивной интерполяции с методом Монте-Карло.

Во второй главе автор описывает разработанный программный комплекс, который содержит реализацию алгоритма адаптивной интерполяции с использованием технологии CUDA. В начале главы приводится информация о программно-аппаратной архитектуре параллельных вычислений CUDA. Далее выполняется постановка задачи моделирования динамических систем с интервальными параметрами на графических процессорах. Описываются основные моменты по распараллеливанию и реализации каждого из этапов алгоритма: обновление узлов интерполяционных сеток, вычисление погрешности интерполяции, разбиение и удаление вершин, а также описываются используемые структуры данных. Оценивается эффективность распараллеливания: замеряется время работы каждого этапа алгоритма с применением распараллеливания и без него.

Третья глава посвящена описанию существующих методов и их программных реализаций, а также сравнению с разработанным алгоритмом адаптивной интерполяции. В первом разделе описываются методы, основанные на рядах Тейлора: метод Мура, метод параллелепипедов и QR-метод Лонера. Приводится основная информация о некоторых программных библиотеках (AWA и VNODE-LP). Во втором разделе раскрываются методы модели Тейлора, основанные на символьных вычислениях. Дается описание общедоступных программных реализаций этих методов (библиотеки COSY Infinity, RiOT и FlowStar). В третьем разделе выполняется сравнение существующих методов с алгоритмом адаптивной интерполяции на разнообразных модельных задачах.

В четвертой главе рассматриваются различные прикладные и исследовательские задачи. В первом разделе исследуются динамические системы, в которых имеют место бифуркации и хаос: осциллятор Ван дер Поля, осциллятор Дуффинга и атмосферная модель Лоренца. Во втором разделе выполняется расчет трубки траекторий для астероида FX11, положение и скорость которого известны неточно. Производится сравнение с результатами, приведенными в зарубежных работах. Третий раздел посвящен

моделированию газофазных химических превращений в условиях неопределенности констант скоростей химических реакций. Отдельно рассматриваются химические неравновесные течения в сопле. Исследуется влияние неопределенностей на параметры установившегося течения.

В заключении перечисляются основные результаты исследования.

Апробация работы и публикации

Работа прошла апробацию на десяти международных конференциях. Все основные результаты изложены в трех публикациях в журналах, входящих в перечень ВАК и в международные базы цитирования, такие как WoS и Scopus. Автором получено свидетельство о регистрации программного обеспечения.

Основные научные результаты

1. Предложен новый эффективный подход к моделированию динамических систем с интервальными параметрами, основанный на иерархическом разбиении области неопределенности параметров. Разработан и обоснован алгоритм адаптивной интерполяции на основе kd-дерева. Сформулированы и доказаны утверждения относительно условий его применимости и погрешности.
2. Разработан программный комплекс с использованием технологии CUDA, включающий параллельную реализацию алгоритма адаптивной интерполяции. Произведено сравнение с существующими программными библиотеками, которое показало превосходство предложенного в работе алгоритма и его реализации по точности и вычислительным затратам.
3. С помощью разработанного программного комплекса решены практические задачи химической кинетики, газовой динамики и небесной механики. Выполнено исследование влияния неопределенностей значений констант скоростей химических реакций на структуру детонационной волны, а также на параметры установившегося течения в сопле.
4. На основе качественного анализа изменений адаптивного разбиения получающегося в процессе работы алгоритма предложен подход идентификации режимов, возникающих в динамической системе.

Степень обоснованности и достоверности научных положений и выводов

Для разработанного метода сформулированы и строго доказаны утверждения относительно условий его применимости, сходимости и погрешности. Решено большое количество разнообразных задач (как модельных, так и прикладных), содержащих интервальные неопределенности, что подтверждает эффективность предложенного в работе подхода. Достоверность научных положений и выводов не вызывает сомнений.

Теоретическая и практическая значимость работы

Получены теоретические оценки для погрешности предложенного в работе алгоритма. Показана связь между погрешностью и высотой kd-дерева.

Предложенный в работе подход успешно применен для решения практических задач авиационной и ракетно-космической отрасли. Выполнено моделирование химических неравновесных течений с неопределенностями в константах скоростей реакций.

Замечания по диссертационной работе

По диссертационной работе имеются следующие замечания:

1. В первой главе, при описании алгоритма адаптивной интерполяции, отсутствуют рекомендации по выбору шага дискретизации, с помощью которого выполняется перестроение дерева.
2. В третьей главе, в третьем разделе, при сравнении разработанного алгоритма и его реализации с существующими программными средствами, для системы ОДУ (3.3) не была оценена работы библиотеки программ RiOT, в отличие от систем (3.1) и (3.2). Также стоит отметить, что для некоторых приведенных примеров достаточно рассмотреть только границу множества решений.
3. В четвертой главе не для всех задач указаны параметры, при которых выполнялись расчеты.

Указанные замечания не снижают значимости результатов диссертационной работы.

Заключение

Диссертационная работа А. Ю. Морозова выполнена на достаточно высоком научном уровне. Результатом работы является решение важных задач, в которых какие-либо параметры точно не известны, но известны диапазоны, в которых находятся их

значения. Такие задачи необходимо решать в механике, химической кинетике, газовой динамике и других отраслях научного знания и техники. Приведенные результаты являются новыми, обоснованными и имеющими большое практическое и научное значение.

Диссертация написана грамотно и аккуратно оформлена. Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

Работа отвечает требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (Постановление Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Морозов Александр Юрьевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Официальный оппонент,

кандидат физико-математических наук, доцент,

старший научный сотрудник ИВМ СО РАН, г. Красноярск,

Рогалев Алексей Николаевич

660036, Красноярск, Академгородок, д. 50, стр. 44

Тел.: 8 962 074 52 81

Email: rogalov@icm.krasn.ru

Подпись старшего научного сотрудника

к. ф.-м. н. А. Н. Рогалева ЗАВЕРЯЮ

