

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Морозова Александра Юрьевича «Моделирование динамических систем с интервальными параметрами», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Актуальность темы диссертационного исследования

Задачи с неточно заданными данными типичны для всех современных отраслей науки и техники, включая авиационную и ракетно-космическую отрасли. В динамических системах проблемы неопределенностей исходных данных особенно ярко проявляются в задачах химической кинетики. Константы скоростей химических реакций определяются экспериментальными методами. Разброс в значении константы скорости для одной и той же реакции может отличаться в десятки раз.

Одним из способов работы с неточными данными является интервальный анализ. Существующие интервальные методы, дают, как правило, сильно завышенные оценки и не всегда применимы к нелинейным задачам. В связи с этим для динамических систем с интервальными параметрами существует потребность в эффективных подходах и алгоритмах моделирования и параметрической идентификации, чему и посвящена данная диссертационная работа.

Содержание работы

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

В первой главе выполняется постановка прямой задачи моделирования динамических систем с интервальными параметрами. Описывается интерполяционный подход и алгоритм адаптивной интерполяции на основе kd-дерева для решения поставленной задачи. Приводятся и доказываются несколько утверждений относительно характеристик алгоритма. Выполняется оценка сложности алгоритма. На обширном наборе задач, содержащих различное количество интервальных параметров, производится сравнение алгоритма

адаптивной интерполяции с методом Монте-Карло по точности и вычислительным затратам.

Во второй главе разрабатывается вариант алгоритма адаптивной интерполяции на основе использования разложения в тензорный поезд для решения задач моделирования динамических систем с большим количеством интервальных параметров. Это позволяет ослабить основные ограничения интерполяционного подхода, описанного в первой главе, связанные со свойствами многомерных пространств. Рассматриваются вопросы распараллеливания алгоритма TT-cross, который позволяет строить разложение в тензорный поезд на графических процессорах без необходимости вычисления всех элементов исходного многомерного тензора. Представлена апробация разработанного варианта алгоритма на нескольких тестовых задачах. Показано, что решение одной из рассмотренных задач было бы фактически невозможно без использования разложения в тензорный поезд.

В третьей главе описан вариант алгоритма адаптивной интерполяции на основе разреженных сеток для решения задач моделирования динамических систем с небольшим и средним количеством интервальных параметров. Рассмотрены разреженные сетки с линейным и нелинейным базисом. Сформулирована и доказана теорема о прямо пропорциональной зависимости глобальной погрешности алгоритма от уровня разреженной сетки. Представлены основные аспекты и особенности распараллеливания и реализации данного варианта алгоритма с использованием OpenMP. Показано, что в большинстве случаев вариант алгоритма адаптивной интерполяции на основе разреженных сеток эффективнее классического варианта.

В четвертой главе автор описывает реализацию классического варианта алгоритма адаптивной интерполяции с использованием технологии CUDA. Показаны основные моменты по распараллеливанию и реализации каждого из этапов алгоритма: обновление узлов интерполяционных сеток, вычисление погрешности интерполяции, разбиение и удаление вершин в kd-дереве, а также описываются используемые структуры данных. Далее приводится описание существующих методов и программных библиотек (AWA, VNODE-LP, COSY Infinity, RiOT, FlowStar и Verifyode (INTLAB)) и выполняется их сравнение с алгоритмом адаптивной интерполяции и его вариантами.

В пятой главе представлен интервальный подход к решению задачи параметрической идентификации, который основан на алгоритме адаптивной интерполяции. Рассмотрены постановки задачи интервальной параметрической идентификации для точечных и интервальных экспериментальных данных. Для

всех постановок задач приведена целевая функция, минимизация которой эквивалентна решению исходной задачи. Сформулированы и доказаны две теоремы: о переходе от интервальных экспериментальных данных к точечным данным и о ширине получаемых интервальных оценок. Для эффективной минимизации целевой функции разработан алгоритм подвижного окна, который относится к градиентным методам. Представлены основные аспекты и особенности распараллеливания и программной реализации подхода. Успешно выполнена апробация разработанного подхода на наборе задач, содержащих разное количество неизвестных величин.

В шестой главе рассматриваются различные прикладные и исследовательские задачи. Сначала приводится описание разработанного программного комплекса, реализующего адаптивную интерполяцию и параметрическую идентификацию. Во втором разделе выполняется расчет интервального тензора напряжений материалов с ковалентной химической связью. В третьем разделе исследуются динамические системы, в которых имеют место бифуркации и хаос: осциллятор Ван дер Поля, осциллятор Дуффинга и атмосферная модель Лоренца. В четвертом разделе выполняется расчет трубки траекторий для астероида FX11, положение и скорость которого известны неточно. Производится сравнение с результатами, приведенными в зарубежных работах. В пятом, шестом и седьмом разделах рассматриваются задачи химической кинетики. Сначала выполняется моделирование химических превращений с интервальными неопределенностями в константах скоростей реакций. Далее решается задача идентификации интервальных констант скоростей химической реакции окисления нафталина. В седьмом разделе выполняется моделирование химических неравновесных течений в сопле. Исследуется влияние неопределенностей на параметры установившегося течения. Восьмой раздел посвящен задачам, которые содержат дробно-дифференциальные уравнения. Решается прямая и обратная задача для уравнения аномальной диффузии. В девятом разделе выполняется построение и параметрическая идентификация интервальных моделей мемристоров по экспериментальным данным.

В заключении сформулированы основные положения диссертационной работы, выносимые на защиту.

Апробация работы и публикации

Работа прошла апробацию на 21 международной конференции. Все основные результаты изложены в 21 публикации в журналах, входящих в перечень

ВАК или в международные базы цитирования, такие как WoS и Scopus. Автором получено 2 свидетельства о регистрации программного обеспечения. Опубликовано 1 рецензируемая монография.

Основные научные результаты

К числу наиболее существенных научных результатов, полученных в диссертации, на мой взгляд, относятся:

1. Интерполяционный подход к решению задач моделирования динамических систем с интервальными параметрами.
2. Алгоритмы адаптивной интерполяции на основе разреженных сеток и тензорных поездов, которые позволяют заметно ослабить «проклятие размерности» при решении задач с большим количеством интервальных параметров.
3. Интервальный метод решения задач параметрической идентификации динамических систем, основанный на нахождении прообраза экспериментальных данных в пространстве параметров.
4. Алгоритм подвижного окна для параметрической идентификации динамических систем с прямоугольными и эллипсоидными областями неопределенности параметров, который позволяет избежать разрастания границ решения.
5. Интервальные вычислительные модели, которые позволяют решить ряд задач из области вычислительного материаловедения, химической кинетики, газовой динамики, небесной механики, микроэлектроники и др.

Степень обоснованности и достоверности научных положений и выводов

Обоснованность и достоверность научных положений, основных выводов и результатов диссертации обеспечивается за счет использования методов математического и интервального анализа, теории численных методов и дифференциальных уравнений. Сформулированы и строго доказаны утверждения и теоремы относительно разработанных алгоритмов. Решено большое количество как модельных, так и прикладных задач, содержащих интервальные неопределенности. Полученные результаты согласуются с результатами, полученными с использованием других методов и программных комплексов. Обоснованность и достоверность научных положений и выводов не вызывает сомнений.

Научная и практическая значимость работы

Разработанные в диссертации подходы и алгоритмы могут применяться для решения ряда актуальных практических и исследовательских задач из различных областей. В частности, разработанные алгоритмы успешно применены для решения практических задач авиационной и ракетно-космической отрасли. Выполнено моделирование химических неравновесных течений с неопределенностями в константах скоростей реакций. Получены теоретические результаты относительно созданных алгоритмов.

Замечания по диссертационной работе

По диссертационной работе имеются следующие замечания:

1. В заключении (п.2) говорится, что алгоритмы адаптивной интерполяции на основе тензорных поездов позволяют преодолеть «проклятие размерности». Это не совсем точно, так как используемая в работе для построения тензорного поезда крестовая аппроксимация позволяет ослабить «проклятие размерности», но полностью его не преодолевает, так как использует матризацию многомерного тензора. Для полной реализации возможностей тензорного поезда необходима разработка других алгоритмов.
2. Часть используемых обозначений является недостаточно удобной. Например, в уравнениях (1.3), (5.1) один и тот же индекс i использован в двух разных смыслах, что затрудняет чтение.

Указанные замечания не снижают общего положительного впечатления о диссертационной работе и носят рекомендательный характер.

Заключение

Диссертация А. Ю. Морозова «Моделирование динамических систем с интервальными параметрами» является законченной научно-исследовательской работой, выполненной на высоком научном уровне, в ходе которой автором разработаны эффективные подходы и алгоритмы, а также их программные реализации для моделирования и параметрической идентификации динамических систем с интервальными параметрами. Построены интервальные вычислительные модели, которые позволяют решить ряд актуальных и практических задач из области вычислительного материаловедения, химической кинетики, газовой динамики, небесной механики, микроэлектроники и др. Содержащиеся в диссертации выводы и новые научные результаты являются в достаточной мере обоснованными и их можно считать крупным научным достижением в области моделирования динамических систем с интервальными параметрами. Работа

полностью соответствует паспорту специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

В диссертации корректно указаны ссылки на использованные источники, автореферат полностью соответствует содержанию диссертации и отражает основные результаты работы.

Представленная работа «Моделирование динамических систем с интервальными параметрами» удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к докторским диссертациям, включая п.п. 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденный постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842. Считаю, что ее автор, Морозов Александр Юрьевич, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, доцент,

главный научный сотрудник отдела

аэрогазодинамики

ПАО «РКК «Энергия»



Алексеев Алексей Кириллович

27 февраля 2024 г

141070, Московская область, г. Королёв, ул. Ленина, д. 4А

Тел. +7(495) 513-68-19

Подпись Алексеева Алексея Кирилловича удостоверяю

Ученый секретарь ПАО «РКК «Энергия»,

доктор физико-математических наук



Хатунцева Ольга Николаевна