

64-я научная конференция МФТИ

29 ноября – 3 декабря 2021 года, Москва



KIAM Astrodynamics Toolbox 2.0 для проектирования космических миссий

М.Г. Широбоков

Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН

Содержание

- Мотивация и цель создания тулбокса
- Возможности и структура тулбокса
- Новое в версии 2.0
- Справочная информация и версии для распространения
- Будущее проекта
- Заключение

Мотивация и цель создания тулбокса

- Сложные проекты с индустрией и составные методы проектирования траекторий в сложных средах
- Цель – разработать высокоуровневый программный инструментарий, который бы позволял:
 - Проводить быстрый анализ траекторий
 - Быстро строить картинки хорошего качества
 - Быстро переключаться между различными способами описания траекторий

Возможности и структура тулбокса

- Низкоуровневые инструменты
 - Уравнения движения, возмущения
 - Методы интегрирования ОДУ
 - Простейшие численные методы оптимизации
 - Функции преобразования
 - Инструменты общего назначения
- Высокоуровневые инструменты
 - Классы Trajectory и Model

Недостатки первой версии

- Функция `planetEphemeris` из MATLAB очень медленная, использовать ее в уравнениях движения невозможно
- Можно использовать сплайны, но на больших интервалах интегрирования обращение к ним отнимает много времени
- Компиляция уравнений движения в MEX-файлы спасает ситуацию только на малых интервалах времени
- Отсутствует преобразование матрицы перехода при преобразовании переменных или систем координат

Новое в версии 2.0

- Внедрена библиотека MICE агентства NASA/NAIF
- Реализовано интегрирование уравнений движений на языке Fortran
- Тулбокс полностью избавлен от сплайнов
- Добавлена система координат SORS
- Добавлены преобразования матрицы перехода при преобразовании переменных и систем координат
- Добавлены методы проектирования специальных классов орбит: гало-орбиты, плоские и вертикальные орбиты Ляпунова и орбиты Лиссажу вокруг коллинеарных точек либрации системы Земля-Луна
- Добавлены новые вспомогательные функции, например функция генерации равномерно распределенных на сфере точек

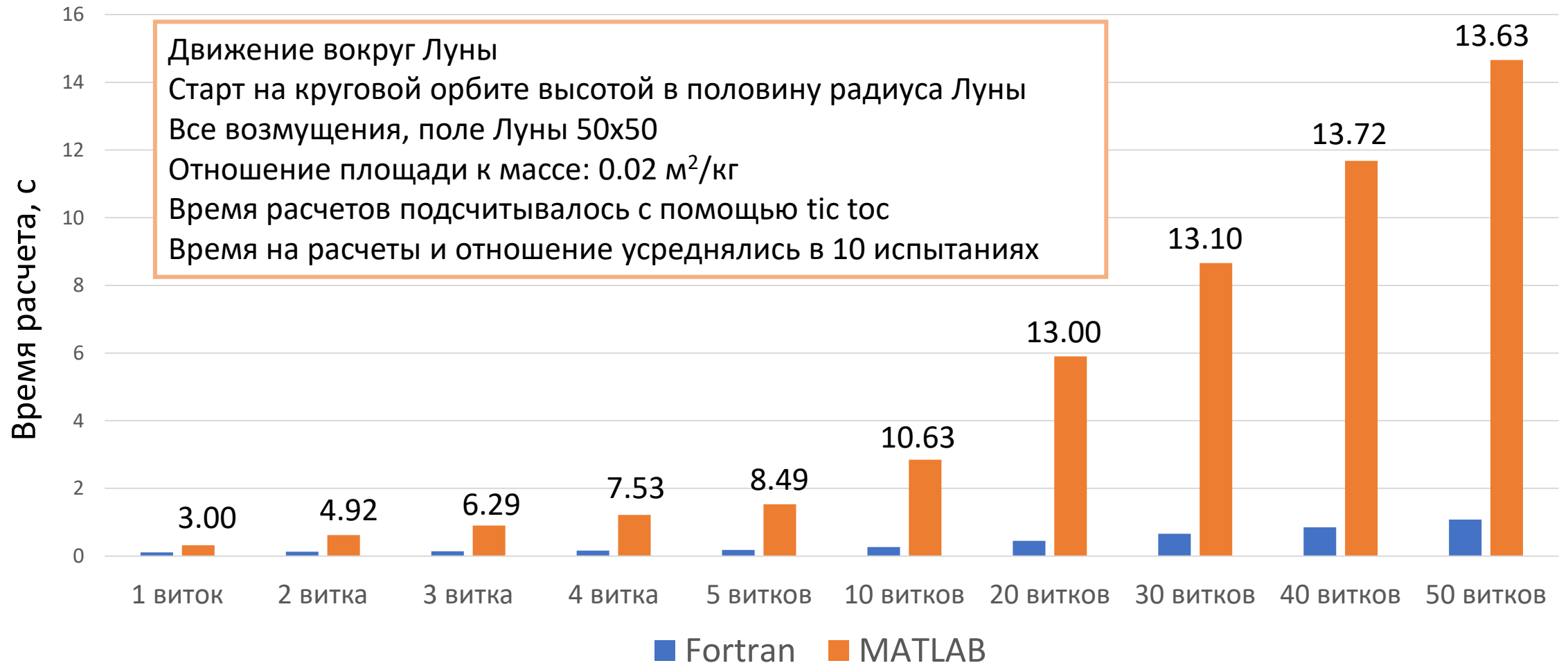
Библиотека MICE от NASA/NAIF

- Изначально доступна по ссылке:
https://naif.jpl.nasa.gov/naif/toolkit_MATLAB.html
- В тулбоксе библиотека установлена и настроена
- Функции тулбокса kplanetEphemeris и kmoonLibration заменяют функции MATLAB planetEphemeris и moonLibration
- Используются эфемериды DE430 и DE440, нацеленные на высокоточное определение движение у Луны
- Процедуры MICE, к которым обращаются эти функции, запускают MEX-файл, скомпилированный на языке низкого уровня
- Библиотека дала существенный выигрыш в скорости даже по сравнению со сплайнами – скорость интегрирования низких окололунных траекторий увеличилась более чем в 3 раза

Интегрирование уравнений движение на Fortran

- Уравнения возмущенного движения вокруг Земли и Луны вместе с интегратором написаны на языке Fortran
- Декартовы координаты и равноденственные элементы
- Уравнения в вариациях
- Все те же возмущения, что в MATLAB-версии
- Программа интегрирования скомпилирована в exe-файл, который имеет входные аргументы:
 - Центральное тело (Земля или Луна)
 - Интервал интегрирования
 - Начальное состояние
 - Список возмущающих факторов
 - Необходимость в матрице перехода
- Подготовлены для удобства функции на MATLAB, которые формируют список аргументов для exe-файла, запускают его и получают выход

Ускорение времени распространения траектории за счет Fortran (без уравнений в вариациях)



Преобразование матриц перехода

Преобразования декартовых координат в классические и равноденственные орбитальные элементы, а также преобразования систем координат между SORS, SCRS и PA описываются формулой

$$\frac{\partial \mathbf{y}_t}{\partial \mathbf{y}_0} = \frac{\partial \mathbf{y}_t}{\partial \mathbf{x}_t} \frac{\partial \mathbf{x}_t}{\partial \mathbf{x}_0} \left(\frac{\partial \mathbf{y}_0}{\partial \mathbf{x}_0} \right)^{-1}$$

где $\mathbf{y} = \mathbf{y}(\mathbf{x})$ – зависимость новых переменных от старых, не важно происходит ли преобразование переменных или преобразование системы координат

Справочная информация

- На Notion создана страница с описанием тулбокса, ссылку можно найти на главной странице сайта нашего коллектива:

<https://keldysh.ru/microsatellites/>

- Там можно найти список всех инструментов, их краткое описание, полное описание синтаксиса классов Trajectory и Model, а также некоторые примеры использования этих классов и других инструментов
- Тулбокс доступен в двух версиях: базовая и полная
 - Полная – только для сотрудников нашего коллектива, содержит все
 - Базовая – свободное распространение, но не содержит некоторые инструменты, либо имеет скрытый код

Участие в разработке

- Текущие разработчики: Широбоков М.Г., Трофимов С.П.
- Приглашаю к участию в наполнении и сопровождении тулбокса
- Наиболее критическая ситуация – нужна справка почти по всем инструментам, комментарии в начале файла, типичные примеры использования
- На сайте Notion будут размещены правила для оформления кода и подготовки справки
- По всем вопросам обращаться ко мне

Будущее проекта

- KIAM Astrodynamics Toolbox как экспертная система
- Знания выражаются в алгоритмах и инструментах
- Переход от императивного программирования к декларативному
- Разработана и находится на этапе реализации система обработки естественного языка пользователя и запуска последовательности команд на основе его запроса
- Система будет способна выдавать последовательность исполненных команд и таким образом будет объяснять свой вывод

Заключение

- Проект активно развивается, это сопряжено с появлением новых сложных задач и стремлением работать на высоком уровне абстракции
- В новой версии решена проблема производительности распространения траекторий на больших интервалах времени путем перехода к другим функциям расчета эфемерид и реализации процедур на языке Fortran
- Развивается сайт проекта на Notion, там можно найти много информации
- Начался новый большой и интересный этап разработки тулбокса и превращения его в экспертную систему