

Создание базы данных межпланетных траекторий на многопроцессорных вычислительных системах*

М.Г. Ширококов, С.П. Трофимов, М.Ю. Овчинников

Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН

В настоящее время многопроцессорные вычислительные системы (МВС) используются практически во всех областях науки и техники. С их помощью удается решить многие задачи динамики жидкости и газа, аэроакустики, задачи вычислительной химии и вычислительной биологии, моделирования глобальных процессов на Земле, прочностного моделирования материалов, моделирования аварийных ситуаций, систем поддержки проектирования, а также задачи бизнес-приложений.

В последние десятилетия повышается роль МВС и в решении задач механики космического полета. С одной стороны, это связано с ростом вычислительных затрат на моделирование орбитальной динамики космических аппаратов вследствие закономерного развития математического инструментария описания движения в рамках модели задачи многих тел. С другой стороны, предварительный анализ любой межпланетной космической миссии предполагает проектирование большого количества альтернативных траекторий, т.е. всестороннее «сканирование» пространства динамических возможностей доставки аппарата к планете-цели для их последующего анализа и отбора на этапе проектирования реальной миссии. Наблюдаемая в последнее время миниатюризация межпланетных космических аппаратов и, как следствие, повышение энергетических и массогабаритных требований к системам управления заставляют проектировщиков миссий искать новые способы проектирования орбит и проводить более глубокий параметрический анализ траекторий.

С точки зрения распараллеливания вычислений, задачи механики космического полета обладают существенно важной особенностью: расчет характеристик одних траекторий перелета может производиться независимо от расчета характеристик других траекторий. Например, межпланетные траектории перелета от Земли до планеты-цели могут рассчитываться независимо друг от друга для каждого набора параметров характеризующих траекторию: даты и времени полета, параметров околоземной и целевой орбиты, параметров двигателей аппарата или параметров схемы перелета. Использование МВС для построения всего набора траекторий представляется поэтому естественным.

К настоящему моменту, авторами работы создан так называемый метод виртуальных траекторий для проектирования межпланетных траекторий с пассивными или активными гравитационными маневрами [1,2]. Суть метода состоит в следующем. Выбирается маршрут перелета – последовательность планет облета, например, Земля–Венера–Юпитер. В рамках модели задачи двух тел орбиты входящих в маршрут планет дискретизируются, т.е. представляются в виде конечного набора узлов. Далее, без привязки к реальному положению планеты на орбите ставится задача поиска всех возможных траекторий перелета между узлами первой планеты маршрута и узлами второй планеты маршрута. Траектории перелета строятся в рамках моделей сопряженных конических сечений и точечных сфер действия и представляют собой дуги эллипсов. Далее строятся траектории перелета между всеми узлами второй планеты маршрута и всеми узлами третьей планеты маршрута. Этот процесс продолжается для всех участков планета-планета. Для траекторий перелета устанавливаются разумные ограничения по длительности перелета и затратам топлива, что помогает отсеять нереализуемые с практической точки зрения случаи. В результате расчетов получается так называемая база виртуальных траекторий. По построению, эти траектории характеризуют все возможные перелеты между орбитами планет маршрута с заданными

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект №17-71-10242).

требованиями. Виртуальными траектории называются потому, что они не привязаны к реальному положению планет на своих орбитах. Для того чтобы эту привязку осуществить, проектировщик миссии может установить интервал дат старта и прилета и отсеять из базы данных траектории, которые не удовлетворяют реальному положению планет на своих орбитах. Далее полученные траектории можно уточнить, выполнив вблизи соответствующих узлов более подробную дискретизацию орбит планет. В работах [1–4] авторы приводят подробное описание алгоритмов метода и доказывают его эффективность в последовательном режиме расчетов на персональном компьютере.

Преимуществом предложенного метода виртуальных траекторий перед другими методами проектирования траекторий с гравитационными маневрами является то, что наиболее ресурсозатратный этап метода (построение базы межпланетных траекторий) для каждого маршрута достаточно выполнить всего один раз. Более того, каждый из этапов метода (построение базы данных, отсеив неподходящих траекторий, уточнение траекторий) может быть эффективно распараллелен, так как представляет собой процедуру независимых вычислений. Создание такой базы данных и реализация вычислений на МВС позволяет быстро и оперативно производить предварительный анализ межпланетных перелетов в Солнечной системе и облегчает проектировщикам миссий анализ альтернатив.

Целью данной работы является реализация метода виртуальных траекторий на гибридном вычислительном кластере К-60 в Институте прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН и оценка эффективности распараллеливания вычислений с помощью распределенных технологий Message Passing Interface (MPI) и Open Multi-Processing (OpenMP). Кластер состоит из 66 вычислительных узлов. Каждый узел представляет собой сервер с двумя процессорами Intel Xeon E5-2690 v4, оперативной памятью 256GB и жестким диском 1TB. Каждый узел работает в гиперпоточном режиме, в результате чего на каждом узле содержится 56 логических процессоров. Опыт распараллеливания метода виртуальных траекторий на персональных компьютерах, использующих технологию гиперпоточности, говорит о высокой эффективности распараллеливания: ускорение достигается во столько раз, сколько логических процессоров присутствует на компьютере. Поэтому одной из целей данной работы является проверка эффективности распараллеливания метода на кластере при разном количестве используемых логических процессоров.

В работе обе технологии, MPI и OpenMP, используются для максимального разделения задачи на независимые части: на разных узлах и в пределах узла на разных процессорах. Обсуждается эффективность использования обеих технологий распараллеливания для решения модельных задач построения траекторий перелета.

Литература

1. Овчинников М.Ю., Трофимов С.П., Широбоков М.Г. Метод виртуальных траекторий для проектирования межпланетных миссий с гравитационными маневрами // Космические исследования. 2013. Т. 51, № 6. С. 484–496. DOI: 10.7868/S0023420613060046
2. Овчинников М.Ю., Трофимов С.П., Широбоков М.Г. Проектирование межпланетных полетов с пассивными гравитационными маневрами с помощью метода виртуальных траекторий // Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. 2013. № 22, 26 с.
3. Ovchinnikov M., Shirobokov M., Trofimov S. Method of Virtual Trajectories for the Design of Gravity Assisted Missions // Academy Transactions Note, Acta Astronautica. 2013. Vol. 91, pp. 137–140. DOI: 10.1016/j.actaastro.2013.06.003
4. Овчинников М.Ю., Трофимов С.П., Широбоков М.Г. Метод виртуальных траекторий для проектирования межпланетных миссий с гравитационными маневрами // Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. 2012. № 9. 26 с.