



Е.Ю. Курапов

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ОТНОСИТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ДВУХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА ОРБИТЕ

(ФГБОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет
им. академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)»)

Неотъемлемой частью исследования космического пространства являются проводимые там научно-исследовательские эксперименты. Проведение экспериментов на орбите невозможно без изучения относительного движения космических аппаратов (КА) на орбите. В частности, одним из экспериментов на орбите, для которого требуется изучение относительного движения, является эксперимент по доставке на Землю полезного груза с помощью тросовой системы.

Тросовая система представляет собой комплекс искусственных космических объектов (космических аппаратов) соединенных длинными тонкими гибкими элементами (тросами). В работе рассматривается искусственный спутник Земли с прикрепленным к нему на тросе малым космическим аппаратом (спускаемой капсулой). Такая система предназначена для доставки полезного груза в заданный район земной поверхности. Для планирования спусков и подбора параметров, необходимых для достижения заданной точности, применяется математическое моделирование, которое позволяет с допустимой погрешностью рассчитать траекторию движения и значения характеристик относительного движения тел, входящих в тросовую систему, на орбите.

Целью данной работы является построение математической модели и анализ относительного движения двух КА на орбите.

Для достижения заданной цели производится построение математической модели относительного пространственного движения двух КА в неподвижной геоцентрической инерциальной системе координат, разрабатывается алгоритм и программа численного интегрирования построенной системы обыкновенных дифференциальных уравнений, проводится анализ относительного движения двух КА, соединенных упругой односторонней связью, различных программ развертывания тросовой системы и влияния условий отделения на реализацию программ развертывания.

Моделирование проводится с помощью специально разработанного программного комплекса, ориентированного на решение конкретной задачи моделирования, включающего настройку начальных параметров моделирования и графического отображение результатов вычислений.

Наиболее общей формой описания движения КА и процесса развертывания троса является система обыкновенных дифференциальных уравнений (ДУ). В описании процесса развертывания троса учитывается управляющая сила, зависящая от выбранной программы развертывания. Управляющая сила является



функцией многих переменных и обычно зависит от времени, текущей и конечной длин троса, скорости разворачивания и, возможно, других параметров.

Для решения полученной системы ДУ необходимо получить вектор начальных условий. Для этого необходимо осуществить пересчет начальных координат и скоростей с учетом взаимного расположения космических аппаратов, их масс и скорости отделения малого КА.

Для интегрирования полученной системы в работе используется метод Рунге-Кутты четвертого порядка точности. Для повышения быстроты расчетов используется алгоритм с переменным шагом интегрирования.

Для проверки математической модели, был проведен ряд вычислений для свободного разворачивания, то есть для тех случаев, когда между КА отсутствует упругая связь. Были построены графики траекторий движения центра масс системы и движения малого КА относительно основного КА. Полученные траектория относительного движения малого КА при разных углах отделения идентичны траекториям, полученным по известному аналитическому решению.

Существующие в настоящее время законы управления разворачивания подразделяются на кинематические и динамические. Динамические законы имеют ряд преимуществ. В качестве примера были рассмотрены два динамических закона изменения натяжения. Близкий к равномерному и близкий к экспоненциальному. Движение по первому закону носит колебательный характер, близкий к равномерному. Второй закон имеет ряд недостатков, делающих его труднореализуемым.

Спуск на Землю привязной капсулы проводится в 3 этапа. Основной задачей на первом этапе является безопасный отвод капсулы от КА на некоторое удаление.

За основу разворачивания для первого участка положен закон, рассмотренный Белецким В.В. [1] Для того, чтобы стабилизировать трос в окрестности линии местной вертикали, малый КА сначала должен пересечь эту линию, а затем вернуться. Таким образом, возникает участок, на котором расстояние между КА уменьшается, что может вызвать провисание троса. Для исключения этого нежелательного явления используется модифицированный закон, полученный в диссертации Наумовым С.А.[2]. Этот закон зависит от трех параметров, которые можно подобрать так, чтобы не было провисания троса.

Основное влияние на процесс разворачивания на начальном этапе оказывает величина начальной скорости отталкивания малого КА. В случае недостаточной начальной скорости может произойти неконтролируемый сход троса и, как результат, потеря управления процессом разворачивания. Слишком большая величина скорости может привести к нештатной ситуации.

Моделирование показывает, что при существенном увеличении начальной скорости, траектория представляет собой петлю, то есть провисание троса неизбежно.

Также существует вероятность отстрела с некоторым отклонением от вертикальной ориентации и выходом из плоскости орбиты. Моделирование по-



казывает, что выбранная программа развертывания достаточно устойчива к отклонению направления отстрела от вертикали в плоскости орбиты. Как показало моделирование, программа развертывания применима при отклонении от вертикали на угол не более 30° по направлению движения и не более 57° против направления движения. При дальнейшем увеличении углов отделения происходит образование петли, что приводит к необходимости сматывания троса, а это, при использовании механизмов развертывания, работающих только на торможение, не допустимо.

Отдельного внимания заслуживает случай пространственного движения, когда происходит отклонение от плоскости начальной орбиты. В данном случае программа развертывания проявляет устойчивость к малым углам отклонения. То есть развертывание завершается на заданной длине троса, и малый КА выходит в окрестность местной вертикали при угле отклонения от плоскости орбиты не более 10° . Но при этом происходит нежелательное линейное смещение линии вертикали.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Сравнение результатов моделирования, полученных по разработанной программе, с результатами известного аналитического решения уравнений относительного движения двух КА показало, что траектории относительного движения совпадают.

2. Алгоритм численного интегрирования обеспечивает расчет относительного движения двух КА с погрешностью, не превышающей $0,007\text{ м/с}$ по скорости и 4 м по относительным координатам КА.

3. Выбранная программа развертывания проявляет значительную устойчивость относительно вариаций значений параметров отделения малого КА. Моделирование показало, что развертывание успешно завершается при отклонении от вертикали на угол не более 30° по направлению движения и не более 57° против направления движения.

4. Выбранная программа развертывания также применима при незначительных отклонениях от плоскости орбиты. Так моделирование пространственного движения показало, что развертывание успешно завершает при угле отклонения не более 10° . Но при этом на каждый градус угла отклонения приходится около $0,3\text{ км}$ смещения относительно линии вертикали.

Литература

1. Белецкий В.В., Левин Е.М. Динамика космических тросовых систем. – М.: Наука, 1990. – 336 с.
2. Наумов С.А. Управление развёртыванием орбитальной тросовой системы для спуска малой капсулы: дис. канд. техн. наук/ Самара, 2006. – 93 с.