



А.М. Смолев, Ю.М. Заболотнов, Т.И. Михеева

МОДЕЛИРОВАНИЕ УГЛОВОГО ДВИЖЕНИЯ КАПСУЛЫ НА ТРОСЕ ПРИ РАЗВЕРТЫВАНИИ КОСМИЧЕСКОЙ ТРОСОВОЙ СИСТЕМЫ

(Самарский университет)

Космическая тросовая система (КТС) – это набор космических объектов (как правило, двух), соединённых тонким тросом, которая производит орбитальный полет. На сегодняшний день разворачивание тросовых систем является одной из самых перспективных областей космической техники. По сравнению со стандартными космическими аппаратами с одним тяжелым телом, использование КТС дает несколько преимуществ. Во-первых, это генерация силы тяжести. Использование этого может улучшить условия на орбите, а в далекой перспективе это позволит создавать физические условия для космических экспедиций, близкие к земным. Во-вторых, это возможность энергоэффективной транспортировки грузов [1].

Рассмотрим задачу моделирования движения малогабаритной капсулы относительно своего центра масс при разворачивании КТС. В процессе разворачивания КТС капсула совершает движение относительно направления троса. По орбите вокруг Земли движется базовый космический аппарат (КА) большой массы, с которого происходит разворачивание КТС. Выпуск троса контролируется управляющим механизмом, который работает в соответствии с измерениями длины и скорости троса. Длина и скорость троса изменяются по заданной программе. Предполагается, что масса базового КА много больше массы остальных частей системы (капсулы и троса). Капсула имеет массу m . Конечная длина троса L_{end} . Высота круговой орбиты h . Системы координат для базового КА и для троса отображены на рисунке 1.

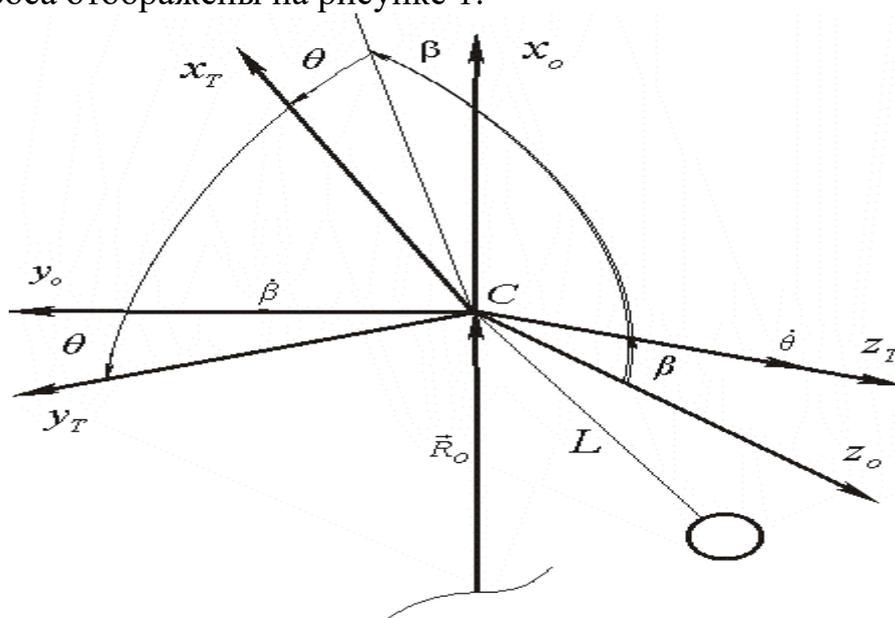


Рис. 1. Системы координат



Требуется найти изменение со временем следующих параметров:

- длины развернутой части троса L ;
- скорости выпуска троса V ;
- угла между тросом и радиус-вектором КА в плоскости орбиты θ
- угловой скорости изменения, соответствующей θ ;
- угла между тросом и плоскостью орбиты β ;
- угловой скорости, соответствующей β ;
- угла между тросом и продольной осью капсулы (угла нутации) α .

Чтобы смоделировать движение капсулы малого размера в соответствии с описанием системы, необходимо найти решение системы общих дифференциальных уравнений, которые задают зависимости приведенных параметров от времени. В систему входят шесть уравнений:

$$L\ddot{\Omega}^2 \cos^2 \theta \sin^2 \beta - 2\theta - 3L\Omega^2 \cos^2 \theta \cos^2 \beta = -\frac{T}{m} \quad (1)$$

$$\dot{L} = V; \quad (2)$$

$$L^2 \ddot{\theta} - 2L^2 \Omega \dot{\theta} + 3L^2 \Omega^2 \sin \theta \cos \theta \cos^2 \beta = 0 \quad (3)$$

$$\dot{\theta} = \omega_{\theta}; \quad (4)$$

$$L^2 \ddot{\beta} + 2L^2 \Omega \dot{\beta} + 2L^2 \Omega^2 \cos^2 \theta \sin 2\beta = 0 \quad (5)$$

$$\dot{\beta} = \omega_{\beta}. \quad (6)$$

T – сила натяжения троса, которая определяется следующим образом:

$$T = m\Omega^2 \left[a(L - L_{end}) + b\frac{V}{\Omega} + 3L_{end} \right]; \quad (7)$$

Ω – угловая скорость движения базового КА по круговой орбите;

a, b – параметры закона управления выпуском троса.

Решение данной системы можно найти с помощью численного метода. В данном случае для нахождения решения был применен метод Рунге-Кутты четвертого порядка точности [2].

Изменение угла нутации спускаемой капсулы α с течением времени было найдено с помощью аналитического решения [3]. При расчете предполагалось, что капсула является идеальной симметричной сферой, у которой момент инерции одинаков относительно любой оси.

Метод Рунге-Кутты для решения уравнений (1)–(6) был реализован в специализированной программной системе. Эта система позволяет производить моделирование разворачивания КТС, обладающей произвольными характеристиками, по заданным параметрам управления. В приложении задаются изменяемые характеристики тросовой системы. Разработанная система позволяет просматривать зависимость выходных параметров КТС от времени, а также производить серии испытаний и сохранять информацию в формате, удобном



для копирования в электронные таблицы. Система отображает ошибку, если произошло одно из следующих событий:

- система расходится, т.е. конечные значения равны NaN или Infinity;
- трос не был развернут на заданную длину, т.е. параметр «Конечная длина троса» не равен фактическому значению длины в момент окончания выпуска троса.

Пример вычисляемой зависимости приведен на рис. 2, а пример создания ряда испытаний – на рис. 3.

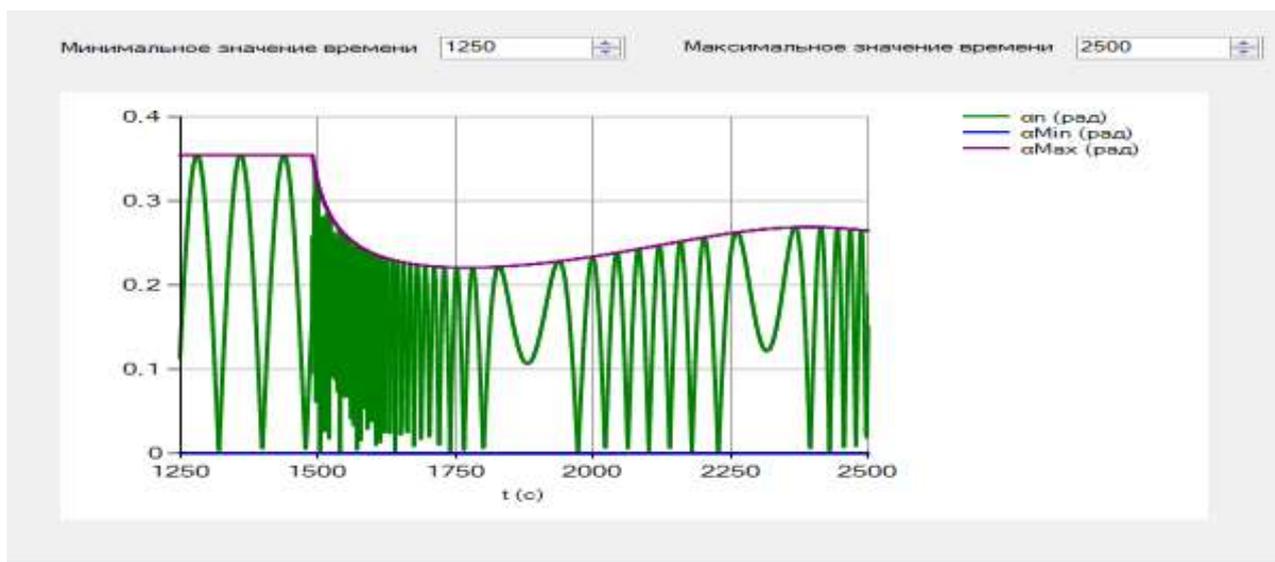


Рис.2. Зависимость угла нутации от времени

Реализация метода Рунге-Кутты может быть использована и для решения других задач, связанных с моделированием изменения систем с течением времени. Так, данная реализация может быть применена при моделировании изменения теоретической интенсивности дорожного движения в течение суток в интеллектуальной транспортной геоинформационной системе «ITSGIS» [5].

Рис.3. Форма задания серии испытаний



Для нахождения оптимальных параметров разворачивания КТС с помощью разработанной программной системы был проведен ряд исследований тросовой системы.

Важной характеристикой движения капсулы относительно троса является так называемый угол нутации – угол между продольной осью капсулы и направлением троса. При увеличении этого угла возможно ослабление троса (его провисание), что может привести к потере управляемости в системе и, как следствие, к аварийным ситуациям. Испытания модели КТС были произведены при следующих значениях угловых скоростей относительно осей y и z :

$$\omega_y \in [-0,1; 0,1] \text{ рад/с}; \quad \omega_z \in [-0,1; 0,1] \text{ рад/с}$$

с шагом $\Delta\omega_y, \Delta\omega_z = 0,005$ рад/с.

В результате было определено, что угол нутации не превышает 90° , если при одной из угловых скоростей, равной нулю, другая составляет менее $0,0625$ рад/с. В случае, если угловые скорости изменяются относительно обеих осей, граница ограничения по угловым скоростям близка к кругу радиусом $0,0625$ с центром в точке $(0; 0)$. То есть, обобщенное ограничение на угловые скорости имеет вид:

$$\omega_y^2 + \omega_z^2 \leq \left(\frac{1}{16}\right)^2. \quad (8)$$

График, отображающий зависимость выполнения условия $\alpha < 90^\circ$ от угловых скоростей отделения КА относительно осей y и z ω_y, ω_z , представлен на рис. 4. На нем область выполнения ограничения на угловые скорости закрашена в темно-оранжевый цвет.

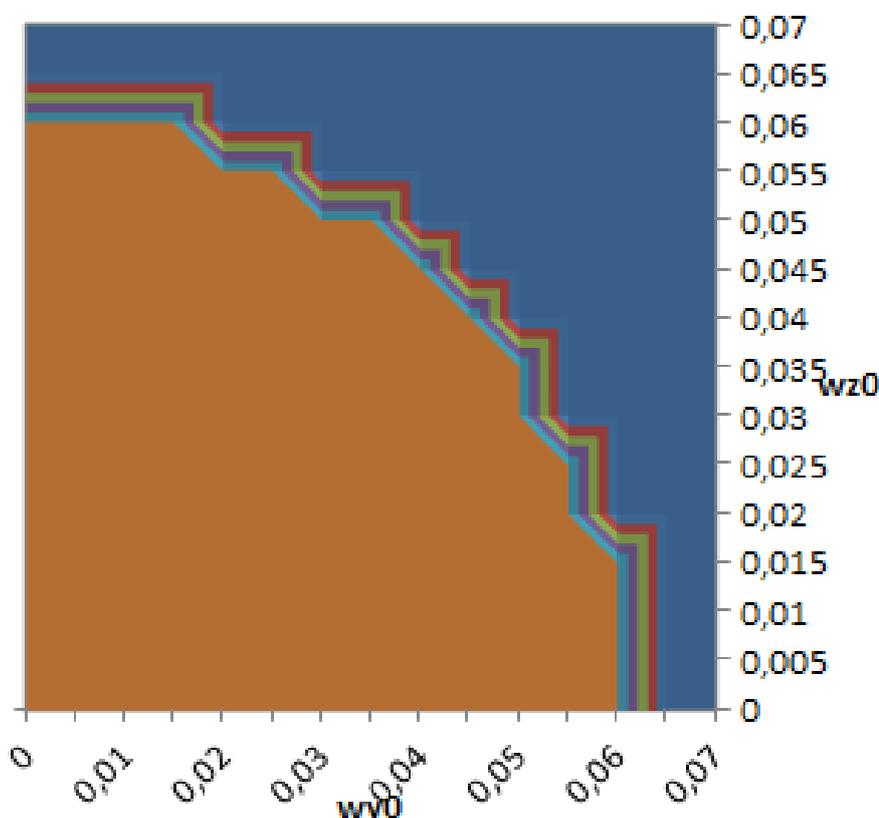


Рис. 4. Область выполнения $\alpha < 90^\circ$ по угловым скоростям ω_y, ω_z



Проверка условия $\alpha < 90^\circ$ также производилась в случае вариации массы малой капсулы m . Было установлено, что величина угла нутации увеличивается с повышением массы капсулы. При правдоподобных значениях массы ($m < 100$ кг) величина угла не превышает допустимую. Максимальное значение угла нутации, равное 90° , достигается при массе капсулы 550 кг.

Литература

- 1 Иванов, В.А. Космические тросовые системы. Некоторые аспекты практического использования / В.А. Иванов, С.А. Купреев, М.Р. Либерзон // М.: СИП РИА, 2005. – 98 с.
- 2 Бахвалов, Н.С. Численные методы. / Н.С. Бахвалов, Н.П. Жидков, Г.М. Кобельков // М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2001. — С. 367.
- 3 Заболотнов, Ю.М. Движение спускаемой капсулы относительно центра масс при разворачивании орбитальной тросовой системы / Ю.М. Заболотнов, О.Н. Наумов // Космические исследования. – М. :, Российская академия наук, 2012. Т. 50, №2.– С. 177–187.
- 4 Михеева, Т.И. Информационная технология автоматической дислокации геобъектов транспортной инфраструктуры на улично-дорожной сети / Т.И. Михеева, А.В. Сидоров, О.К. Головнин // Перспективные информационные технологии. Труды Международной научно-технической конференции. Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С.П. Королева. 2013. – С. 236–241.
- 5 Михеева, Т.И. Автоматизированная система интеллектуальной поддержки принятия решений в распределенных средах / Т.И. Михеева, О.К. Головнин, А.В. Сидоров // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2014. Т. 18. № 5 (66). – С. 131–138.
- 6 Заболотнов, Ю.М. Устойчивость движения в атмосфере связки двух твердых тел, соединенных тросом / Ю.М. Заболотнов, Д.В. Еленев // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. 2013. № 2. – С. 49–60.
- 7 Наумов, О. Н. Статистический анализ вращательного движения легкой спускаемой капсулы при разворачивании космической тросовой системы / О. Н. Наумов // Изв. вузов. Авиационная техника, №2, 2012. – С. 37–40.

Т.Н Соснина

ДВОЙНАЯ ДВОЙСТВЕННОСТЬ КАК МЕТОДОЛОГИЧЕСКОЕ СРЕДСТВО МОДЕЛИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

(Самарский университет)

Моделирование является одним из эффективных методов научного исследования. Анализ этого феномена продолжает оставаться в поле зрения ученых. Методологические функции моделирования в буквальном их прочтении