



времени некогерентного накопления ввиду ограничения, вводимого модуляцией сигнала навигационным сообщением.

### Литература

1. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования. Изд. 4-е. Под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. М.: Радиотехника. 2010. 800 с.
2. Статистическая теория радиотехнических систем. М. Радиотехника. 2003. 400 с.
3. Martin N .Leblond V, Guilloeyel G., Heiries V. VOC(x,y) signal acquisition techniques and performances. ION 2003.
4. Heiries V R oviras D., Ries L., Calmettes V. Analysis of Non Ambiguous VOC Signal Acquisition Performance. ION 2004.

Ч. Дон<sup>1</sup>, Ю.М. Заболотнов<sup>1</sup>, Ч. Ван<sup>2</sup>

### МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ РАЗВЕРТЫВАЕМОЙ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ТРОСОВОЙ СИСТЕМЫ С АТМОСФЕРНЫМ ЗОНДОМ

(<sup>1</sup>Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва,

<sup>2</sup>Северо-западный политехнический университет, г. Сиань, КНР)

Рассматривается построение математической модели и анализ управляемого движения при разворачивании космической тросовой системой (КТС) с атмосферным зондом (АЗ). КТС состоит из базового космического аппарата (КА), АЗ (тела с большим аэродинамическим сопротивлением) и соединяющего их троса. Учитываются аэродинамические силы, действующие на все элементы системы, включая трос достаточно большой длины (порядка 30 и более километров). Показано, что построение номинальной программы разворачивания тросовой системы с учетом аэродинамических сил позволяет в несколько раз уменьшить ошибки приведения системы в заданное конечное вертикальное состояние при разворачивании КТС. Приводятся численные расчеты, подтверждающие проведенные исследования и сформулированные выводы.

Атмосферный зонд это тело надувной или складной конструкции, имеющее увеличенный баллистический коэффициент. Атмосферные зонды могут использоваться, например, для мониторинга верхних слоев атмосферы.

Задача управления разворачиванием КТС разбивается на две части: 1) построение номинальной программы разворачивания КТС; 2) стабилизация движения КТС относительно номинального движения с помощью некоторого алгоритма регулирования.

Для построения номинальной программы разворачивания КТС в положение, близкое к вертикальному, разработана модель движения системы в подвижной орбитальной системе координат с учетом массы троса и действующих



на него аэродинамических сил

$$\ddot{L} = \frac{v_e}{M_e} L(\dot{\theta}^2 + 2\dot{\theta}\Omega + 3\Omega^2 \cos^2 \theta) + \frac{Q_L - T_n}{M_e}, \quad (1)$$

$$\ddot{\theta} = -2\frac{v_e}{J_e} L\dot{L}(\dot{\theta} + \Omega) - \frac{3}{2}\Omega^2 \sin 2\theta, \quad (2)$$

где  $L$  и  $\theta$  - длина троса и угол его отклонения троса от вертикали,  $\Omega$  - угловая скорость вращения центра масс КТС по орбите,  $M_e = (m_1^0 - L\rho)(m_2 + L\rho) / M$ ,  $m_1^0$  и  $m_2$  - начальная масса КА и масса АЗ,  $M = m_1^0 + m_2$ ,  $\rho$  - линейная плотность троса,  $T_n$  - сила натяжения троса,  $Q_L$  и  $Q_\theta$  - обобщенные аэродинамические силы,  $v_e = (m_1^0 - L\rho)(m_2 + L\rho / 2) / M$ ,

$J_e = L^2(m_1^0 m_2 - 2L\rho m_2 / 3 + L\rho m_1^0 / 3 - L^2 \rho^2 / 4) / M$ . При выводе уравнений (1-2) предполагается, что орбита центра масс системы за время развертывания системы не изменяется и близка к круговой орбите.

Программа развертывания КТС в вертикальное положение имеет вид

$$T_n = v_e \Omega^2 \cos^2 \theta_p [a(L - L_k) + b\dot{L} / \Omega + 3L_k], \quad (3)$$

где  $a, b$  - параметры закона управления,  $L_k$  - конечная длина троса,  $\theta_p$  - отклонение троса в конечном положении равновесия, определенное в силу уравнений (1-2).

Обобщенные аэродинамические силы определяются из выражений  $Q_L = \delta A_L / \delta L$ ,  $Q_\theta = \delta A_\theta / \delta \theta$ , где  $\delta A_L$  и  $\delta A_\theta$  - работы на возможных перемещениях  $\delta L$ ,  $\delta \theta$ . Аэродинамические силы, действующие на трос, определяются интегрированием по длине троса в предположении, что трос представляет собой прямую линию.

При записи уравнений движения КТС как системы с распределенными параметрами трос представляется как совокупность материальных точек с упругими односторонними механическими связями. Поэтому уравнения движения КТС в геоцентрической неподвижной системе координат записываются в виде [1]

$$\frac{d\vec{r}_k}{dt} = \vec{V}_k, \quad m_k \frac{d\vec{V}_k}{dt} = \vec{G}_k + \vec{T}_k + \vec{R}_k \quad (4)$$

где  $\vec{r}_k$  ( $k = 1, 2, \dots, n$ ) - радиус-вектора КА, зонда и материальных точек троса;  $\vec{V}_k$  - абсолютные скорости точек,  $\vec{G}_k, \vec{T}_k, \vec{R}_k$  - вектора гравитационной сил, сил натяжения троса и аэродинамических сил.

Так как трос не воспринимает сжимающих усилий, то модуль сил упругости вычисляется по закону Гука



$$T_k = \begin{cases} c \frac{|\bar{r}_k - \bar{r}_{k+1}| - \Delta L_k}{\Delta L_k}, & \text{if } |\bar{r}_k - \bar{r}_{k+1}| - l \geq 0 \\ 0, & \text{if } |\bar{r}_k - \bar{r}_{k+1}| - l \leq 0 \end{cases}, \quad (5)$$

где  $\Delta L_k$  - нерастянутая длина  $k$ -ого участка троса,  $c = E \cdot A$  - коэффициент жесткости,  $E$  - модуль Юнга,  $A$  - площадь поперечного сечения троса.

Соответственно в векторном виде силы натяжения троса определяются выражениями

$$\bar{T}_k = T \frac{\bar{r}_{k+1} - \bar{r}_k}{|\bar{r}_{k+1} - \bar{r}_k|}, \quad \bar{T}_{k+1} = -\bar{T}_k. \quad (6)$$

При моделировании развертывания КТС в соответствии с к системой (4) необходимо добавить уравнения, учитывающие динамику работы механизма управления. Запишем эти уравнения в виде [2]

$$m_e \frac{dV_l}{dt} = T_1 - F_c, \quad \frac{dl}{dt} = V_l, \quad (7)$$

где коэффициент  $m_e$  учитывает инерционность механизма управления,  $V_l$  - скорость троса,  $F_c$  - управляющая сила в механизме выпуска троса.

В соответствии с принципом обратной связи силу  $F_c$  зададим в виде [2,3]

$$F_c = T_n + p_1 \Delta L + p_2 \Delta V, \quad (12)$$

где  $p_1, p_2$  - коэффициенты регулирования,  $T_n$  - номинальная сила натяжения троса (3),  $\Delta L = l - L$ ,  $\Delta V = V_l - V_L$ .

При добавлении новой точки при увеличении длины троса используется алгоритм, описанный в [1].

При проведении моделирования использовались следующие исходные данные:  $m_e = 0.2 \text{ кг}$ ,  $m_1 = 6000 \text{ кг}$ ,  $m_2 = 20 \text{ кг}$ ,  $L_k = 30 \text{ км}$  и  $L_k = 60 \text{ км}$ ,  $a = 4$ ,  $b = 5$ , баллистические коэффициенты  $\sigma_1 = 1.257 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 / \text{кг}$ ,  $\sigma_2 = 0.015 \text{ м}^2 / \text{кг}$ ; коэффициенты регулирования  $p_1 = 0.243$ ,  $p_2 = 7.824$  [4],  $\rho = 0.2 \text{ кг} / \text{км}$ , высота начальной орбиты 250 км.

Сравнение результатов моделирования движения КТС с учетом и без учета аэродинамических сил показало, что учет при построении номинальной программы (3) позволил уменьшить ошибки регулирования по окончанию развертывания КТС с атмосферным зондом в несколько раз. Данный вывод остается в силе при изменении наклона начальной орбиты центра масс КТС и при учете вращения атмосферы.

## Литература

1. Zabolotnov Yu. Introduction to Dynamics and Control in Space Tether System. Beijing: Science Press, 2013. 140 p.



2. Zabolotnov Yu.M., Naumov O.N. Motion of a Descent Capsule Relative to Its Center of Mass when Deploying the Orbital Tether System // J. Cosmic Research. 2012. 50 (2), pp. 177-187.

3. Kruijff M. Tethers in Space. - The Netherlands: Delta - Utec Space Research, 2011. - 432 p.

4. Заболотнова О. Ю. Синтез алгоритмов управления для развёртывания космической тросовой системы // Полет. 2010. №11. С. 36-42.

Н.В. Ефимушкина

## ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПОДСИСТЕМЫ ВВОДА-ВЫВОДА КОМПЬЮТЕРА

(Самарский государственный технический университет)

*Аннотация:* Описывается подход к разработке имитационных моделей подсистем ввода-вывода современных компьютеров. Моделирующая программа позволяет исследовать типовые структуры этих подсистем и режимы их работы. В ней применяются принципы анимации для обеспечения наглядности и лучшего усвоения материала.

*Ключевые слова:* имитация, процессор, память, клавиатура, монитор.

### **Введение**

Общеизвестно, что современные вычислительные системы характеризуются сложными структурами и режимами функционирования. Для изучения особенностей их работы используются методы теории вычислительных систем (ВС) [1, 3]. При этом применяются аналитические, имитационные и экспериментальные методы. Наиболее достоверные результаты позволяют получить эксперименты непосредственно над объектом в реальных или специально созданных условиях. Высокая сложность и стоимость вычислительных систем и их подсистем ограничивает применение этих методов для обучения студентов.

### **Формулировка проблемы**

Наиболее перспективными представляются методы имитационного моделирования. Моделирующая программа содержит процедуры, воспроизводящие структуру системы и протекающие в ней процессы. Важнейшее свойство имитационного моделирования — универсальность. Метод позволяет исследовать системы любой сложности, учитывать влияние различных факторов и воспроизводить типовые ситуации. Важной особенностью этого метода является возможность использования средств анимации, которые обеспечивают большую наглядность.

В настоящее время из аналогов автору известен только пакет программ имитационного моделирования компьютерных сетей Opnet. Этот пакет не пригоден для изучения отдельных ЭВМ и их подсистем. Предлагаемая модель предназначена именно для таких объектов.

При разработке моделей решался целый ряд проблем: