

# Управление движением связки двух космических аппаратов для создания искусственной гравитации

С.А. Тамайо-Леон, П.В. Фадеенков

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия

**Обоснование.** Из-за невесомости на орбите и при открытии космоса существует 6 главных рисков, связанных с изменением гравитационных полей [1], поэтому в качестве решения проблемы возникает искусственная гравитация (ИГ). ИГ — это идея имитации гравитации Земли в космосе. К.Э. Циолковский в 1895 году предложил первую идею создания в невесомости искусственной силы тяжести центробежной силой [2].

**Цель** — использовать систему управления для обеспечения создания соответствующей искусственной гравитации на орбите планеты в оскулирующих элементах системы координат (СК) на невозмущенном движении.

**Методы.** Главная идея решения состоит из следующих компонентов: 2 космических аппарата (КА), которые вращаются в одном направлении с малой тягой ( $F$ ) для ускорения и торможения; точка вращения, которая является центром масс системы; трос, который удерживает КА.

Представление предположений о движении: невозмущенное движение на орбите, КА — материальные точки, масса троса не учитывается, центр масс тросовой системы движется по неизменной эллиптической орбите, трос всегда натянут —  $L \approx$  постоянная, система не изменится вне плоскости вращения.

Математическая модель движения основана на модели Асланова [3]:

$$\ddot{\theta} + \ddot{u} - 2(\dot{\theta} + \dot{u})\dot{\varphi} \tan\varphi + \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{1 + e \cos u} \dot{u}^2 \sin 2\theta = \frac{Q_0 M}{m_1 m_2 L^2 \cos^2 \varphi}.$$

Предполагаем что угол вне плоскости не меняется, означает что  $\ddot{\varphi} = \dot{\varphi} = \varphi = 0$ :

$$\ddot{\theta} + \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{1 + e \cos u} \dot{u}^2 \sin 2\theta = \frac{Q_0 M}{m_1 m_2 L^2}$$

где  $u$  — аргумент широты;  $\dot{u}$  — угловая скорость истинной нахождения центра масс;  $e$  — эксцентриситет орбиты;  $M = m_1 + m_2$  и  $Q_0 = FL$  — общий момент тяги.

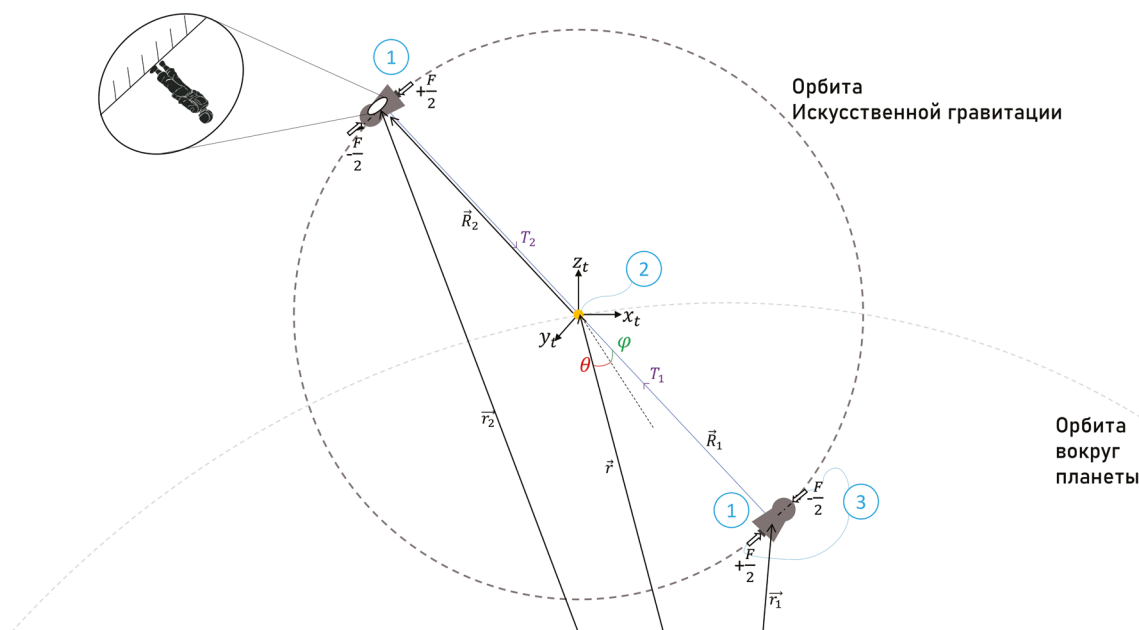


Рис. 1. Схема вращающейся тросовой системы

Для того чтобы управлять угловую скорость системы, мы определили нашу цель:  $g_3 = \dot{\theta}^* R_i = 9,80665 \text{ м/с}^2$ .

Для того чтобы получить аналитическое решение, считаем параметры полета в таблице 2 ( $e \approx 0$  и  $\dot{u} = 0,00123017 \text{ рад/с}$ ). Считая уравнение [ddtheta simp], мы определяем фазовые переменные:

$$\frac{d\dot{\theta}}{d\theta} = \frac{\frac{FM}{m_1 m_2 L} - \frac{3}{2} \dot{u}^2 \sin 2\theta}{\dot{\theta}}.$$

Для того, чтобы настроить систему управления, необходимо определить критерии параметров:

$$U_y = -k_1(\dot{\theta} - \dot{\theta}^*)$$

$$F = F(U_y) = F(-k_1(\dot{\theta} - \dot{\theta}^*)) = F(\dot{\theta})$$

Теперь, определим нелинейный управляющий сигнал:

$$F = \begin{cases} C \sin(U_y) & \text{при } |U_y| \geq b \\ 0 & \text{при } |U_y| < b \end{cases}$$

Решение системы уравнений при  $|U_y| \geq b$  имеет вид:

$$\begin{cases} \theta'(t) = \sqrt{0,5B}(C_2 \cos(\sqrt{2B}t) - C_1 \sin(\sqrt{2B}t)) \\ \theta(t) = \frac{A}{2B} + \frac{C_2}{2} \sin(\sqrt{2B}t) + \frac{C_1}{2} \cos(\sqrt{2B}t), \end{cases}$$

где  $C_1 = -35,375$  и  $C_2 = 141,75$ .

При  $|U_y| < b$  получим:

$$\begin{cases} \theta'(t) = \sqrt{0,5B}(C_4 \cos(\sqrt{2B}t) - C_3 \sin(\sqrt{2B}t)) \\ \theta(t) = \frac{C_4}{2} \sin(\sqrt{2B}t) + \frac{C_3}{2} \cos(\sqrt{2B}t), \end{cases}$$

где  $C_3 = -4,263$  и  $C_4 = 117,59$ ; в обоих случаях  $\theta' = \dot{\theta}$ ,  $A = \frac{F}{1 \cdot 10^7}$ ,  $B = 1,5\dot{u}^2 = 2,26998 \cdot 10^{-6}$ .

Таблица 1. Параметры системы управления

Параметр	Значение
Тяга двигателя ( $C$ )	400 Н
Граница зоны нечувствительности ( $b$ )	0,25 рад/с
Коэффициент усиления ошибки по угловой скорости ( $k_1$ )	1000
Угол в плоскости ( $\theta_0$ )	0 рад
Угловая скорость в плоскости ( $\dot{\theta}$ )	0,1107 рад/с

**Результаты.** Параметры полета представлены в табл. 2 и результаты на рис. 2.

Таблица 2. Параметры полета

Параметр	Значение
Большая полуось	$a_0 = 7\,171\,000 \text{ м}$
Эксцентриситет	$e_0 \approx 0$ — без эксцентриситета
Угол истинной аномалии	$u_0 = 0 \text{ рад}$ .
Угловая скорость аргумента широты	$\dot{u}_0 = 0,001 \text{ рад/с}$
Масса КА	$m_1 = m_2 = 25\,000 \text{ кг}$
Длина троса	$L = 800 \text{ м}$
Время полета	100 мин и 1 виток

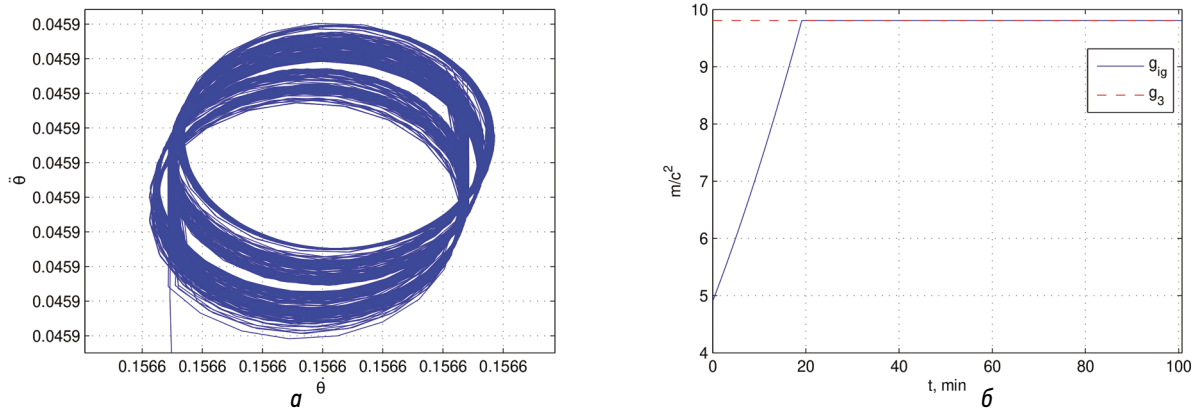


Рис. 2. Результаты: *a* — фазовый портрет в конечной точке; *b* — искусственная гравитация создана с помощью системы управления

**Выводы.** Как видно на рис. 2, наша цель была достигнута. Хотя предельный цикл мал, при лучшей стратегии управления он может быть еще меньше. Однако для моделирования и симуляции больших сценариев необходимо учитывать возмущающие и внешние силы.

**Ключевые слова:** искусственная гравитация; системы управления; вращающаяся тросовая система; космическая тросовая система; мала тяга; фазовый портрет.

### Список литературы

1. Patel Z.S., Brunstetter T.J., Tarver W.J., et al. Red risks for a journey to the red planet: The highest priority human health risks for a mission to mars. NPJ Microgravity. 2020. Vol. 6, No 1. P. 1–13. DOI: 10.1038/s41526-020-00124-6
2. Роскосмос. Варианты создания искусственной силы тяжести в космосе. 2021.
3. Aslanov V., Ledkov A. Dynamics of tethered satellite systems. Elsevier, 2012.

### Сведения об авторах:

**Серхио Тамайо-Леон** — студент, группа 1238-240402D, факультет ИАРКТ, кафедра динамики полета; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия. E-mail: 2021-04465@students.ssau.ru

**Павел Васильевич Фадеенков** — доцент, факультет ИАРКТ, кафедра динамики полета; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия. E-mail: fadeenkov.pv@ssau.ru