

Сомов Е.И., Бутырин С.А., Сомов С.Е., Сомова Т.Е.

**НАВЕДЕНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ  
КОСМИЧЕСКОГО РОБОТА ПРИ ИНСПЕКЦИИ СОСТОЯНИЯ  
ГЕОСТАЦИОНАРНОГО СПУТНИКА**

Информационные спутники на геостационарной орбите (ГСО) имеют требуемую длительность службы до 25 лет при наличии технического обслуживания с помощью космических роботов-манипуляторов (КРМ), в частности дозаправки топливом их электрореактивных двигательных установок. Рассматривается маневрирование КРМ в окрестности цели на расстоянии 80-120 м для её осмотра (инспекции) последовательным прохождением шести точек в порядке возрастания их номеров с зависанием в каждой точке относительно цели на пять минут для её наблюдения (рис. 1 а).

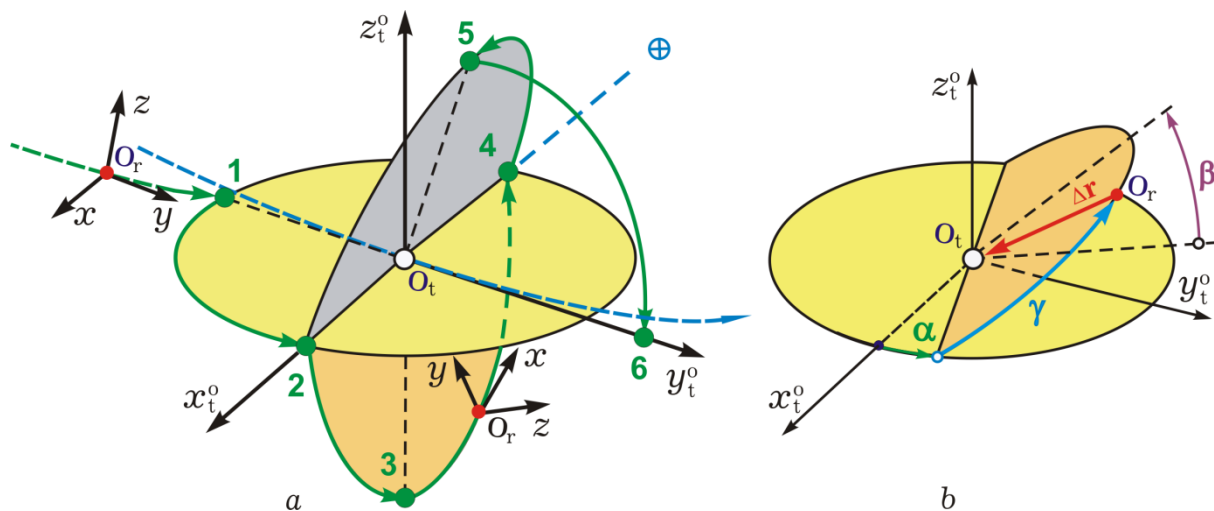


Рис. 1. Схема перелётов КРМ при инспекции состояния спутника на ГСО

**Основные модели и постановка задачи**

Используются общепринятые обозначения  $col(\cdot) = \{\cdot\}$  для векторов, матрицы  $[\alpha]_i$  элементарного поворота вокруг  $i$ -ой оси на угол  $\alpha$ ,  $i = x, y, z = 1, 2, 3 \equiv 1 \div 3$ ,  $C_\alpha \equiv \cos \alpha$ ,  $S_\alpha \equiv \sin \alpha$ . Вводятся инерциальная система координат (ИСК), связанная с корпусом КРМ система координат (ССК)  $O_r, x, y, z$  с началом в полюсе  $O_r$  и орбитальная система координат (ОСК) цели  $O_t, x_t^o, y_t^o, z_t^o$ , (рис. 1а). Предполагается, что на борту КРМ имеется наблюдательный инструмент (телескоп), ось визирования которого параллельна оси  $O_r, y$  ССК робота.

В ОСК цели перемещение КРМ между наблюдениями задаётся плоскостью, определяемой углами  $\alpha$  и  $\beta$  (рис. 1 б), и расположением полюса  $O_r$  КРМ в назначенной плоскости, что определяется углом  $\gamma$  и модулем  $s$  вектора  $\mathbf{s} = -\Delta\mathbf{r}$  (рис. 1 б). Задача наведения КРМ состоит в программном расположении полюса  $O_r$  КРМ в назначенной плоскости ОСК цели и в программной ориентации оси  $O_r y$  по орту вектора  $\Delta\mathbf{r}$ , когда ось  $O_r z$  направлена по нормали к плоскости перемещения полюса  $O_r$  робота.

Закон углового наведения КРМ определяется кватернионом  $\Lambda^p(t)$ , вектором модифицированных параметров Родрига  $\sigma = \text{etg}(\Phi/4)$  с углом собственного поворота  $\Phi$  относительно орта  $\mathbf{e}$  оси Эйлера, векторами угловой скорости  $\boldsymbol{\omega}^p(t)$  и углового ускорения  $\boldsymbol{\varepsilon}^p(t)$  ССК робота относительно ИСК, естественно в проекции на оси ССК.

### **Законы пространственного наведения КРМ при облёте цели**

Расположение КРМ определяется углом  $\gamma(t)$  в плоскости, положение которой задано фиксированными для  $j$ -го участка значениями углов  $\alpha$  и  $\beta$ , и расстоянием  $\Delta r(t)$  до цели. Номер участка соответствует первой точке наблюдения на рис. 1 а. Угол  $\gamma(t)$  изменяется от начального значения  $\gamma_{ij} = \gamma(t_{ij})$  до конечного значения  $\gamma_{fj} = \gamma(t_{ij} + T_j)$ , где  $T_j$  – длительность интервала прохождения  $j$ -го участка. При этом расстояние  $\Delta r(t)$  до цели изменяется от начального  $\Delta r_{ij} = \Delta r(t_{ij})$  до конечного  $\Delta r_{fj} = \Delta r(t_{ij} + T_j)$  значения.

Столбец  $\mathbf{s}(t)$  координат центра масс КРМ с модулем  $s(t) \equiv \Delta r(t)$  определяется в ОСК  $O_r x_t^o y_t^o z_t^o$  цели с помощью ортогональной матрицы  $\mathbf{Q} = [\alpha]_3^t [\beta]_1^t [\gamma(t)]_3^t$ . При заданных краевых условиях  $\gamma_{ij}$ ,  $\gamma_{fj}$  и  $\Delta r_{ij}$ ,  $\Delta r_{fj}$  для каждого  $j$ -го участка назначаются сплайны второго порядка  $\gamma_j^p(t)$  и  $s_j^p(t)$  с известными первыми  $\dot{\gamma}_j^p(t)$ ,  $\dot{s}_j^p(t)$  и вторыми  $\ddot{\gamma}_j^p(t)$ ,  $\ddot{s}_j^p(t)$  производными по времени, что позволяет по явным соотношениям вычислить векторы линейных и угловых программных перемещений, скоростей и ускорений ССК КРМ относительно ОСК цели. Эти векторы представляются в ИСК, к ним добавляются соответствующие параметры движения цели и по явным соотношениям вычисляются векторы координат, скорости и ускорения КРМ в ИСК. Наконец, с помощью стандартного преобразования искомые законы наведения представляются в ССК  $O_r x_{uz}$  робота в виде программных значений векторов расположения  $\Delta\mathbf{r}^p(t) = -\mathbf{s}^p(t)$ , скорости  $\mathbf{v}^p = \{v_i^p\}$  и ускорения  $\mathbf{w}^p = \{w_i^p\}$  в его поступательном движении, а также программных изменений

угла собственного поворота  $\Phi$ , векторов угловой скорости  $\omega^p = \{\omega_i^p\}$  и углового ускорения  $\varepsilon^p = \{\varepsilon_i^p\}$  робота.

### Результаты компьютерной имитации

Исходные данные для компьютерной имитации манёвров КРМ при визуальной инспекции состояния геостационарного спутника приведены в табл. 1. Длительность интервала прохождения  $j$ -го участка была принятой одинаковой:  $T_j = 400$  с,  $j = 1 \div 5$ .

Таблица 1 – Параметры маневрирования КРМ при инспекционном облёте спутника

Участок, $j$	Угол $\alpha$ , град	Угол $\beta$ , Град	Угол $\gamma_i$ , град	Угол $\gamma_f$ , град	$\Delta r_i$ , М	$\Delta r_f$ , м
1	0	0	-90	0	100	100
2	0	-90	0	90	100	100
3	0	-90	90	180	100	100
4	0	70	180	90	100	80
5	90	90	70	0	80	120

Временная диаграмма маневрирования КРМ приведена на рис. 2, где участки перехода КРМ между точками наблюдения отмечены фиолетовым цветом, а участки собственно наблюдения, в которых КРМ стабилизируется в ОСК цели, – зелёным цветом. В верхней части диаграммы указано текущее время в секундах, а в нижней части – длительности наблюдения.



Рис. 2. Временная диаграмма перелётов КРМ и наблюдений состояния спутника

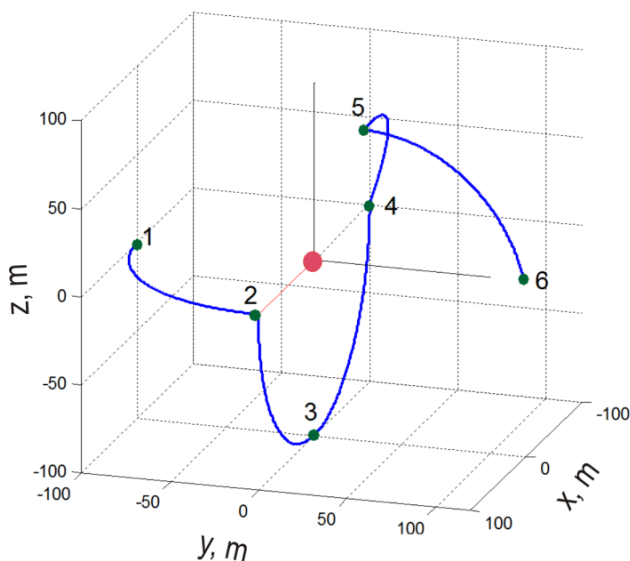


Рис. 3. Пространственная программная траектория КРМ в ОСК цели

На рис. 3 приведена программная траектория центра масс робота в ОСК цели, построенная на основе результатов компьютерного синтеза законов наведения КРМ в отношении его поступательного маневрирования при инспекционном облёте спутника.

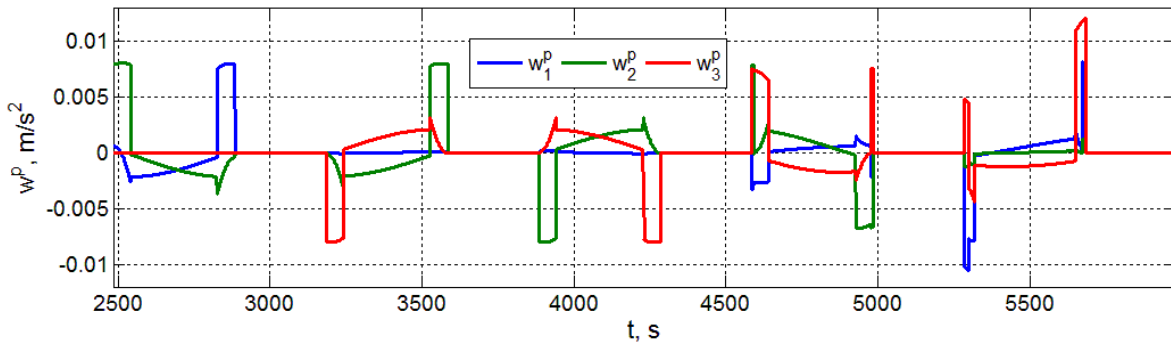


Рис. 4. Вектор программного ускорения КРМ в поступательном движении

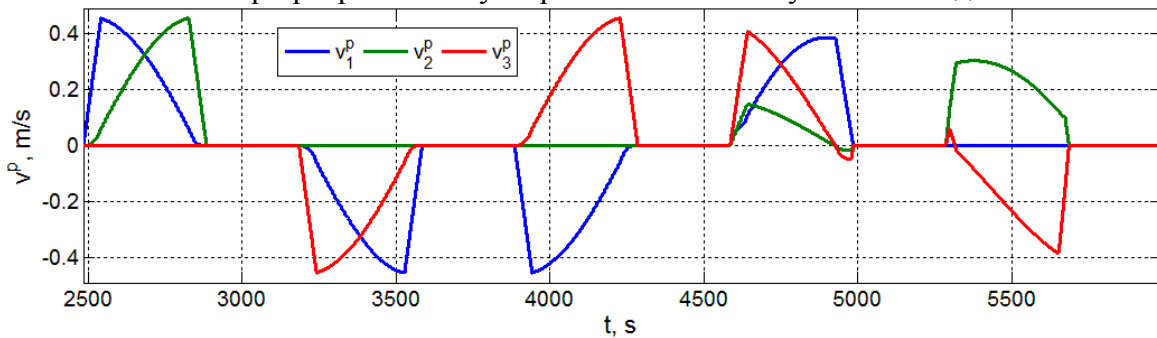


Рис. 5. Вектор программной скорости КРМ в поступательном движении

На рис. 4 и 5 представлены изменения значений векторов программного ускорения  $\mathbf{w}^p = \{w_i^p\}$  и скорости  $\mathbf{v}^p = \{v_i^p\}$  КРМ в его поступательном движении.

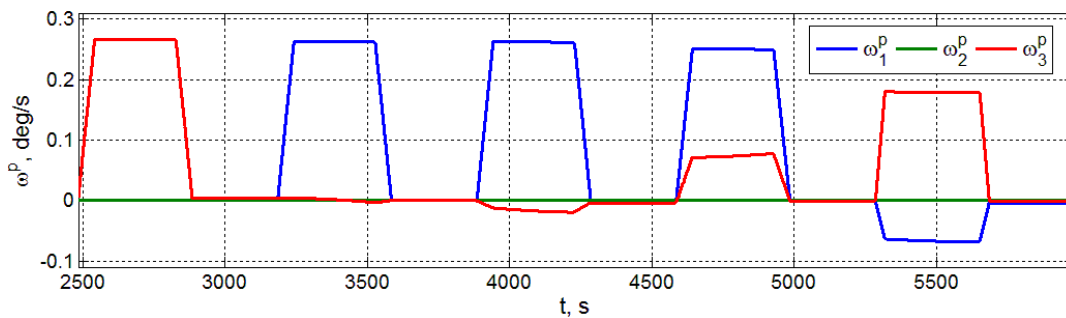


Рис. 6. Вектор программной угловой скорости КРМ при облёте спутника

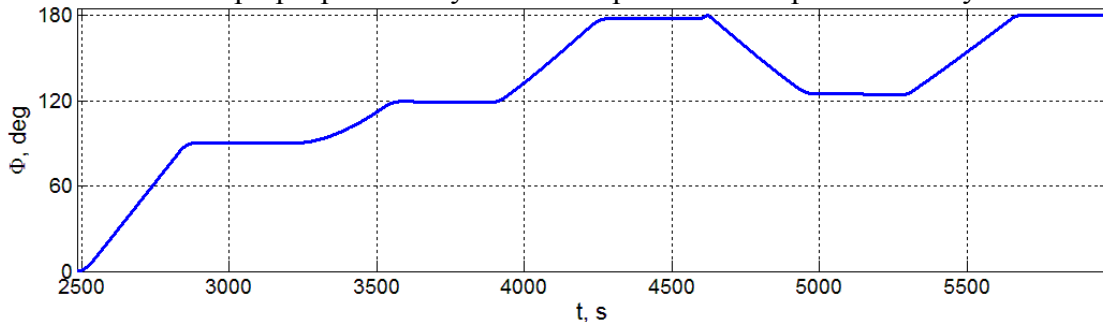


Рис. 7. Изменения угла собственного поворота КРМ при облёте спутника

На рис. 6 и 7 приведены изменения вектора программной угловой скорости  $\boldsymbol{\omega}^p = \{\omega_i^p\}$  и угла собственного поворота КРМ  $\Phi$  при облёте спутника с заданными параметрами маневрирования, приведёнными в табл. 1.

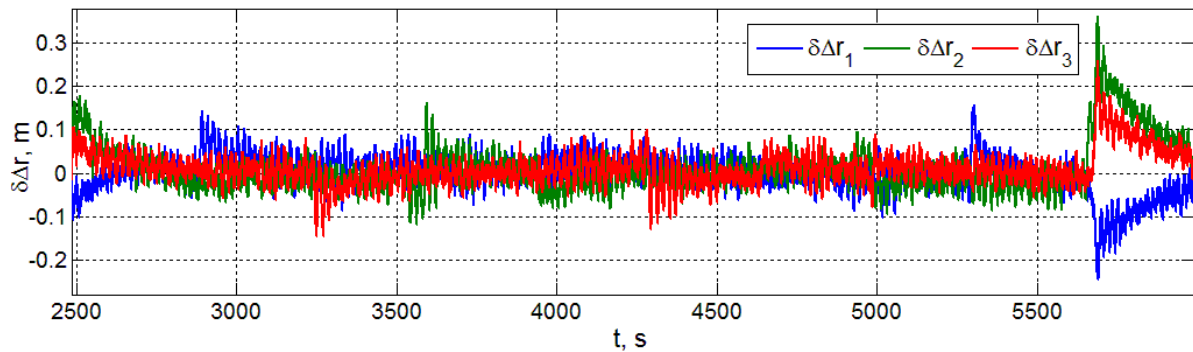


Рис. 7. Вектор рассогласования при стабилизации КРМ по дальности до цели

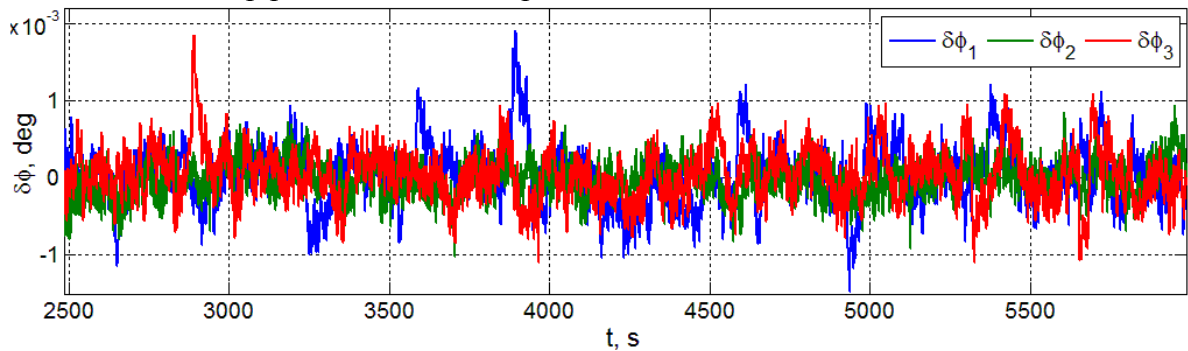


Рис. 8. Вектор погрешности угловой стабилизации при наведении КРМ на цель

При нелинейном анализе динамики системы управления движением (СУД) робота с массой 3000 кг в процессе инспекционного облёта геостационарного спутника учитывались погрешности измерений координат пространственного движения КРМ и возмущения от второй гармоники гравитационного потенциала Земли, а также влияния Луны и Солнца.

Приводами СУД являлись: 1) двигательная установка малой тяги на основе восьми реактивных двигателей (РД) по симметричной схеме при широтно-импульсной модуляции тяги 25 Н каждого РД с периодом  $T_u^e = 4$  с, которая позволяет одновременно создавать векторы импульсов силы и момента произвольных направлений в ССК робота; 2) силовой гироскопический кластер на основе четырёх гиродинов (ГД), где каждый ГД с собственным кинетическим моментом  $h_g = 100$  Нмс имеет период цифрового управления  $T_u = 0,25$  с.

На рис. 7 и 8 приведены изменения вектора  $\delta\Delta\mathbf{r} = \{\delta\Delta r_i\}$  рассогласования при наведении КРМ по дальности и вектор  $\delta\boldsymbol{\phi} = \{\delta\Delta\phi_i\}$  погрешности при угловом наведении КРМ в процессе инспекции состояния геостационарного спутника.

### Заключение

Представлены разработанные методы синтеза законов пространственного наведения космического робота при визуальной инспекции состояния геостационарного спутника. Выполнен нелинейный анализ динамики системы управления движением робота при инспекции. Приведены численные результаты, подтверждающие эффективность созданных алгоритмов наведения и управления.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 20-08-00779.