

УДК 629.78 : 681.51

## НАВЕДЕНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМ РОБОТОМ ПРИ ВИЗУАЛЬНОЙ ИНСПЕКЦИИ СОСТОЯНИЯ ГЕОСТАЦИОНАРНОГО СПУТНИКА

© 2020 Е.И. Сомов<sup>1,2</sup>, С.А. Бутырин<sup>1,2</sup>, С.Е. Сомов<sup>1,2</sup>, Т.Е. Сомова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Самарский федеральный исследовательский центр Российской академии наук

<sup>2</sup> Самарский государственный технический университет

Статья поступила в редакцию 06.04.2020

Рассматриваются вопросы наведения и управления космическим роботом при визуальной инспекции состояния информационного геостационарного спутника. В системе управления движением робота применяются двигательная установка с 8 реактивными двигателями при широтно-импульсной модуляции их тяги и силовой гироскопический кластер на основе 4 гиродинов с цифровым управлением. Приводятся численные результаты, демонстрирующие эффективность разработанных алгоритмов наведения и управления.

*Ключевые слова:* космический робот, геостационарный спутник, мониторинг состояния, наведение, управление

DOI: 10.37313/1990-5378-2020-22-2-132-137

*Работа поддержана РФФИ, грант 20-08-00779.*

### ВВЕДЕНИЕ

Информационные спутники на геостационарной орбите (ГСО) имеют потребную длительность службы до 25 лет при наличии технического обслуживания с помощью космических роботов-манипуляторов (КРМ), в частности дозаправки топливом их электрореактивных двигательных установок. Предшествующая статья авторов [1] в этом же выпуске журнала содержит выбор отечественных реактивных двигательных установок (РДУ) для выведения КРМ по комбинированной схеме на ГСО и электромеханических приводов системы управления движением (СУД) КРМ для его сближения с целью (геостационарным спутником) от расстояния 500 м до дальности 100 м на интервале времени  $t \in [1637, 2185]$  с, синтезированные алгоритмы

наведения и управления, а также результаты нелинейного анализа динамики СУД при таком сближении.

В данной статье рассматривается маневрирование КРМ в окрестности цели на расстоянии 80–120 м при визуальной инспекции её состояния с последовательным наблюдением из 6 точек в порядке возрастания их номеров с зависанием в каждой точке относительно цели на 5 минут, рис. 1а.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Модели движения КРМ, состав СУД, используемые алгоритмы наведения и управления детально представлены в [1], поэтому здесь приводятся только необходимая информация. Применяется геоцентрическая инерциальная система координат (ИСК)  $\mathbf{I}_{\oplus}$  с началом в центре Земли  $O_{\oplus}$  и общепринятые обозначения  $\{\cdot\} = \text{col}(\cdot)$ ,  $(\cdot)$  и  $\circ, \sim$  для векторов, матриц и кватернионов, а также матрицы  $[\alpha]_i$  элементарного поворота вокруг  $i$ -ой оси на угол  $\alpha$ ,  $i = 1, 2, 3 \equiv 1 \div 3$ . Используются Гринвичская система координат (ГСК)  $\mathbf{G}_{\oplus}$ , связанная с Землей, орбитальные системы координат (ОСК)  $O_r x^o y^o z^o$  КРМ с началом в его полюсе  $O_r$  и цели  $O_t x_t^o y_t^o z_t^o$  с началом в её полюсе  $O_t$ , а также связанная с корпусом КРМ система координат (ССК)  $O_r x y z$ .

Предполагается, что на борту КРМ имеется наблюдательный инструмент (телескоп), ось визирования которого параллельна оси  $O_r y$  ССК робота, см. рис. 1. Как и в статье [1], приводами СУД являются: 1) РДУ на основе восьми реактив-

*Евгений Иванович Сомов, ведущий научный сотрудник отдела «Динамики и управления движением» СамНЦ РАН; начальник отдела «Навигации, наведения и управления движением» НИИ Проблем надежности механических систем СамГТУ, E-mail e\_somov@mail.ru*

*Сергей Анфимович Бутырин, старший научный сотрудник отдела «Динамики и управления движением» СамНЦ РАН; начальник лаборатории «Моделирования систем управления» НИИ Проблем надежности механических систем СамГТУ, E-mail butyrinsa@mail.ru*

*Сергей Евгеньевич Сомов, научный сотрудник отдела «Динамики и управления движением» СамНЦ РАН; научный сотрудник отдела «Навигации, наведения и управления движением» НИИ Проблем надежности механических систем СамГТУ, E-mail s\_somov@mail.ru*

*Татьяна Евгеньевна Сомова, научный сотрудник отдела «Навигации, наведения и управления движением» НИИ Проблем надежности механических систем СамГТУ, E-mail te\_somova@mail.ru*

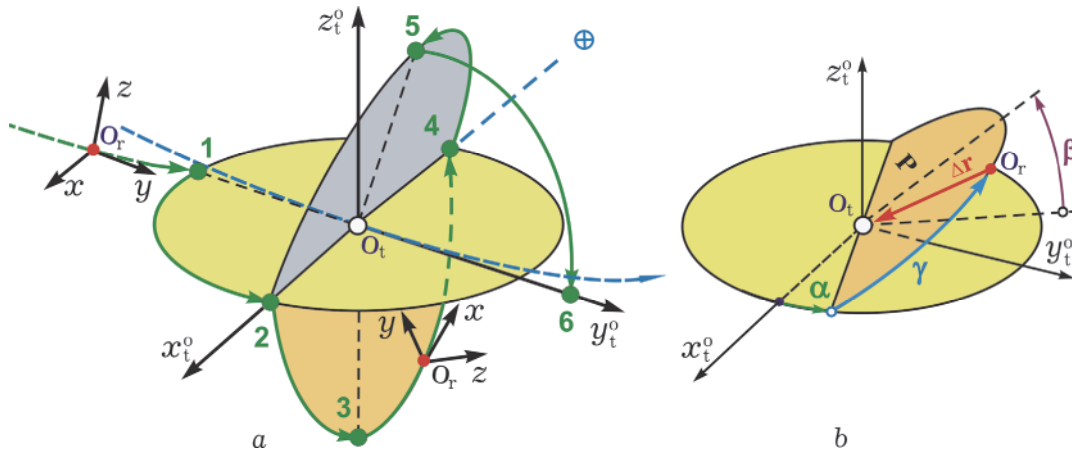


Рис. 1. Схема перелётов КРМ при визуальной инспекции состояния геостационарного спутника

ных двигателей по симметричной схеме при широтно-импульсной модуляции значений тяги 25 Н каждого двигателя с периодом  $T_u^e = 4$  с, что позволяет одновременно создавать векторы импульсов силы и момента произвольного направления в ССК робота; 2) силовой гироскопический кластер (СГК) на основе четырёх гиродинов с собственным кинетическим моментом (КМ)  $h_g = 100$  Нмс и цифровым управлением с периодом  $T_u = 0.25$  с.

Если считать КРМ твёрдым телом с массой  $m$  и тензором инерции  $\mathbf{J}$ , то при стандартных обозначениях модель его пространственного движения в проекции на оси ССК  $O_rxyz$  имеет вид

$$\mathbf{r}^* + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r} = \mathbf{v}; \quad m(\mathbf{v}^* + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}) = \mathbf{P}^e + \mathbf{F}^d;$$

$$\dot{\boldsymbol{\Lambda}} = \boldsymbol{\Lambda} \circ \boldsymbol{\omega} / 2; \quad \mathbf{J} \dot{\boldsymbol{\omega}} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{G} = \mathbf{M}^g + \mathbf{M}^e + \mathbf{T}^d.$$

Здесь кватернион  $\boldsymbol{\Lambda} = (\lambda_0, \boldsymbol{\lambda})$  с вектором  $\boldsymbol{\lambda} = \{\lambda_i\}$  представляет ориентацию КРМ в ИСК;  $\mathbf{G} = \mathbf{J} \boldsymbol{\omega} + \mathbf{H}$  является вектором КМ механической системы, где  $\mathbf{H}$  – вектор кинетического момента СГК; векторы  $\mathbf{P}^e$ ,  $\mathbf{M}^e$  и  $\mathbf{M}^g \equiv -\mathbf{H}^*$  представляют соответственно управляющие силы РДУ, моменты РДУ и СГК, векторы  $\mathbf{F}^d$  и  $\mathbf{T}^d$  – внешние возмущающие силы и моменты, а также используется символ  $(\cdot)^*$  локальной производной по времени. Применяемые дискретные алгоритмы широтно-импульсного и цифрового управления детально представлены в [1].

В статье решаются две задачи: 1) синтез алгоритмов наведения КРМ в процессе инспекционного облёта геостационарного спутника с последовательным наблюдением его состоя-

ния из 6 точек с заданных расстояний; 2) анализ динамики СУД робота с массой  $m \approx 3000$  кг при таком облёте.

### ЗАКОНЫ НАВЕДЕНИЯ РОБОТА ПРИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ ОБЗОРЕ ЦЕЛИ

В ОСК цели перемещение КРМ между наблюдениями задаётся плоскостью  $\mathbf{P}$ , положение которой назначается фиксированными углами  $\alpha$  и  $\beta$  на рис. 1b, и расположением полюса  $O_r$  КРМ в этой плоскости, которое определяется углом  $\gamma(t)$  и модулем  $s(t) = \Delta r(t)$  вектора  $\mathbf{s}(t) = -\Delta \mathbf{r}(t)$ . рис. 1b. Задача пространственного наведения КРМ состоит в программном расположении  $\mathbf{s}^p(t) = -\Delta \mathbf{r}^p(t)$  полюса  $O_r$  КРМ в плоскости  $\mathbf{P}$  ОСК цели и в программной ориентации оси  $O_r y$  по орту вектора  $\Delta \mathbf{r}^p$ , когда ось  $O_r z$  ССК робота направлена по нормали к плоскости перемещения его полюса  $O_r$ .

Пусть номер  $j = 1 \div 5$  перелёта (перехода) между точками инспекции соответствует точке завершения предыдущего наблюдения, см. рис. 1a. Временная диаграмма перелётов КРМ приведена на рис. 2, где переходы КРМ между точками наблюдения отмечены синим цветом, а участки наблюдения, где КРМ стабилизируется в ОСК цели, – зеленым цветом. В верхней части диаграммы указано текущее время, а в нижней

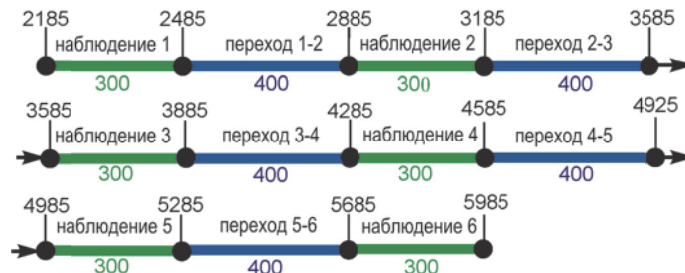


Рис. 2. Временная диаграмма перелётов КРМ и наблюдений состояния спутника

части – длительности наблюдения. Здесь длительность  $j$ -го перелёта принята одинаковой  $T_j = 400$  с  $\forall j = 1 \div 5$ , также как и длительность 300 с (5 минут) наблюдения геостационарного спутника из каждой точки, см. рис. 1a и 2.

Таблица 1. Параметры перелётов КРМ

$j$	$\alpha_j$ , град	$\beta_j$ , град	$\gamma_i^p$ , град	$\gamma_f^p$ , град	$s_i^p$ , м	$s_f^p$ , 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

Заданные кинематические параметры для имитации перелётов КРМ при последовательной визуальной инспекции состояния спутника на ГСО приведены в таб. 1.

При  $j$ -ом перелёте КРМ вектор его требуемого расположения  $\mathbf{s}^p(t)$  определяется углом  $\gamma_j^p(t)$  в плоскости, заданной фиксированными углами  $\alpha_j$  и  $\beta_j$ , и расстоянием  $s_j^p(t)$  от цели. Угол  $\gamma_j^p(t)$  изменяется от начального (initial) значения  $\gamma_{ij}^p = \gamma_j^p(t_{ij})$  до конечного (final) значения  $\gamma_{fj}^p = \gamma_j^p(t_{ij} + T_j)$ , где  $T_j$  – длительность  $j$ -го перелёта. При этом расстояние  $s_j^p(t)$  изменяется от начального значения  $s_{ij}^p = s_j^p(t_{ij})$  до конечного  $s_{fj}^p = s_j^p(t_{ij} + T_j)$ . На рис. 3 представлена пространственная программная траектория перелётов КРМ в ОСК цели, полученная в компьютерной среде *MatLab*.

Для каждого  $j$ -го перелёта столбец  $\mathbf{s}^p(t)$  координат центра масс КРМ с модулем  $s^p(t)$  определяется в ОСК  $O_t x_t^o y_t^o z_t^o$  цели с помощью ортогональной матрицы  $\mathbf{Q}_j = [\alpha_j]_3^t [\beta_j]_1^t [\gamma_j^p(t)]_3^t$ . При заданных краевых условиях

$$\gamma_{ij}^p, \gamma_{fj}^p; \dot{\gamma}_{ij}^p = \dot{\gamma}_{fj}^p = 0; \gamma_{fj}^p = \ddot{\gamma}_{fj}^p = 0;$$

$$s_{ij}^p, s_{fj}^p; \dot{s}_{ij}^p = \dot{s}_{fj}^p = 0; \dot{s}_{fj}^p = \ddot{s}_{fj}^p = 0$$

назначаются сплайны второго порядка  $\gamma_j^p(t)$  и  $s_j^p(t)$  с ограниченными 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 программных как поступательных, так и угловых перемещений, скоростей и ускорений КРМ относительно ОСК цели. Эти векторы сначала представляются в ИСК, к ним добавляются соответствующие кинематические параметры движения цели и также по явным соотношениям вычисляются векторы координат, скорости и ускорения КРМ в ИСК. Наконец, с помощью стандартного обратного кинематического преобразования искомые законы наведения робота представляются в его ССК  $O_r x_r y_r z_r$  в виде программных значений векторов расположения  $\Delta \mathbf{r}^p(t) = -\mathbf{s}^p(t)$ , скорости  $\Delta \mathbf{v}^p = \{\Delta v_i^p\}$  и ускорения  $\mathbf{w}^p = \{w_i^p\}$  в его поступательном

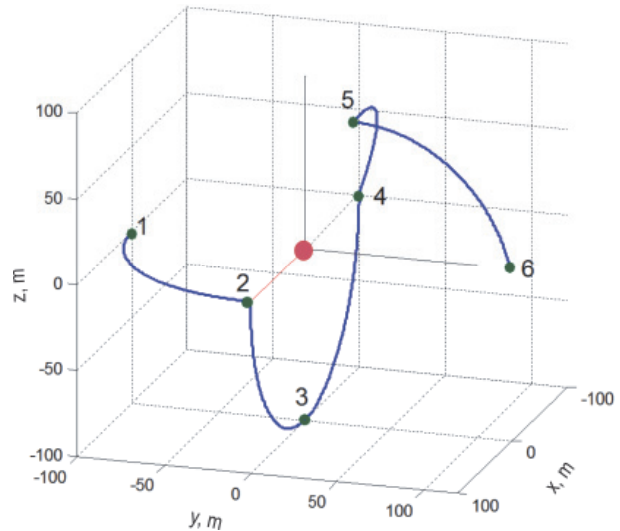


Рис. 3. Программная траектория перелётов КРМ

движению, а также программных изменений кватерниона  $\Lambda^p$ , вектора модифицированных параметров Родрига  $\sigma = \{\sigma_i\}$ , векторов угловой скорости  $\omega^p = \{\omega_i^p\}$  и углового ускорения  $\epsilon^p = \{\epsilon_i^p\}$  робота.

Изменения вектора  $\mathbf{s}^p(t) = \{s_i^p(t)\}$  дальности полюса КРМ  $O_r$  от цели и его модуля  $s^p(t)$  приведены на рис. 4. Здесь легко убедиться, что наблюдение геостационарного спутника из пятой точки выполняется при дальности 80 м, а наблюдение из шестой точки – с расстояния 120 м.

Рис. 5 представляет изменения вектора  $\Delta \mathbf{v}^p = \{\Delta v_i^p\}$  программной скорости поступательного движения КРМ, где компоненты  $\Delta v_i^p$  этого вектора по оси  $O_r x$  ССК робота ( $i = 1$ ) отмечены синим цветом, по оси  $O_r y$  ( $i = 2$ ) – зелёным и по оси  $O_r z$  ( $i = 3$ ) – красным цветом. С применением такой же цветовой разметки на рис. 6 и 7 представлены изменения программных значений вектора модифицированных параметров Родрига  $\sigma = \{\sigma_i\}$  и вектора угловой скорости  $\omega^p = \{\omega_i^p\}$ .

### АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ СУД РОБОТА ПРИ ОБЗОРЕ СОСТОЯНИЯ СПУТНИКА

Как и в [1], при анализе точности поступательного перемещения КРМ используется вектор рассогласования  $\delta \Delta \mathbf{r} \equiv \{\delta \Delta r_i\} = \Delta \mathbf{r}^p(t) - \Delta \mathbf{r}(t)$  между программной разностью  $\Delta \mathbf{r}^p(t)$  и фактической разностью  $\Delta \mathbf{r}(t)$  расположенных полюсов цели  $O_t$  и робота  $O_r$ . При заданном в ИСК программном угловом движении КРМ (законе наведения)  $\Lambda^p(t)$ ,  $\omega^p(t)$  погрешность ориентации КРМ определяется кватернионом  $\mathbf{E} = (e_0, \mathbf{e}) = \tilde{\Lambda}^p \circ \Lambda$ , вектором Эйлера  $\mathbf{E} = \{e_0, \mathbf{e}\}$ , где вектор



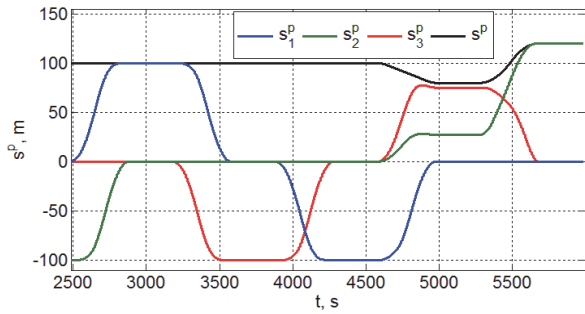


Рис. 4. Программная дальность КРМ от цели

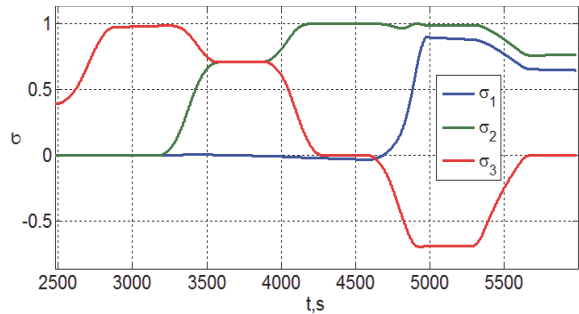


Рис. 6. Модифицированные параметры Родрига

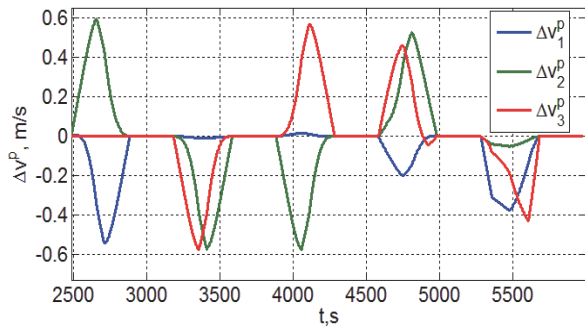


Рис. 5. Вектор программной линейной скорости

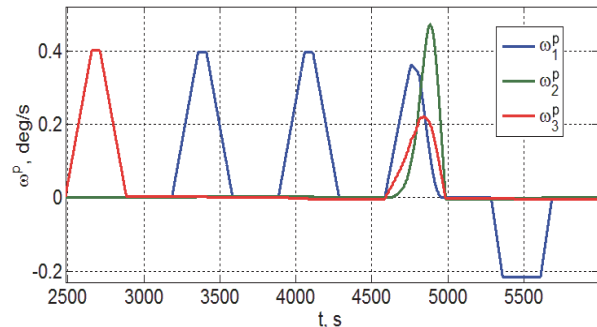


Рис. 7. Вектор программной угловой скорости

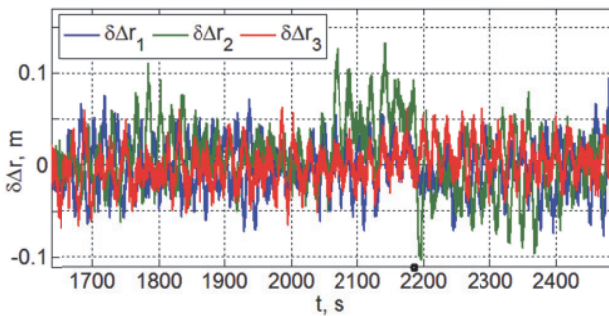


Рис. 8. Рассогласования в расположении КРМ

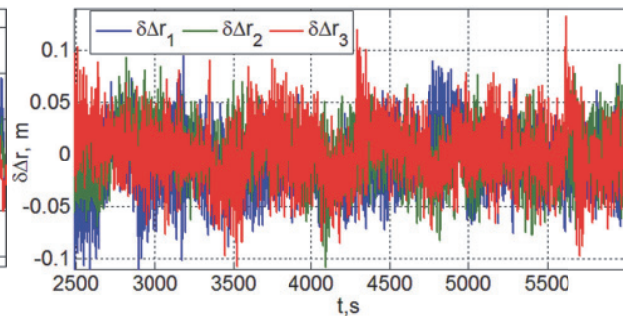


Рис. 10. Рассогласования в расположении КРМ

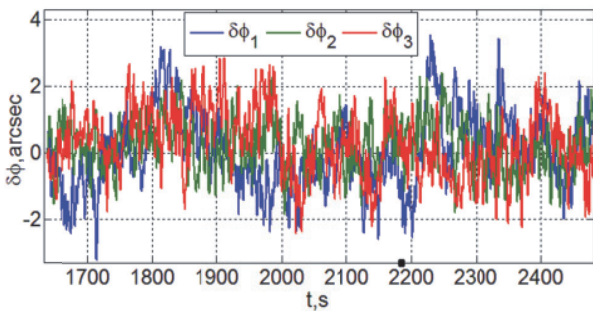


Рис. 9. Ошибки угловой стабилизации КРМ

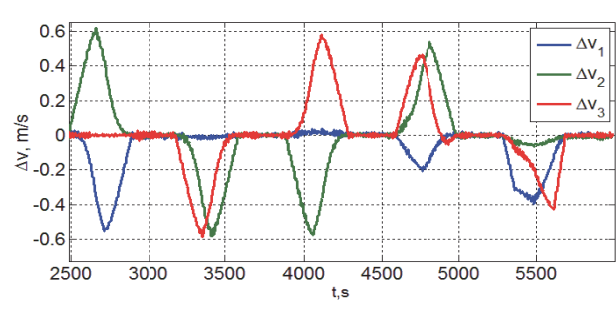


Рис. 11. Вектор скорости перемещения КРМ

$\mathbf{e} = \{e_i\}$ , матрицей  $\mathbf{C}^e(\mathbf{E}) = \mathbf{I}_3 - 2[\mathbf{e} \times] \mathbf{Q}_e^t$ , где  $\mathbf{Q}_e = \mathbf{I}_3 e_0 + [\mathbf{e} \times]$  и вектором ошибки ориентации  $\delta\phi = \{\delta\phi_i\} = \{2e_0 e_i\}$ , а погрешность стабилизации угловой скорости вычисляется по формуле  $\delta\omega = \{\delta\omega_i\} = \omega - \mathbf{C}^e \omega^p(t)$ .

На последующих рисунках кратко приводятся результаты нелинейного анализа точности системы управления движением КРМ, полученные методами компьютерной имитации.

На рис. 8 представлены рассогласования  $\delta\Delta r_i$  в расположении КРМ сначала при сбли-

жении КРМ массой  $m = 3018$  кг с геостационарным спутником с начальной дальности 500 м до расстояния 100 м на интервале времени  $t \in [1637, 2185]$  с длительностью 548 с, а затем в процессе наблюдения цели из первой точки в течение 300 секунд на интервале времени  $t \in [2185, 2485]$  с, см. временную диаграмму перелётов КРМ и наблюдений состояния спутника на рис. 2 и программную траекторию перелётов КРМ на рис. 3, а на рис. 9. приведены ошибки  $\delta\phi_i$  угловой стабилизации КРМ на

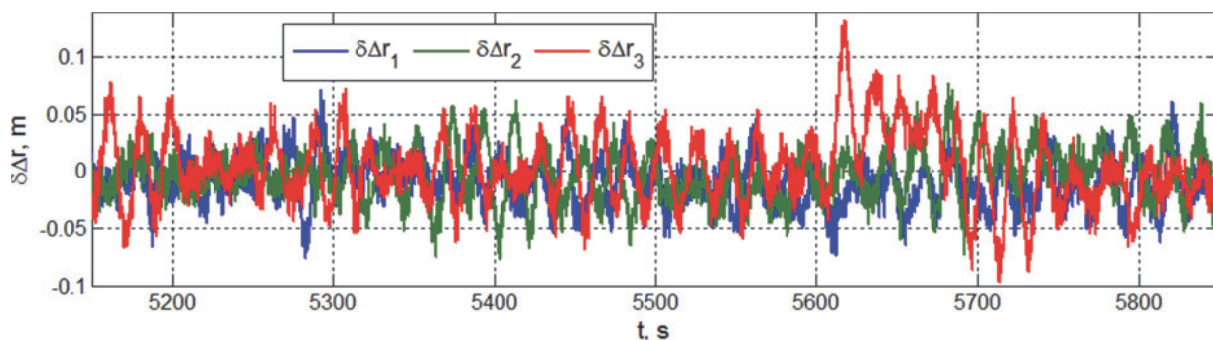


Рис. 12. Рассогласования в расположении КРМ при последнем перелёте и наблюдении

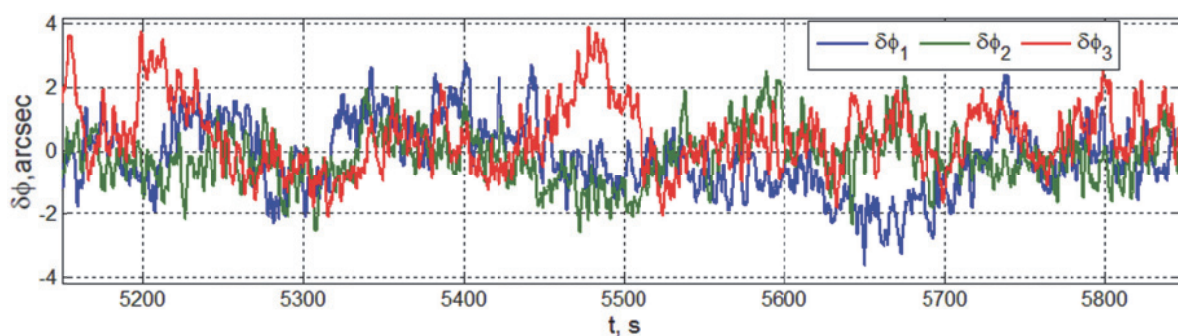


Рис. 13. Погрешности угловой стабилизации КРМ при последнем перелёте и наблюдении

интервале времени  $t \in [1637, 2485]$  с при выполнении тех же манёвров сближения и наблюдения. При этом момент времени  $t = 2185$  с на рис. 8 и 9 отмечен точкой на оси абсцисс.

На рис. 10 и 11 представлены рассогласования в расположении КРМ и компоненты вектора  $\Delta \mathbf{v} = \{\Delta v_i\}$  фактической скорости его поступательного перемещения при перелётах КРМ и последовательном наблюдении состояния цели из точек 2 ÷ 6, см. также рис. 2 и 3.

Наконец, рис. 12 и 13 в удобном масштабе представляют рассогласования в расположении и погрешности угловой стабилизации КРМ при последнем перелёте и наблюдении состояния геостационарного спутника из шестой точки.

Из представленных результатов следует, что при наблюдениях состояния цели достигается точность не хуже 0.05 м по компонентам вектора расположения КРМ и не хуже 2 угл. сек по компонентам вектора погрешности его ориентации. Расчеты показывают, что на таких участках при частоте съёмки 60 кадров/сек, фокусном расстоянии объектива 0.3 м и размере пикселя 9 мкм, изображение будет четким: смаз изображения составит не более 0.023 пикселя в любой точке кадра.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены разработанные алгоритмы наведения космического робота для облёта геостационарного спутника с последовательным наблюдением его состояния из 6 точек с задан-

ного расстояния. В рамках принятого уровня моделирования КРМ выполнен анализ динамики системы управления движением робота при таком облёте, приведены численные результаты, демонстрирующие эффективность разработанных алгоритмов наведения и управления.

Отметим, что в алгоритмах широтно-импульсного управления реактивной двигательной установкой и цифрового управления силовом гироскопическим кластером применяются только позиционные векторные рассогласования, информация о рассогласованиях в скоростях поступательного и вращательного движений робота и геостационарного спутника не используется, этот факт значительно упрощает бортовую реализацию измерительных средств системы управления движением робота. Отмеченные алгоритмы подробно представлены в работах [2, 3].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сомов Е.И., Бутырин С.А., Сомов С.Е., Сомова Т.Е. Вывод на орбиту и сближение космического робота с геостационарным спутником // Известия Самарского научного центра РАН. 2020. Том 22. № 2. С. 124-131.
2. Сомов Е.И., Бутырин С.А. Наведение и управление движением свободнолетающего робота при завершении сближения с пассивным объектом в дальнем космосе // Известия Самарского научного центра РАН. 2017. Том 19, № 4. С. 81-90.
3. Somov Ye., Butyrin S., Somov S. Guidance, navigation and control of a free-flying robot during its rendezvous with a passive space vehicle // Mathematics in Engineering, Science and Aerospace. 2018. Vol. 9. No 3. P. 387-396.

**GUIDANCE AND CONTROL OF A SPACE ROBOT DURING VISUAL INSPECTION  
OF THE GEOSTATIONARY SATELLITE STATE**

© 2020 Ye.I. Somov<sup>1,2</sup>, S.A. Butyrin<sup>1,2</sup>, S.Ye. Somov<sup>1,2</sup>, T.Ye. Somova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Samara Federal Research Centre, Russian Academy of Sciences

<sup>2</sup> Samara State Technical University

We are considering the problems on guidance and control for a space robot during visual checking the state of an information geostationary satellite. The robot motion control system uses a propulsion unit with 8 jet engines and pulse-width modulation of their thrust, and also a gyro moment cluster based on 4 gyrodines with digital control. Numerical results are presented that demonstrate the effectiveness of the developed guidance and control algorithms.

*Key words:* a space robot, geostationary satellite, a monitoring of state, guidance, control

DOI: 10.37313/1990-5378-2020-22-2-132-137

---

*Yevgeny Somov, Leading Researcher of Department "Dynamics and Motion Control", Samara Federal Research Centre, Russian Academy of Sciences; Head of Department for "Navigation, Guidance, and Motion Control", Research Institute for Problems of Mechanical Systems Reliability, Samara State Technical University. E-mail e\_somov@mail.ru*

*Sergey Butyrin, Senior Researcher of Department "Dynamics and Motion Control", Samara Federal Research Centre, Russian Academy of Sciences; Head of Laboratory for "Modeling of Control Systems", Research Institute for Problems of Mechanical Systems Reliability, Samara State*

*Technical University. E-mail butyrinsa@mail.ru*

*Sergey Somov, Researcher of Department "Dynamics and Motion Control", Samara Federal Research Centre, Russian Academy of Sciences; Researcher of Department "Navigation, Guidance, and Motion Control", Research Institute for Problems of Mechanical Systems Reliability, Samara State Technical University. E-mail s\_somov@mail.ru*

*Tatyana Somova, Researcher of Department "Navigation, guidance, and Motion Control", Research Institute for Problems of Mechanical Systems Reliability, Samara State Technical University. E-mail te\_somova@mail.ru*