

УДК 517.977.5-629.783

Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-4-602-614

Для цитирования: Оптимальное управление разведением спицы трансформируемого рефлектора при наличии возмущений с коррекцией интервалов наблюдений / С. А. Кабанов, Д. С. Кабанов, Е. Н. Никулин, Ф. В. Митин // Сибирский аэрокосмический журнал. 2022. Т. 23, № 4. С. 602–614. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-4-602-614.

For citation: Kabanov S. A., Kabanov D. S., Nikulin E. N., Mitin F. V. [Optimal control of deployment of the spoke of a transformable reflector in the presence of disturbances]. *Siberian Aerospace Journal*. 2022, Vol. 23, No. 4, P. 602–614. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-4-602-614.

Оптимальное управление разведением спицы трансформируемого рефлектора при наличии возмущений с коррекцией интервалов наблюдений

С. А. Кабанов, Д. С. Кабанов, Е. Н. Никулин, Ф. В. Митин*

БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова
Российская Федерация, 199005, г. Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул., 1
*E-mail: fedor28@list.ru

В настоящее время активно развивается разработка крупногабаритных космических конструкций и, в частности, трансформируемых рефлекторов. Особенностью данных аппаратов является малый объём при транспортировке и большие размеры в развёрнутом рабочем состоянии. Поэтому важно осуществить надежное и плавное раскрытие, настроить форму активной радиотражающей поверхности с заданной точностью, регулировать орбитальное положение. В космическом пространстве на систему оказывается постоянное воздействие радиации, возникает большой перепад температур на околоземной орбите, присутствует солнечный ветер, что главным образом влияет на диаграмму направленности. В данной работе рассмотрен процесс разведения спицы рефлектора при наличии возмущений и ошибок измерений. В соответствии с принципом разделения алгоритм включает фильтр Калмана и регулятор для разведения спицы и коррекции интервалов включения измерителей. Задача управления разведением спицы решается при использовании алгоритма оптимального управления по иерархии целевых критериев. Коррекция интервалов наблюдений производится управлением производными от моментов времени включения и отключения измерителей. Представлены результаты численного моделирования.

Ключевые слова: алгоритм последовательной оптимизации, крупногабаритный трансформируемый рефлектор, оптимальная фильтрация, математическая модель, моделирование.

Optimal control of deployment of the spoke of a transformable reflector in the presence of disturbances

S. A. Kabanov, D. S. Kabanov, E. N. Nikulin, F. V. Mitin*

BSTU “VOENMEH” named after D. F. Ustinov
1, 1 st. Krasnoarmeyskaya, St. Petersburg, 199005, Russian Federation
*E-mail: fedor28@list.ru

Currently, the development of large-sized space structures and, in particular, transformable reflectors is actively developing. A feature of these devices is a small volume during transportation and large dimensions in the expanded working condition. Therefore, it is important to carry out a reliable and

smooth deployment, adjust the shape of the active radio-reflecting surface with a given accuracy, and adjust the orbital position. In outer space, the system is constantly exposed to radiation, there is a large temperature difference in near-Earth orbit, there is a solar wind, which mainly affects the radiation pattern. In this paper, the process of deployment of the reflector spokes in the presence of disturbances and measurement errors is considered. The solution to the problem is presented using the separation theorem. To estimate the parameters of the system in the presence of measurement noise, the Kalman filter is applied. Its performance is shown at various values of the noise intensity. A random process such as white noise was selected as external disturbances and measurement noises. The control problem is solved using the optimal control algorithm according to the hierarchy of target criteria. The possibility of minimizing energy costs by means of interval switching on of measuring sensors is shown. The results of numerical simulation are presented.

Keywords: sequential optimization algorithm, large-size transformable reflector, optimal filtration, mathematical model, modeling.

Введение

Рефлекторы космического базирования активно используются во многих сферах жизнедеятельности человека. С помощью них осуществляется воздушно-космическая связь и глобальное вещание. Такие антенны используются для прогнозирования климата и дистанционного зондирования земли, исследования дальнего космоса [1–3]. Крупногабаритные рефлекторы специальным образом укладываются в наземных условиях для размещения их в ракете-носителе. После достижения заданной орбиты начинается поэтапный процесс развертывания конструкции, по завершении которого достигается требуемая форма отражающей поверхности.

С середины XX в. все большее внимание стало уделяться крупногабаритным трансформируемым антеннам из-за их большой апертуры и малой массы в развернутом состоянии. Примером такой конструкции является рефлектор Astro Mesh [4; 5]. Для задачи разведения спиц, их выдвижения, обеспечения заданной формы отражающего сетеполотна разработаны математические модели и алгоритмы управления [6–15]. Важно изучить и смоделировать процесс развертывания с учетом возможностей отключения измерителей при минимизации ухудшения при этом точности оценивания [16–18].

Рассмотрим реализацию крупногабаритной космической конструкции с применением вантовой системы для создания необходимой формы радиоотражающей поверхности рефлектора (рис. 1) [10]. Крупногабаритный трансформируемый рефлектор (КТР) состоит из космического аппарата (КА) 1. К нему прикреплены разворачиваемые элементы, такие как солнечные батареи 2, облучающая система 3. Для обеспечения заданной диаграммы направленности штанга 4 выдвигает рефлектор 5 на необходимое фокусное расстояние. Отражающей поверхностью является сетеполотно 6.

Раскрытие КТР происходит в космическом пространстве, поэтому важно привести систему в рабочее положение при минимизации колебаний, что достигается плавностью раскрытия и высокой точностью выхода к упорам. Большой перепад температур, а также радиация и солнечный ветер оказывают возмущаю-

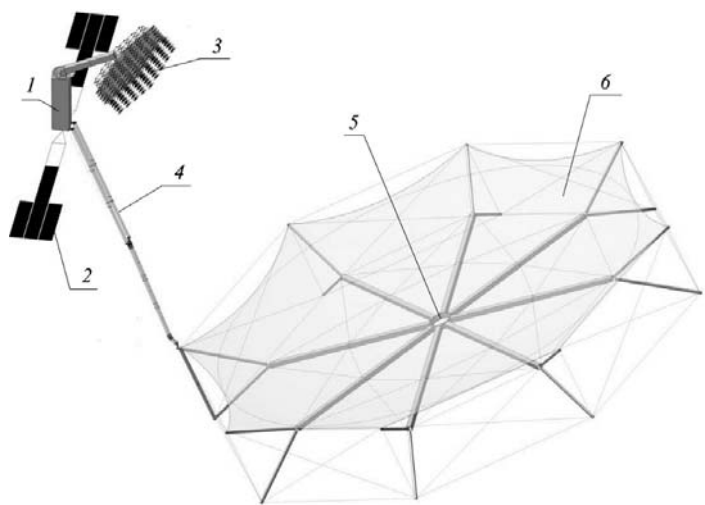


Рис. 1. Конструкция КТР

Fig. 1. The design of the LTR
(Large-sized transformable reflector)

щее воздействие на конструкции, что может привести к искажению диаграммы направленности [11; 12]. Поэтому необходимо решать задачи фильтрации, оптимального раскрытия рефлектора и коррекции интервалов наблюдений при допустимой точности оценивания, т. е. исследовать возможность регулировки режима активной работы измерителей.

Математическое описание задачи

Рассмотрим процесс прямого раскрытия спицы КТР. Необходимо изменить положение спицы на заданный угол φ под действием силы M (рис. 2). Спица жестко закреплена одним концом к КА, вращение осуществляется под действием электрического двигателя. Рассмотрим поворот спицы в упрощенном виде без учета изгибных колебаний, моментов трения, создаваемых упором и фиксатором. Оптимальное управление раскрытием рефлектора с учетом колебаний рассмотрено в работах [13; 15].

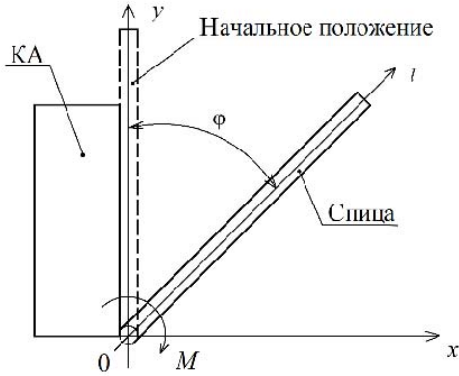


Рис. 2. Разведение спицы рефлектора

Fig. 2. The deployment of the reflector spoke

Для исследования возможностей автоматической оптимальной регулировки режима активной работы измерителей в работе [17] предложен алгоритм с оптимальной коррекцией структуры наблюдений. В применении к рефлектору разработан соответствующий алгоритм [18], позволяющий экономить энергию на работу измерителей.

Математическая модель, описывающая данный процесс, имеет вид

$$\dot{x} = f(x, u, t) + \xi_x, \tag{1}$$

при наблюдении

$$z = a(t, \tau) [h(x, t) + \xi_z], \tag{2}$$

где x – n -мерный вектор состояния; u – m -мерный вектор управления; $m \leq n$, ξ_x, ξ_z – n - и l -векторы возмущений в виде белых шумов с интенсивностями B_x и B_z соответственно; $l \leq n$; z – l -вектор измерений; f – h -заданные непрерывные вектор-функции своих аргументов соответствующей размерности, имеющие непрерывные частные производные по x ; $t \in [t_0, t_f]$ – переменная непрерывного времени; $u \in U(t)$, $U(t)$ – заданная область m -мерного пространства.

Введем функцию времени $a(t, \tau)$, определяющую активность измерителей; если $a(t, \tau) = 1$, то в момент t проводится измерение, а если $a(t, \tau) = 0$ – нет. Здесь $a(t, \tau) = 1 - \Delta\alpha^T \cdot 1(t - \tau_{2j-1}) + \Delta\alpha^T \cdot 1(t - \tau_{2j})$, $1(t - \tau_{2j-1}) = [1(t - \tau_1)1(t - \tau_3) \dots 1(t - \tau_{2r-1})]^T$, $1(t - \tau_{2j}) = [1(t - \tau_2)1(t - \tau_4) \dots 1(t - \tau_{2r})]^T$, $\Delta\alpha = (\Delta\alpha_1 \Delta\alpha_2 \dots \Delta\alpha_r)^T$, $\Delta\alpha_j = 1$; $1(t - \tau_{2j-1})$, $1(t - \tau_{2j})$ – единичные функции; τ_{2j}, τ_{2j-1} – моменты времени включения и отключения измерителей, $j = \overline{1, r}$.

При этом минимизируется целевой функционал, в общем случае имеющий терминальную и интегральную составляющие,

$$I = M \left[V_f(x, \bar{x}, t_0, t_f) + \int_{t_0}^{t_f} f_0(x, \bar{x}, u, t) dt \right], \tag{3}$$

где f_0, V_f – заданные положительно определённые функции своих аргументов, имеющие непрерывные частные производные по x, t , а функция f_0 еще и по u . Примем

$$V_f = V_{f1}(x, \bar{x}, t_0) + V_{f2}(x, t_f), \quad V_{f1}(x, \bar{x}, t_0) = 0.5 \Delta \bar{x}_0^T R_0^{-1} \Delta \bar{x}_0,$$

$$V_{f2}(x, t_f) = 0.5 \Delta x_f^T \rho \Delta x_f + 0.5 \rho_0 \Delta \bar{x}_f^T R(t_f) \Delta \bar{x}_f + 0.5 \beta \sum_{j=1}^r (\tau_{2j} - \tau_{2j-1})^{-2}, \quad j = \overline{1, r}, \quad \Delta \bar{x}_0 = \bar{x}_0 - x_0,$$

$$\begin{aligned} \bar{x}_0 = \bar{x}(t_0), \quad x_0 = x(t_0), \quad \Delta x_f = x(t_f) - x_f, \quad \Delta \bar{x}_f = \bar{x}(t_f) - x_f, \quad \rho = \text{diag}(\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n), \\ f_0(x, \bar{x}, u, t) = 0.5 \Delta \bar{x}^T \gamma \Delta \bar{x} + 0.5 (u^T k^{-2} u + u_0^T k^{-2} u_0), \quad \gamma = \text{diag}(\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n), \quad \Delta \bar{x} = \bar{x} - x, \quad x_f - \end{aligned}$$

заданное конечное значение вектора x ,

$$k = \text{diag}(k_1, k_2, \dots, k_m); \quad \beta, \rho_0, \rho_i, \gamma_i \quad (i = \overline{1, n}), \quad k_j \quad (j = \overline{1, m}) -$$

заданные коэффициенты; R_0, R – матрицы соответствующих размерностей.

Здесь $x = (\varphi \ \omega \ U)^T$ – вектор состояния. В поэлементном виде система представляется следующим образом:

$$\dot{\varphi} = \omega + \xi_x, \quad \dot{\omega} = \frac{m_\phi p E_0 \sin \vartheta}{\omega_d X_c I} U, \quad \dot{U} = u,$$

где φ – угол поворота спицы; ω – угловая скорость поворота спицы; ξ_x – возмущение в виде случайного процесса с интенсивностью B_x ,

$$M_\Pi = \frac{m_\phi p E_0 \sin \vartheta}{\omega_d X_c} U -$$

полезный момент, создаваемый бесколлекторной машиной (равен общему моменту, действующему на спицу, без учета моментов трения и создаваемых упором и фиксатором); m_ϕ – число фаз ротора; p – число пар полюсов магнитного поля; E_0 – действующее значение электродвижущей силы (ЭДС); ϑ – угол рассогласования (между U и E_0 , для двигателя находится в пределах $[0, \pi/2]$); ω_d – угловая скорость вращения ротора двигателя; X_c – синхронное сопротивление; I – момент инерции спицы; U – напряжение питания бесколлекторной машины; u – управление.

Рассмотрим спицу как цилиндрическую трубу. Примем её за однозвенную конструкцию. Измерению доступен угол поворота спицы. Для задачи разведения спиц уравнение наблюдения рассмотрим в виде (2), где $h(x, t) = \varphi$, ξ_x – возмущение в виде случайного процесса с интенсивностью B_z .

Согласно принципу разделения [19], синтез управления заключается в получении оптимальной оценки вектора состояния и, далее, в формировании собственно управления в предположении, что вектор состояния известен точно и равен вектору оценки

$$x = \hat{x}, \quad u = u(\hat{x}, t).$$

Так как информация не будет поступать непрерывно, предлагается оптимизировать режимы отключения измерительной аппаратуры при допустимом ухудшения точности оценивания.

Основной результат

Для построения оптимального управления системой (1), (2), минимизирующего критерий (3), необходимо иметь оценку вектора состояния. Предположим, что алгоритм оценивания имеет вид [16]:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}} &= f(\hat{x}, u, t) + \alpha(t, \tau) R h_x^T B_z^{-1} [z - h(\hat{x}, t)], \\ \dot{R} &= f_x R + R f_x^T - R h_x^T B_z^{-1} h_x R + B_x, \quad R(t_0) = R_0. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь \hat{x} – n -мерный вектор оценок. $f_x = \partial f / \partial x$, $h_x = \partial h / \partial x$.

Введем дополнительное управление моментами включения и выключения измерителей

$$\dot{t} = w. \quad (5)$$

Для минимизации затрат на время наблюдения рассмотрим критерий Красовского [19]:

$$I_1 = I + 0.5 \int_{t_0}^{t_f} (w^T k_w^{-2} w + w_0^T k_w^{-2} w_0) dt, \quad k_w = \text{diag}(k_{w1}, k_{w2}, \dots, k_{w2r}). \quad (6)$$

Положим

$$f^{\Phi 1} = f(\hat{x}, u, s) + \alpha(s, \tau) R h_{\hat{x}}^T B_z^{-1} [z - h(\hat{x}, s)], \quad f^{\Phi 2} = f_{\hat{x}} R + R f_{\hat{x}}^T - \alpha(\tau, t) R h_{\hat{x}}^T B_z^{-1} h_{\hat{x}} R + B_x.$$

Исходная система и уравнение наблюдения имеют вид (1), (2):

$$\dot{x} = f(x, u, t) + \xi_x, \quad x = [X^T \ Y^T]^T, \quad f = [F^T \ u^T]^T, \quad z = \alpha(t, \tau) [h(x, t) + \xi_z].$$

Обозначим

$$R = [R_1 \ R_2 \dots R_n], \quad f^{\Phi 2} = [f_1^{\Phi 2} \ f_2^{\Phi 2} \dots f_n^{\Phi 2}], \quad B_x = [B_{x1} \ B_{x2} \dots B_{xn}],$$

$$R_i = \begin{bmatrix} R_{1i} \\ \dots \\ R_{ni} \end{bmatrix}, \quad f_i^{\Phi 2} = \begin{bmatrix} f_{1i}^{\Phi 2} \\ \dots \\ f_{ni}^{\Phi 2} \end{bmatrix}, \quad B_{xi} = \begin{bmatrix} B_{x1i} \\ \dots \\ B_{xni} \end{bmatrix}, \quad i = \overline{1, n} -$$

столбцы матриц R и $f^{\Phi 2}$ соответственно.

Представим гамильтониан H в виде

$$H = p_{\hat{x}}^T f^{\Phi 1} + tr[p_R^T f^{\Phi 2}] + p_{\tau}^T w + p_x^T f + f_0(x, u, t)$$

или

$$H = p_{\hat{x}}^T \left\{ f(\hat{x}, u, s) + \alpha(s, t) R h_{\hat{x}}^T B_z^{-1} [z - h(\hat{x}, s)] \right\} + tr \left\{ p_R^T [f_{\hat{x}} R + R f_{\hat{x}}^T - \alpha(t, \tau) R h_{\hat{x}}^T B_z^{-1} h_{\hat{x}} R + B_x] \right\} + p_x^T f(x, u, s) + p_{\tau}^T w + \gamma \alpha(t, \tau) + 0.5(\Delta x^T R^{-1} \Delta x + w^T k_w^{-2} w + w_0^T k_w^{-2} w_0 + u^T k_u^{-2} u + u_0^T k_u^{-2} u_0).$$

Здесь

$$tr \ p_R^T f_R = \sum_{i=1}^n p_R^T f_R,$$

P_R – матрица, сопряженная с матрицей R , и составленная из столбцов P_{Ri} ,

$$i = \overline{1, n} : p_R = [p_{R1} \ p_{R2} \dots p_{Rn}], \quad p_{Ri} = \begin{bmatrix} p_{R1i} \\ \dots \\ p_{Rni} \end{bmatrix}.$$

Тогда канонические уравнения имеют вид

$$\dot{x} = f(x, u, t) + \xi_x, \quad \dot{Y} = u, \quad \dot{\tau} = w,$$

$$\dot{\hat{x}} = \left(\frac{\partial H}{\partial p_x} \right)^T = f^{\Phi 1}(\hat{x}, u, t, R, B_z, \tau, z),$$

$$\dot{R} = \left(\frac{\partial H}{\partial p_R} \right)^T = f^{\Phi 2}(\hat{x}, u, t, R, B_z, B_x, \tau, z),$$

$$\dot{p}_x = - \left[\partial(p_x^T f) / \partial x \right]^T - f_{0x}^T,$$

$$\dot{p}_{\hat{x}} = \left(\frac{\partial H}{\partial \hat{x}} \right) = - \left(\frac{\partial f^{\Phi 1}}{\partial \hat{x}} \right) p_{\hat{x}} - \left[\frac{\partial tr(p_R^T f^{\Phi 2})}{\partial \hat{x}} \right]^T - f_{0\hat{x}}^T,$$

$$\dot{p}_R = - \left(\frac{\partial H}{\partial R} \right)^T = - \alpha h_{\hat{x}}^T B_z^{-1} (z - h) p_{\hat{x}}^T - p_R^T f_{\hat{x}} - f_{\hat{x}}^T p_R^T + \alpha \left(p_R^T R_x^T h_{\hat{x}}^T B_z^{-1} h_{\hat{x}} + h_{\hat{x}}^T B_z^{-1} h_{\hat{x}} R p_R^T \right),$$

$$\dot{p}_{\tau} = - \left(\frac{\partial H}{\partial \tau} \right)^T = \left\{ - p_{\hat{x}}^T R h_{\hat{x}}^T B_z^{-1} [z - h(\hat{x}, t)] + tr \left[p_R^T R h_{\hat{x}}^T B_z^{-1} h_{\hat{x}} R \right] \right\} \left(\frac{\partial \alpha(t, \tau)}{\partial \tau} \right)^T.$$

Здесь

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial \alpha(t, \tau)}{\partial \tau} \right)^T &= -\Delta \alpha \delta(T - \tau), \quad f_{0\dot{x}} = \gamma(\Delta x)^T, \quad f_{0x} = -\gamma(\Delta x)^T, \\ p_{\bar{x}}(t_0) &= R_0^{-1} \Delta \bar{x}_0, \quad p_x(t_0) = -R_0^{-1} \Delta \bar{x}_0, \quad p_R(t_0) = 0.5 \frac{\partial}{\partial R} \left[\Delta \bar{x}^T R_0^{-1} \Delta \bar{x} \right] = -\Delta \bar{x} \Delta \bar{x}^T R_0^{-2}, \\ p_x(t_f) &= \rho \Delta x_f, \quad p_{\bar{x}}(t_f) = \rho_0 R(t_f) \Delta \bar{x}_f, \quad p_R(t_f) = \rho_0 \Delta \bar{x}_f \Delta \bar{x}_f^T, \quad p_{\tau_{2j-1}}(t_f) = \beta (\tau_{2j} - \tau_{2j-1})^{-1}, \\ p_{\tau_{2j}}(t_f) &= -\beta (\tau_{2j} - \tau_{2j-1})^{-1}, \quad \Delta x_f = x(t_f) - x_f, \quad \Delta \bar{x} = \bar{x} - x, \quad w(t) = -k_w^2 p_\tau(t), \\ u(t) &= -k^2 p_Y(t), \quad p_x = \begin{pmatrix} p_X^T & p_Y^T \end{pmatrix}^T. \end{aligned}$$

В прогнозирующую модель в прямом времени входят уравнения динамики разведения спицы рефлектора и уравнения фильтра Калмана при неизменном режиме работы измерителей. Далее вычисляются граничные значения сопряженных переменных. При интегрировании в обратном времени к уравнениям прогноза в прямом времени добавляются уравнения для сопряженных переменных. После нахождения значений сопряженных переменных в текущий момент вычисляется управление. Далее исходная система с управлением интегрируется на шаг вперед. При $t < t_f$ вычисления повторяются из текущего положения. При $t > t_f$ расчеты завершаются.

При вычислениях последовательность переключений τ_i , $i = \overline{1, r}$ остается неизменной. При сближении соседних значений моментов переключения до минимальной величины $(\tau_{i+1} - \tau_i) < \varepsilon$ принимается $\tau_{i+1} = \tau_i$ и количество всех переключений в структуре (r) уменьшается на единицу: $(r - 1)$, где $\varepsilon > 0$ – заданная малая величина.

Здесь

$$\begin{aligned} f^{\phi 1} &= \begin{bmatrix} \hat{\omega} + \alpha(t, \tau) B_z^{-1} R_{11} (z - \hat{x}_1) \\ \frac{m_\phi p E_0 \sin \vartheta}{\omega_d X_c I} \hat{U} + \alpha(t, \tau) B_z^{-1} R_{12} (z - \hat{x}_1) \\ u + \alpha(t, \tau) B_z^{-1} R_{13} (z - \hat{x}_1) \end{bmatrix}, \\ f_{11}^{\phi 2} &= 2R_{12} - \alpha(t, \tau) B_z^{-1} R_{11}^2 + B_x, \\ f_{12}^{\phi 2} &= R_{22} + \frac{m_\phi p E_0 \sin \vartheta}{\omega_d X_c I} R_{13} - \alpha(t, \tau) B_z^{-1} R_{11} R_{12}, \\ f_{13}^{\phi 2} &= R_{23} - \alpha(t, \tau) B_z^{-1} R_{11} R_{13}, \\ f_{22}^{\phi 2} &= 2 \frac{m_\phi p E_0 \sin \vartheta}{\omega_d X_c I} R_{23} - \alpha(t, \tau) B_z^{-1} R_{12}^2, \\ f_{23}^{\phi 2} &= \frac{m_\phi p E_0 \sin \vartheta}{\omega_d X_c I} R_{33} - \alpha(t, \tau) B_z^{-1} R_{21} R_{13}, \\ f_{33}^{\phi 2} &= -\alpha(t, \tau) B_z^{-1} R_{13}^2, \quad f_{21}^{\phi 2} = f_{12}^{\phi 2}, \quad f_{31}^{\phi 2} = f_{13}^{\phi 2}, \quad f_{32}^{\phi 2} = f_{23}^{\phi 2}. \end{aligned}$$

Спица приводится в движение приводом, в качестве которого рассмотрен бесколлекторный электродвигатель Phyttron серии phySPACE [20]. Точность 3–5 % для $1,8^\circ$. В качестве датчика углового положения используется энкодер ЛИР-МА208 [21] с точностью $\pm 1^\circ$. Но так как поворот спицы рассматривается в упрощенном виде без учета изгибных колебаний, то надо увеличить интенсивность ошибок измерения B_z .

Требуется перевести спицу из начального положения $x(0) = (0 \ 0 \ 0)^T$ в конечное $x(t_f) = (\pi/2 \ 0 \ 0)^T$ с отсутствием перерегулирования по углу разворота φ за время $t_f = 60$ с при наличии внешних возмущений ξ_x и шумов измерений ξ_z .

Моделирование

Примем время раскрытия спицы $t_f = 60$ с. Число фаз ротора $m_s = 2$, число пар полюсов магнитного поля $p = 2$, действующее значение ЭДС на обмотке статора $E_0 = 2,5$ В, синхронное сопротивление $X_s = 22 \cdot 10^{-3}$ Ом, угол рассогласования между полем ротора и статора $\vartheta = \pi/10$ при любой нагрузке, $\omega_p = 247$ рад/с. Рассматривается спица длиной $a = 9,75$ м, массой (всех вложенных звеньев) $m = 32$ кг, сечением в виде кольца с внешним радиусом $R = 0,26$ м и внутренним радиусом $r = 0,25$ м. Момент инерции $I = mR^2/2 + ma^2/3 = 1015,4$ кг·м².

В расчетах шум ξ_x и ξ_z принимались белыми с интенсивностями $B_x = 0,00279$, $B_z = 0,0156$ соответственно.

На рис. 3 представлены результаты моделирования при непрерывных измерениях: графики зависимостей $\varphi(t)$, $\omega(t)$. При этом ошибки оценивания приняли значения: $R_{11}(t_f) = 0,00683$, $R_{22}(t_f) = 0,00004$. Видно, что удалось решить поставленную задачу, т. е. раскрыть спицу из начального положения на заданный угол $\pi/2$.

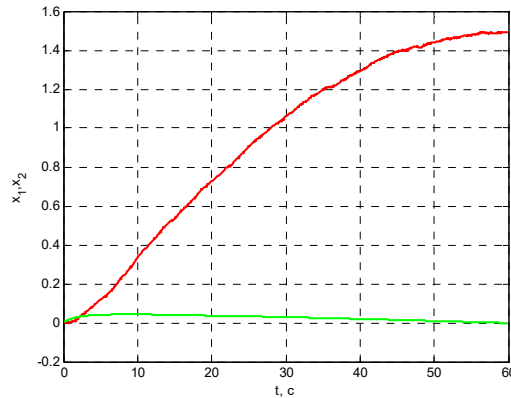


Рис. 3. Графики $x_1(t) = \varphi(t)$, $x_2(t) = \omega(t)$

Fig. 3. Graphics $x_1(t) = \varphi(t)$, $x_2(t) = \omega(t)$

Далее проводились расчеты с применением приведенного выше алгоритма с коррекцией интервалов наблюдения. Вначале приняты 2 интервала отключения измерений: с момента $\tau_1 = 10$ с до $\tau_2 = 20$ с и от $\tau_3 = 30$ с до $\tau_4 = 40$ с. При значениях весовых коэффициентов в критерии (3)

$\rho_0 = 10^{-10}$, $\beta = 10^{-2}$, $k_{w1} = 2 \cdot 10^{-12}$, $k_{w2} = 2 \cdot 10^{-8}$, $k_{w3} = 4$, $k_{w4} = 1$ на рис. 4, а показаны графики $\tau_i(t)$, $i = \overline{1,4}$, а на рис. 4, б – диагональные элементы матрицы ковариации $R_{11}(t)$, $R_{22}(t)$. В результате исходные интервалы отключения измерений $\Delta\tau_1(t_0) = \tau_2(t_0) - \tau_1(t_0) = 10$ с, $\tau_2(t_0) = \tau_4(t_0) - \tau_3(t_0) = 10$ с перешли при $\tau_1(t_f) = 11,998$ с, $\tau_2(t_f) = 20,134$ с, $\tau_3(t_f) = 37,863$ с, $\tau_4(t_f) = 40,215$ с в $\Delta\tau_1(t_f) = \tau_2(t_f) - \tau_1(t_f) = 8,136$ с, $\Delta\tau_2(t_f) = \tau_4(t_f) - \tau_3(t_f) = 2,352$ с, т. е. сумма $\Delta\tau(t_0) = \Delta\tau_1(t_0) + \Delta\tau_2(t_0) = 20$ с уменьшилась до $\Delta\tau(t_f) = \Delta\tau_1(t_f) + \Delta\tau_2(t_f) = 10,488$ с, т. е. произошло сужение интервалов отключения измерений.

При увеличении коэффициента β интервал отключения измерений должен увеличиться. Например, при $\beta = 1$ получаем $\tau_1(t_f) = 11,978$ с, $\tau_2(t_f) = 20,126$ с, $\tau_3(t_f) = 26,648$ с, $\tau_4(t_f) = 44,034$ с и $\Delta\tau_1(t_f) = 8,148$ с, $\Delta\tau_2(t_f) = 17,386$ с, т. е. сумма $\Delta\tau(t_0) = \Delta\tau_1(t_0) + \Delta\tau_2(t_0) = 20$ с увеличилась до $\Delta\tau(t_f) = \Delta\tau_1(t_f) + \Delta\tau_2(t_f) = 25,534$ с. На рис. 5 представлены соответствующие графики.

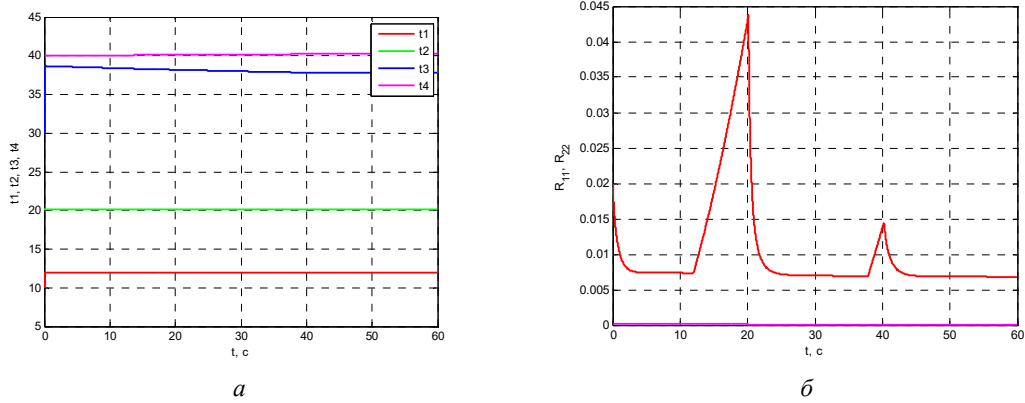


Рис. 4. Графики: $a - \tau_i(t), i = \overline{1,4}$; $b - R_{11}(t), R_{22}(t)$ при 2 интервалах отключения измерений и $\beta = 10^{-2}$

Fig. 4. Graphics: $a - \tau_i(t), i = \overline{1,4}$; $b - R_{11}(t), R_{22}(t)$ at 2 measurement shutdown intervals and $\beta = 10^{-2}$

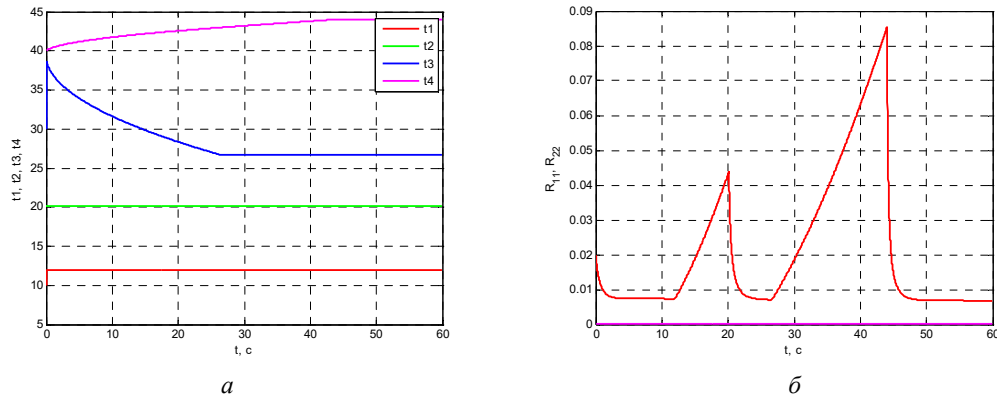


Рис. 5. Графики: $a - \tau_i(t), i = \overline{1,4}$; $b - R_{11}(t), R_{22}(t)$ при увеличении коэффициента β

Fig. 5. Graphics: $a - \tau_i(t), i = \overline{1,4}$; $b - R_{11}(t), R_{22}(t)$ when increasing the coefficient β

Рассмотрим теперь один интервал отключения измерителей: $\tau_1(t_0) = 30$ с, $\tau_2(t_0) = 40$ с, $\Delta\tau(t_0) = \tau_2(t_0) - \tau_1(t_0) = 10$ с. При значениях коэффициентов: $\rho_0 = 10^{-6}$, $\beta = 10^{-2}$, $k_{w1} = 10$, $k_{w2} = 5$ получено $\tau_1(t_f) = 33,91$ с, $\tau_2(t_f) = 40,122$ с и $\Delta\tau(t_f) = 6,212$ с, т. е. сужение интервала (рис. 6).

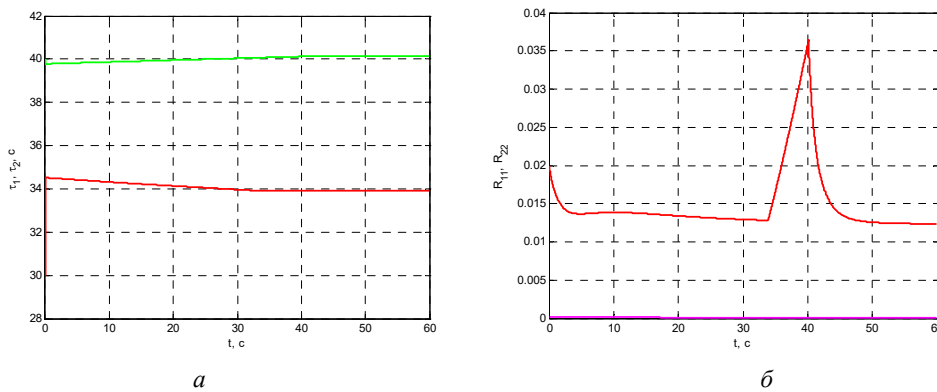


Рис. 6. Графики: $a - \tau_i(t), i = \overline{1,2}$; $b - R_{11}(t), R_{22}(t)$ при 1 интервале отключения измерений и $\beta = 10^{-2}$

Fig. 6. Graphics: $a - \tau_i(t), i = \overline{1,2}$; $b - R_{11}(t), R_{22}(t)$ at 1 measurement shutdown interval and $\beta = 10^{-2}$

При $\rho_0 = 10^{-6}$, $\beta = 1$, $k_{w1} = 10$, $k_{w2} = 5$ вышло $\tau_1(t_f) = 20,953$ с, $\tau_2(t_f) = 52,05$ с и $\Delta\tau(t_f) = 31,097$ с, т. е. увеличение коэффициента β приводит к расширению интервала отключения наблюдений (рис. 7).

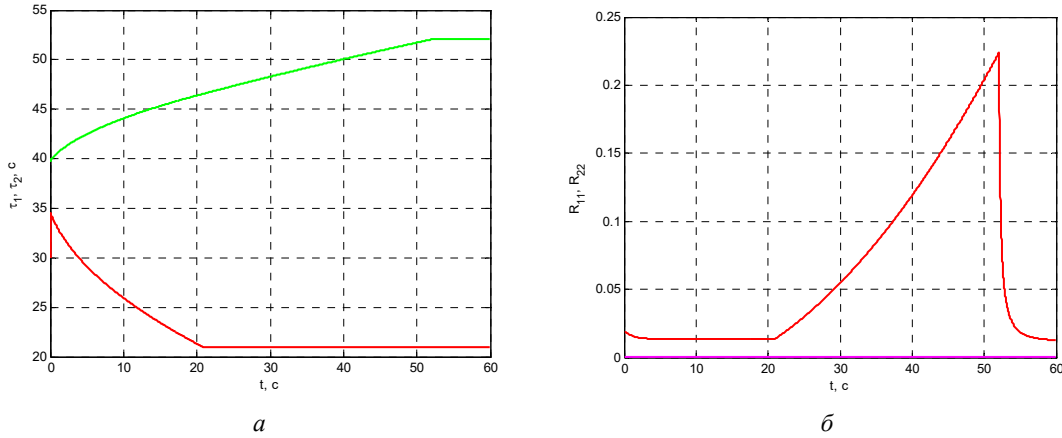


Рис. 7. Графики: $a - \tau_i(t)$, $i = \overline{1,2}$; $b - R_{11}(t)$, $R_{22}(t)$ при 1 интервале отключения измерений и при увеличении коэффициента β

Fig. 7. Graphics: $a - \tau_i(t)$, $i = \overline{1,2}$; $b - R_{11}(t)$, $R_{22}(t)$ at 1 measurement shutdown interval when increasing the coefficient β

Теперь примем $\tau_1(t_0) = 35$ с, $\tau_2(t_0) = 45$ с, $\Delta\tau(t_0) = \tau_2(t_0) - \tau_1(t_0) = 10$ с. При значениях коэффициентов $\rho_0 = 10^{-5}$, $\beta = 10^{-2}$, $k_{w1} = 10$, $k_{w2} = 5$ получено $\tau_1(t_f) = 42,311$ с, $\tau_2(t_f) = 46,012$ с и $\Delta\tau(t_f) = 3,701$ с, т. е. сужение интервала (рис. 8). При этом $R_{11}(t_f) = 0,0136$, $R_{22}(t_f) = 0,0000423$.

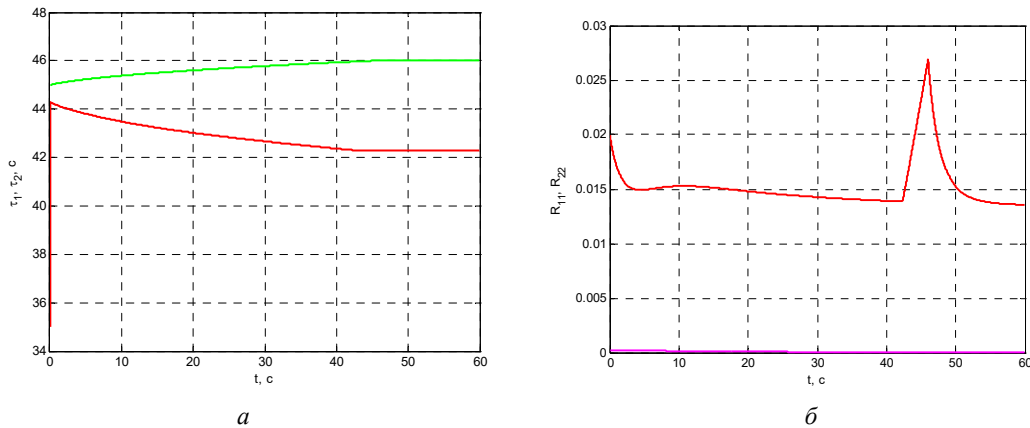


Рис. 8. Графики: $a - \tau_i(t)$, $i = \overline{1,2}$; $b - R_{11}(t)$, $R_{22}(t)$ при изменении начальных значений $\tau_i(t_0)$

Fig. 8. Graphics: $a - \tau_i(t)$, $i = \overline{1,2}$; $b - R_{11}(t)$, $R_{22}(t)$ when changing the initial values $\tau_i(t_0)$

При значениях коэффициентов $\rho_0 = 10^{-6}$, $\beta = 0,2$, $k_{w1} = 10$, $k_{w2} = 5$ получено $\tau_1(t_f) = 31,051$ с, $\tau_2(t_f) = 48,47$ с и $\Delta\tau(t_f) = 17,419$ с, т. е. уменьшение коэффициента ρ_0 и увеличение β приводят к расширению интервала отключения наблюдений (рис. 9). При этом $R_{11}(t_f) = 0,0137$, $R_{22}(t_f) = 0,0000423$.

Как видно из результатов проведенных расчетов, алгоритм с оптимальной коррекцией интервалов наблюдений можно активно использовать при решении задачи экономии затрат энергии на измерения при допустимой точности оценивания. Предполагается, что последовательность моментов переключений в работе измерителей остается упорядоченной по шкале времени. В алгоритме предусмотрено слияние сближающихся моментов переключения с исключением

соответствующего участка. Результаты численного моделирования демонстрируют возможность сокращения времени работы измерителей при допустимой точности оценивания.

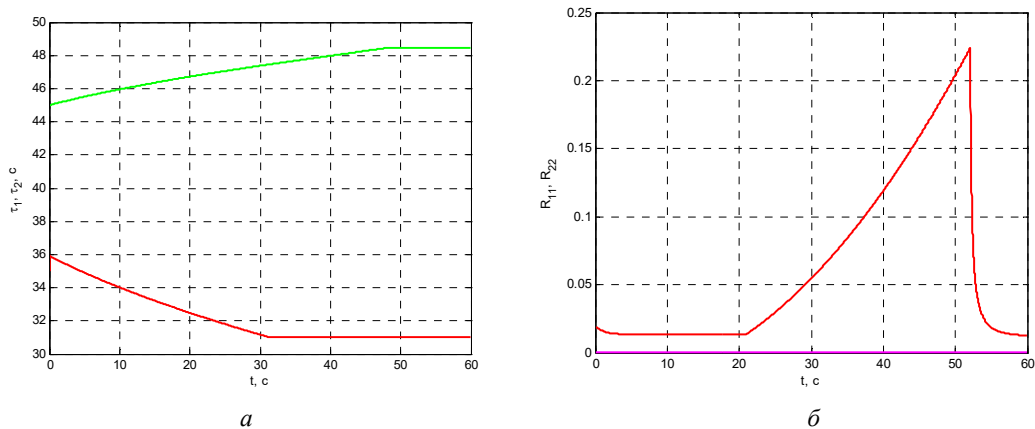


Рис. 9. Графики: $a - \tau_i(t), i = \overline{1,2}$; $b - R_{11}(t), R_{22}(t)$ при уменьшении коэффициента ρ_0 и увеличении коэффициента β

Fig. 9. Graphics: $a - \tau_i(t), i = \overline{1,2}$; $b - R_{11}(t), R_{22}(t)$ when decreasing the coefficient ρ_0 and increasing the coefficient β

На этапе проектирования системы управления в зависимости от вида и интенсивности случайных возмущений, требований к величине допустимых энергетических затрат проводятся исследования по виду структуры наблюдения, установлению весовых коэффициентов критерия, обеспечивающих автоматическое определение интервалов отключения измерителей. В зависимости от получаемых значений весовых коэффициентов критерия возможна коррекция режима работы измерителей. При отключении датчиков не затрачивается энергия на их функционирование и передачу данных.

Дальнейшее уточнение границ интервалов отключения наблюдений можно производить автономно на борту системы.

Заключение

В работе получено решение задачи оптимизации процессов управления по алгоритму последовательной оптимизации [14] и наблюдения по представленному выше алгоритму с коррекцией структуры наблюдений [17; 18]. В результате проделанной работы было подтверждено решение задачи оптимального управления стохастической моделью раскрытия спицы КТР по неполным данным с использованием принципа разделения. Использование алгоритма последовательной оптимизации при полученных оценках с помощью фильтра Калмана данных с коррекцией интервалов отключения измерителей позволило решить поставленную задачу. Результаты работы – сокращение времени включения измерителей при допустимой точности – получены путем численного моделирования. Интервальное выключение измерений позволяет снизить энергозатраты на питание датчиков и обработку измерений. В дальнейшем для усовершенствования представленного алгоритма возможно также вместо принципа разделения применить совместное решение задач навигации и управления как иерархической дифференциальной игры [22].

Представленные исследования доложены на XXVI международной научной конференции «Системный анализ, управление и навигация» [17; 18].

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-08-00646а.

Acknowledgment. The reported study was funded by RFBR according to the research project No 20-08-00646a.

Библиографические ссылки

1. Puig L., Barton A., Rando N. A review on large deployable structures for astrophysics missions // *Acta Astronautica*. 2019. Vol. 67(1). P. 12–26.
2. Полянский И. С., Архипов Н. С., Мисюрин С. Ю. О решении проблемы оптимального управления адаптивной многолучевой зеркальной антенной // *Автомат. и телемех.* 2019. № 1. С. 83–100.
3. Статический и модальный анализ силовой конструкции прецизионного крупногабаритного антенного рефлектора из полимерных композиционных материалов / А. Ю. Власов, Н. А. Амельченко, К. А. Пасечник и др. // *Сибирский журнал науки и технологий*. 2017. Т. 18, № 4. С. 897–901.
4. Nie R., He B., Zhang L. Deployment dynamics modeling and analysis for mesh reflector antennas considering the motion feasibility // *Nonlinear Dyn.* 2018. Vol. 91. P. 549–564.
5. Thomson M. W. The AstroMesh Deployable Reflector. IUTAM-IASS Symposium on Deployable Structures: Theory and Applications. 2000. P. 435–446.
6. Dynamics of a deployable mesh reflector of satellite antenna: form finding and modal analysis / P. Li, C. Liu, Q. Tian et al. // *J Comput. Nonlinear Dyn.* 2016. Vol. 11(4). P. 549–564.
7. Резник С. В., Чубанов Д. Е. Моделирование динамики раскрытия крупногабаритного трансформируемого рефлектора космической антенны из композиционного материала // *Вестник Российского ун-та дружбы народов. Серия: Инженерные исследования*. 2018. Т. 19, № 4. С. 411–425.
8. Бакулин В. Н., Борзых С. В. Моделирование динамики процесса раскрытия крупногабаритных трансформируемых космических конструкций // *Известия вузов. Авиационная техника*. 2020. № 4. С. 50–56.
9. Разработка расчетно-экспериментального метода модального анализа / В. А. Бернс, В. Е. Левин, Д. А. Красноруцкий и др. // *Космические аппараты и технологии*. 2018. Т. 2, № 3(25). С. 125–133.
10. Development for petal-type deployable solid-surface reflector by uniaxial rotation mechanism / H. Huang, Q. Cheng, L. Zheng, Y. Yang // *Acta Astronautica*. 2021. № 178. P. 511–521.
11. Ишков В. Н. Воздействие солнечных активных явлений на околоземное космическое пространство и возможность их прогноза // *Сложные системы*. 2012. № 4 (5). С. 21–41.
12. Влияние солнечной активности на магнитосферу Земли / Б. Б. Михалев, С. Б. Дертеев, И. Ю. Лагаев, Т. Т. Осмонов // *Актуальные проблемы современной физики и математики*. 2017. С. 92–97.
13. Кабанов С. А., Митин Ф. В. Оптимизация процессов раскрытия и создания формы трансформируемого рефлектора космического базирования // *Изв. РАН. ТиСУ*. 2021. № 2. С. 106–125.
14. Кабанов С. А., Кабанов Д. С. Управление разведением спиц крупногабаритного трансформируемого рефлектора с использованием алгоритма последовательной оптимизации // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2021. № 22(8). С. 433–441.
15. Оптимальное управление разведением спицы трансформируемого рефлектора при наличии возмущений / С. А. Кабанов, Д. С. Кабанов, Е. Н. Никулин, Ф. В. Митин // *Сибирский аэрокосмический журнал*. 2021. Т. 22, № 4. С. 649–659.
16. Малышев В. В., Красильщиков М. Н., Карлов В. И. Оптимизация наблюдения и управления летательных аппаратов. М. : Машиностроение, 1989. 312 с.
17. Кабанов Д. С. Оптимальное управление стохастической системой с коррекцией интервалов наблюдений // *Системный анализ, управление и навигация : тезисы докладов*. М. : Изд-во МАИ, 2022. С. 119–120.
18. Оптимальное управление разведением спицы трансформируемого рефлектора при наличии возмущений с коррекцией интервалов наблюдений / С. А. Кабанов, Д. С. Кабанов, Е. Н. Никулин Ф. В. Митин // *Системный анализ, управление и навигация : тезисы докладов*. М. : Изд-во МАИ, 2022. С. 117–118.

19. Справочник по теории автоматического управления / под ред. А. А.Красовского. М. : Наука, 1987. 712 с.
20. Микропривод. Серия phySPACE для работы в космосе, диаметр 19–125 мм [Электронный ресурс]. URL: <http://www.microprivod.ru/catalog/phytron/seriya-vssspase-dlya-raboty-v-kosmose,diametr-19-125-mm.html> (дата обращения 31.08.2022).
21. ЛИР-МА208Е. Абсолютный угловой энкодер [Электронный ресурс]. URL: <https://skbis.ru/catalog/rotary/absolute-rotary-encoders/lir-ma208e> (дата обращения: 31.08.2022).
22. Кабанов С. А. Оптимизация динамики систем при действии возмущений. М. : Физматлит, 2008. 200 с.

References

1. Puig L., Barton A., Rando N. A review on large deployable structures for astrophysics missions. *Acta Astronautica*. 2019, Vol. 67(1), P. 12–26.
2. Polyanskij I. S., Arhipov N. S., Misyurin S. Yu. [On the solution of the problem of optimal control of an adaptive multi-beam reflector antenna]. *Avtomat. i telemekh.* 2019, No. 1, P. 83–100 (In Russ.).
3. Vlasov A. Yu., Amel'chenko N. A., Pasechnik K. A., Titov M. A., Serzhantova M. V. [Static and modal analysis of the power construction of the precision large-sized antenna reflector from polymer composite materials]. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2017, No. 4, P. 897–901 (In Russ.).
4. Nie R., He B., Zhang L. Deployment dynamics modeling and analysis for mesh reflector antennas considering the motion feasibility. *Nonlinear Dyn.* 2018, Vol. 91, P. 549–564.
5. Thomson M. W. The AstroMesh Deployable Reflector. *IUTAM-IASS Symposium on Deployable Structures: Theory and Applications*, 2000, P. 435–446.
6. Li P., Liu C., Tian Q., Hu H., Song Y. Dynamics of a deployable mesh reflector of satellite antenna: form finding and modal analysis. *J Comput. Nonlinear Dyn.* 2016, Vol. 11(4), P. 549–564.
7. Reznik S. V., Chubunov D. E. [Large-sized transformable space antenna reflector made of composite materials dynamic modeling process]. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2018, Vol. 19(4), P. 411–425 (In Russ.).
8. Bakulin V. N., Borzyh S. V. [Modeling the dynamics of the process of deployment large-sized transformable space structures]. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Aviacionnaya tekhnika*. 2020, No. 4, P. 50–56 (In Russ.).
9. Berns V. A., Levin V. E., Krasnorutsky D. A., Marinin D. A., Zhukov E. P., Malenkova V. V., Lakiza P. A. [Development of a calculation and experimental method for modal analysis of large transformable space structures]. *Spacecrafts & Technologies*, 2018, Vol. 2, No. 3, P. 125–133 (In Russ.).
10. Huang H., Cheng Q., Zheng L., Yang Y. Development for petal-type deployable solid-surface reflector by uniaxial rotation mechanism. *Acta Astronautica*. 2021, No. 178, P. 511–521.
11. Ishkov V. N. [Solar geoeffective phenomena: Action on the near-earth outer space and the possibility of the forecast]. *Slozhnye sistemy*. 2012, No. 4 (5), P. 21–41 (In Russ.).
12. Mihalyaev B. B., Derteev S. B., Lagaev I. Yu., Osmonov T. T. [Vliyanie solnechnoj aktivnosti na magnitosferu Zemli]. *Aktual'nye problemy sovremennoj fiziki i matematiki. trudy*. 2017, P. 92–97 (In Russ.).
13. Kabanov S. A., Mitin F. V. Optimization of the Processes of Deployment and Shape Generation for a Transformable Space-Based Reflector. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2021, Vol. 60, No. 2, P. 283–302.
14. Kabanov S. A., Kabanov D. S. Deployment the Spoke of a Large-Sized Transformable Reflector Using a Sequential Optimization Algorithm. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. 2021; Vol. 22(8), P. 433–441 (In Russ.).

15. Kabanov S. A., Kabanov D. S., Nikulin E. N., Mitin F. V. Optimal control of deployment of the spoke of a transformable reflector in the presence of disturbance. *Siberian Aerospace Journal*. 2021, Vol. 22, No. 4, P. 649–659.

16. Malyshev V. V., Krasil'shchikov M. N., Karlov V. I. *Optimizaciya nablyudeniya i upravleniya letatel'nyh apparatov* [Optimization of surveillance and control of aircraft]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989, 312 p. (In Russ.).

17. Kabanov D. S. Optimal control of a stochastic system with the correction of observation intervals. *Sistemnyy analiz, upravlenie i navigaciya*. Moscow, MAI Publ., 2022, P. 119–120.

18. Kabanov S. A., Kabanov D. S., Nikulin E. N., Mitin F. V. Optimal control of deployment of the spoke of a transformable reflector in the presence of disturbance. *Sistemnye analiz, upravlenie i navigaciya*. Moscow, MAI Publ., 2022, P. 117–118.

19. *Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravleniya*. [Handbook on the theory of automatic control.]. Ed. by A. A. Krasovskiy. Moscow, Nauka Publ., 1987, 712 p. (In Russ.).

20. *Mikroprivod. Seriya phySPACE dlja raboty v kosmose, diametr 19–125 mm* [Microdrive. phySPACE Space Series, 19–125 mm diameter]. Available at: <http://www.microprivod.ru/catalog/phytron/seriya-vssspase-dlya-raboty-v-kosmose,diametr-19-125-mm.html> (accessed: 31 August 2022) (In Russ.).

21. *LIR-MA208E. Absolutnyy uglovoj yenkoder* [LIR-MA208E. Absolute rotary encoder]. Available at: <https://skbis.ru/catalog/rotary/absolute-rotary-encoders/lir-ma208e> (accessed: 31 August 2022) (In Russ.).

22. Kabanov S. A. *Optimizaciya dinamiki sistem pri deystvii vozmushcheniy* [Optimization of the dynamics of systems under the action of disturbances]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2008, 200 p.

© Кабанов С. А., Кабанов Д. С., Никулин Е. Н., Митин Ф. В., 2022

Кабанов Сергей Александрович – доктор технических наук, профессор, кафедра систем управления и компьютерных технологий; БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова. E-mail: kaba-sa@mail.ru.

Кабанов Дмитрий Сергеевич – кандидат технических наук, научный сотрудник; НИЛ РИУС БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова. E-mail: kabanovds@mail.ru.

Никулин Евгений Николаевич – доктор технических наук, профессор, заместитель директора Института систем вооружения; БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова. E-mail: nikulin_en@voenmeh.ru.

Митин Фёдор Васильевич – кандидат технических наук, доцент, кафедра систем управления и компьютерных технологий; БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова. E-mail: fedor28@list.ru.

Kabanov Sergey Aleksandrovich – Dr. Sc., Professor; BSTU “VOENMEH” named after D. F. Ustinov. E-mail: kaba-sa@mail.ru.

Kabanov Dmitriy Sergeevich – Cand. Sc., researcher; BSTU “VOENMEH” named after D. F. Ustinov. E-mail: kabanovds@mail.ru.

Nikulin Evgeniy Nikolaevich – Dr. Sc., Professor, Deputy Director of the Institute of Weapon Systems; BSTU “VOENMEH” named after D. F. Ustinov. E-mail: nikulin_en@voenmeh.ru.

Mitin Fedor Vasilyevich – Cand. Sc., Associate Professor Department of Control Systems and Computer Technologies; BSTU “VOENMEH” named after D. F. Ustinov. E-mail: fedor28@list.ru.
