

УДК 517.977.5-629.783

Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-4-649-659

Для цитирования: 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. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-4-649-659.

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 disturbance. *Siberian Aerospace Journal*. 2021, Vol. 22, No. 4, P. 649–659. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-4-649-659.

Оптимальное управление разведением спицы трансформируемого рефлектора при наличии возмущений*

С. А. Кабанов, Д. С. Кабанов, Е. Н. Никулин, Ф. В. Митин¹

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» имени Д. Ф. Устинова»
Российская Федерация, 199005, г. Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул., 1

¹E-mail: fedor28@list.ru

Одним из перспективных видов космических аппаратов являются крупногабаритные трансформируемые рефлекторы. Такие аппараты доставляются на заданную орбиту в сложенном виде, а затем разворачиваются до рабочего состояния. Большая апертура позволяет значительно расширить возможности антенны. При этом возникают задачи плавного и надёжного раскрытия, настройки формы радиоотражающего сетеполотна, регулировка орбитального положения. Ввиду того что процесс раскрытия занимает длительное время, учёт возмущающих воздействий является важной проблемой. Наличие радиации, большого перепада температур, солнечного ветра оказывает влияние на всю систему и, главным образом, на диаграмму направленности. Также необходимо плавно раскрыть элементы конструкции, так как с увеличением диаметра радиоотражающей поверхности возрастают моменты инерции антенны, что приводит к длительным колебаниям. В данной работе рассмотрен процесс разведения спицы рефлектора при наличии возмущений и ошибок измерений. Решение задачи представлено с использованием теоремы разделения. Для оценивания параметров системы при наличии шумов измерений применен фильтр Калмана. Показана его работоспособность при различных значениях интенсивности шума. В качестве внешних возмущений и шумов измерений выбран случайный процесс типа белого шума. Задача управления решается при использовании алгоритма оптимального управления по иерархии целевых критериев. Показана возможность минимизации энергетических затрат путем интервального включения измерительных датчиков. Представлены результаты численного моделирования.

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

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-08-00646а.
The reported study was funded by RFBR according to the research project No 20-08-00646a.

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. Mitin¹

Baltic State Technical University “VOENMEH” named after D. F. Ustinov
1, 1 Krasnoarmeyskaya St., St. Petersburg, 199005, Russian Federation
¹E-mail: fedor28@list.ru

One of the promising types of spacecrafts is large-size transformable reflectors. Such apparatuses are delivered to a target orbit folded, and then deployed to a working condition. The large aperture allows you to significantly expand the capabilities of the antenna. In this case, the tasks arise of a smooth and reliable deployment, adjusting the shape of a radio-reflecting net, and adjusting the orbital position. Due to the fact that the deployment process takes a long time, accounting for disturbing influences is an important problem. The presence of radiation, large temperature differences, solar wind affects the entire system and mainly on the directional diagram. It is also necessary to smoothly deployment the structural elements, since with an increase in the diameter of the radio-reflecting surface, the moments of inertia of the antenna increase, which leads to prolonged oscillations. 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

Космические антенны играют незаменимую роль в воздушно-космической связи, военной разведке, зондировании дальнего космоса, глобальном вещании, дистанционном зондировании Земли и прогнозировании климата. Из-за ограничений, накладываемых ракетоносителем, широко используются разворачиваемые антенны [1–3]. Они размещаются в обтекателе на этапе запуска, после выхода на орбиту начинается процесс разворачивания и, наконец, образуются параболические отражающие поверхности. Стабильное и надежное разворачивание рефлектора во многом обеспечивает успех космической миссии.

С конца 1960-х гг. крупногабаритные трансформируемые антенны стали активно применяться из-за их большой апертуры и малой массы. В настоящее время Astro Mesh рефлектор является наиболее совершенной и надежной из доступных разворачиваемых антенн [4; 5]. Процесс разворачивания завершается фиксацией фермы и формированием необходимой формы отражающей поверхности.

Для подавляющего большинства таких конструкций раскрытие необратимо и отсутствуют эффективные способы обслуживания и активной корректировки на орбите радиоотражающего сетеполотна. Важно изучить и смоделировать процесс разворачивания на стадии проектирования, чтобы получить глубокое представление о динамике разворачивания [6]. Сложное кинематическое и динамическое поведение системы, высокие нелинейные напряжения и различные топологии кабельных сетей, а также рассеяние энергии, вызванное трением, демпфированием, и зазоры приводят к значительным воздействиям на динамику разворачивания крупногабарит-

ных трансформируемых антенн. Активно ведутся исследования в области динамического моделирования при раскрытии различных типов конструкций [7; 8].

Рассмотрим реализацию крупногабаритной космической конструкции с применением вантовой системы для создания необходимой формы радиоотражающей поверхности рефлектора (рис. 1) [9–12]. 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.

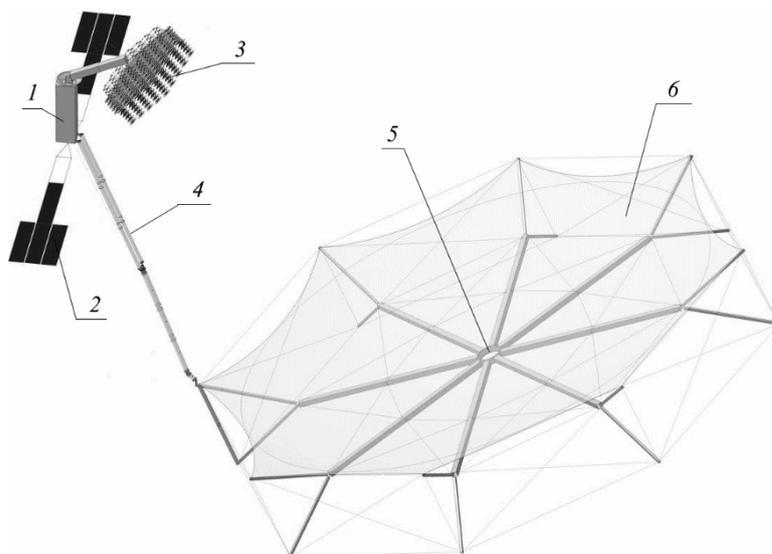


Рис. 1. Конструкция КТР

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

Важной проблемой при раскрытии КТР из сложенного положения в заданное с высокой точностью выхода к упорам является учёт возмущающих воздействий. Также необходимо плавно раскрыть элементы конструкции, так как с увеличением диаметра радиоотражающей поверхности возрастают моменты инерции антенны, что приводит к длительным затухающим колебаниям. Наличие радиации, большого перепада температур, солнечного ветра оказывает влияние на всю систему, и главным образом на диаграмму направленности [13; 14]. Поэтому необходимо решать задачи фильтрации и управления раскрытием рефлектора.

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.

Математическая модель, описывающая данный процесс, имеет вид $\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{f}(\mathbf{X}, u, t) + \xi_x$, где $\mathbf{X} = (\varphi \ \omega \ a_1 \ V_{1a})^T$ – вектор состояния; $\xi_x = [\xi_{x1} \ \xi_{x2} \ \xi_{x3} \ \xi_{x4}]^T$ – воз-

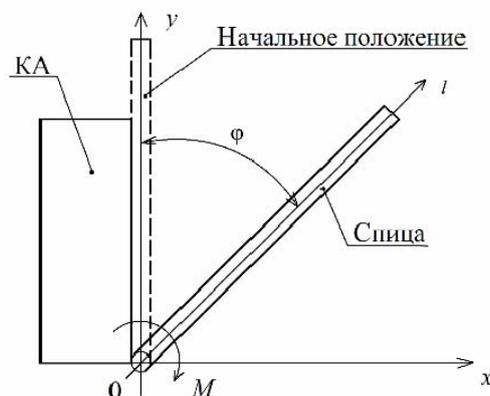


Рис. 2. Разведение спицы рефлектора

Fig. 2. Spreading of the reflector spoke

мущения с интенсивностью $\mathbf{B}_x = \text{diag}(B_{x1}, B_{x2}, B_{x3}, B_{x4})$; u – вектор управления; t – время; φ – угол поворота спицы; ω – угловая скорость поворота спицы; a_1 и V_{1a} – зависящие от времени изгиб и скорость изгиба спицы соответственно. В поэлементном виде система представляется следующим образом [15]:

$$\begin{aligned} \dot{\varphi} &= \omega + \xi_{x1}, \\ \dot{\omega} &= \frac{M(U, \varphi, \omega)}{I} + \xi_{x2}, \\ \dot{a}_1(t) &= V_{1a}(t) + \xi_{x3}, \\ \dot{V}_{1a}(t) &= -\frac{EI_{\text{изг}}}{\rho S} q_1^4 [a_1(t) + \gamma V_{1a}(t)] + \frac{2}{\rho S b_1(L)} \frac{M(U, \varphi, \omega)}{R_d} + \xi_{x4}, \end{aligned} \quad (1)$$

где I – момент инерции спицы; E – модуль упругости; $I_{\text{изг}}$ – изгибной момент инерции; ρ – плотность материала спицы; S – площадь спицы в поперечном сечении; l – координата длины спицы; γ – коэффициент затухания; M – общий момент, действующий на спицу: $M(U, \varphi, \omega) = M_{\text{п}}(U) - M_{\text{тр}} - M_{\text{упор}}(\varphi, \omega) - M_{\text{ф}}(\varphi, \omega)$; $M_{\text{п}}$ – полезный момент, создаваемый бесколлекторной машиной; U – напряжение питания бесколлекторной машины; $M_{\text{тр}}$ – момент трения; $M_{\text{упор}}$ – момент, создаваемый упором; $M_{\text{ф}}$ – момент, создаваемый фиксатором; $h(t, l) = a_1(t)b_1(l)$ – изгиб спицы [10; 11; 15; 16]; $a_1(t)$ – функции только времени t ; $b_1(l)$ – функции только координаты l ; $q_1 = Z/L$, где $Z_1 = 1,875$, L – полная длина спицы; R_d – радиус вала двигателя.

Управление осуществляется за счёт изменения напряжения питания бесколлекторной машины U , $|U| \leq U_{\text{max}}$ ($U_{\text{max}} = 12,5$ В). Полезный момент зависит от управления U [10] $M_{\text{п}} = m_{\text{ф}} p E_0 U \sin \vartheta / (\omega_p X_c)$, где $m_{\text{ф}}$ – число фаз ротора; p – число пар полюсов магнитного поля; E_0 – действующее значение электродвижущей силы (ЭДС) на обмотке статора; ϑ – угол рассогласования (между U и E_0 , для двигателя находится в пределах $[0, \pi/2]$)); ω_p – угловая скорость вращения ротора двигателя; X_c – синхронное сопротивление.

Рассмотрим спицу как цилиндрическую трубу. Примем её за однозвенную конструкцию. Измерению доступны угол поворота спицы и изгиб на ее конце. Для задачи разведения спиц уравнения наблюдения рассмотрим в виде

$$\mathbf{z} = \mathbf{h}(x, t) + \xi_z, \quad (2)$$

где $\mathbf{z} = [z_1 \ z_2]^T$, $\mathbf{h}(x, t) = [\varphi \ d(L)]^T$, $(d(L) = a(t)b(L))$, $\xi_z = [\xi_{z1} \ \xi_{z2}]^T$ – случайные процессы типа белого шума с интенсивностью $\mathbf{B}_z = \text{diag}(B_{z1}, B_{z2})$.

В соответствии с принципом разделения, задаче управления предшествует задача оценивания вектора состояния по неполным данным, заданным уравнением (2) [17–19]. Оптимальную оценку можно получить с помощью фильтра Калмана, уравнения которого для данной задачи будут иметь вид

$$\begin{aligned} \frac{d\hat{\varphi}}{dt} &= \hat{\omega} + R_{11} B_{z1}^{-1} (z_1 - \hat{\varphi}) + R_{13} b_1(L) B_{z2}^{-1} (z_2 - \hat{d}), \\ \frac{d\hat{\omega}}{dt} &= \frac{M}{I} + R_{21} B_{z1}^{-1} (z_1 - \hat{\varphi}) + R_{23} b_1(L) B_{z2}^{-1} (z_2 - \hat{d}), \\ \frac{d\hat{a}_1}{dt} &= \hat{V}_{1a} + R_{31} B_{z1}^{-1} (z_1 - \hat{\varphi}) + R_{33} b_1(L) B_{z2}^{-1} (z_2 - \hat{d}), \\ \frac{d\hat{V}_{1a}}{dt} &= -\frac{EI_{\text{изг}}}{\rho S} q_1^4 (\hat{a}_1 + \gamma \hat{V}_{1a}) + \frac{2}{\rho S b_1(L)} \frac{M}{R_d} + \\ &+ R_{41} B_{z1}^{-1} (z_1 - \hat{\varphi}) + R_{43} b_1(L) B_{z2}^{-1} (z_2 - \hat{d}), \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{R}} &= \mathbf{f}_x \mathbf{R} + \mathbf{R} \mathbf{f}_x^T - \mathbf{R} \mathbf{h}_x^T \mathbf{B}_z^{-1} \mathbf{h}_x \mathbf{R} + \mathbf{B}_x, \\ \mathbf{R}(t_0) &= \mathbf{R}_0. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь

$$\mathbf{f}_x = \partial \mathbf{f} / \partial x, \quad \mathbf{h}_x = \partial \mathbf{h} / \partial x, \quad \mathbf{h}_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_1(L) & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{f}_x = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{EI_{изг}}{\rho S} q_1^4 & -\frac{EI_{изг}}{\rho S} q_1^4 \gamma \end{bmatrix}, \quad R_{ii}(t_0) = 9\sigma_{xi}^2, \quad i = \overline{1, n},$$

остальные элементы матрицы начальных ковариаций ошибок оценивания принимались равными нулю.

Спица приводится в движение приводом, в качестве которого рассмотрен бесколлекторный электродвигатель Phyttron серии phySPACE [20]. Точность 3–5 % для 1,8°. Для измерения прогиба спицы h используется лазерный сканер RangeVision Standard Plus с точностью $\pm 0,03$ мм [21]. В качестве датчика углового положения используется энкодер ЛИР-МА208 [22] с точностью $\pm 1^\circ$.

Требуется перевести спицу из начального положения $\mathbf{X}(0) = (0 \ 0 \ 0 \ 0)^T$ в конечное $\mathbf{X}(t_f) = (\pi/2 \ 0 \ 0 \ 0)^T$ с отсутствием перерегулирования по углу разворота φ за время $t_f = 90$ с при наличии внешних возмущений ξ_x и шумов измерений ξ_z .

Постановка задачи управления

Рассмотрим иерархию целевых функционалов вида

$$J_1 = \mathbf{V}_{f1}(\mathbf{X}, t_f), \quad (5)$$

$$J_2 = \mathbf{V}_{f2}(\mathbf{X}, t_f) + \int_{t_0}^{t_f} [f_0(\mathbf{X}, t) + 0,5(u^2 + u_0^2)^2 k^{-2}] dt, \quad (6)$$

где $V_{f1} = 0,5\beta_1[\omega(t_f) - \omega_f]^2$; $V_{f2} = 0,5\Delta \mathbf{X}_f^T \mathbf{p}_k \Delta \mathbf{X}_f$; $f_0 = 0,5\beta_2[\varphi(t) - \varphi_f]^2 + 0,5\beta_3 h^2$; $\mathbf{a} = \text{diag}(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4)$; $\beta_1, \beta_2, \beta_3, k$ – заданные коэффициенты; $\Delta \mathbf{X}_f = \mathbf{X}(t_f) - \mathbf{X}_f$; $\mathbf{X}_f = (\varphi_f \ \omega_f \ a_{1f} \ V_{1af})^T$ – заданные конечные значения соответствующих переменных в (1). Так как $h(t, L) = a_1(t)b_1(L)$, $V_{1a}(t, L) = V_{1a}(t)b_1(L)$, то $a_1(t) = h(t, L) / b_1(L)$ и $a_1(t_f) = h(t_f, L) / b_1(L)$.

Решение задачи управления разведением спицы по иерархии критериев в детерминированной постановке подробно представлено в работе [16]. Задача управления также решалась алгоритмами управления по принципу максимума с использованием численных методов Ньютона и Крылова – Черноушко, алгоритмом на основе ПИД-структуры регулирования, алгоритмом коррекции параметров структуры управления [10; 11; 15]. Применение алгоритма последовательной оптимизации по иерархии целевых критериев позволяет решать задачу в режиме реального времени с отсутствием длительных затухающих колебаний после достижения спицей заданного угла разворота. С помощью данного алгоритма удаётся добиться необходимой точности и качества регулирования системы.

Моделирование

Примем время раскрытия спицы $t_f = 90$ с, максимальная допустимая амплитуда прогиба $h_{\max} = 10$ мм. Значение коэффициента затухания $\gamma = 0,04$ 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.

Были приняты следующие параметры спицы при моделировании [10]: материал АБС пластик QHF – 0140: плотность материала $\rho = 1600$ кг/м³, модуль упругости (Юнга) $E = 1,2 \cdot 10^{11}$ Па, длина спицы $a = 9,75$ м, масса спицы (всех вложенных звеньев) $m = 32$ кг. Рассматривается спица с сечением в виде кольца с внешним радиусом $R = 0,26$ м и внутренним радиусом $r = 0,25$ м. Момент инерции I будет равняться $I = mR^2/2 + ma^2/3 = 1015,4$ кг·м². Изгибной момент инерции $I_{изг} = \pi R^3 \delta = 5,52 \cdot 10^{-4}$ м⁴, где δ – толщина стенки трубы (спицы).

Примем, что возмущения не превышают ± 1 % от максимальных значений соответствующих переменных. В расчетах шумы ξ_x и ξ_z принимались белыми с интенсивностями $\mathbf{B}_x = \text{diag}(0,02, 0, 0,0001, 0)$, $\mathbf{B}_z = \text{diag}(0,02, 0,0005)$ соответственно. Начальные значения ошибок оценивания задавались в виде: $\hat{\varphi}(t_0) = \varphi(t_0) + \Delta\varphi(t_0)$, $\hat{\omega}(t_0) = \omega(t_0) + \Delta\omega(t_0)$, $\hat{a}_1(t_0) = a_1(t_0) + \Delta a_1(t_0)$, $\hat{V}_{1a}(t_0) = V_{1a}(t_0) + \Delta V_{1a}(t_0)$, где $\Delta\varphi(t_0) = 0,1$ рад, $\Delta\omega(t_0) = 0,002$ рад/с, $\Delta a_1(t_0) = 5 \cdot 10^{-5}$ м, $\Delta V_{1a}(t_0) = 0,01$ м/с.

На рис. 3 представлены результаты моделирования: графики зависимостей $\varphi(t)$ (на всем интервале оптимизации) и $h(t)$ (на первых 10 с). Видно, что удалось решить поставленную задачу, т. е. раскрыть спицу из начального положения на заданный угол $\pi/2$.

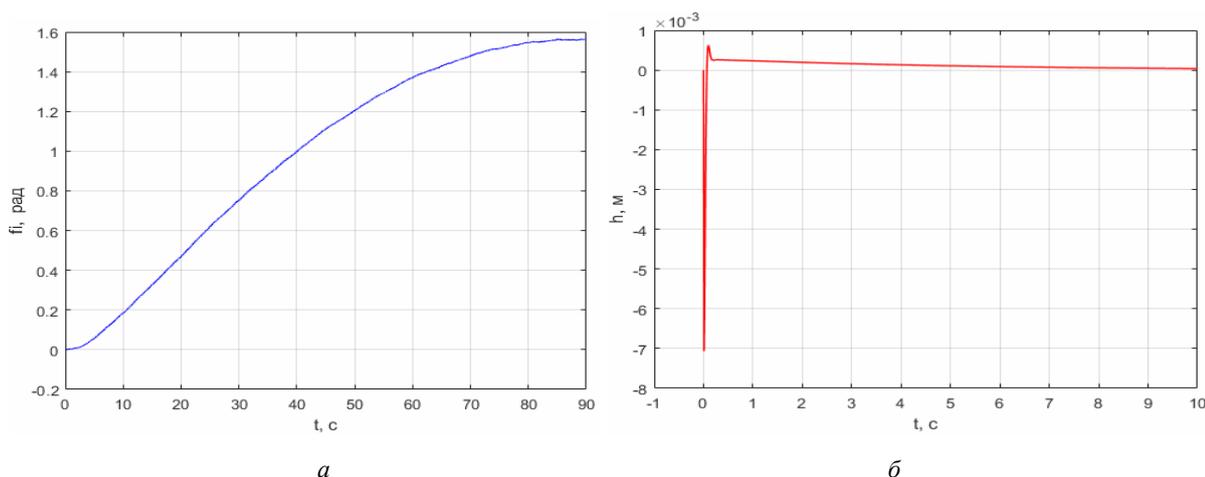


Рис. 3. Графики: а – $\varphi(t)$; б – $h(t)$

Fig. 3. Graphics: a – $\varphi(t)$; b – $h(t)$

Максимальный прогиб спицы $h(t) = 7 \cdot 10^{-3}$ м наблюдается в начальный момент времени, в дальнейшем он плавно стримится к нулю. При использовании алгоритма последовательной оптимизации по иерархии из двух целевых критериев механизмы упора и фиксатора из-за плавного подхода к конечному состоянию не приводят к дополнительным колебаниям развернутой антенны.

При выбранных возмущениях и шумах измерений алгоритмы оптимальной фильтрации и управления успешно решают поставленную задачу. Отклонения начальных значений переменных величин допустимо выбирать из диапазона ± 7 % от максимальных значений соответствующих величин, в противном случае требуется корректировка весовых коэффициентов.

На рис. 4, а показан график изменения ошибки оценивания $\Delta\varphi$ при $\mathbf{B}_z = \text{diag}(0,02, 0,0005)$ и при отсутствии внешних возмущений. На рис. 4, б показана аналогичная кривая при увеличении интенсивности \mathbf{B}_z втрое. Наибольшая ошибка достигается в начале моделирования, затем

она стремится к нулю (в том числе и для других $\Delta\varphi(t_0)$). При наличии внешних возмущений ошибки имеют математическое ожидание равное нулю и дисперсию, не превышающую дисперсию возмущений.

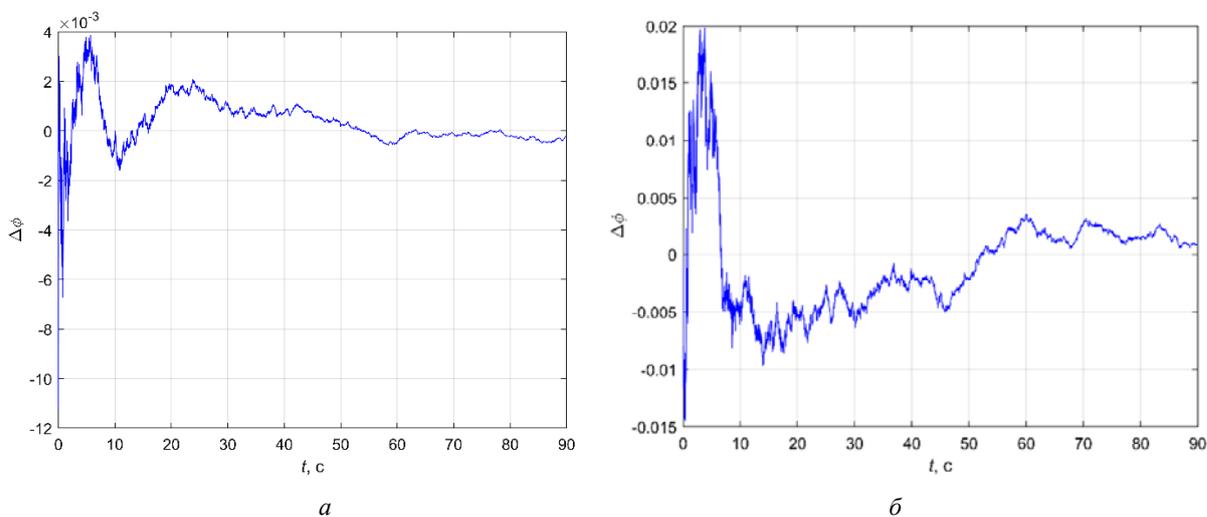


Рис. 4. Графики $\Delta\varphi$ при различных уровнях интенсивности шума

Fig. 4. Graphics of $\Delta\varphi$ at different levels of noise intensity

На рис. 5 представлены диагональные элементы матрицы ковариации при $R_{11}(0) = 0,017$; $R_{22}(0) = 0,0002$; $R_{33}(0) = 0,001$; $R_{44}(0) = 0$. Достаточно быстро они приходят к установившемуся значениям. Было проведено моделирование при различных начальных значениях диагональных элементов матрицы ковариации и разной интенсивности шумов измерений, фильтр Калмана успешно обработал все варианты.

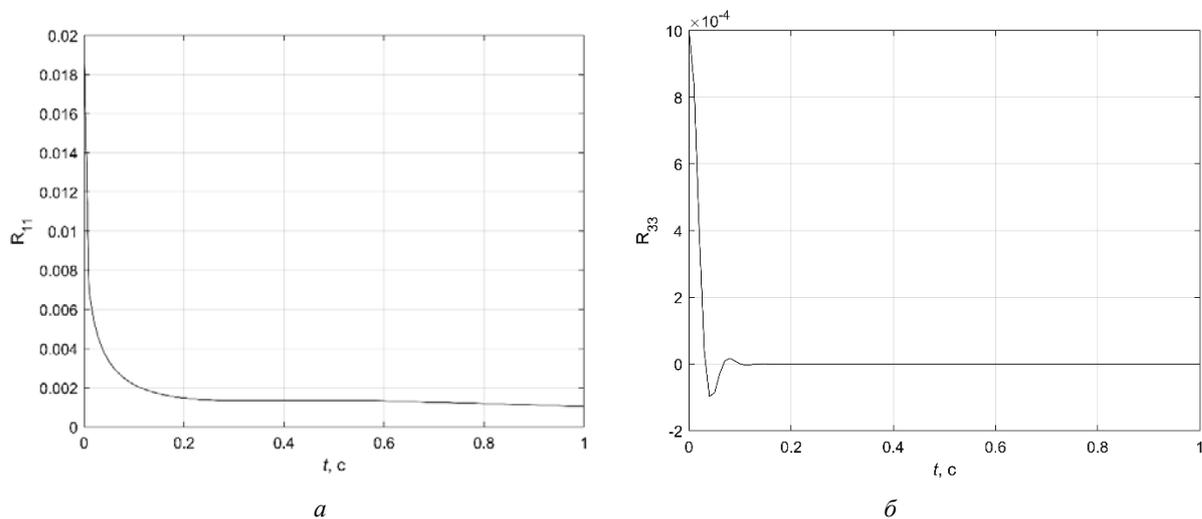


Рис. 5. Графики: а – $R_{11}(t)$; б – $R_{33}(t)$

Fig. 5. Graphics: а – $R_{11}(t)$; б – $R_{33}(t)$

Для минимизации энергетических затрат было предложено периодически отключать работу датчиков и оценку состояния на этих участках вычислять путем прогнозирования с использованием уравнений (3), (4) при $B_{z1}^{-1} = 0$ и $B_{z2}^{-1} = 0$. Это позволило успешно решать задачу управления при меньших энергетических затратах. При отключении датчиков не затрачивается энергия на их функционирование и передачу данных.

На рис. 6 представлен график $R_{11}(t)$

$$\dot{R}_{11} = -R_{11}^2 B_{z1}^{-1} - R_{13}^2 b_1 B_{z2}^{-1} + 2R_{12} + B_{x1}$$

при периодическом отключении измерений с датчиков. Каждый раз при включении измерений элементы ковариационной матрицы достигают установившегося значения. В уравнении для \dot{R}_{11} слагаемые $R_{11}^2 B_{z1}^{-1}$ и $R_{13}^2 b_1 B_{z2}^{-1}$ характеризуют скорость поступления информации, их отсутствие при отключении измерений приводит к возрастанию R_{11} .

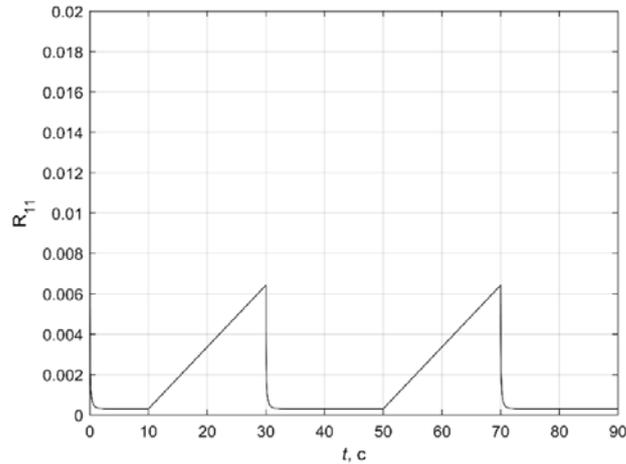


Рис. 6. График $R_{11}(t)$

Fig. 6. Graphic $R_{11}(t)$

Для успешного решения задачи и точного выполнения терминальных условий необходимо включение датчиков измерения состояния системы на конечном отрезке интервала оптимизации. Чем больше время включения датчиков в конце моделирования, тем точнее удаётся решить поставленную задачу. Определение оптимального интервала включения измерений является самостоятельной научно-технической задачей. При возрастании интенсивности внешних возмущений \mathbf{V}_x необходимо измерять состояние системы более длительное время. При заданном $\mathbf{V}_x = \text{diag}(0,02, 0, 0,0001, 0)$ для успешного решения задачи достаточно включения датчиков на участке с 85 по 90 с. При увеличении значений возмущений вдвое необходимо увеличить время наблюдений на конечном участке до 15 с. Время работы датчиков зависит от вида и интенсивности внешних возмущений, требований к величине допустимых энергетических затрат. В результате статистического моделирования оценка математического ожидания критерия (5) $M(J_1) = 0$, критерия (6) $M(J_2) = 0,035$, где для одного из вариантов получено следующее значение $\varphi(t_f) = 1,576$.

Отдельной задачей стоит определение времени отключения датчиков измерения углового положения спицы и величины прогиба независимо друг от друга. Так, для выполнения терминального условия по углу φ при заданных возмущениях необходимо осуществлять наблюдение последние 5 с моделирования, тогда как для выполнения требований для прогиба h достаточно 3 с наблюдений. Величины φ и h зависят от приложенного момента M . Значение h в конце раскрытия при выбранном управлении не превышает $5 \cdot 10^{-5}$ м, что соответствует точности датчика. Поэтому значением прогиба в конечный момент времени можно пренебречь.

Заключение

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 оцененных с помощью фильтра Калмана данных позволило решить поставленную задачу

при различных интенсивностях возмущений и шумов измерений. Интервальное выключение измерений позволяет снизить энергозатраты на питание датчиков и обработку измерений. Дальнейшие работы предполагают поставить и решить задачу оптимизации интервалов наблюдений для минимизации энергетических затрат [23].

Представленные исследования доложены на XXII Международной научной конференции «Системный анализ, управление и навигация» [24].

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. № 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 // *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 Рос. 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 // *Изв. высш. учебн. завед. 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. Кабанов С. А., Зимин Б. А., Митин Ф. В. Разработка и анализ математических моделей раскрытия подвижных частей трансформируемых космических конструкций. Ч. I // *Мехатроника, автоматизация, управление.* 2020. Т. 20, № 1. С. 51–64.
11. Kabanov S. A., Mitin F. V. Optimization of the stages of deploying a large-sized space-based reflector // *Acta Astronautica, Special Issue on 6th SFS 2019.* 2020. Vol. 176. P. 717–724.
12. Development for petal-type deployable solid-surface reflector by uniaxial rotation mechanism / H. Huang, Q. Cheng, L. Zheng, Y. Yang // *Acta Astronautica.* 2021. No. 178. P. 511–521.
13. Ишков В. Н. Воздействие солнечных активных явлений на околоземное космическое пространство и возможность их прогноза // *Сложные системы.* 2012. № 4 (5). С. 21–41.
14. Влияние солнечной активности на магнитосферу Земли / Б. Б. Михалыев, С. Б. Дертеев, И. Ю. Лагаев, Т. Т. Осмонов // *Актуальные проблемы современной физики и математики.* 2017. С. 92–97.
15. Кабанов С. А., Митин Ф. В. Оптимизация процессов раскрытия и создания формы трансформируемого рефлектора космического базирования // *Изв. РАН. ГиСУ.* 2021. № 2. С. 106–125.
16. 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.

17. Справочник по теории автоматического управления / под ред. А. А. Красовского. М. : Наука, 1987. 712 с.
18. Кабанов С. А. Оптимизация динамики систем при действии возмущений. М. : Физматлит, 2008. 200 с.
19. Кабанов Д. С. Оптимальное управление ядерным реактором с учетом случайных возмущений // Приборостроение. 2009. № 5. С. 27–30.
20. Микропривод [Электронный ресурс]. URL: <http://www.microprivod.ru/catalog/phytron/seriya-vssspase-dlya-raboty-i-v-kosmose,diametr-19-125-mm.html> (дата обращения 10.10.2021).
21. Пинтер-Плоттер.ру [Электронный ресурс]. URL: <https://printer-plotter.ru/3d-oborudovanie/3d-scanners/rangevision/?yclid=5975775935832053836> (дата обращения 10.10.2021).
22. СКБ ИС [Электронный ресурс]. URL: <http://www.skbis.ru/index.php?p=3&c=18&d=128> (дата обращения 10.10.2021).
23. Малышев В. В., Красильщиков М. Н., Карлов В. И. Оптимизация наблюдения и управления летательных аппаратов. М. : Машиностроение, 1989. 312 с.
24. Оптимальное управление разведением спицы трансформируемого рефлектора при наличии возмущений / С. А. Кабанов, Д. С. Кабанов, Е. Н. Никулин, Ф. В. Митин // Системный анализ, управление и навигация : тез. докладов. М. : Изд-во МАИ, 2021. С. 168–169.

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. Y. [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. Y., 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., Chubakov 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. Kabanov S. A., Zimin B. A., Mitin F. V. [Development and Research of Mathematical Models of Deployment of Mobile Parts of Transformable Space Construction. Part I]. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. 2020, Vol. 21, No. 1, P. 51–64 (In Russ.).
11. Kabanov S. A., Mitin F. V. Optimization of the stages of deploying a large-sized space-based reflector. *Acta Astronautica, Special Issue on 6th SFS 2019*. 2020, 176, P. 717–724.
12. 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.

13. 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.).
14. Mihalyaev B. B., Derteev S. B., Lagaev I. Y., Osmonov T. T. [Vliyanie solnechnoj aktivnosti na magnitosferu Zemli]. *V sbornike: Aktual'nye problemy sovremennoj fiziki i matematiki. trudy*. 2017, P. 92–97 (In Russ.).
15. 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.
16. 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.).
17. *Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravlenija. Pod red. A. A. Krasovskogo* [Handbook on the theory of automatic control. Ed. by A. A. Krasovskij]. Moscow, Nauka Publ., 1987, 712 p.
18. Kabanov S. A. *Optimizaciya dinamiki sistem pri dejstvii vozmushchenij* [Optimization of the dynamics of systems under the action of disturbances]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2008, 200 p.
19. Kabanov D. S. [Optimal control of a nuclear reactor taking into account random disturbances]. *Journal of instrument engineering*. 2009, No. 5, P. 27–30 (In Russ.).
20. *Mikroprivod* [Microdrive]. Available at: <http://www.microprivod.ru/catalog/phytron/seriya-vssspase-dlya-raboty-v-kosmose,diametr-19-125-mm.html> (accessed: 10.10.2021).
21. *Pinter-Plotter.ru* [Pinter Plotter.ru]. Available at: <https://printer-plotter.ru/3d-oborudovanie/3d-scanners/rangevision/?yclid=5975775935832053836> (accessed: 10.10.2021).
22. *SKB IS* [SKB IS]. Available at: <http://www.skbis.ru/index.php?p=3&c=18&d=128> (accessed: 10.10.2021).
23. 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.
24. 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]. *Sistemnyj analiz, upravlenie i navigaciya: Tezisy dokladov*. Moscow, Izd-vo MAI Publ., 2021, P. 168–169.

© Кабанов С. А., Кабанов Д. С., Никулин Е. Н., Митин Ф. В., 2021

Кабанов Сергей Александрович – доктор технических наук, профессор кафедры 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 кафедры систем управления и компьютерных технологий; БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова. E-mail: fedor28@list.ru.

Kabanov Sergey Aleksandrovich – Dr. Sc., Professor; Department of Control Systems and Computer Technologies, Baltic State Technical University “VOENMEH” named after D. F. Ustinov. E-mail: kaba-sa@mail.ru.

Kabanov Dmitriy Sergeevich – Cand. Sc., researcher, NIL RIUS; Baltic State Technical University “VOENMEH” named after D. F. Ustinov. E-mail: kabanovds@mail.ru.

Nikulin Evgeny Nikolaevich – Dr. Sc., Professor, Deputy Director of the Institute of Weapon Systems; Baltic State Technical University “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; Baltic State Technical University “VOENMEH” named after D. F. Ustinov. E-mail: fedor28@list.ru.
