

УДК 517.977.5-629.783

Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-4-577-588

Для цитирования: Кабанов С. А., Митин Ф. В. Решение задачи фильтрации при оптимальной настройке радиоотражающего сетеполотна трансформируемого рефлектора // Сибирский аэрокосмический журнал. 2021. Т. 22, № 4. С. 577–588. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-4-577-588.

For citation: Kabanov S. A., Mitin F. V. Solution of the filtration problem with the optimal adjustment of the radio-reflecting net of a transformable reflector. *Siberian Aerospace Journal*. 2021, Vol. 22, No. 4, P. 577–588. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-4-577-588.

Решение задачи фильтрации при оптимальной настройке радиоотражающего сетеполотна трансформируемого рефлектора*

С. А. Кабанов, 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

В данной работе рассматривается решение задачи фильтрации с применением фильтра Калмана при оптимальной настройке радиоотражающего сетеполотна. Рассмотрен крупногабаритный трансформируемый рефлектор космического базирования. В процессе выведения данной конструкции на заданную орбиту возможен уход реальной формы радиоотражающего сетеполотна от желаемой. Для обеспечения поточечной настройки активной части сетеполотна применяется тросо-вантовая система. Узловые точки радиоотражающей поверхности связаны с тыльной стороной сетеполотна через ванты. В них встроены актюаторы, позволяющие изменять длину ванта. В качестве исполнительного органа выбран пьезоактюатор. Путем поточечной настройки пьезоактюаторов происходит натяжение сетеполотна до необходимой формы. Это позволяет обеспечивать качественную диаграмму направленности и высокий уровень сигнала при приеме-передаче данных. Приведены конкретные значения возмущающих воздействий. Для измерения напряжения питания на пьезоактюаторе и длины ванта применяются преобразователь напряжения и лазерный сканер. Определены возможные отклонения от расчётного начального положения. В соответствии с принципом разделения сперва решается задача оценивания, затем задача управления. Задача оценивания решается с использованием фильтра Калмана. Задача управления – с использованием алгоритма оптимального управления по иерархии целевых критериев. Представлены результаты численного моделирования. Показано успешное решение поставленной задачи при вариативных значениях шумов измерений и возмущающих воздействий. Приведено сравнение с траекториями, полученными с использованием различных алгоритмов оптимального управления.

Ключевые слова: алгоритм последовательной оптимизации, крупногабаритный трансформируемый рефлектор, радиоотражающее сетеполотно, пьезоактюатор, математическая модель, моделирование.

* Исследование выполнено в организации БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (доп. соглашение от 09.06.2020 № 075-03-2020-045/2 на выполнение базовой части государственного задания «Разработка фундаментальных основ создания и управления группировками высокоскоростных беспилотных аппаратов космического и воздушного базирования и группами робототехнических комплексов наземного базирования»).

The work was carried out in BSTU “VOENMEH” named after D. F. Ustinov with financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (government contract agreement No 075-03-2020-045/2 of 09.06.2020).

Solution of the filtration problem with the optimal adjustment of the radio-reflecting net of a transformable reflector

S. A. Kabanov, 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

In this paper, we consider the solution of the filtering problem using the Kalman filter with the optimal tuning of the radio-reflecting net. A large-sized transformable space-based reflector is considered. In the process of placing in orbit this structure, it is possible that the real form of the radio-reflecting net can deviate the desired one. To ensure point-to-point adjustment of the active part of the mesh, a cable-cable system is used. The nodal points of the radio-reflecting surface are connected to the back side of the net through cables. They have built-in actuators that allow you to change the length of the cables. A piezo actuator was selected as a control device. By point-by-point adjustment of the piezo actuators, the net is stretched to the required shape. This allows you to provide a high-quality radiation pattern and a high signal level when receiving and transmitting data. Specific values of the disturbing influences are given. To measure the supply voltage on the piezo actuator and the cable length, a voltage converter and a laser scanner are used. Possible deviations from the calculated initial position are determined. In accordance with the principle of separation, the estimation problem is solved first, then the control problem. The estimation problem is solved using the Kalman filter. The control problem is solved using the optimal control algorithm according to the hierarchy of target criteria. The results of numerical simulation are presented. The successful solution of the problem is shown with variable values of measurement noise and disturbing influences. Comparison with trajectories obtained using various optimal control algorithms is given.

Keywords: sequential optimization algorithm, large-sized transformable reflector, radio-reflective net, piezo actuator, mathematical model, modeling.

Введение

В настоящее время спутники связи активно используются для решения широкого круга задач [1; 2]. Одним из конструктивных способов реализации таких спутников является создание крупногабаритных космических рефлекторов [3–5]. Ведутся активные разработки в этой области. Данные конструкции позволяют работать одновременно в нескольких частотах, обладают большой областью засвечивания [6–9].

Рассмотрим реализацию крупногабаритной космической конструкции с применением вантовой системы для создания необходимой формы радиоотражающей поверхности рефлектора (рис. 1) [10–14]. 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.

Для эффективного использования спутников связи необходимо поддержание точной формы радиоотражающего сетеполотна 6. Это позволяет обеспечивать качественную диаграмму направленности и высокий уровень сигнала при приеме-передаче данных [15; 16].

Ввиду эксплуатации оборудования в космическом пространстве возникают периодические возмущающие воздействия на конструкцию рефлектора. Такие возмущения вызваны изменением температурного режима, наличием радиации, солнечного ветра [17; 18]. В процессе получения сведения о состоянии формы радиоотражающей поверхности необходимо учитывать влия-

ние шумов измерений. Ввиду ограниченности запасов энергии на рефлекторе важным является минимизация энергетических затрат.

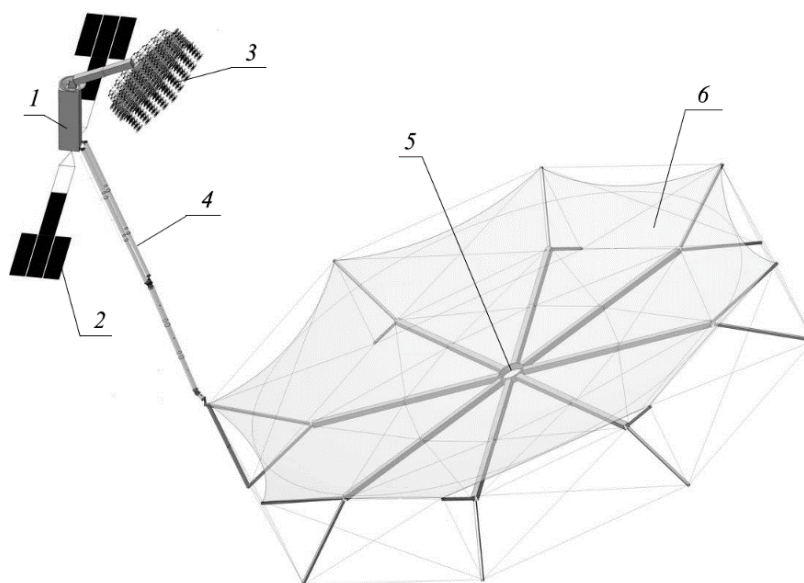


Рис. 1. Конструкция крупногабаритного трансформируемого рефлектора

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

Таким образом, необходимо осуществить точечную поднастройку сетеполотна при минимизации энергетических затрат, учитывая влияние шумов измерения и внешних возмущающих воздействий.

Математическое описание задачи

На рис. 2 представлена одна спица КТР в сечении, где 1 – спица, 2 и 3 – внешняя и задняя сетка, 4 – ванты, в которых установлены актюаторы. Необходимо, изменяя длину вант 4 с помощью актюаторов 5, задать желаемую форму радиоотражающего сетеполотна 2, обеспечив тем самым требуемую диаграмму направленности. В качестве актюаторов рассматривался пьезопривод. Желаемая форма задаётся в наземных условиях. В процессе доставки КТР на заданную орбиту и при раскрытии конструкции может происходить незначительное смещение реальной формы от желаемой. После развёртывания происходит сверка контрольных точек и на актюаторы 5 передаётся управляющее воздействие для изменения длины ванты 4.

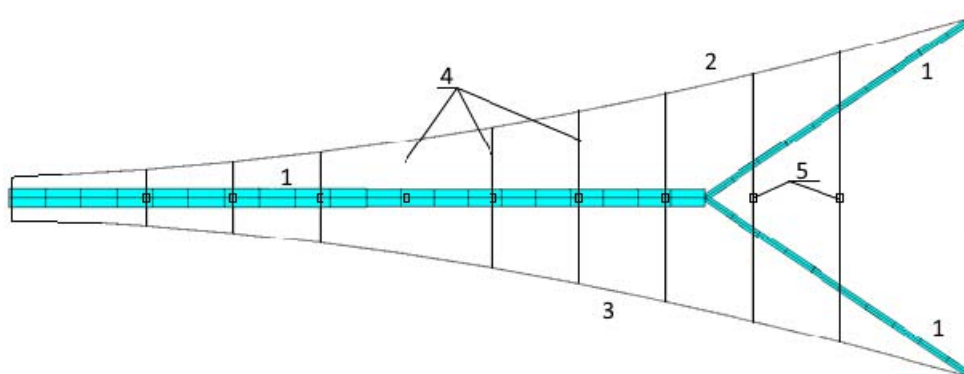


Рис. 2. Спица в сечении

Fig. 2. The spoke in cross section

В качестве актюатора для управления настройкой радиоотражающего сетеполотна выбран пьезоактюатор типа АПМ [19] с перемещением $l_{\max} = 10$ мм при допуске перемещения ± 15 %. Для измерения напряжения на входе пьезоактюатора взят преобразователь напряжения измерительный ПИН-50-У-4/20-ДХ [19] с основной приведенной погрешностью не более 1,5 %. Для измерения изменения длины ванты используется лазерный сканер RangeVision Standard Plus [21] с точностью $\pm 0,03$ мм.

Система дифференциальных уравнений, описывающих пьезоэлемент с исполнительным органом на основании выводов А. А. Никольского [22], имеет вид $\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{f}(\mathbf{X}, u, t) + \xi_x$, где $\mathbf{X} = (l \ V \ U_3)^T$ – вектор состояния, $\xi_x = [\xi_{x1} \ \xi_{x2} \ \xi_{x3}]^T$ – шум с интенсивностью $\mathbf{B}_x = \text{diag}(B_{x1}, B_{x2}, B_{x3})$. Или в поэлементном виде

$$\begin{aligned} \dot{l} &= V + \xi_{x1}, \\ \dot{V} &= \frac{NK_0 U_3 + F_c - K_y l - K_d V}{m_\Sigma} + \xi_{x2}, \\ \dot{U}_3 &= \frac{e_3}{C_0 R_{\text{вт}} K_d} - \frac{U_3}{C_0 R_{\text{вт}} K_d} - \frac{K_{\text{п}} V}{C_0 K_d} + \xi_{x3}, \end{aligned} \quad (1)$$

где l – изменение длины (ход) актюатора; V – скорость выдвижения актюатора; N – количество элементов; K_0 – коэффициент обратного пьезоэффекта; U_3 – электрическое напряжение, приложенное к электродам актюатора; F_c – статическое усилие; K_y – коэффициент упругости; K_d – коэффициент внутреннего демпфирования; e_3 – напряжение от источника электродвижущей силы; C_0 – ёмкость; $R_{\text{вт}}$ – внутреннее сопротивление; $K_{\text{п}}$ – коэффициент прямого пьезоэффекта; m_Σ – суммарная масса, состоящая из массы самого пьезоактюатора и перемещаемой массы.

Общепринятая на практике постановка задачи совмещенного синтеза оптимального управления линейными системами опирается на теорему разделения. Согласно этой теореме, оптимальная система управления состоит из оптимального фильтра, формирующего оценки вектора состояния системы, и оптимального регулятора, определяющего управление уже в детерминированной постановке при предположении, что вектор состояния известен точно [23–25]. В данной статье для построения управления применяется фильтр Калмана и алгоритм последовательной оптимизации [26].

Измерению доступны длина выдвижения и напряжение на пьезоактюаторе. Уравнение наблюдения рассмотрим в виде

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

где $\mathbf{z} = [z_1 \ z_2]^T$, $\mathbf{H} = [1 \ 0 \ 1]^T$, $\xi_z = [\xi_{z1} \ \xi_{z2}]^T$ – случайные процессы типа белого шума с интенсивностью $\mathbf{B}_z = \text{diag}(B_{z1}, B_{z2})$.

Оптимальную оценку можно получить с помощью фильтра Калмана

$$\begin{aligned} \frac{d\hat{l}}{dt} &= \hat{V} + R_{11} B_{z1}^{-1} (z_1 - \hat{l}) + R_{13} B_{z2}^{-1} (z_2 - \hat{U}_3), \\ \frac{d\hat{V}}{dt} &= \frac{NK_0 \hat{U}_3 + F_c - K_y \hat{l} - K_d \hat{V}}{m_\Sigma} + R_{21} B_{z1}^{-1} (z_1 - \hat{l}) + R_{23} B_{z2}^{-1} (z_2 - \hat{U}_3), \\ \frac{d\hat{U}_3}{dt} &= \frac{e_3}{C_0 R_{\text{вт}} K_d} - \frac{\hat{U}_3}{C_0 R_{\text{вт}} K_d} - \frac{K_{\text{п}} \hat{V}}{C_0 K_d} + R_{31} B_{z1}^{-1} (z_1 - \hat{l}) + R_{33} B_{z2}^{-1} (z_2 - \hat{U}_3). \end{aligned}$$

$$\dot{\mathbf{R}} = \mathbf{A}\mathbf{R} + \mathbf{R}\mathbf{A}^T - \mathbf{R}\mathbf{H}^T \mathbf{B}_z^{-1} \mathbf{H}\mathbf{R} + \mathbf{B}_x, \quad \mathbf{R}(t_0) = \mathbf{R}_0,$$

где

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\frac{K_y}{m_\Sigma} & -\frac{K_d}{m_\Sigma} & \frac{NK_0}{m_\Sigma} \\ 0 & -\frac{K_\Pi}{C_0 K_d} & -\frac{1}{C_0 R_{\text{вт}} K_d} \end{bmatrix}, \quad R_{nn}(t_0) = 9\sigma_{xn}^2,$$

остальные элементы матрицы начальных ковариаций ошибок оценивания принимались равными нулю.

Постановка задачи управления

Для решения задачи управления применяется алгоритм оптимального управления по иерархии целевых критериев [26]. Помимо выполнения терминальных условий необходимо уменьшить энергетические затраты. Для случая управления пьезоактюатором – это мощность, выделяемая на пьезоактюаторе в процессе управления.

Управление вычисляется в виде $u = u_1 + u_2$, где u_1 и u_2 минимизируют критерии качества J_1 и J_2 соответственно

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

$$J_2 = \mathbf{V}_{f2}(\mathbf{X}, t_f) + \int_{t_0}^{t_f} [f_0(\mathbf{X}, t) + 0,5(u^2 + u_0^2)k_2^{-2}] dt,$$

где $V_{f1} = 0,5\beta_1[V(t_f) - V_f]^2$, $V_{f2} = 0,5\Delta\mathbf{X}_f^T \mathbf{p}_k \Delta\mathbf{X}_f$, $f_0 = 0,5\beta_2[l(t) - l_f]^2 + 0,5\beta_3 P_3(t)$; $\mathbf{p}_k = \text{diag}(\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4)$, $\beta_1, \beta_2, \beta_3, k_2$ – заданные коэффициенты; $\Delta\mathbf{X}_f = \mathbf{X}(t_f) - \mathbf{X}_f$, $\mathbf{X}_f = (l_f V_f U_{3f})^T$ – заданное конечное значение вектора $\mathbf{X}$ в (1), $P_3 = U_\Pi \cdot I = (e_- - U_3)^2 / R_{\text{вт}}$ – электрическая мощность; U_Π – полное приложенное напряжение; I – ток. Подробно решение задачи управления в детерминированной постановке рассмотрено в работе [22].

Для оценки влияния возмущений на систему необходимо определить величины внешних возмущений и шумов измерений. Помимо внешних возмущений может наблюдаться изменение начального и конечного состояния, вызванное воздействиями на конструкцию при доставке рефлектора на орбиту.

Примем, что отфильтрованный шум измерений не превосходит ошибок измерительных датчиков. Внешние возмущения (влияние нагрузки, температуры окружающей среды, солнечное давление, радиация и т. п.) оказывают воздействие на весь вектор переменных состояния. Как правило, внешние возмущения случайны, некоррелированы и распределены равномерно в заданном диапазоне. В космическом пространстве внешнее влияние, оказываемое на рефлектор, является достаточно длительным и медленно нарастающим, поэтому на рассматриваемом интервале времени (не более 10 с) его можно считать квазистационарным. Возмущения примем равными ± 1 % от максимальных значений соответствующих переменных. В общем случае величины возмущений от нештатных ситуаций предугадать затруднительно.

Пьезоактюатор выдвигается из начального положения при значении $l_0 = 0$ мм и фиксируется при достижении заданной длины $l_f = 5$ мм. Актюатор в начальном положении находится в состоянии покоя, соответственно линейная скорость $V_0 = 0$ м/с, напряжение $U_{30} = 0$ В. Конечное значение линейной скорости $V_f = 0$ м/с. Пьезоактюатор преобразует электрическое напряжение в механическое перемещение [19]. Когда к нему приложено электрическое напряжение, он деформируется, при снятии напряжения он приходит в исходное состояние. Примем конечное значение напряжения, исходя из ограничений, принятых на орбите $U_{3f} = 12$ В. Время выдвигания $t_f = 4$ с.

Моделирование

Для моделирования был выбран тонкопленочный пьезоэлектрический микроактюатор типа АПМ со следующими техническими характеристиками [19]: $K_0 = 3,425 \cdot 10^{-8}$ Кл/м, $m_\Sigma = 0,125$ кг, $F_c = 0$ Н, $K_y = 7,611$ Н/м, $K_d = 1,9$, $C_0 = 11,7 \cdot 10^{-5}$ Ф, $R_{вт} = 1,025 \cdot 10^2$ Ом. Для осуществления выдвигания на заданную длину $l_f = 5$ мм при ограничении на управление $e_{\max} = 12$ В необходимо $N = 305$ слоёв.

Численное моделирование перевода системы из начального состояния $x(0) = (0 \ 0 \ 0)^T$ в конечное $x(t_f) = (l_f \ 0 \ U_{3f})^T$ при минимизации энергии P , с отсутствием перерегулирования по длине выдвигания l за время $t_f = 4$ с проводилось методом Эйлера с шагом $\Delta t = 0,00001$ с. Расчеты показали, что при значениях параметров критерия J_2 : $\rho_1 = 10^4$, $\rho_2 = 10^8$, $\rho_3 = 0$, $\rho_4 = 0$, $\beta_1 = 0$, $\beta_2 = 0$, $\beta_3 = 0$, $k_2 = 1$ алгоритм успешно решает поставленную задачу. Затраченная мощность на перевод системы из начального в конечное положение $P_s = 0,0075$ Вт, при максимальном токе $I = 0,0069$ А.

На рис. 3 представлены результаты моделирования, графики зависимостей $l(t)$ и $V(t)$ соответственно. Видно, что удалось решить поставленную задачу, т. е. перевести пьезоактюатор из начального состояния в конечное, переместив его активную часть на 5 мм при $\mathbf{B}_x = \text{diag}(0,00075, 0, 0,12, 0)$.

На рис. 4 представлены ток и мощность при работе пьезоактюатора. Видно, что за время моделирования было затрачено около 8 мВт.

Принятые возмущения и шумы измерений не оказывают существенного влияния на переходные характеристики системы. Алгоритм успешно справляется с возмущениями и отклонениями начальных значений в диапазоне $\pm 10\%$.

На рис. 5 представлены диагональные элементы матрицы ковариации при $R_{11}(0) = 0,01$; $R_{22}(0) = 0,001$; $R_{33}(0) = 0,1$; $\mathbf{B}z = \text{diag}(0,0001, 0,18)$. Видно, что с течением времени они приходят к установившимся значениям. Также было проведено моделирование при разных уровнях шума. Фильтр Калмана обрабатывает их успешно.

Поскольку шумы измерений не оказывают сильного воздействия на управление, то для экономии энергии было предложено периодически отключать работу датчиков и текущее положение определять путем математического моделирования. Это позволило успешно решать задачу управления при меньших энергетических затратах. В моменты отключения датчиков не затрачивается энергия на их функционирование и передачу данных.

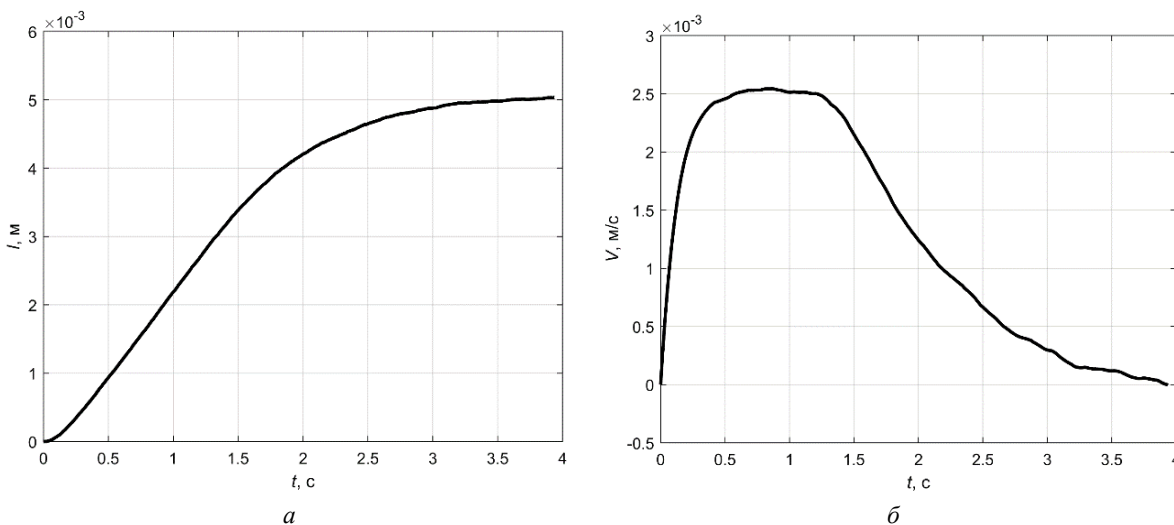


Рис. 3. Графики: а – $l(t)$; б – $V(t)$

Fig. 3. Graphics: а – $l(t)$; б – $V(t)$

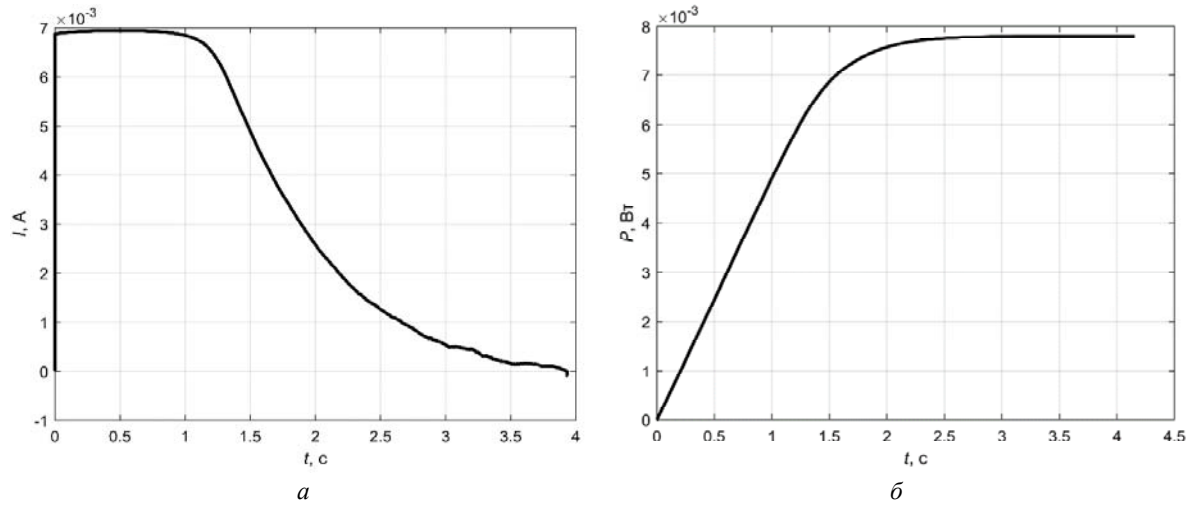


Рис. 4. Графики: $a - I(t)$; $б - P(t)$

Fig. 4. Graphics: $a - I(t)$; $b - P(t)$

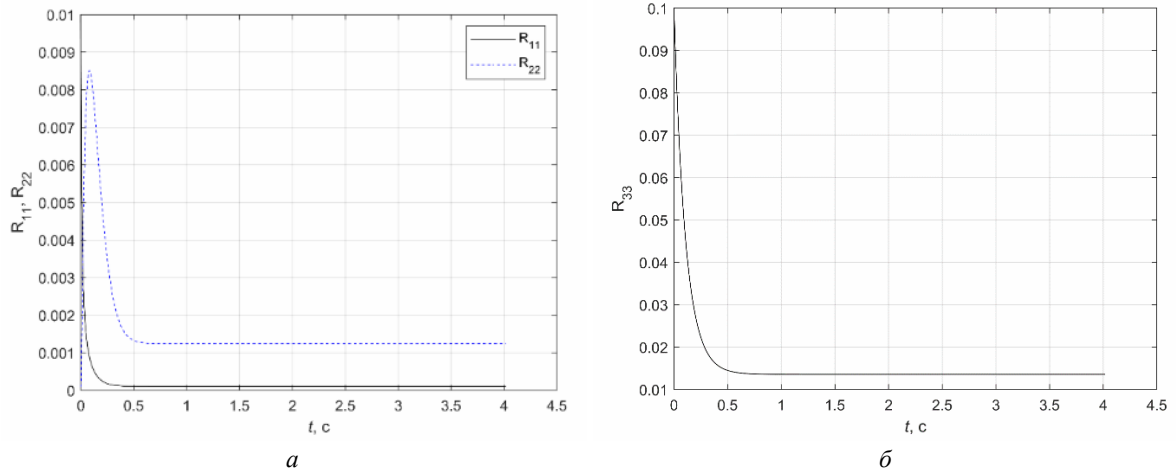


Рис. 5. Графики: $a - R_{11}(t), R_{22}(t)$; $б - R_{33}(t)$

Fig. 5. Graphics: $a - R_{11}(t), R_{22}(t)$; $b - R_{33}(t)$

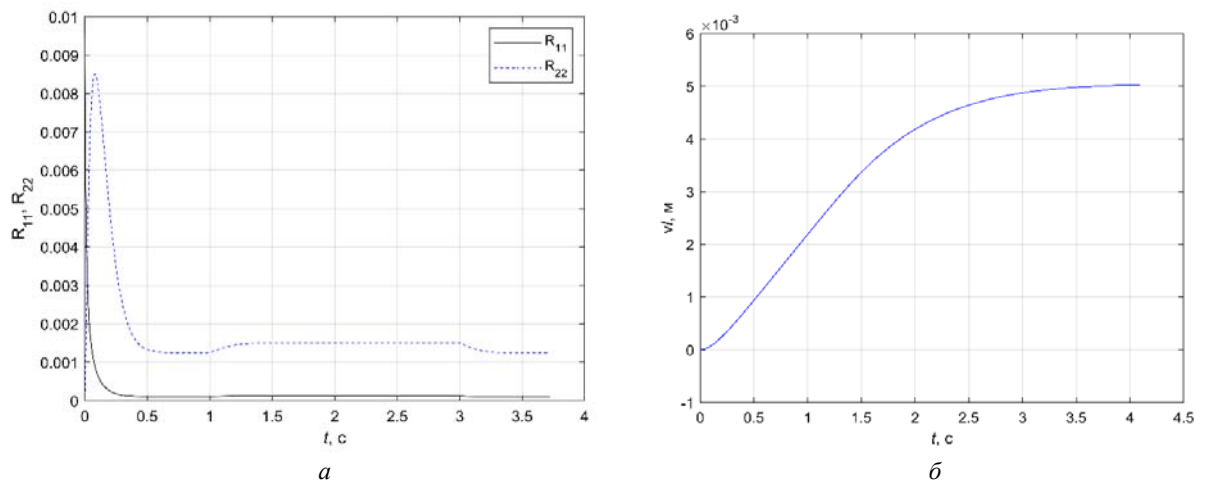


Рис. 6. Графики: $a - R_{11}(t), R_{22}(t)$; $б - \hat{I}(t)$

Fig. 6. Graphics: $a - R_{11}(t), R_{22}(t)$; $b - \hat{I}(t)$

На рис. 6, а представлены графики $R_{11}(t)$ и $R_{22}(t)$ при отключении измерений с 1 до 3 секунды. Рис. 6, б показывает оцененную величину $\hat{l}(t)$. Элементы ковариационной матрицы приходят к установившемуся значению при наличии наблюдений. На интервале отключения измерений при $B_{z1}^{-1} = 0$ и $B_{z2}^{-1} = 0$ величины оценок и $R_{11}(t)$, $R_{22}(t)$ вычисляются с помощью фильтра в режиме прогноза.

При включении измерений на 3 с фильтр Калмана приводит оценку к оптимальному значению к 3,2 с. Математическое ожидание шума равняется нулю, поэтому при отключении измерений каких-либо существенных отличий в оценке измеряемых величин не наблюдается. Критическим является наличие внешних возмущений, так как за время отключения датчиков возможен уход математической модели от состояния реальной системы. Ввиду того, что процесс управления для рассматриваемой задачи занимает $t_f = 4$ с, важно включать измерения при приближении к конечным значениям, что позволит оценить состояние системы и при необходимости скорректировать управление. При этом достаточно проводить измерение длины выдвижения пьезоактюатора l , включение датчика измерения напряжения $U_{30} = 0$ незначительно повышает точность решения задачи.

Ошибки оценивания Δl и ΔU_3 при работе фильтра Калмана с течением времени стремятся к нулю. При наличии внешних возмущений данные ошибки имеют математическое ожидание равное нулю и дисперсию, не превышающую дисперсию возмущений.

Заключение

Для решения задачи управления также применялись алгоритмы на основе принципа максимума Понтрягина с использованием численных методов Ньютона, Крылова – Черноусько, алгоритма коррекции параметров структуры управления [12; 23; 27]. Алгоритм последовательной оптимизации позволил на 12 % снизить энергетические затраты на управление. Применение ПИД-структуры управления увеличивало затраты электроэнергии на 27 % по сравнению с предлагаемым алгоритмом [28] при наличии перерегулирования.

Как видно, численное моделирование подтвердило возможность решения задачи оптимального управления стохастической моделью пьезоактюатора для настройки радиоотражающего сетеполотна КТР по неполным данным с использованием принципа разделения. Интервальное выключение измерений позволяет снизить энергозатраты на питание датчиков и обработку измерений. При этом более длительное включение датчиков в конечный момент времени приводит к более точному выполнению терминальных условий. Поэтому дополнительно возникает задача оптимизации интервалов наблюдения с целью минимизации энергетических затрат при высокоточном выполнении терминальных условий [29].

Представленные исследования доложены на XXII международной научной конференции «Системный анализ, управление и навигация» [30].

Библиографические ссылки

1. Вовасов В. Е., Бетанов В. В., Герко С. А. Методика калибровки навигационного приемника ГЛОНАСС при использовании двухчастотных комбинаций измерений псевдопоследовательностей // Вестник Московского авиационного института. 2014. Т. 21, № 5. С. 137–144.
2. Фёдоров А. В., Хоанг Ву. Т. Программный комплекс для проектирования алгоритмов управления движением сервисного модуля на геостационарной орбите // Вестник Московского авиационного ин-та. 2020. Т. 27, № 4. С. 192–205.
3. Kazantsev Z. A. Deployment concept mechanical system of a radar antenna for space purposes // Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 4. С. 858–867.

4. Xuelin D., Jingli D., Hong B., Guohui S., Deployment analysis of deployable antennas considering cable net and truss flexibility // *Aerospace Science and Technology*. 2018. Vol. 82–83. P. 557–565.
5. Wang H. Multifrequency Spaceborne Deployable Radiometer Antenna Designs // *IEEE Aerospace and electronic systems magazine*. 2020. Vol. 35, No. 5. P. 28–35.
6. Deployable reflector system for satellite applications, in: 2005 SBMO / M. Terada, N. Bludworth, J. Moore et al. // *IEEE MTT-S International Conference on Microwave and Optoelectronics*. Brazil. 2005. P. 647–656.
7. Li T. Deployment analysis and control of deployable space antenna // *Aerospace Science and Technology*. 2012. Vol. 18, No. 1. P. 42–47.
8. Резник С. В., Чубанов Д. Е. Моделирование динамики раскрытия крупногабаритного трансформируемого рефлектора космической антенны из композиционного материала // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования*. 2018. Т. 19, № 4. С. 411–425.
9. Метод расчёта напряженно-деформированного состояния вантовооболочечных конструкций космических антенн рефлекторов / А. В. Бельков, С. В. Белов, А. П. Жуков и др. // *Вестник Томского гос. ун-та. Математика и механика*. 2019. № 62. С. 5–18.
10. 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.
11. 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.
12. Кабанов С. А., Зимин Б. А., Митин Ф. В. Разработка и анализ математических моделей раскрытия подвижных частей трансформируемых космических конструкций. Ч. II // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2020. Т. 21, № 2. С. 117–128.
13. 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.
14. 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.
15. Тайгин В. Б., Лопатин А. В. Метод обеспечения высокой точности формы рефлекторов зеркальных антенн космических аппаратов // *Космические аппараты и технологии*. 2019. Т. 3, № 4 (30). С. 200–208.
16. Kalabegashvili G. I., Bikeev E. V., Mathylenko M. G. Determination of the minimal reflecting surface points number required for assessment of large-size transformable antenna pattern deviation // *Сибирский журнал науки и технологий*. 2018. Т. 19, № 1. С. 66–75.
17. Ишков В. Н. Воздействие солнечных активных явлений на околоземное космическое пространство и возможность их прогноза // *Сложные системы*. 2012. № 4 (5). С. 21–41.
18. Влияние солнечной активности на магнитосферу Земли / Б. Б. Михалеев, С. Б. Дертеев, И. Ю. Лагаев, Т. Т. Осмонов // *Актуальные проблемы современной физики и математики*. 2017. С. 92–97.
19. Панич А. Е. Пьезокерамические актюаторы. Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2008. 159 с.
20. ПИН-50-У-4/20-ДХ – преобразователь измерительный постоянного и переменного напряжения [Электронный ресурс]. URL: <https://www.electronpribor.ru/catalog/850/pin-50-u-420-dh.htm> (дата обращения: 10.10.2021).
21. 3D-сканеры RangeVision [Электронный ресурс]. URL: <https://printer-plotter.ru/3d-oborudovanie/3d-scanners/rangevision/?yclid=5975775935832053836> (дата обращения: 10.10.2021).

22. Управление пьезоактюатором для настройки отражающей поверхности рефлектора космического базирования / С. А. Кабанов, Ф. В. Митин, А. И. Кривушов, Е. А. Улыбушев // Изв. вузов. Авиационная техника. 2018. № 4. С. 111–116.
23. Справочник по теории автоматического управления / под ред. А. А. Красовского. М. : Наука, 1987. 712 с.
24. Кабанов С. А. Оптимизация динамики систем при действии возмущений. М. : Физматлит, 2008. 200 с.
25. Кабанов Д. С. Оптимальное управление ядерным реактором с учетом случайных возмущений // Приборостроение. 2009. № 5. С. 27–30.
26. Кабанов С. А. Управление системами на прогнозирующих моделях. СПб. : Изд-во СПбГУ, 1997. 200 с.
27. Кабанов С. А., Митин Ф. В. Оптимизация процессов раскрытия и создания формы трансформируемого рефлектора космического базирования // Изв. РАН. ТиСУ. 2021. № 2. С. 106–125.
28. Кабанов С. А., Митин Ф. В. Оптимальное управление пьезоактюатором для настройки радиоотражающего сетеполотна космического рефлектора // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 3. С. 183–191.
29. Малышев В. В., Красильщиков М. Н., Карлов В. И. Оптимизация наблюдения и управления летательных аппаратов. М. : Машиностроение, 1989. 312 с.
30. Кабанов С. А., Митин Ф. В., Шевчик А. А. Решение задачи фильтрации при оптимальной настройке радиоотражающего сетеполотна трансформируемого рефлектора // Системный анализ, управление и навигация : тез. докладов. М. : Изд-во МАИ, 2021. С. 170–171.

References

1. Vovasov V. E., Betanov V. V., Gerko S. A. [Calibration technique of navigation glonass receiver using combinations of dual-frequency pseudorange measurements]. *Aerospace MAI Journal*. 2014, Vol. 21, No. 5, P. 137–144 (In Russ.).
2. Fyodorov A. V., Hoang Vu. T. [Software package for motion control algorithms design of service module in geostationary orbit]. *Aerospace MAI Journal*. 2020, Vol. 27, No. 4, P. 192–205 (In Russ.).
3. Kazantsev Z. A. [Deployment concept mechanical system of a radar antenna for space purposes]. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2017, Vol. 18, No. 4. P. 858–867 (In Russ.).
4. Xuelin D., Jingli D., Hong B., Guohui S. Deployment analysis of deployable antennas considering cable net and truss flexibility. *Aerospace Science and Technology*. 2018, Vol. 82–83, P. 557–565.
5. Wang H. Multifrequency Spaceborne Deployable Radiometer Antenna Designs. *IEEE Aerospace and electronic systems magazine*. 2020. Vol. 35, No. 5, P. 28–35.
6. Deployable reflector system for satellite applications, in: 2005 SBMO / M. Terada, N. Bludworth, J. Moore et al. *IEEE MTT-S International Conference on Microwave and Optoelectronics*. Brazil. 2005. P. 647–656.
7. Li T. Deployment analysis and control of deployable space antenna. *Aerospace Science and Technology*. 2012, Vol. 18, No. 1, P. 42–47.
8. Reznik S. V., Chubakov D. E. [Modeling the dynamics of the deployment of a large-sized transformable reflector of a space antenna made of composite material]. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2018, Vol. 19, No. 4, P. 411–425 (In Russ.).
9. Bel'kov A. V., Belov S. V., Zhukov A. P., Pavlov M. S., Ponomarev S. V., Kuznecov S. A. [Method for calculation of the stress-strain state for cable-membrane space reflector structures]. *Vestn. Tomsk. Gos. Univ. Mat. Mekh*. 2019, No. 62, P. 5–18 (In Russ.).

10. 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.
11. 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.).
12. Kabanov S. A., Zimin B. A., Mitin F. V. [Development and Research of Mathematical Models of Deployment of Mobile Parts of Transformable Space Construction. P. II]. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. 2020, Vol. 21, No. 2, P. 117–128 (In Russ.).
13. 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, No. 176, P. 717–724.
14. 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.
15. Taygin V. B., Lopatin A. V. [Method of achievement the high accuracy of the shape of reflectors of mirror antennas of spacecraft]. *Spacecrafts & Technologies*. 2019, Vol. 3, No. 4, P. 200–208 (In Russ.).
16. Kalabegashvili G. I., Bikeev E. V., Mathylenko M. G. [Determination of the minimal reflecting surface points number required for assessment of large-size transformable antenna pattern deviation]. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2018, Vol. 19, No. 1, P. 66–75 (In Russ.).
17. 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.).
18. Mihalyaev B. B., Derteev S. B., Lagaev I. Y., Osmonov T. T. [Vliyanie solnechnoj aktivnosti na magnitosferu Zemli]. *Aktual'nye problemy sovremennoj fiziki i matematiki. trudy*. 2017, P. 92–97 (In Russ.).
19. Panich A. E. *P'ezokeramicheskie aktyuatory* [Piezoceramic actuators]. Rostov-na-Donu, YUFU Publ., 2008, 159 p.
20. PIN-50-U-4/20-DKh – preobrazovatel' izmeritel'nyy postoyannogo i peremennogo napryazheniya [PIN-50-U-4/20-DX – DC and AC voltage Measuring Converter]. Available at: <https://www.electronpribor.ru/catalog/850/pin-50-u-420-dh.htm> (accessed: 10.10.2021).
21. 3D skanery RangeVision [3D Scanners Range Vision]. Available at: <https://printer-plotter.ru/3d-oborudovanie/3d-scanners/rangevision/?yclid=5975775935832053836> (accessed: 10.10.2021).
22. Kabanov S. A., Mitin F. V., Krivushov A. I., Ulybushev E. A. Control of a piezo actuator to adjust refractive surface of the space-based reflector. *Russian Aeronautics (Iz. VUZ)*. 2018, Vol. 61, No. 4, P. 629–635.
23. *Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravleniya. Pod red. A. A. Krasovskogo* [Handbook on the theory of automatic control. Ed. by A. A. Krasovskij]. Moscow, Nauka Publ., 1987, 712 p.
24. Kabanov S. A. *Optimizatsiya dinamiki sistem pri deystvii vozmushcheniy* [Optimization of the dynamics of systems under the action of disturbances]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2008, 200 p.
25. 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.).
26. Kabanov S. A. *Upravlenie sistemami na prognoziruyushchih modelyah* [Control systems based on predictive model]. SPb., SPbGU Publ., 1997, 200 p.
27. 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.
28. Kabanov S. A., Mitin F. V. [Optimal control for piezo actuator for setting the shape of the radio-reflecting network]. *Journal of Instrument Engineering*. 2021, Vol. 64, No. 3, P. 183–191 (In Russ.).

29. 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.

30. Kabanov S. A., Mitin F. V., Shevchik A. A. [Solution of the filtration problem with the optimal adjustment of the radio reflecting net of a transformable reflector]. *Sistemnyy analiz, upravlenie i navigaciya*. Moscow, Izd-vo MAI Publ., 2021, P. 170–171.

© Кабанов С. А., 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.

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.

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.
