Иванов Станислав Валерьевич, Бабенко Татьяна Сергеевна, Бессмертный Андрей Александрович, Рева Антон Андреевич

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ЗАКОНА ТЕРМИНАЛЬНО-ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ДИНАМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

В статье рассматривается задача оптимального терминального управления стохастической динамической системой с неопределенной управляющей функцией. Предлагается подход к ее решению, включающий синтез управления на основе модели с обобщенным управлением и организацию движения системы по сформированной оптимальной траектории. Вместо решения двухточечной краевой задачи Коши используется подход одностороннего управления по принципу гарантированного результата, что позволяет строить оптимально-терминальное управление в функции текущих координат объекта.

Адрес статьи: www.gramota.net/materials/1/2016/1/9.html

Статья опубликована в авторской редакции и отражает точку зрения автора(ов) по рассматриваемому вопросу.

Источник

Альманах современной науки и образования

Тамбов: Грамота, 2016. № 1 (103). С. 43-46. ISSN 1993-5552.

Адрес журнала: www.gramota.net/editions/1.html

Содержание данного номера журнала: www.gramota.net/materials/1/2016/1/

© Издательство "Грамота"

Информация о возможности публикации статей в журнале размещена на Интернет сайте издательства: www.gramota.net

Вопросы, связанные с публикациями научных материалов, редакция просит направлять на адрес: almanac@gramota.net

8. **Индустриальное наследие**: материалы Международной научной конференции (г. Саранск, 23-25 июня 2005 г.). Саранск, 2005.
9. **К 300-летию уральской металлургии** / Демидовский институт. Екатеринбург, 2001.
10. **Металлургическая промышленность России XVIII-XX веков.** Саранск – Екатеринбург, 2007.
11. **Молчанова Г. Ф.** Верх-Исетский завод, 1726-2001: три века российской металлургии. Екатеринбург, 2001.
12. **Нагорнов В. П.** Ибердский доменный и молотовой завод Рязанской губернии // Российский научный журнал. 2012. № 3 (28).
13. **Нагорнов В. П.** На заре рязанской металлургии: страницы истории Улусского металлургического завода // Материалы и исследования по рязанскому краеведению: сб. научных работ / отв. ред., сост. Б. В. Горбунов. Рязань, 2006. Т. 11.
14. **Нагорнов В. П.** Об истории основания и функционирования Лашманского металлургического завода Рязанской губернии // Российский научный журнал. 2010. № 3 (16).
15. **Нижнетагильский металлургический завод. XVIII-XX вв.** / Ю. С. Комратов, И. Г. Семенов, С. В. Устьянцев, С. И. Хлопотов. Екатеринбург, 1996.
16. **От «Гужона» к «Серпу и молоту»: история Московского металлургического завода «Серп и молот» в документах. 1883-1932 гг.** / сост. И. Л. Корнаковский. М., 2009.
17. **Поздравление Президента Российской Федерации В. В. Путина работникам и ветеранам горно-металлургического комплекса России 19 июля 2015 г.** [Электронный ресурс]. URL: http://www.kremlin.ru/events/president/letters/50017 (дата обращения: 15.12.2015).
18. **Порталь Р.** Урал в XVIII веке: очерки социально-экономической истории / пер. с фр. Л. Сахабгареевой; РАН, Уфимский научный центр, Центр этнологических исследований. Уфа, 2004.
19. **Промышленные династии тульского происхождения**: сб. статей. Тула, 1993. Вып. 2.
20. **Рискин В. М.** Третье рождение: Уфалейскому заводу металлургического машиностроения 245 лет. Челябинск, 2006.
21. **Хадсон Х.** Первые Демидовы и развитие черной металлургии России в XVIII веке / авторизованный пер. с англ. И. Кучумова; отв. ред. И. Н. Юркин; Институт истории и археологии Уральского отделения РАН. СПб., 2014.
22. **Чуприянов В. И.** Чермозский завод. Факты, моменты и события (1761-1956). Пермь, 2001.

TOPICAL PROBLEMS OF HISTORIOGRAPHY OF NATIVE METALLURGIC INDUSTRY OF THE SECOND HALF OF THE XIX – THE BEGINNING OF THE XX CENTURY

Ershov Vitalii Fedorovich
Moscow Region State University
ershov_vf@mail.ru

The article is devoted to the analysis of the contemporary historiography on the issues of the development of metallurgic industry in pre-revolutionary Russia. The author substantiates the topicality of the further study of the history of native metallurgy. The scientific-theoretical and applied significance of studying the evolution of the centres of metallurgic sector in European Russia in the post-reform period is shown. The perspective directions of the historiographical mastering of this problem in the framework of social history and scientific local history are suggested.

Key words and phrases: native historiography; historiography of history of Russia of the end of the XIX – the beginning of the XX century; regional history and local history; history of industry; Russian metallurgy; mining and metallurgy complex.

УДК 629.7.017.2
Технические науки

В статье рассматривается задача оптимального терминального управления стохастической динамической системой с неопределенной управляющей функцией. Предлагается подход к ее решению, включающий синтез управления на основе модели с обобщенным управлением и организацию движения системы по сформированной оптимальной траектории. Вместо решения двухточечной краевой задачи Коши используется подход одностороннего управления по принципу гарантированного результата, что позволяет строить оптимально-терминальное управление в функции текущих координат объекта.

Ключевые слова и фразы: оптимальное управление; стохастическая динамическая система; терминальные условия; двухточечная краевая задача; принцип максимума Понтрягина.

Иванов Станислав Валерьевич, к.т.н.
Бабенко Татьяна Сергеевна
Бессмертный Андрей Александрович
Рева Антон Андреевич
Донской государственный технический университет
sta399@yandex.ru; dstu-uts32@rambler.ru; an6194@mail.ru; reva-anton12@mail.ru

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ЗАКОНА ТЕРМИНАЛЬНО-ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ДИНАМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Традиционные подходы к решению задачи оптимального управления стохастической динамической системой с априорно неопределенными параметрами предполагают оценивание и идентификацию вектора состояния

и вектора параметров системы; формирование оптимального управления на основе уточненной математической модели системы [1; 2]. Вследствие этого при решении таких задач используются упрощенные модели. Неадекватность принятой модели реальному движению в этом случае приводит к движению системы по неоптимальной траектории и не позволяет с высокой точностью выполнить терминальные условия.

В связи с этим представляет интерес разработка способов решения задачи оптимизации на основе системы обобщенных моделей.

Постановка задачи

Стохастические динамические системы, движение которых описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений, имеют вид

$$\dot{x} = f(x,t) + \phi(x,t)\, u(v,t) + W_x, \quad t \in [t_0,\, t_k] \tag{1}$$

с функцией наблюдения

$$z = h\,(x,t) + W_z\,, \tag{2}$$

где x – вектор состояния размера n; v – вектор управления (управляющих параметров) размера r; f – известная нелинейная непрерывная дифференцируемая по x векторная функция размера n; ϕ – известная нелинейная непрерывная дифференцируемая по x матричная функция размера $n \times r$; u – в общем случае неизвестная нелинейная векторная управляющая функция размера r, которая принимается как обобщенное управление; h – известная нелинейная непрерывная дифференцируемая по x векторная функция размера n; W_x, W_z – векторы возмущений в системе и шумов измерителя, которые могут быть представлены белыми гауссовскими шумами с нулевыми средними и известными матрицами интенсивностей $D_x(t)$, $D_z(t)$; t_0, t_k – моменты времени начала и окончания управления.

Стоит отметить, что система (1) является структурно неопределенной вследствие неопределенности управляющей функции $u(v,t)$.

Предполагая, что модель движения системы известна с точностью до управляющей функции, ее можно представить в виде

$$\dot{x}_m = f(x_m,t) + \phi\,(x_m,t)\, u_m\,(t)\,, \tag{3}$$

где x_m – модельный вектор состояния, а $u_m\,(t)$ – модельное обобщенное управление.

Терминальное условие и минимизируемый функционал, соответственно, задаются в форме

$$S(x_m,\, t_k) = 0, \tag{4}$$

$$J = \int_{t_0}^{t_k} F(x_m,\, u_m,\, t)\, dt\,, \tag{5}$$

где (4) – гиперповерхность в пространстве состояний; $S(x_m,\, t_k)$ – непрерывная дифференцируемая по x_m векторная функция размера n; $F(x_m,\, u_m,\, t)$ – в общем случае нелинейная дважды дифференцируемая по x_m и u_m функция.

Задачу управления динамической системой (1) целесообразно представить в виде двухэтапной, причем на первом этапе осуществляется поиск оптимального обобщенного управления $u_m^o(t)$, удовлетворяющего на решениях (3) терминальному условию (4) и условию минимума функционала (5), а на втором этапе – формирование управления, корректирующего $v(t)$ для приближения (подстройки) реального процесса (1) к оптимальному модельному (3).

Решение задачи на первом этапе может быть найдено одним из известных методов синтеза, например: [2; 4], позволяющим найти оптимальное обобщенное управление

$u_m^o(t)$: $S(x_m, t_k) \le \mathrm{E}_S$, $J \to \inf$, (3), $x_m(t_0) = x_{m\,0}$, $t \in [t_0,\, t_k]$, $u_m \in U$, где E_S – допустимая погрешность выполнения терминального условия; U – заданная ограниченная область в пространстве управляющей функции.

Решение задачи на втором этапе может быть получено на основе определения текущего значения управляющей функции.

Решение задачи

Система (1) в терминах оценок вектора состояния и обобщенного управления имеет вид:

$$\dot{\hat{x}} = f(\hat{x},t) + \phi(\hat{x},t)\, \hat{u}\,(t)\ . \tag{6}$$

Задача идентификации обобщенного управления представляется как поиск на решениях (6) его оптимальной оценки, удовлетворяющей условию минимума рассогласования между текущим наблюдением z (2) и его текущей оценкой $h(\hat{x},t)$. Исходя из этого, формируется минимизируемый функционал в виде

$$J = \frac{1}{2}\int_{t_0}^{t} \left\{ \left[z - h(\hat{x},t)\right]^T D_z^{-1} \left[z - h(\hat{x},t)\right] + \hat{u}^T R\, \hat{u} \right\}\, d\tau\,,$$

где R – положительно определенная диагональная матрица весовых коэффициентов размера $r \times r$; T – знак операции транспонирования.

Для решения задачи используется принцип максимума Понтрягина и формируется гамильтониан

$$H = \psi^T f(\hat{x}, t) + \psi^T \phi(\hat{x}, t)\, \hat{u} + \frac{1}{2}\left[z - h(\hat{x}, t)\right]^T D_z^{-1}\left[z - h(\hat{x}, t)\right] + \frac{1}{2}\hat{u}^T R \hat{u}\ ,$$

где ψ – вектор сопряженных переменных.

Из условия стационарности гамильтониана по управлению $\frac{\partial H}{\partial \hat{u}} = 0$ следует: $\hat{u} = -R\, \phi^T(\hat{x}, t)\, \psi$. На основании уравнения для сопряженных переменных $\dot{\psi} = -\frac{\partial H}{\partial \hat{x}}$ с учетом выражения для оценки $\hat{u}$ получается следующая система сопряженных уравнений:

$$\dot{\hat{x}} = f(\hat{x}, t) - \phi(\hat{x}, t)\, R\, \phi^T(\hat{x}, t)\, \psi,$$

$$\dot{\psi} = -\left[\frac{\partial f(\hat{x}, t)}{\partial \hat{x}}\right]^T \psi - \left[\frac{\partial \phi(\hat{x}, t)}{\partial \hat{x}}\, R\, \phi^T(\hat{x}, t)\, \psi\right]^T \psi -$$

$$-\left[\frac{\partial h(\hat{x}, t)}{\partial \hat{x}}\right]^T D_z^{-1}\left[z - h(\hat{x}, t)\right],$$

определяющих двухточечную краевую задачу. Использование для ее решения метода инвариантного погружения [3] дает систему уравнений для оценок

$$\dot{\hat{x}} = f(\hat{x}, t) + G\left[\frac{\partial h(\hat{x}, t)}{\partial \hat{x}}\right]^T D_z^{-1}\left[z - h(\hat{x}, t)\right], \tag{7}$$

$$\dot{G} = G\left\{\frac{\partial^2 h(\hat{x}, t)}{\partial \hat{x}^2} D_z^{-1}\left[z - h(\hat{x}, t)\right] - \left[\frac{\partial h(\hat{x}, t)}{\partial \hat{x}}\right]^T D_z^{-1}\, \frac{\partial h(\hat{x}, t)}{\partial \hat{x}}\right\} G +$$

$$+ G\left[\frac{\partial f(\hat{x}, t)}{\partial \hat{x}}\right]^T + \frac{\partial f(\hat{x}, t)}{\partial \hat{x}}\, G + \phi(\hat{x}, t)\, R \phi^T(\hat{x}, t)\ , \tag{8}$$

где G – ковариационная матрица ошибок оценок.

Если сравнить уравнения (6) и (7), можно заметить, что

$$\phi(\hat{x}, t)\, \hat{u} = G\left[\frac{\partial h(\hat{x}, t)}{\partial \hat{x}}\right]^T D_z^{-1}\left[z - h(\hat{x}, t)\right],$$

откуда следует выражение для искомой оценки обобщенного управления

$$\hat{u} = \phi^{-1}(\hat{x}, t)\, G\left[\frac{\partial h(\hat{x}, t)}{\partial \hat{x}}\right]^T D_z^{-1}\left[z - h(\hat{x}, t)\right]. \tag{9}$$

Таким образом, алгоритм идентификации обобщенного управления может быть построен на основе системы уравнений (7), (8) и зависимости (9). По сравнению с известным алгоритмом субоптимальной параметрической идентификации (расширенным обобщенным фильтром Калмана – Бьюси), для реализации бортового алгоритма потребуется в 2-3 раза меньше вычислительных затрат.

Пример

Иллюстрацию и сравнительную оценку эффективности предложенного алгоритмического подхода к решению задачи управления динамической системой проведем на примере динамической системы

$$\dot{x} = -x^2\,[v + v^2] + w_x\ ,\quad x(0) = 1,\quad t \in [0;\, 3c]\ ,\quad d_x = 0,01;$$
$$z = x + w_z\ ,\ d_z = 0,05. \tag{10}$$

Модель движения системы в терминах обобщенного управления принимает вид

$$\dot{x}_m = -x_m^2\, u_m\ ,\quad x_m(0) = 1.$$

Исходные данные: $u_v = 5$; $v_0 = 0$; $r = 10$; $g(0) = 1$. Значение u_v существенно отличается от действительного и выбрано таким из соображений «мягкой» подстройки движения динамической системы.

Тогда выражения (7)-(9), определяющие процедуру коррекции движения системы (10), с учетом значений соответствующих параметров принимают вид

$$\dot{\hat{x}} = 100\ g\ (z - \hat{x}),\ \dot{g} = -100\ g^2 + 10\ \hat{x}^4,$$

$$\hat{u} = -100\ \hat{x}^{-2} g\ (z - \hat{x}).$$

Моделирование процессов управления угловой переориентацией ЛА [5; 6] по предложенной методике для решения задачи с шагом интегрирования (тактом подстройки) 0,001 с дает максимальные ошибки приближения движения системы к модельному оптимальному по обобщенному управлению и координате, соответственно, $0,4\%$ и $0,9\%$ при длительности переходных процессов не более 0,5 с.

При использовании для решения этой задачи алгоритма параметрической идентификации, построенного на основе расширенного обобщенного фильтра Калмана – Бьюси, получены аналогичные результаты, однако вычислительные затраты при этом возросли в 2,5 раза.

Список литературы

1. **Первачев С. В., Перов А. И.** Адаптивная фильтрация сообщений. М.: Радио и связь, 1991. 283 с.
2. **Петров Б. Н., Лопатин В. И., Митрошин Э. И., Васильев В. И.** Некоторые вопросы статистически оптимальной обработки информации о параметрах траектории транспортного космического корабля // XXV Конгресс Международной астронавтической федерации. Амстердам, 1974. С. 56-58.
3. **Половинчук Н. Я., Иванов С. В., Руденко Н. В.** Алгоритм терминального управления для автопилота летательного аппарата // Технические и технологические системы: сборник материалов Шестой международной научной конференции «Технические и технологические системы 2014». Краснодар: ФВУНЦ ВВС ВВА, 2014. С. 261-269.
4. **Половинчук Н. Я., Трофименко В. Н., Руденко Н. В., Иванов С. В.** Оптимальное терминальное управление структурно неопределенной динамической системой // Двойные технологии. 2013. № 4. С. 40-43.
5. **Сейдж Э. П., Уайт Ч. С.** Оптимальное управление системами. М.: Радио и связь, 1982. 392 с.
6. **Справочник по теории автоматического управления** / под ред. А. А. Красовского. М.: Наука, 1987. 712 с.

SOLVING THE TASK OF PARAMETRIC SYNTHESIS OF THE LAW OF OPTIMAL TERMINATION CONTROL OVER THE DYNAMIC OBJECT MOVEMENT UNDER THE CONDITIONS OF INDETERMINACY

Ivanov Stanislav Valer'evich, Ph. D. in Technical Sciences
Babenko Tat'yana Sergeevna
Bessmertnyi Andrei Aleksandrovich
Reva Anton Andreevich
Don State Technical University
sta399@yandex.ru; dstu-uts32@rambler.ru; an6194@mail.ru; reva-anton12@mail.ru

The article analyzes the task of optimal termination control over the stochastic dynamic system with uncertain steering function. The paper proposes an approach, which includes control synthesis on the basis of the integrated control model and organizing the system movement according to the formed optimal trajectory. Instead of solving the two-point boundary value Cauchy problem the authors use a one-way control approach on the guaranteed result principle, which allows developing optimal termination control in the function of the current position of an object.

Key words and phrases: optimal control; stochastic dynamic system; terminal conditions; two-point boundary value problem; Pontryagin's maximum principle.

УДК 629.7.017.2
Технические науки

В статье ставится задача рассмотреть способ управления маневрирующим в атмосфере летательным аппаратом на участке спуска в условиях неопределенности его управляющей функции. Выделены два этапа решения данной задачи: на первом этапе производится поиск оптимального обобщенного управления, на втором – формирование управления с целью приближения (подстройки) реального процесса к модельному. На основе полученного результата можно сделать вывод, что использование предложенного способа позволяет эффективно решать задачу оптимального управления летательным аппаратом в условиях существенной неопределенности его управляющей функции.

Ключевые слова и фразы: летательный аппарат; аэродинамические качества; принцип текущего итерационного программирования; управление летательным аппаратом; система дифференциальных уравнений; движение аэродинамически управляемого летательного аппарата в атмосфере.

Иванов Станислав Валерьевич, к.т.н.
Бабенко Татьяна Сергеевна
Рева Антон Андреевич
Бессмертный Андрей Александрович
Донской государственный технический университет
Sta399@yandex.ru; dstu-uts32@rambler.ru; Reva-anton12@mail.ru; an6194@mail.ru

МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ТЕРМИНАЛЬНО-ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТОМ С УЧЕТОМ КОРРЕКЦИИ ОБОБЩЕННОГО УПРАВЛЕНИЯ

Решение задачи терминального оптимального управления маневрирующим в атмосфере летательным аппаратом (ЛА) является наиболее эффективным при реализации принципа текущего итерационного программирования [2], который предполагает формирование в процессе движения ЛА оптимального управления на основе информации о модели объекта. Однако такое управляемое движение ЛА характеризуется широкой областью состояний и управлений, и модель объекта не может быть сформирована точно.

Представляет интерес разработка способов и алгоритмов терминального управления при решении задачи оптимизации на основе близких к реальному движению ЛА обобщенных моделей.