НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ
июль–август 2023 Том 23 № 4 http://ntv.ifmo.ru/
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS
July–August 2023 Vol. 23 No 4 http://ntv.ifmo.ru/en/
ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

BRIEF PAPERS

doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-4-850-853
УДК 681.5.015

Адаптивный наблюдатель переменных состояния нелинейной нестационарной системы с неизвестными постоянными параметрами и запаздыванием в канале измерений

Алексей Алексеевич Бобцов[1], Николай Анатольевич Николаев[2]✉, Ольга Андреевна Козачёк[3], Ольга Владимировна Оськина[4]

[1,2,3,4] Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

[1] bobtsov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-1854-6717
[2] nanikolaev@itmo.ru✉, https://orcid.org/0000-0002-8835-5142
[3] oakozachek@itmo.ru, https://orcid.org/0009-0008-8613-2835
[4] ov_oskina@itmo.ru, https://orcid.org/0009-0005-5121-0432

Аннотация
Рассмотрена задача оценки неизвестных постоянных параметров нелинейной нестационарной системы в условиях запаздывания в канале измерений. Целью работы является синтез адаптивного наблюдателя для нелинейной нестационарной системы, обеспечивающего асимптотическую сходимость оценок неизвестных постоянных параметров к истинным значениям. Предложен метод оценивания неизвестных постоянных параметров нелинейной нестационарной системы, базирующийся на технологии GPEBO (Generalized Parameter Estimation Based Observer). На основе технологии GPEBO выполнена параметризация исходной динамической системы к виду линейной регрессионной модели с последующей идентификацией неизвестных параметров. Для оценивания неизвестных параметров линейной регрессионной модели применен метод наименьших квадратов с фактором забывания. В рамках работы предложено расширение предыдущих результатов авторского коллектива на случай нелинейных нестационарных систем с запаздыванием в канале измерений. Предложенный алгоритм оценки параметров может использоваться для решения прикладных задач, таких как контроль технического состояния, а также в задачах синтеза систем автоматического управления.

Ключевые слова
идентификация параметров, линейная регрессия, запаздывание

Благодарности
Работа подготовлена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 22-21-00499, https://rscf.ru/project/22-21-00499.

Ссылка для цитирования: Бобцов А.А., Николаев Н.А., Козачёк О.А., Оськина О.В. Адаптивный наблюдатель переменных состояния нелинейной нестационарной системы с неизвестными постоянными параметрами и запаздыванием в канале измерений // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23, № 4. С. 850–853. doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-4-850-853

Adaptive observer for state variables of a time-varying nonlinear system with unknown constant parameters and delayed measurements

Alexey A. Bobtsov[1], Nikolay A. Nikolaev[2]✉, Olga A. Kozachek[3], Olga V. Oskina[4]

[1,2,3,4] ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

[1] bobtsov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-1854-6717
[2] nanikolaev@itmo.ru✉, https://orcid.org/0000-0002-8835-5142
[3] oakozachek@itmo.ru, https://orcid.org/0009-0008-8613-2835
[4] ov_oskina@itmo.ru, https://orcid.org/0009-0005-5121-0432

Abstract
Unknown constant parameters estimation problem for a nonlinear time-varying system with delayed measurements is considered. The objective of this work is to design an adaptive observer for a nonlinear time-varying system. The observer must provide asymptotic convergence of the unknown constant parameters estimates to their true values. The main idea behind the method is to perform the parametrization of initial dynamical system based on GPEBO (Generalized Parameter Estimation Based Observer) technology and to build a linear regression model. The identification of linear regression model unknown parameters is performed using least square method with forgetting factor. This work develops the previously published approach for the case of nonlinear time-varying systems with delayed measurements. New parameters estimation algorithm can be applied for technical tasks, such as technical condition control and automatic control systems design.

Keywords
parameters identification, linear regression, delay

Acknowledgements
This work was supported by Russian Science Foundation, project no. 22-21-00499, https://rscf.ru/project/22-21-00499.

For citation: Bobtsov A.A., Nikolaev N.A., Kozachek O.A., Oskina O.V. Adaptive observer for state variables of a time-varying nonlinear system with unknown constant parameters and delayed measurements. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 4, pp. 850–853 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-4-850-853

Предложено развитие результата работы [1] для случая, когда в канале измерения присутствует известное постоянное запаздывание (т. е. выходная переменная измерена с некоторой временной задержкой). В рамках обобщенного подхода к синтезу наблюдателей [2], основанного на оценке постоянных параметров, предложен наблюдатель, обеспечивающий асимптотическую сходимость оценок неизвестных постоянных параметров нелинейной нестационарной системы к истиным значениям в условии наличия запаздывания в канале измерений.

Рассмотрим нелинейную нестационарную систему с одним входом и одним выходом (SISO) вида:

$$\begin{gathered}\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{k}\mathbf{C}^T(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{b}u(t) + \mathbf{w}(\mathbf{C}^T(t)\mathbf{x}(t), t),\\ y(t) = \mathbf{C}^T(\varphi(t))\mathbf{x}(\varphi(t)),\end{gathered} \tag{1}$$

где $\mathbf{x}(t) \in \mathbb{R}^n$ — неизвестный вектор состояния; $u(t) \in \mathbb{R}$ — известный входной сигнал; $y(t) \in \mathbb{R}$ — измеряемый выходной сигнал; $\mathbf{A}(t) \in \mathbb{R}^{n\times n}$ и $\mathbf{C}^T(t) \in \mathbb{R}^n$ — известные матрицы с ограниченными во времени нестационарными параметрами; $\mathbf{k} \in \mathbb{R}^n$ и $\mathbf{b} \in \mathbb{R}^n$ — постоянные и неизвестные векторы; $\mathbf{w}(\mathbf{C}^T(t)\mathbf{x}(t), t)$ — частично неизвестная нелинейная вектор-функция; $\varphi(t)$ — известная неотрицательная функция, определяющая запаздывание в канале измерений

$$\varphi(t) = t - d,\ \varphi(t) \geq 0, \tag{2}$$

где $d > 0$ — постоянное запаздывание.

В отношении рассматриваемой системы при решении поставленной задачи примем следующие типовые допущения (например, [3–5]).

Допущение 1. Нелинейная вектор-функция $\mathbf{w}(\mathbf{C}^T(t)\mathbf{x}(t), t)$ может быть представлена в виде $\mathbf{w}(\mathbf{C}^T(t)\mathbf{x}(t), t) = \mathbf{m}f(\mathbf{C}^T(t)\mathbf{x}(t))$, где $f(\mathbf{C}^T(t)\mathbf{x}(t))$ — известная скалярная нелинейная функция, а $\mathbf{m} \in \mathbb{R}^n$ — вектор неизвестных постоянных параметров.

Допущение 2. Предположено, что сигнал $u(t)$ ограничен и при этом траектории вектора переменных состояния $\mathbf{x}(t)$ также ограничены.

Допущение 3. Пара матриц $\mathbf{A}(t)$ и $\mathbf{C}^T(t)$ обнаруживаема, т. е. существует вектор обратной связи $\mathbf{L}(t)$ такой, что автономная система

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = [\mathbf{A}(t) - \mathbf{L}(t)\mathbf{C}^T(t)]\mathbf{x}(t)$$

является асимптотически устойчивой.

Допущение 4. Автономная система $\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}_0(t)\mathbf{x}(t)$, где $\mathbf{A}_0(t) = \mathbf{A}(t) - \mathbf{L}(t)\mathbf{C}^T(t)$ — равномерно устойчива (uniformly stable). Другими словами, ее фундаментальная матрица удовлетворяет условию [6, теорема 6.4]:

$$\|\mathbf{\Phi}_{A_0}(t, \tau)\| \leq c_1,\ \forall t \geq \tau \geq 0.$$

Для системы (1) определим задачу синтеза адаптивного наблюдателя вида:

$$\begin{gathered}\dot{\boldsymbol{\chi}}(t) = F(\boldsymbol{\chi}(t), u(t), y(t)),\\ [\hat{\mathbf{x}}(t) \quad \hat{\mathbf{k}}(t) \quad \hat{\mathbf{b}}(t) \quad \hat{\mathbf{m}}(t)]^T = S(\boldsymbol{\chi}(t), u(t), y(t)),\end{gathered}$$

где $\boldsymbol{\chi}(t) \in \mathbb{R}^{n_\chi}$ — все сигналы вектора $\boldsymbol{\chi}(t)$ ограничены; $\hat{\mathbf{x}}(t)$, $\hat{\mathbf{k}}(t)$, $\hat{\mathbf{b}}(t)$ и $\hat{\mathbf{m}}(t)$ — текущие оценки, соответственно, $\mathbf{x}(t)$, $\mathbf{k}$, $\mathbf{b}$ и $\mathbf{m}$.

Адаптивный наблюдатель должен обеспечивать сходимость оценок переменных состояния и постоянных неизвестных параметров к реальным значениям, а именно:

$$\hat{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{x}(t),\ \hat{\mathbf{k}}(t) = \mathbf{k},\ \hat{\mathbf{b}}(t) = \mathbf{b},\ \hat{\mathbf{m}}(t) = \mathbf{m},$$

для всех $\mathbf{x}_0 \in \mathbb{R}^n$, $\boldsymbol{\chi}(t) \in \mathbb{R}^{n_\chi}$.

Для решения поставленной задачи, по аналогии с [5], рассмотрим систему (1) в момент времени $t - d$

$$\dot{\mathbf{x}}_d = \mathbf{A}_d\mathbf{x}_d + \mathbf{k}\mathbf{C}_d^T\mathbf{x}_d + \mathbf{b}u_d + \mathbf{w}_d,\ y(t) = \mathbf{C}_d^T\mathbf{x}_d, \tag{3}$$

где $\mathbf{x}_d = \mathbf{x}(\varphi(t))$, $\mathbf{A}_d = \mathbf{A}(\varphi(t))$, $\mathbf{C}_d^T = \mathbf{C}^T(\varphi(t))$, $u_d = u(\varphi(t))$, $\mathbf{w}_d = \mathbf{m}f(\mathbf{C}_d^T\mathbf{x}_d)$.

Для оценки неизвестных параметров системы (3) используем технологию Generalized Parameter

Estimation Based Observer и по аналогии с работой [1] рассмотрим уравнения вида:

$$\dot{\xi}(t) = \mathbf{A}_{0d}\xi(t) + \mathbf{L}_d y(t),\ \xi(0) = \mathbf{0}_{n\times 1}, \tag{4}$$

$$\dot{\boldsymbol{\eta}}(t) = \mathbf{A}_{0d}\boldsymbol{\eta}(t) + \mathbf{I}y(t),\ \boldsymbol{\eta}(0) = \mathbf{0}_{n\times n}, \tag{5}$$

$$\dot{\zeta}(t) = \mathbf{A}_{0d}\zeta(t) + \mathbf{I}u_d,\ \zeta(0) = \mathbf{0}_{n\times n}, \tag{6}$$

$$\dot{\boldsymbol{\rho}}(t) = \mathbf{A}_{0d}\boldsymbol{\rho}(t) + \mathbf{I}f_d,\ \boldsymbol{\rho}(0) = \mathbf{0}_{n\times n}, \tag{7}$$

$$\dot{\boldsymbol{\Phi}}(t) = \mathbf{A}_{0d}\boldsymbol{\Phi}(t),\ \boldsymbol{\Phi}(0) = \mathbf{I}_{n\times n}, \tag{8}$$

где $\mathbf{A}_{0d} = \mathbf{A}_0(\varphi(t))$ и $\mathbf{L}_d = \mathbf{L}(\varphi(t))$ — матрицы; $\mathbf{I}$ — единичная матрица соответствующей размерности.

Таким образом, после несложных математических преобразований (по аналогии с [1]), исходную динамическую систему (1) преобразуем к линейной регрессионной модели вида:

$$\mathbf{z}(t) = \boldsymbol{\Psi}(t)\boldsymbol{\Theta}, \tag{9}$$

где $\mathbf{z}(t) = y(t) - \mathbf{C}_d^T\xi(t)$ — измеряемый сигнал; $\boldsymbol{\Psi}(t) = [\mathbf{C}_d^T\boldsymbol{\Phi}(t) \quad \mathbf{C}_d^T\boldsymbol{\eta}(t) \quad \mathbf{C}_d^T\zeta(t) \quad \mathbf{C}_d^T\boldsymbol{\rho}(t)]$ — вектор известных функций; $\boldsymbol{\Theta} = [\boldsymbol{\theta} \quad \mathbf{k} \quad \mathbf{b} \quad \mathbf{m}]^T$ — вектор неизвестных постоянных параметров, $\boldsymbol{\theta} = \mathbf{x}(0)$.

восстановлен вектор состояния исходной динамической системы (1).

Для иллюстрации работоспособности предложенного подхода выполним компьютерное моделирование. При моделировании для системы (1) были выбраны следующие параметры: $\mathbf{A}(t) = \begin{bmatrix} 2-\sin t & 1 \\ -8+\cos(t) & 0 \end{bmatrix}$, $\mathbf{b} = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix}$, $\mathbf{k} = \begin{bmatrix} -1 \\ 3 \end{bmatrix}$, $\mathbf{C}(t) = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$, $\mathbf{w}(y, t) = \mathbf{m}\sin(\mathbf{C}^T(t)\mathbf{x}(t))$, где $\mathbf{m} = \begin{bmatrix} -4 \\ 4 \end{bmatrix}$. Начальные условия вектора состояния $\mathbf{x}(0) = \begin{bmatrix} -3 \\ -2 \end{bmatrix}$.

Используя вектор обратной связи $\mathbf{L}(t) = \begin{bmatrix} 2-\sin(t) \\ 1+\cos(t) \end{bmatrix}$, получим $\mathbf{A}_0(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -9 & 0 \end{bmatrix}$.

Для проверки работоспособности предложенного алгоритма (4)–(8) совместно с методом наименьших квадратов с фактором забывания для оценки параметров модели (1) применим следующие параметры $\alpha = 10^5$, $M = 10^6$, $\beta = 1$, $f_0 = 0{,}1$. При этом на вход системы был подан синусоидальный сигнал $u(t) = \sin(t)$.

Результаты моделирования (рисунок) подтвердили достижение поставленной цели.

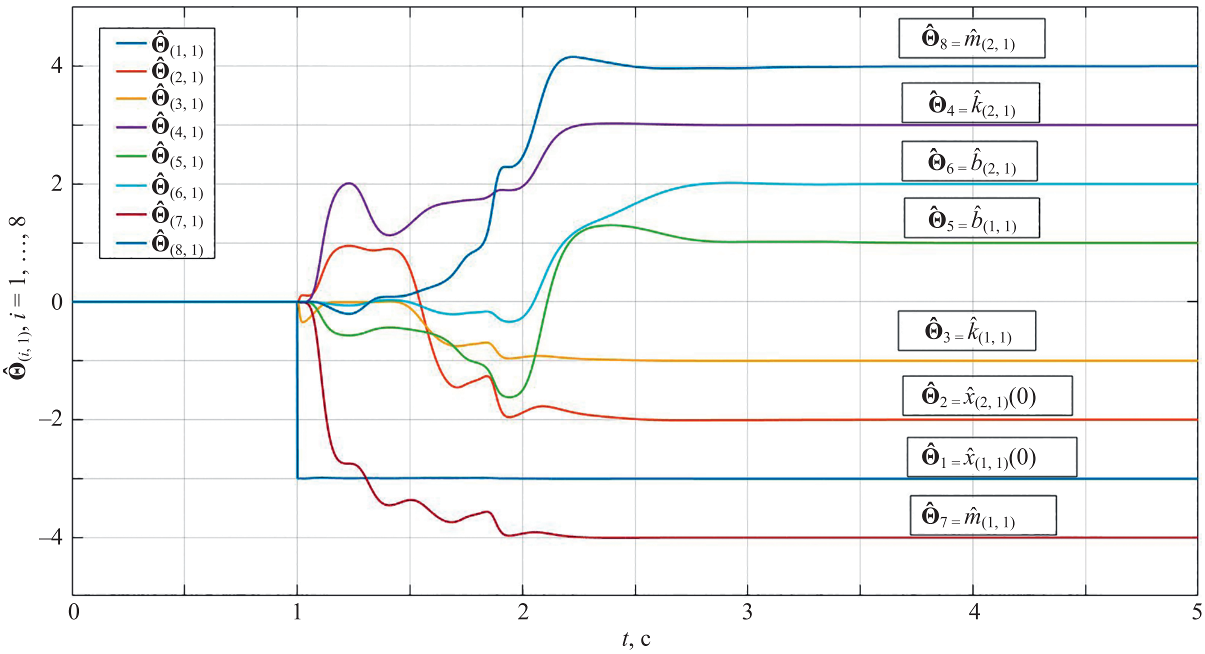

Рисунок. Переходные процессы по оценкам неизвестных параметров

Figure. Transients of unknown parameters estimates

Для оценки неизвестных постоянных параметров модели (9) применим метод наименьших квадратов с фактором забывания (forgetting factor) [7, 8]. После получения оценок неизвестных параметров может быть

В работе предложено развитие результата [1] для случая, когда выходная переменная динамической системы доступна измерению с известным постоянным запаздыванием вида (2). Результаты моделирования продемонстрировали работоспособность предложенного алгоритма.

Литература

1. Козачёк А.А., Бобцов А.А., Николаев Н.А. Адаптивный наблюдатель переменных состояния нелинейной нестационарной системы с неизвестными постоянными параметрами // arXiv. 2023. arXiv:2305.15504. https://doi.org/10.48550/arXiv.2305.15504
2. Ortega R., Bobtsov A., Nikolaev N., Schiffer J., Dochain D. Generalized parameter estimation-based observers: Application to power systems and chemical–biological reactors // Automatica. 2021. V. 129. P. 109635. https://doi.org/10.1016/j.automatica.2021.109635
3. Tranninger M., Seeber R., Zhuk S., Steinberger M., Horn M. Detectability analysis and observer design for linear time varying systems // IEEE Control Systems Letters. 2020. V. 4. N 2. P. 331–336. https://doi.org/10.1109/lcsys.2019.2927549
4. Tranninger M., Zhuk S., Steinberger M., Fridman L., Horn M. Non-uniform stability, detectability, and, sliding mode observer design for time varying systems with unknown inputs // arXiv. 2018. arXiv:1809.06460. https://doi.org/10.48550/arXiv.1809.06460
5. Bobtsov A., Nikolaev N., Slita O., Kozachek O., Oskina O. Adaptive observer for a LTV system with partially unknown state matrix and delayed measurements // Proc. of the 14th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). 2022. P. 165–170. https://doi.org/10.1109/ICUMT57764.2022.9943429
6. Rugh W.J. Linear System Theory. Prentice-Hall, Inc., 1996. 581 p.
7. Ljung L. System identification // Signal Analysis and Prediction. Birkhäuser, Boston, MA, 1998. P. 163–173. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-1768-8_11
8. Sastry S., Bodson M. Adaptive Control: Stability, Convergence and Robustness. New Jersey: Prentice-Hall, 1989. 377 p.

References

1. Kozachek O., Bobtsov A., Nikolaev N. Adaptive observer of state variables of a nonlinear time varying system with unknown constant parameters. *arXiv*, 2023, arXiv:2305.15504. (in Russian). https://doi.org/10.48550/arXiv.2305.15504
2. Ortega R., Bobtsov A., Nikolaev N., Schiffer J., Dochain D. Generalized parameter estimation-based observers: Application to power systems and chemical–biological reactors. *Automatica*, 2021, vol. 129, pp. 109635. https://doi.org/10.1016/j.automatica.2021.109635
3. Tranninger M., Seeber R., Zhuk S., Steinberger M., Horn M. Detectability analysis and observer design for linear time varying systems. *IEEE Control Systems Letters*, 2020, vol. 4, no. 2, pp. 331–336. https://doi.org/10.1109/lcsys.2019.2927549
4. Tranninger M., Zhuk S., Steinberger M., Fridman L., Horn M. Non-uniform stability, detectability, and, sliding mode observer design for time varying systems with unknown inputs. *arXiv*, 2018, arXiv:1809.06460. https://doi.org/10.48550/arXiv.1809.06460
5. Bobtsov A., Nikolaev N., Slita O., Kozachek O., Oskina O. Adaptive observer for a LTV system with partially unknown state matrix and delayed measurements. *Proc. of the 14th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*, 2022, pp. 165–170. https://doi.org/10.1109/ICUMT57764.2022.9943429
6. Rugh W.J. *Linear System Theory*. Prentice-Hall, Inc., 1996, 581 p.
7. Ljung L. System identification. *Signal Analysis and Prediction*. Birkhäuser, Boston, MA, 1998, pp. 163–173. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-1768-8_11
8. Sastry S., Bodson M. *Adaptive Control: Stability, Convergence and Robustness*. New Jersey, Prentice-Hall, 1989, 377 p.

Авторы

Бобцов Алексей Алексеевич — доктор технических наук, профессор, директор мегафакультета, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, sc 8046819200, https://orcid.org/0000-0003-1854-6717, bobtsov@mail.ru

Николаев Николай Анатольевич — кандидат технических наук, доцент, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, sc 13105019100, https://orcid.org/0000-0002-8835-5142, nanikolaev@itmo.ru

Козачёк Ольга Андреевна — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, sc 57219308287, https://orcid.org/0009-0008-8613-2835, oakozachek@itmo.ru

Оськина Ольга Владимировна — студент, инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, sc 57353555800, https://orcid.org/0009-0005-5121-0432, ov_oskina@itmo.ru

Authors

Alexey A. Bobtsov — D.Sc., Professor, Director of School of Computer Technologies and Control, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, sc 8046819200, https://orcid.org/0000-0003-1854-6717, bobtsov@mail.ru

Nikolay A. Nikolaev — PhD, Associate Professor, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, sc 13105019100,https://orcid.org/0000-0002-8835-5142, nanikolaev@itmo.ru

Olga A. Kozachek — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, sc 57219308287, https://orcid.org/0009-0008-8613-2835, oakozachek@itmo.ru

Olga V. Oskina — Student, Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, sc 57353555800, https://orcid.org/0009-0005-5121-0432, ov_oskina@itmo.ru

Статья поступила в редакцию 12.05.2023
Одобрена после рецензирования 19.06.2023
Принята к печати 24.07.2023

Received 12.05.2023
Approved after reviewing 19.06.2023
Accepted 24.07.2023