

УДК 004.021

DOI: 10.25559/SITITO.17.202104.831-837

Научная статья

Выбор системы координат при обработке информационных сигналов с использованием фильтра Калмана

В. М. Понятский^{1,2}

¹ ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», г. Тула, Российская Федерация

Адрес: 300012, Российская Федерация, г. Тула, пр. Ленина, д. 92

² Акционерное общество «Конструкторское бюро приборостроения им. академика А. Г. Шипунова», г. Тула, Российская Федерация

Адрес: 300001, Российская Федерация, г. Тула, ул. Щегловская засека, д. 59

info@kbptula.net

Аннотация

Рассматриваются вопросы сглаживания информационных сигналов в технических системах с подвижным основанием. В таких системах используются различные системы координат и при управлении исполнительными элементами осуществляется преобразование сигналов из одной системы координат в другую. Выбор системы координат, в которой осуществляется обработка информационных сигналов, должен осуществляться с учетом характера изменения обрабатываемых сигналов. В статье рассматривается обработка информационных сигналов с учетом системы измерения координат с помощью фильтрации Калмана. Учет системы измерения координат при фильтрации Калмана позволяет обеспечить требуемую точность обработки сигналов.

Ключевые слова: информационная система, фильтр Калмана, измерение, система координат

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Понятский В. М. Выбор системы координат при обработке информационных сигналов с использованием фильтра Калмана // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2021. Т. 17, № 4. С. 831-837. doi: <https://doi.org/10.25559/SITITO.17.202104.831-837>

© Понятский В. М., 2021



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.



A Coordinate System Choice when Information Signal Processing by Kalman Filter

V. M. Ponyatsky^{a,b}

^a Tula State University, Tula, Russian Federation

Address: 92 Prospekt Lenina, Tula 300012, Russian Federation

^b KBP Instrument Design Bureau, Tula, Russian Federation

Address: 59 Shcheglovskaya Zaseka St., Tula 300001, Russian Federation

info@kbptula.net

Abstract

The article describes information signal smoothing problems in the technical systems with movable platform. In such technical systems different coordinate system are used and there is a signal conditioning from one coordinate system into one another when actuating element controlling. A choice of coordinate system, which is used for information signal processing, must take account of behavior of processed signals. Kalman filter allows providing signal processing required accuracy, if there is taken account of a system of dimensioning.

Keywords: information system, Kalman filter, measurement, coordinate system

The author declares no conflict of interest.

For citation: Ponyatsky V.M. A Coordinate System Choice when Information Signal Processing by Kalman Filter. *Sovremennye informacionnye tehnologii i IT-obrazovanie = Modern Information Technologies and IT-Education*. 2021; 17(4):831-837. doi: <https://doi.org/10.25559/SITITO.17.202104.831-837>



Введение

В технических системах с подвижным основанием, в связи с использованием различных систем координат, обработка информационных сигналов должна осуществляться в соответствующей системе координат¹ [1-3]. Известны традиционные алгоритмы фильтрации Калмана [4, 5] для сглаживания информационных сигналов [6, 7]. В работе [8] рассмотрены алгоритмы фильтрации с использованием преобразования координат. Однако, необходимо учитывать характер изменения информационных сигналов в выбранной системе координат, чтобы не возникали ситуации, когда повышается динамика этих сигналов и возрастают требования к алгоритмам обработки.

В статье рассматривается обработка информационных сигналов с учетом системы измерения координат с помощью фильтрации Калмана. Учет системы измерения координат при фильтрации Калмана позволяет обеспечить требуемую точность обработке сигналов².

Алгоритм обработки информационных сигналов с учетом системы измерения координат, основанный на фильтрации Калмана

Дискретный алгоритм оценивания состояния объекта управления, функционирующего в системе координат C1, по l - ому каналу при измерении в системе координат C2 в рамках методов фильтрации Калмана [9-15] имеет вид:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{io}^{C1}(n|n-1) &= \Phi_i(n)\mathbf{x}_{io}^{C1}(n-1) + \mathbf{B}_i(n)\mathbf{U}_i(n); \\ \mathbf{x}_{io}^{C2}(n|n-1) &= \text{ПК2}(\mathbf{x}_{io}^{C1}(n|n-1)); \\ \Delta\mathbf{x}_{io}^{C2}(n) &= \{\mathbf{z}_i(n) - \mathbf{H}(n)\mathbf{x}_{io}^{C2}(n|n-1)\}; \\ \Delta\mathbf{x}_{io}^{C1}(n) &= \text{ПК1}(\Delta\mathbf{x}_{io}^{C2}(n)); \\ \mathbf{x}_{io}^{C1}(n) &= \mathbf{x}_{io}^{C1}(n|n-1) + \mathbf{S}_i(n)\mathbf{K}_i(n)\Delta\mathbf{x}_{io}^{C1}(n); \\ \mathbf{K}_i(n) &= \mathbf{S}_i\mathbf{P}_i(n|n-1)\mathbf{H}_i^T \{ \mathbf{H}_i(n)\mathbf{P}_i(n|n-1)\mathbf{H}_i^T(n) + \mathbf{V}_{iv}(n) \}^{-1}; \\ \mathbf{P}_i(n|n-1) &= \mathbf{G}_i(n)\mathbf{V}_{iv}(n)\mathbf{G}_i^T(n) + \Phi_i(n)\mathbf{P}_i(n-1)\Phi_i^T(n); \\ \mathbf{P}_i(n) &= \mathbf{P}_i(n|n-1) - \mathbf{K}_i(n)\mathbf{H}_i(n)\mathbf{P}_i(n|n-1), \end{aligned} \quad (1)$$

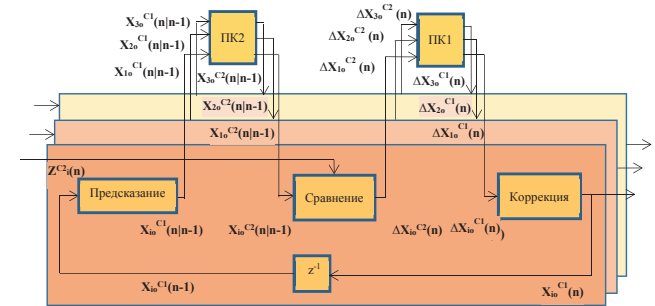
где $\mathbf{z}_i(n)$ – вектор наблюдений; $\mathbf{z}_{io}(n) = \mathbf{H}_i(n)\mathbf{x}_{io}^{C1}(n|n-1)$ – вектор оценок наблюдений; $\mathbf{x}_{io}^{C1}(n)$ – оценка вектора состояния наблюдаемого объекта или процесса; $\mathbf{x}_{io}^{C2}(n|n-1)$ – оценка вектора прогноза состояния наблюдаемого объекта или процесса; $\Phi_i(n)$ – матрица упреждения; $\mathbf{H}_i(n)$ – матрица наблюдения; $\mathbf{K}_i(n)$ – матрица коэффициентов; $\mathbf{P}_i(n+1|n)$ – дисперсионная матрица предсказания вектора состояния наблюдаемого объекта или процесса; $\mathbf{P}_i(n)$ – дисперсионная матрица оценки вектора состояния наблюдаемого объекта или процесса; $\mathbf{V}_{iv}(n)$ – матрица интенсивности шумов; $\mathbf{V}_{iv}(n)$ – матрица интенсивности полезно-

го сигнала; $\mathbf{U}_i(n)$ – вектор управления; $\mathbf{B}_i(n)$ – матрица коэффициентов управления; $\mathbf{C}_i(n)$ – вектор весовых коэффициентов; $\mathbf{S}_i(n)$ – матрица, учитывающая тип и качество измерителя или отсутствия измерений $\mathbf{S}_i(n) = 0$; ПК 1 ($\alpha_1; \alpha_2; \alpha_3$), ПК 2 ($\alpha_1; \alpha_2; \alpha_3$) преобразование координат из системы координат 1 в систему координат 2 и обратно из системы координат 2 в систему координат 1.

Непрерывный алгоритм фильтрации Калмана имеет вид:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{io}^{C2}(t) &= \text{ПК2}(\mathbf{x}_{io}^{C1}(t)); \\ \Delta\mathbf{x}_{io}^{C2}(t) &= \mathbf{z}(t) - \mathbf{H}(t)\mathbf{x}_{io}^{C2}(t); \\ \Delta\mathbf{x}_{io}^{C1}(t) &= \text{ПК1}(\Delta\mathbf{x}_{io}^{C2}(t)); \\ \frac{d\mathbf{x}_{io}^{C1}}{dt} &= \Phi(t)\mathbf{x}_{io}^{C1}(t) + \mathbf{B}(t)\mathbf{U}(t) + \mathbf{S}(t)\mathbf{K}(t)\Delta\mathbf{x}_{io}^{C1}(t); \\ \frac{d\mathbf{P}(t)}{dt} &= \mathbf{V}_w(t) + \Phi(t)\mathbf{P}(t) + \mathbf{P}(t)\Phi^T(t) - \mathbf{P}(t)\mathbf{H}^T(t)\mathbf{V}_v^{-1}(t)\mathbf{H}(t)\mathbf{P}(t), \end{aligned} \quad (2)$$

где $\mathbf{z}_i(t)$ – вектор измерений; $\mathbf{z}_{io}(t) = \mathbf{H}_i(t)\mathbf{x}_{io}^{C1}(t)$ – вектор оценок наблюдений; $\mathbf{x}_{io}^{C1}(t)$ – оценка вектора состояния наблюдаемого процесса; $\Phi_i(t)$ – матрица упреждения; $\mathbf{P}_i(t)$ – корреляционная матрица ошибок фильтрации; $\mathbf{H}(t)$ – матрица наблюдения; $\mathbf{K}_i(t) = \mathbf{S}_i(t)\mathbf{P}_i(t)\mathbf{H}_i^T(t)\mathbf{V}_{iv}^{-1}(t)$ – вектор коэффициентов усиления; $\mathbf{V}_v(t)$ – матрица интенсивности шумов; $\mathbf{V}_{iv}(t)$ – матрица интенсивности полезного сигнала; $\mathbf{U}_i(t)$ – вектор управления; $\mathbf{B}_i(t)$ – матрица коэффициентов управления; $\mathbf{C}_i(t)$ – матрица весовых коэффициентов; $\mathbf{S}(t)$ – матрица, учитывающая тип и качества измерений или отсутствия измерений $\mathbf{S}_i(t) = 0$.



Р и с. 1. Схема фильтра с учетом преобразования координат
Fig. 1. Filter scheme considering coordinate transformation

Результаты

Анализ описанного подхода проводится в среде Matlab на примере оценки двухканального сигнала, формируемого в исходной системе координат C1, а обрабатываемого в измерительной системе координат C2 [16-24]. Оценка вектора состояния для каждого канала $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2]^T$ производится с помощью фильтрующих звеньев второго порядка³. Для фильтра в каждом канале соответствующие матрицы выглядят следующим образом:

¹ Ривкин С. С. Стабилизация измерительных устройств на качающемся основании. М.: Наука, 1978. 320 с.; Ривкин С. С., Ивановский Р. И., Костров А. В. Статистическая оптимизация навигационных систем. Л.: Судостроение, 1976. 280 с.

² Dhuli R., Kandagadla M., Lall B. Multirate Kalman filter for sensor data fusion. Indian Inst. Technol. Guwahati, Guwahati, India, Tech. Rep., 2009. P. 229-233.

³ Bar-Shalom Y., Fortman T.E. Tracking and Data Association. San Diego, CA Academic Press, 1988. 322 p.; Manyika J., Durrant-Whyte H. Data Fusion and Sensor Management: A Decentralized Information-Theoretic Approach. New York: Ellis Horwood, 1994. 269 p.; Blackman S.S., Popoli R. Design and Analysis of Modern Tracking Systems. Boston: Artech House, 1999. 1230 p.



$$\Phi_1 = \Phi_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H}_1 = [1 \ 0], \quad \mathbf{H}_2 = [1 \ 0], \quad \mathbf{K}_1 = \begin{bmatrix} k_1^1 \\ k_2^1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K}_2 = \begin{bmatrix} k_1^2 \\ k_2^2 \end{bmatrix}.$$

Расчет ведется по формулам:

$$x1_{io}^{C1}(n|n-1) = x1_{io}^{C1}(n) + T_d x2_{io}^{C1}(n);$$

$$x2_{io}^{C1}(n|n-1) = x2_{io}^{C1}(n);$$

$$\begin{bmatrix} x1_{1\sigma}^{C2}(n|n-1) \\ x1_{2\sigma}^{C2}(n|n-1) \end{bmatrix} = \mathbf{A}_{21} \begin{bmatrix} x1_{1\sigma}^{C1}(n|n-1) \\ x1_{2\sigma}^{C1}(n|n-1) \end{bmatrix};$$

$$\Delta x1_{io}^{C2}(n) = \{z_i(n) - x1_{io}^{C2}(n|n-1)\};$$

(3)

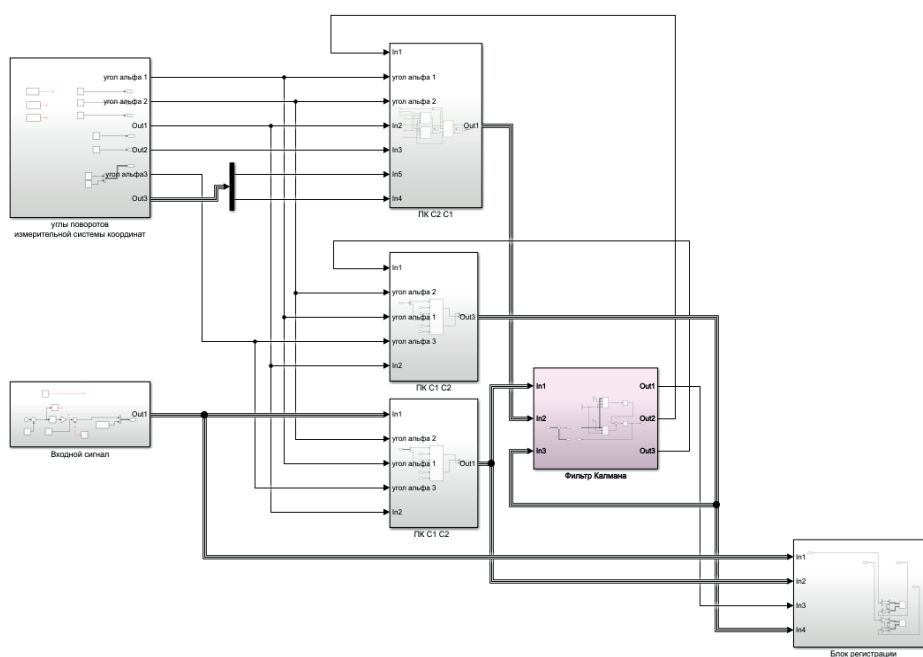
$$\begin{bmatrix} \Delta x1_{1\sigma}^{C1}(n) \\ \Delta x1_{2\sigma}^{C1}(n) \end{bmatrix} = \mathbf{A}_{12} \begin{bmatrix} \Delta x1_{1\sigma}^{C2}(n) \\ \Delta x1_{2\sigma}^{C2}(n) \end{bmatrix};$$

$$x1_{io}^{C1}(n) = x1_{io}^{C1}(n|n-1) + k_1^i \Delta x1_{io}^{C1}(n);$$

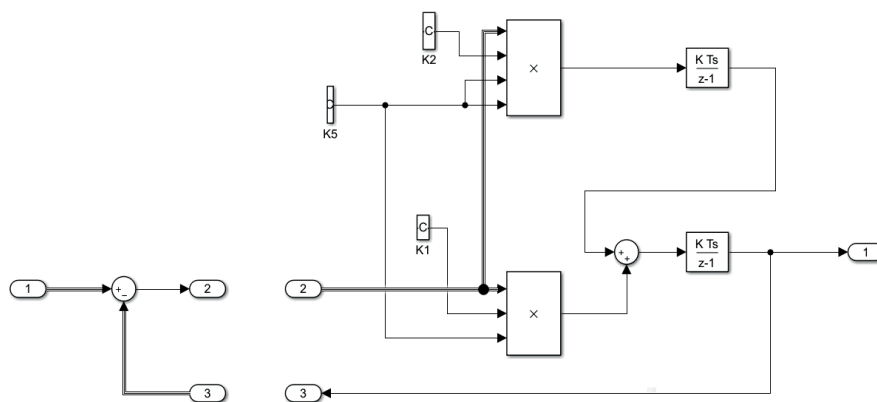
$$x2_{io}^{C1}(n) = x2_{io}^{C1}(n|n-1) + k_2^i \Delta x1_{io}^{C1}(n),$$

где $\mathbf{A}_{12}, \mathbf{A}_{21}$ матрицы преобразования из системы координат 1 в систему координат 2 и из системы координат 2 в систему координат 1.

Модель фильтра с преобразованием координат реализована в соответствии с (3) (см. рис. 2).



а)



б)

Р и с. 2. Модель исследования фильтра с преобразованием координат:

а – общая схема подключения фильтра; б – модель фильтра

Fig. 2. Filter study model with coordinate transformation:

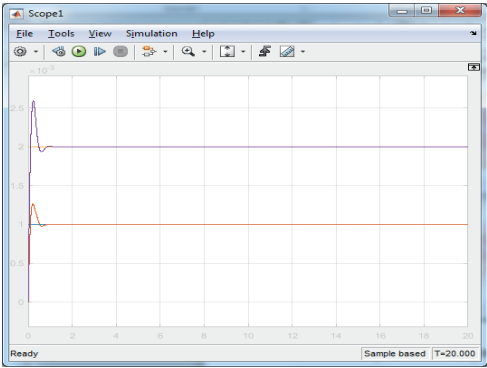
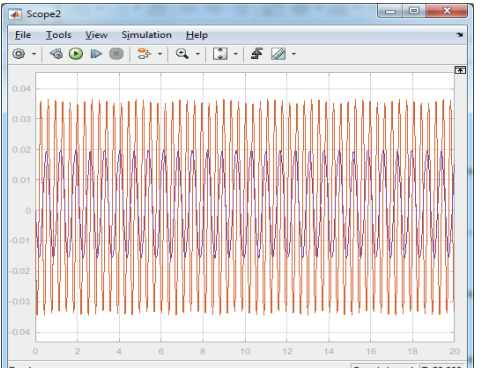
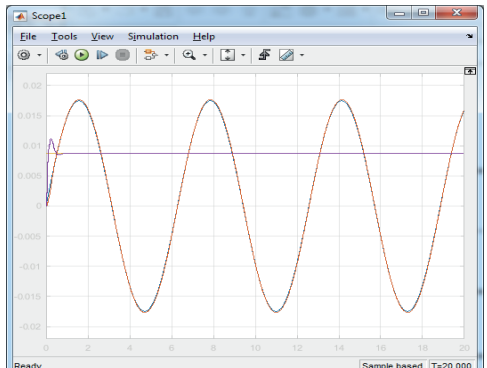
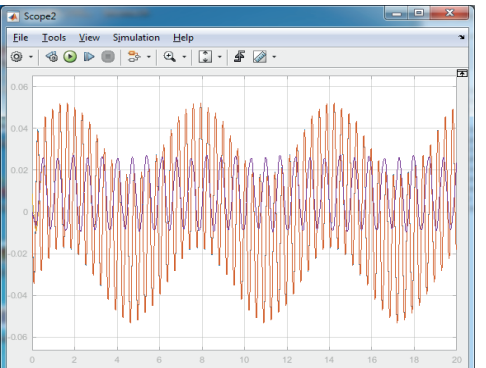
a – common filter connection scheme; б – filter model



Результаты оценки качества функционирования алгоритма фильтрации при разном характере изменения входного сигнала и изменении углов при преобразовании координату

по гармоническому закону: $\alpha_1=A_1\sin(w_1t)$; $\alpha_2=A_2\sin(w_2t)$; $\alpha_3=A_3\sin(w_3t)$, $A_1=3^\circ$; $A_2=2^\circ$; $A_3=1^\circ$; $w_1=2\text{Гц}$; $w_2=3\text{Гц}$; $w_3=1.5\text{Гц}$.

Таблица 1.
Table 1.

№	Исходные данные	Фильтр с преобразованием координат	
		Входной сигнал и его оценка в исходной системе координат СК 1	Исходный сигнал и его оценка в измерительной системе координат СК 2
1	Входной сигнал постоянен		
2	Входной гармонический сигнал меняется		

Сравнение результатов моделирования показывает, что обработка информационных сигналов в измерительной системе координат СК2 предъявляет более высокие требования к алгоритмам фильтрации Калмана [25-29] по сравнению с использованием исходной системы СК1.

Таким образом, проведенное исследование показало, что учет системы измерения координат при фильтрации Калмана позволяет обеспечить требуемую точность обработки сигналов.

References

- [1] Roecker J.A., McGillem C.D. Comparison of Two-Sensor Tracking Methods Based on State Vector Fusion and Measurement Fusion. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 1988; 24(4):447-449. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1109/7.7186>
- [2] Armesto L., Tornero J., Vincze M. Fast Ego-Motion Estimation with Multi-Rate Fusion of Inertial and Vision. *The International Journal of Robotics Research*. 2007; 26(6):577-589. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1177/0278364907079283>
- [3] Chong C.-Y., Mori S., Barker W.H., Chang K.-C. Architectures and Algorithms Track Association and Fusion. *IEEE Aerospace and Electronic System Magazine*. 2000; 15(1):5-13. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1109/62.821657>



- [4] Willner D., Chang C.B., Dunn K.P. Kalman Filter Algorithms for a Multi-Sensor System. *1976 IEEE Conference on Decision and Control including the 15th Symposium on Adaptive Processes*. IEEE Press, Clearwater, FL, USA; 1976. p. 570-574. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1109/CDC.1976.267794>
- [5] Gan Q., Harris Chris J. Comparison of Two Measurement Fusion Methods for Kalman-Filter-Based Multisensory Data Fusion. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 2001; 37(1):273-279. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1109/7.913685>
- [6] Ponyatsky V.M. Quality improvement of the information processing derived from several video sensors in control problems. *Sovremennye informacionnye tehnologii i IT-obrazovanie = Modern Information Technologies and IT-Education*. 2016; 12(4):165-172. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28151074> (accessed 23.08.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
- [7] Ponyatsky V.M., Zenov B.V. The Use of Kalman Filter in Moving Object Control. *Sovremennye informacionnye tehnologii i IT-obrazovanie = Modern Information Technologies and IT-Education*. 2018; 14(3):609-615. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.25559/SITITO.14.201803.609-615>
- [8] Bar-Shalom Y., Campo L. The Effect of the Common Process Noise on the Two-Sensor Fused-Track Covariance. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 1986; 22(11):803-805. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1109/TAES.1986.310815>
- [9] Yan L.P., Liu B.S., Zhou D.H. The Modeling and Estimation of Asynchronous Multirate Multisensory Dynamic Systems. *Aerospace Science and Technology*. 2006; 10:63-71. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2005.09.001>
- [10] Bar-Shalom Y. Update with Out-of-Sequence Measurements in Tracking: Exact Solution. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 2002; 38(3):769-777. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1109/TAES.2002.1039398>
- [11] Alexander H.L. State Estimation for Distributed Systems with Sensing Delay. *Proc. SPIE 1470, Data Structures and Target Classification*. SPIE; 1991. p. 103-111. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1117/12.44843>
- [12] Larsen T.D., Andersen N.A., Ravn O., Poulson N.K. Incorporation of Time Delayed Measurements in a Discrete-Time Kalman Filter. *Proceedings of the 37th IEEE Conference on Decision and Control (Cat. No.98CH36171)*. 1998. p. 4:3972-3977. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1109/CDC.1998.761918>
- [13] Sahebsara M., Chena T., Shah S.L. Optimal Fast-Rate Soft-sensor Design for Multi-rate Processes. *Proceedings of the 2006 American Control Conference*. IEEE Press, Minneapolis, MN, USA; 2006. p. 976-981. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1109/ACC.2006.1655485>
- [14] Hara T., Tomizuka M. Multi-rate Controller for Hard Disk Drive with Redesign of State Estimator. *Proceedings of the 1998 American Control Conference (IEEE Cat. No.98CH36207)*. IEEE Press, Philadelphia, PA, USA; 1998. p. 3033-3037. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1109/ACC.1998.688414>
- [15] Mallick M., Coraluppi S., Carthel C. Advances in Asynchronous and Decentralized Estimation. *2001 IEEE Aerospace Conference Proceedings (Cat. No.01TH8542)*. IEEE Press, Big Sky, MT, USA; 2001. Vol. 4. p. 1873-1888. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1109/AERO.2001.931505>
- [16] Nettleton E.W., Durrant-Whyte H.F. Delayed and Asequence Data in Decentralized Sensing Networks. *Proc. SPIE 4571, Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*. SPIE; 2001. p. 1-9. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1117/12.444148>
- [17] Zhang K.S., Li X.R., Zhu Y.M. Optimal Update with Out-of-Sequence Updates for Distributed Filtering. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2005; 53(6):1992-2004. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1109/TSP.2005.847830>
- [18] Mallick M., Krant S.J., Bar-Shalom Y. Multi-Sensor Multi-Target Tracking Using Out-of-Sequence Measurements. *Proceedings of the Fifth International Conference on Information Fusion. FUSION 2002. (IEEE Cat.No.02EX5997)*. IEEE Press, Annapolis, MD, USA; 2002. Vol. 1. p. 135-142. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1109/ICIF.2002.1021142>
- [19] Steffes S. Computationally Distributed Real-Time Dual Rate Kalman Filter. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*. 2014; 37(4):1064-1068. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.2514/1.G000179>
- [20] Anitha R., Renuka S., Abudhahir A. Multi Sensor Data Fusion Algorithms for Target Tracking Using Multiple Measurements. *2013 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research*. IEEE Press, Enathi, India; 2013. p. 1-4. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1109/iccic.2013.6724283>
- [21] Gao J.B., Harris C.J. Some remarks on Kalman Filters for the multisensory fusion. *Information Fusion*. 2002; 3(3):191-201. (In Eng.) doi: [https://doi.org/10.1016/S1566-2535\(02\)00070-2](https://doi.org/10.1016/S1566-2535(02)00070-2)
- [22] Guo Y., Zhao Y., Huang B. Development of soft sensor by incorporating the delayed infrequent and irregular measurements. *Journal of Process Control*. 2014; 24:1733-1739. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2014.09.006>
- [23] Wang Y., Kosti' D., Jansen S., Nijmeijer H. Filling the Gap between Low Frequency Measurements with Their Estimates. *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE Press, Hong Kong, China; 2014. p. 175-180. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1109/ICRA.2014.6906606>
- [24] Sun S.L., Deng Z.L. Multi-Sensor Optimal Information Fusion Kalman Filter. *Automatica*. 2004; 40(6):1017-1023. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2004.01.014>
- [25] Feddaoui A., Boizot N., Busvelle E., Hugel V. High-gain Extended Kalman Filter for Continuous-Discrete Systems with Asynchronous Measurements. *International Journal of Control*. 2018; 93(8):2001-2014. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1080/00207179.2018.1539525>
- [26] Luo R.C., Chang C.C., Lai C.C. Multisensor Fusion and Integration: Theories, Applications, and its Perspectives. *IEEE Sensors Journal*. 2011; 11(12):3122-3138. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2011.2166383>
- [27] Castanedo F. A Review of Data Fusion Techniques. *The Scientific World Journal*. 2013; 2013:704504. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1155/2013/704504>



- [28] Smith D., Singh S. Approaches to Multisensor Data Fusion in Target Tracking: A Survey. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*. 2006; 18(12):1696-1710. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1109/TKDE.2006.183>
- [29] Durrant-Whyte H., Henderson T.C. Multisensor Data Fusion. In: Siciliano B., Khatib O. (eds.) *Springer Handbook of Robotics*. Springer, Berlin, Heidelberg; 2008. p. 585-610. (In Eng.) doi: https://doi.org/10.1007/978-3-540-30301-5_26

*Поступила 23.08.2021; одобрена после рецензирования 10.11.2021; принята к публикации 25.11.2021.
Submitted 23.08.2021; approved after reviewing 10.11.2021; accepted for publication 25.11.2021.*

Об авторе:

Понятский Валерий Мариафович, профессор кафедры радиоэлектроники Института высокоточных систем им. В.П. Грязева, ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» (300012, Российская Федерация, г. Тула, пр. Ленина, д. 92); начальник отдела, Акционерное общество «Конструкторское бюро приборостроения им. академика А. Г. Шипунова» (300001, Российская Федерация, г. Тула, ул. Щегловская засека, д. 59), доктор технических наук, доцент, **ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8326-165X>**, info@kbptula.net

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

About the author:

Valeriy M. Ponyatsky, Professor at the Chair of Radioelectronics, Institute of High Precision Systems named after V.P. Gryazev, Tula State University (92 Prospekt Lenina, Tula 300012, Russian Federation); Head of Department, KBP Instrument Design Bureau (59 Shcheglovskaya Zaseka St., Tula 300001, Russian Federation), Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, **ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8326-165X>**, info@kbptula.net

The author has read and approved the final manuscript.

