

УДК 681.5.017

DOI: 10.25559/SITITO.14.201803.609-615

ПРИМЕНЕНИЕ ФИЛЬТРА КАЛМАНА ДЛЯ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ ПОДВИЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

В.М. Понятский, Б.В. Зенов

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

THE USE OF KALMAN FILTER IN MOVING OBJECT CONTROL

Valeriy M. Ponyatsky, Boris V. Zenov

JSC «KBP named after Academician A.Shipunov», Tula, Russia

© Понятский В.М., Зенов Б.В., 2018

Ключевые слова

Фильтр Калмана;
измерительная система;
датчик угловой скорости;
акселерометр.

Аннотация

Рассматриваются проблемы, возникающие в процессе управления объектом по сигналам от нескольких датчиков с отличающимися характеристиками шумов в выдаваемых показаниях в условиях отсутствия априорной информации об интенсивности шумов исследуемого процесса и применяемых датчиков. Приводятся основные подходы их решения, предлагаются варианты структур фильтров, вырабатывающих оценку угловой ориентации тела путем объединения показаний, снимаемых с датчиков угловых скоростей и акселерометров, с учетом специфики их шумов. Проводится моделирование работы предложенных структур при различных интенсивностях шумов в показаниях датчиков и различном выборе коэффициентов фильтрующих звеньев с целью получения требуемой полосы пропускания. На основе сравнительного анализа полученных результатов вырабатываются рекомендации по выбору количества каналов в структуре для фильтрации входящих измерений и полосы их пропускания.

Keywords

Kalman filter; instrumentation
system; angular velocity sensor;
accelerometer.

Abstract

The problems arising in object control based on signals from several sensors in the course of difference in noise characteristics in their readings and missing of priori information on noise intensity of investigated process and applied sensors are considered. The basic approaches of their decision are presented, variants of filter structures providing an estimation of the body angular orientation using fusion of readings from gyroscopes and accelerometers taking into account the specifics of their data are proposed. Modeling of their work is performed at various noise intensities in sensor indications and a various choice of factors of filtering links to get the required bandwidth. On the basis of the comparative analysis of the received results recommendations for choice quantities of channels in structure for a filtration of coming measurements and their bandwidths are developed.

Об авторах:

Понятский Валерий Мариафович, кандидат технических наук, начальник отдела, Акционерное общество «Конструкторское бюро приборостроения им. академика А. Г. Шипунова» (300001, Россия, г. Тула, ул. Щегловская засека, д. 59), ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8326-165X>, kbkedr@tula.net

Зенов Борис Владиславович, ведущий инженер-исследователь, Акционерное общество «Конструкторское бюро приборостроения им. академика А. Г. Шипунова» (300001, Россия, г. Тула, ул. Щегловская засека, д. 59), ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1914-8892>, zbv89@mail.ru



Введение

При решении задач оптимального оценивания и управления в динамических системах ключевой проблемой является наличие шумов измерения на выходе объекта управления. Для их устранения традиционно применяют алгоритмы статистического оценивания, использующие априорную информацию о статистических свойствах протекающего процесса и его измерений и вырабатывающие несмещенную оценку с минимизацией дисперсии ее ошибки, относящиеся к фильтрам калмановского типа. Эффективность их работы сильно зависит от степени адекватности построенной модели реальным характеристикам системы. При использовании в измерительной системе датчиков, выдающих показания с присутствием шумов, характеристики которых зависят от совокупности внешних факторов и не могут быть предсказаны до начала измерений, использование классической парадигмы калмановской фильтрации становится затруднительным. Выход может заключаться в увеличении количества чувствительных элементов в системе, дублирующих и дополняющих друг друга. Подобный подход оправдан, если характеристики шумов датчиков имеют принципиальные отличия.

Типичным примером такой системы может служить совокупность датчиков для определения ориентации твердого тела, состоящая из датчиков угловых скоростей и акселерометров. Первые выдают достаточно точные показания на коротких промежутках времени, но обладают долгосрочной нестабильностью, выражающейся в появлении низкочастотного дрейфа, вызывающего со временем накопление ошибки. Акселерометры, напротив, выдают несмещенные, но сильно зашумленные в высокочастотной области показания. Выработать оценку состояния объекта возможно, выполнив комбинирование данных датчиков с учетом специфики их шумов.

Методы объединения информации с датчиков

Для осуществления процедуры объединения показаний возможно использование многоканального фильтра Калмана, обобщенная схема которого выглядит следующим образом [1]:

$$\frac{d\mathbf{x}_o}{dt} = \Phi(t)\mathbf{x}_o(t) + \mathbf{B}(t)\mathbf{U}(t) + \sum_{i=1}^N \mathbf{K}_i(t)(\mathbf{z}_i(t) - \mathbf{H}(t)\mathbf{x}_o(t)); \quad (1)$$

$$\frac{d\mathbf{P}(t)}{dt} = \mathbf{V}_w(t) + \Phi(t)\mathbf{P}(t) + \mathbf{P}(t)\Phi^T(t) - \sum_{i=1}^N \mathbf{P}(t)\mathbf{H}^T(t)\mathbf{V}_{vi}^{-1}(t)\mathbf{H}(t)\mathbf{P}(t),$$

где $\mathbf{z}_i(t)$ – вектор измерений i -го датчика; $\mathbf{z}_o(t) = \mathbf{H}(t)\mathbf{x}_o(t)$ – вектор оценок наблюдений; $\mathbf{x}_o(t)$ – оценка вектора состояния процесса; $\Phi(t)$ – матрица упреждения; $\mathbf{P}(t)$ – корреляционная матрица ошибок фильтрации; $\mathbf{H}(t)$ – матрица наблюдения; $\mathbf{K}_i(t) = \mathbf{S}_i(t)\mathbf{P}(t)\mathbf{H}^T(t)\mathbf{V}_{vi}^{-1}(t)$ – вектор коэффициентов усиления; $\mathbf{V}_{vi}(t)$ – матрица интенсивности шумов; $\mathbf{V}_w(t)$ – матрица интенсивности полезного сигнала; $\mathbf{U}(t)$ – вектор управления; $\mathbf{B}(t)$ – матрица коэффициентов управления; $\mathbf{S}_i(t)$ – признак наличия ($\mathbf{S}_i(t) = 1$) или отсутствия ($\mathbf{S}_i(t) = 0$) измерений, N – количество измерителей.

При наличии двух дублирующих типов измерителей, упомянутых выше, использование данной схемы фильтра для оценки вектора состояния возможно в рамках двух различных подходов. Первый подход заключается в организации двухканальной структуры фильтра, предполагающей коррекцию оценки параметров процесса с помощью взвешенной суммы двух инноваций, соответствующих каждой одному из имеющихся типов датчиков. Реализуется такой фильтр в соответствии с уравнениями:

$$\frac{d\mathbf{x}_o}{dt} = \Phi(t)\mathbf{x}_o(t) + \sum_{i=1}^2 \mathbf{K}_i(t)(\mathbf{z}_i(t) - \mathbf{H}(t)\mathbf{x}_o(t)), \quad (2)$$

$$\frac{d\mathbf{P}(t)}{dt} = \mathbf{V}_w(t) + \Phi(t)\mathbf{P}(t) + \mathbf{P}(t)\Phi^T(t) - \sum_{i=1}^2 \mathbf{P}(t)\mathbf{H}^T(t)\mathbf{V}_{vi}^{-1}(t)\mathbf{H}(t)\mathbf{P}(t).$$

Второй подход базируется на предположении о достаточно малой величине шумовой составляющей в выходных данных датчика угловых скоростей по сравнению с данными акселерометра, вследствие чего можно отказаться от фильтрации первых и использовать их в качестве вектора внешнего воздействия (управления) $\mathbf{U}(t)$ на оценку состояния процесса, корректируя затем ее с помощью измерений, полученных со второго датчика [2]. При этом фильтр вырождается в одноканальный и реализуется в соответствии со следующими уравнениями:

$$\frac{d\mathbf{x}_o}{dt} = \Phi(t)\mathbf{x}_o(t) + \mathbf{B}(t)\mathbf{z}_2(t) + \mathbf{K}_1(t)(\mathbf{z}_1(t) - \mathbf{H}(t)\mathbf{x}_o(t)), \quad (3)$$

$$\frac{d\mathbf{P}(t)}{dt} = \mathbf{V}_w(t) + \Phi(t)\mathbf{P}(t) + \mathbf{P}(t)\Phi^T(t) - \mathbf{P}(t)\mathbf{H}^T(t)\mathbf{V}_{v2}^{-1}(t)\mathbf{H}(t)\mathbf{P}(t).$$

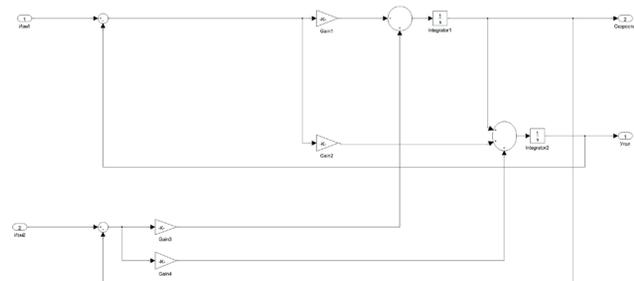


Рис. 1. Схема фильтра оценки угловой ориентации тела с двухканальной фильтрацией результатов измерения

Fig. 1. Filter scheme for assessing the angular orientation of the body with two-channel filtering measurement results

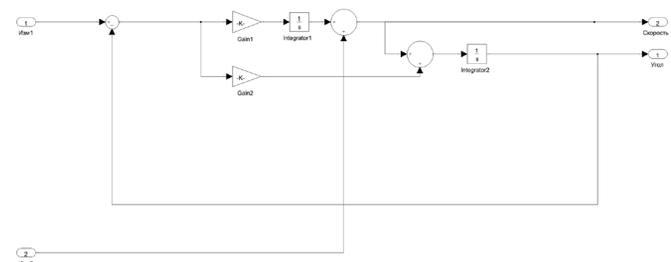


Рис. 2. Схема фильтра оценки угловой ориентации тела с одноканальной фильтрацией результатов измерения и управляющим входом

Fig. 2. Filter scheme for assessing the angular orientation of the body with a single-channel filtering of measurement results and a control input



Сравнительный анализ описанных подходов проводится на примере оценки регулярного гармонического воздействия системой двух измерителей, позволяющих получать показания по одной угловой координате $z_1(t) = [\theta^s]$, $z_2(t) = [\dot{\theta}^s]$, но может быть распространен на случай трехосевых измерений без потери общности.

Реализации фильтров для установившегося режима на основе уравнений (2) и (3) представлены на рис. 1 и 2 соответственно. Оценка вектора состояния $x = [\theta \ \dot{\theta}]^T$ производится с помощью фильтрующих звеньев второго порядка. Для двухканальной структуры фильтра (рис.1) соответствующие схеме матрицы выглядят следующим образом:

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

Для одноканального фильтра при учете измерений угловой скорости в виде управляющего воздействия (рис.2):

$$\Phi = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{H}_1 = [1 \ 0], \mathbf{V} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \mathbf{K}_1 = \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix}.$$

Коэффициенты $k_i, i=1,2$, выбраны исходя из компромисса между шириной полосы пропускания фильтра, определяющей степень сглаживания результатов измерений, и требованием минимального смещения фазы оценки.

Результаты исследования

Ошибки на выходах фильтров при небольших амплитудах шумов измерений и малой ширине полосы пропускания представлены на рис. 3-4. Как видно из графиков, двухканальный вариант фильтра при таком выборе коэффициентов фильтрации имеет в установившемся режиме большую ошибку оценивания, чем вырожденный одноканальный вариант с учетом измерений угловой скорости в виде управляющего воздействия. Однако для последнего варианта характерно наличие четко выраженного переходного процесса (рис. 5), что в ряде случаев может быть нежелательно.

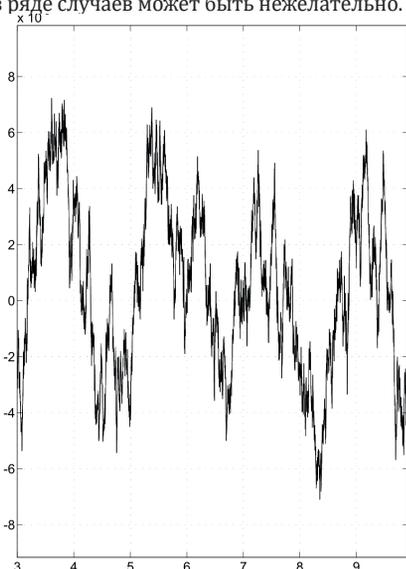


Рис. 3. Ошибка оценки угловой ориентации объекта на выходе схемы двухканальной фильтрации при небольших шумах в получаемых измерениях
Fig. 3. Error in estimating the angular orientation of an object at the output of a two-channel filtering circuit with small noise in the measurements obtained

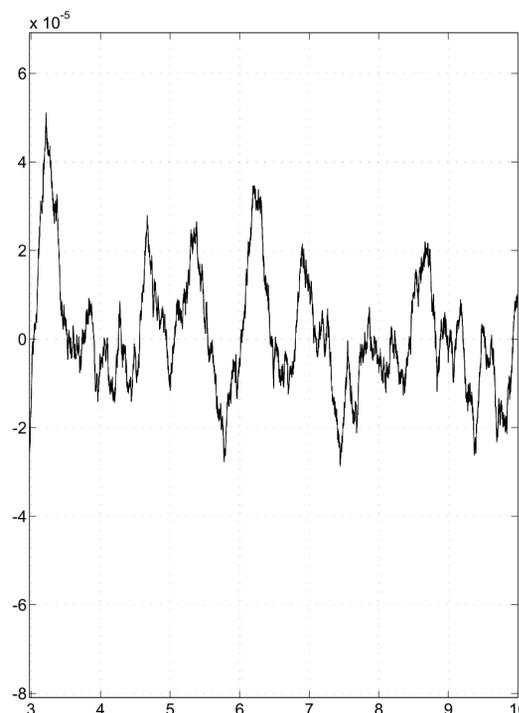


Рис. 4. Ошибка оценки угловой ориентации объекта на выходе схемы одноканальной фильтрации с управляющим входом при небольших шумах в получаемых измерениях в установившемся режиме
Fig. 4. P Error of estimation of the angular orientation of an object at the output of a single-channel filtering circuit with a control input for small noises in the obtained measurements in a steady state

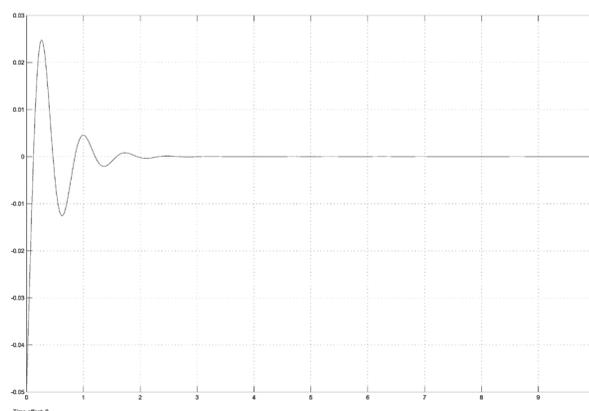


Рис. 5. Ошибка оценки угловой ориентации объекта на выходе схемы одноканальной фильтрации с управляющим входом при небольших шумах в получаемых измерениях в общем случае

Fig. 5. Error in estimating the angular orientation of an object at the output of a single-channel filtering circuit with a control input with small noise in the measurements obtained in the general case

Для борьбы с данным явлением полезно увеличить полосу пропускания фильтра. На рис. 6-7 представлены результаты после расширения полосы пропускания по первому каналу в 10 раз за счет увеличения коэффициентов k_1^1 и k_2^1 . Очевидно, что оба фильтра показывают в данном случае практически одинаково-



вый уровень максимальной ошибки оценивания. При этом надо заметить, что в целом увеличение пропускания фильтров негативно сказалось на выходных результатах и, если в одноканальном варианте с управляющим внешним воздействием данный шаг еще имел смысл с целью устранения колебательности, то для двухканальной реализации никаких дополнительных преимуществ получено не было.

В случае присутствия в системе сильношумящего акселерометра (интенсивность шумов на два порядка больше, чем в предыдущих случаях) использование двухканального варианта фильтрации становится более предпочтительным, что хорошо иллюстрируется рис. 8-10. Максимальная ошибка оценивания для двух различных вариантов построения схемы отличается в 1.5-2 раза, при этом результаты работы одноканальной схемы фильтрации, как и прежде, характеризуются присутствием переходного процесса. Полоса пропускания в данном случае снова сужена, как для случая рис. 3-4. Использование широкополосного фильтра для обработки сигнала с присутствием шумов столь высокой интенсивности, очевидно, приведет к неудовлетворительным результатам.

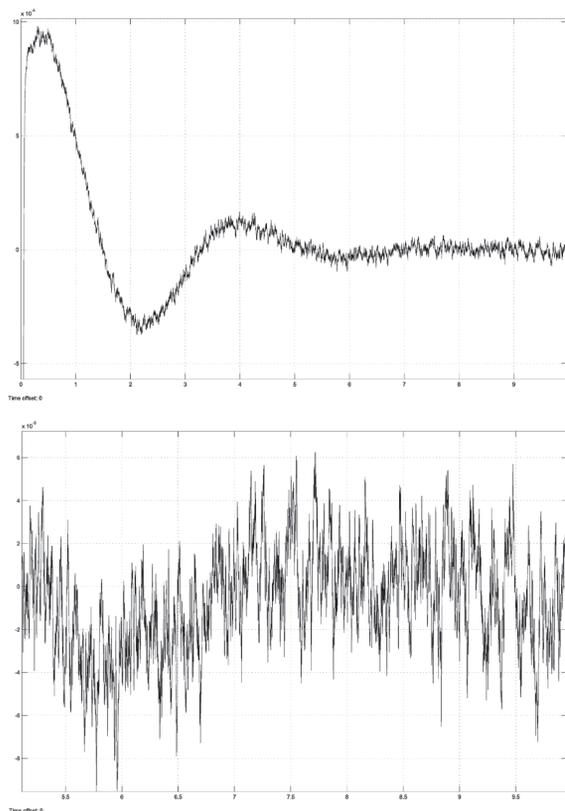


Рис. 7. Ошибка оценки угловой ориентации объекта на выходе схемы одноканальной фильтрации с управляющим входом при небольших шумах в получаемых измерениях и расширенной полосе пропускания

Fig. 7. Error of estimating the angular orientation of an object at the output of a single-channel filtering circuit with a control input with small noise in the resulting measurements and an extended passband

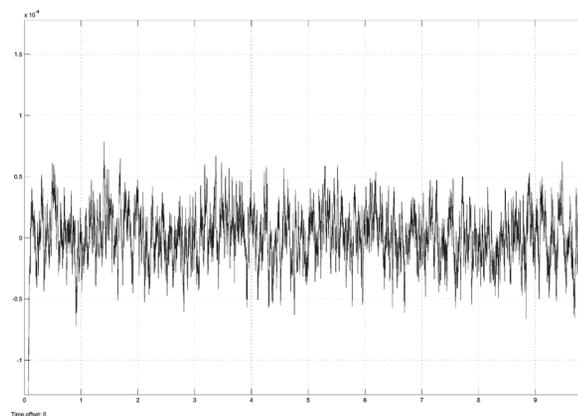


Рис. 6. Ошибка оценки угловой ориентации объекта на выходе схемы двухканальной фильтрации при небольших шумах в получаемых измерениях и расширенной полосе пропускания

Fig. 6. Error in estimating the angular orientation of an object at the output of a dual-channel filtering circuit with small noise in the resulting measurements and an extended passband

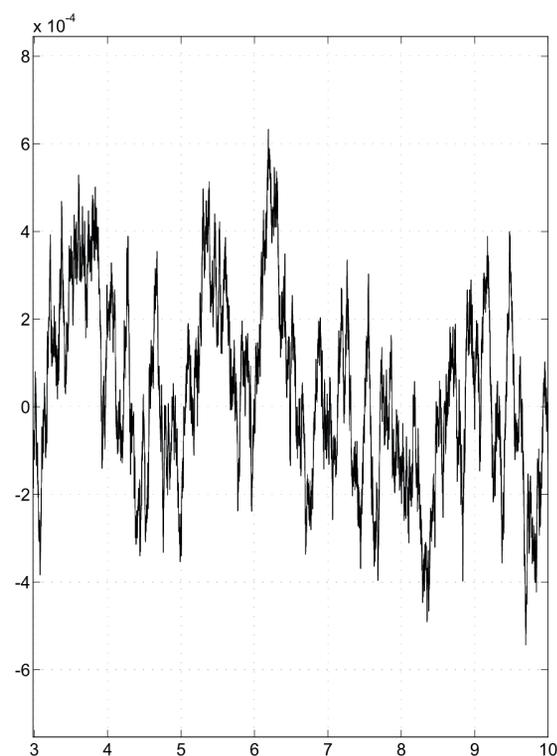


Рис. 8. Ошибка оценки угловой ориентации объекта на выходе схемы двухканальной фильтрации при значительной интенсивности шума в получаемых измерениях

Fig. 8. Error in estimating the angular orientation of an object at the output of a two-channel filtering circuit with a significant noise intensity in the obtained measurements



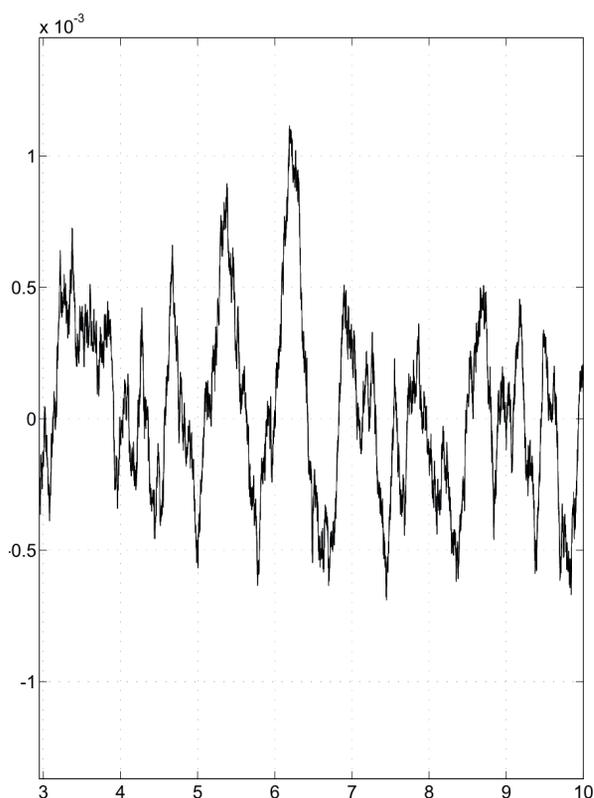


Рис. 9. Ошибка оценки угловой ориентации объекта на выходе схемы одноканальной фильтрации с управляющим входом при значительной интенсивности шума в получаемых измерениях в установившемся режиме
Fig. 9. Error of estimation of the angular orientation of an object at the output of a single-channel filtering circuit with a control input at a significant noise intensity in the obtained measurements in the steady state

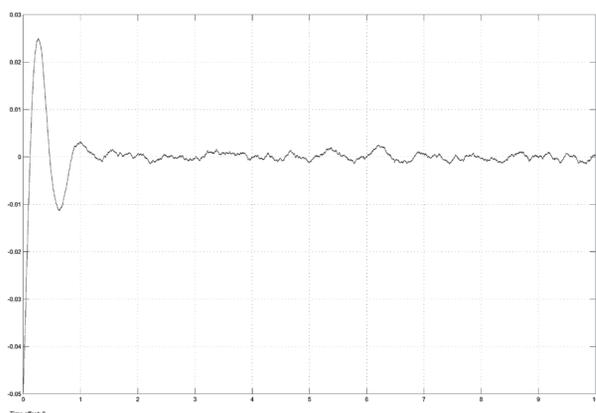


Рис. 10. Ошибка оценки угловой ориентации объекта на выходе схемы одноканальной фильтрации с управляющим входом при значительной интенсивности шума в получаемых измерениях в общем случае
Fig. 10. Error of estimation of the angular orientation of an object at the output of a single-channel filtering circuit with a control input at a significant noise intensity in the obtained measurements in the general case

Заключение

Таким образом, точность получаемой с помощью калмановской фильтрации оценки процесса в системе, содержащей измерители с разными характеристиками шумов, сильно зависит от интенсивности шумов датчиков и правильного выбора полосы пропускания. В случае несильно зашумленных показаний можно реализовать фильтр с большой шириной полосы, при этом возможен выбор как одноканальной, так и двухканальной схемы фильтрации. Если область применения допускает возможность работы фильтра исключительно в установившемся режиме, то стоит выбрать одноканальную схему и максимально заузить полосу. В присутствии же значительных шумов предпочтительным является использование двухканального варианта фильтрации с малой шириной полосы пропускания, а одноканальный вариант с введением управляющего входа является мене удачным выбором.

Список использованных источников

- [1] *Понятский В.М.* Повышение качества обработки информации, поступающей с нескольких видеосенсоров, в задачах управления // *Современные информационные технологии и ИТ-образование*. 2016. Т. 12, № 4. С. 165–172. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28151074> (дата обращения: 12.07.2018).
- [2] *Шнекторов А.Г., Фам В.Т.* Анализ применения микромеханических измерительных систем для задач управления морскими подвижными объектами // *Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*. 2017. №5. С. 16-20. URL: <https://izv.eltech.ru/assets/files/izv-etu-5-2017-16-20.pdf> (дата обращения: 12.07.2018).
- [3] Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем / Под ред. В.Я. Распопова. СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор», 2009. 280 с.
- [4] *Gan Q., Harris C.J.* Comparison of two measurement fusion methods for Kalman-filter-based multisensor data fusion // *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 2001. Vol. 37, no. 1. Pp. 273–279. DOI: 10.1109/7.913685
- [5] *Assa A., Janabi-Sharifi F.* A Kalman Filter-Based Framework for Enhanced Sensor Fusion // *IEEE Sensors Journal*. 2015. Vol. no. 6. Pp. 3281–3292. DOI: 10.1109/JSEN.2014.2388153
- [6] *Wu Y., Cai M., Li J.* Multi-sensor adaptive data fusion with colored measurement noise // *Proceedings of the 29th Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*. 2017. Pp. 6102–6107. DOI: 10.1109/CCDC.2017.7978267
- [7] *Sun S.L., Deng Z.L.* Multi-sensor optimal information fusion Kalman filter // *Automatica*. 2004. Vol. 40, issue 6. Pp. 1017–1023. DOI: 10.1016/j.automatica.2004.01.014
- [8] *Shivashankarappa N., Adiga S., Avinash R.A., Janardhan H.R.* Kalman filter based multiple sensor data fusion in systems with time delayed state // *3rd International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)*. 2016. Pp. 375–382. DOI: 10.1109/SPIN.2016.7566723
- [9] *Ka-Veng Yuen, Ka-In Hoi, Kai-Meng Mok.* Selection of noise parameters for Kalman filter // *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*. 2007. Vol. 6. Pp. 49–56. DOI: 10.1007/s11803-007-0659-9
- [10] *Guan H., Li L., Jia X.* Multi-sensor fusion vehicle positioning based on Kalman Filter // *2013 IEEE Third International Con-*



ference on Information Science and Technology (ICIST). Yangzhou, 2013. Pp. 296–299. DOI: 10.1109/ICIST.2013.6747554

- [11] Caron F, Duflos E, Pomorski D, Vanheeghe P. GPS/IMU data fusion using multisensor Kalman filtering: Introduction of contextual aspects // *Information Fusion*. 2006. Vol. 7, issue 2. Pp. 221–230. DOI: 10.1016/j.inffus.2004.07.002
- [12] Chavez-Garcia R.O., Aycard O. Multiple Sensor Fusion and Classification for Moving Object Detection and Tracking // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2016. Vol. 17, no. 2. Pp. 525–534. DOI: 10.1109/TITS.2015.2479925
- [13] Yang C, Zheng J, Ren X, Yang W, Shi H, Shi L. Multi-Sensor Kalman Filtering With Intermittent Measurements // *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2018. Vol. 63, issue 3. Pp. 797–804. DOI: 10.1109/TAC.2017.2734643
- [14] Saha R.K., Chang K.C. An efficient algorithm for multisensor track fusion // *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 1998. Vol. 34, no. 1. Pp. 200–210. DOI: 10.1109/7.640278
- [15] Понятский В.М. Исследование способов реализации адаптивной системы управления с фильтром Калмана // *Стохастическая оптимизация в информатике*. 2008. Т. 4, № 1-1. С. 196–210. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=12994135> (дата обращения: 12.07.2018).
- [16] Anitha R, Renuka S, Abudhahir A. Multi sensor data fusion algorithms for target tracking using multiple measurements // *IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research*. 2013. Pp. 1–4. DOI: 10.1109/ICCIC.2013.6724283
- [17] Pornsarayouth S, Wongsaitsuwan M. Sensor fusion of delay and non-delay signal using Kalman Filter with moving covariance // *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*. 2009. Pp. 2045–2049. DOI: 10.1109/RO-BIO.2009.4913316
- [18] Сейдж Э., Мелса Дж. Л. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении. М.: Связь, 1976. 496 с.
- [19] Durrant-Whyte H, Henderson T.C. Multisensor Data Fusion / B. Siciliano, O. Khatib (Eds.) // *Springer Handbook of Robotics*. Springer Handbooks. Springer, Cham, 2016. Pp. 867–896. DOI: 10.1007/978-3-319-32552-1_35
- [20] Kasper R, Schmidt S. Sensor-data-fusion for an autonomous vehicle using a Kalman-filter // *6th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics*. Subotica, 2008. Pp. 1–5. DOI: 10.1109/SISY.2008.4664905
- [21] 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. Vol. 24, no. 4. Pp. 447–449. DOI: 10.1109/7.7186
- [22] Fung M.L., Chen M.Z.Q., Chen Y.H. Sensor fusion: A review of methods and applications // *29th Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*. Chongqing, 2017. Pp. 3853–3860. DOI: 10.1109/CCDC.2017.7979175
- [23] Згуровский М.З., Подладчиков В.Н. Аналитические методы калмановской фильтрации для систем с априорной неопределенностью. К.: Наукова думка, 1995. 298 с.
- [24] Bar-Shalom Y, Li X. R. Multitarget-Multisensor Tracking: Principles and Techniques. CT, Storrs: YBS Publishing, 1995. 615 p.

Поступила 12.07.2018; принята в печать 15.09.2018;
опубликована онлайн 30.09.2018.

References

- [1] Ponyatskiy V.M. Quality improvement of the information processing derived from several video sensors in control problems. *Modern Information Technology and IT-education*. 2016; 12(4):165–172. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28151074> (accessed 12.07.2018). (In Russian)
- [2] Shpektorov A.G., Fam V.T. Analysis of micromechanical measuring systems application for marine ocean vehicles stabilization. *Izvestiya SPbGETU "LETI"*. 2017; 5:16–20. Available at: <https://izv.eltech.ru/assets/files/izv-etu-5-2017-16-20.pdf> (accessed 12.07.2018). (In Russian)
- [3] Basics of building strapless inertial navigation systems [Osnovy postroyeniya besplatformennykh inertsiyal'nykh navigatsionnykh system]. V.Ya. Raspopov (Ed.). SPb.: GNTS RF OAO "Kontsern "TSNII "Elektropribor", 2009. 280 p. (In Russian)
- [4] Gan Q, Harris C.J. Comparison of two measurement fusion methods for Kalman-filter-based multisensor data fusion. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 2001; 37(1):273–279. DOI: 10.1109/7.913685
- [5] Assa A, Janabi-Sharifi F. A Kalman Filter-Based Framework for Enhanced Sensor Fusion. *IEEE Sensors Journal*. 2015; 1(6):3281–3292. DOI: 10.1109/JSEN.2014.2388153
- [6] Wu Y, Cai M, Li J. Multi-sensor adaptive data fusion with colored measurement noise. *Proceedings of the 29th Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*, pp. 6102–6107, 2017. DOI: 10.1109/CCDC.2017.7978267
- [7] Sun S.L., Deng Z.L. Multi-sensor optimal information fusion Kalman filter. *Automatica*. 2004; 40(6):1017–1023. DOI: 10.1016/j.automatica.2004.01.014
- [8] Shivashankarappa N, Adiga S, Avinash R.A., Janardhan H.R. Kalman filter based multiple sensor data fusion in systems with time delayed state. *3rd International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)*, pp. 375–382, 2016. DOI: 10.1109/SPIN.2016.7566723
- [9] Ka-Veng Yuen, Ka-In Hoi, Kai-Meng Mok. Selection of noise parameters for Kalman filter. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*. 2007; 6:49–56. DOI: 10.1007/s11803-007-0659-9
- [10] Guan H, Li L, Jia X. Multi-sensor fusion vehicle positioning based on Kalman Filter. *2013 IEEE Third International Conference on Information Science and Technology (ICIST)*. Yangzhou, pp. 296–299, 2013. DOI: 10.1109/ICIST.2013.6747554
- [11] Caron F, Duflos E, Pomorski D, Vanheeghe P. GPS/IMU data fusion using multisensor Kalman filtering: Introduction of contextual aspects. *Information Fusion*. 2006; 7(2):221–230. DOI: 10.1016/j.inffus.2004.07.002
- [12] Chavez-Garcia R.O., Aycard O. Multiple Sensor Fusion and Classification for Moving Object Detection and Tracking. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2016; 17(2):525–534. DOI: 10.1109/TITS.2015.2479925
- [13] Yang C, Zheng J, Ren X, Yang W, Shi H, Shi L. Multi-Sensor Kalman Filtering With Intermittent Measurements. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2018; 63(3):797–804. DOI: 10.1109/TAC.2017.2734643
- [14] Saha R.K., Chang K.C. An efficient algorithm for multisensor track fusion. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 1998; 34(1):200–210. DOI: 10.1109/7.640278
- [15] Ponyatskiy V.M. Study of ways to implement an adaptive control system with Kalman filter. *Stokhasticheskaya optimizatsi-*



- ya v informatike. 2008; 4(1-1):196-210. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=12994135> (accessed: 12.07.2018). (In Russian)
- [16] Anitha R., Renuka S., Abudhahir A. Multi sensor data fusion algorithms for target tracking using multiple measurements. *IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research*, 1–4, 2013. DOI: 10.1109/IC-CIC.2013.6724283
- [17] Pornsarayouth S., Wongsaisuwan M. Sensor fusion of delay and non-delay signal using Kalman Filter with moving covariance. *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*. 2009:2045–2049. DOI: 10.1109/ROBIO.2009.4913316
- [18] Sage A.P., Melsa J.L. Estimation Theory with Applications to Communications and Control. McGraw-Hill Inc., US, 1971. 752 p.
- [19] Durrant-Whyte H., Henderson T.C. Multisensor Data Fusion. B. Siciliano, O. Khatib (Eds.) *Springer Handbook of Robotics*. Springer Handbooks. Springer, Cham, pp. 867-896, 2016. DOI: 10.1007/978-3-319-32552-1_35
- [20] Kasper R., Schmidt S. Sensor-data-fusion for an autonomous vehicle using a Kalman-filter. *6th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics*. Subotica, pp. 1-5, 2008. DOI: 10.1109/SISY.2008.4664905
- [21] 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. DOI: 10.1109/7.7186
- [22] Fung M.L., Chen M.Z.Q., Chen Y.H. Sensor fusion: A review of methods and applications. *29th Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*. Chongqing, pp. 3853–3860, 2017. DOI: 10.1109/CCDC.2017.7979175
- [23] Zgurovsky M.Z., Podladchikov V.N. Analytical methods of Kalman filtering for systems with a priori uncertainty [Analiticheskiye metody kalmanovskoy fil'tratsii dlya sistem s aprior-noy neopredelennost'yu]. Kiev: Naukova Dumka, 1995. 298.
- [24] Bar-Shalom Y., Li X. R. Multitarget-Multisensor Tracking: Principles and Techniques. CT, Storrs: YBS Publishing, 1995. 615 p.

Submitted 12.07.2018; revised 15.09.2018;
published online 30.09.2018.

About the authors:

Valeriy M. Ponyatsky, Candidate of Technical Sciences, Head of Department, JSC «KBP named after Academician A.Shipunov» (59 Shcheglovskaya Zaseka Str., Tula 300001, Russia), ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8326-165X>, kbkedr@tula.net

Boris V. Zenov, lead research engineer, JSC «KBP named after Academician A.Shipunov» (59 Shcheglovskaya Zaseka Str., Tula 300001, Russia), ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1914-8892>, zbv89@mail.ru



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted reuse, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

