

## МЕТОД ФИЛЬТРАЦИИ ШУМОВ В СИГНАЛЕ ГИРОСКОПИЧЕСКОГО ДАТЧИКА НА ОСНОВЕ АДАПТИВНОГО АЛЬФА-БЕТА-ФИЛЬТРА КАЛМАНА

**Д.М. Волков, А.И. Савельев**

Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук,  
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация  
E-mail: saveliev@iias.spb.su

**Аннотация.** Для обеспечения стабилизации полета беспилотного летательного аппарата (БПЛА) мультироторного типа необходимо обрабатывать данные с микромеханических датчиков, установленных на борту, и преобразовывать их в управляющие сигналы. В процессе эксплуатации на БПЛА действует множество внешних и внутренних факторов, что приводит к возникновению шумов в данных типах датчиков. Шумы негативно сказываются на работе системы управления аппаратом. Особенно подвержены шумам сигналы гироскопа, на основе которых рассчитываются угловые скорости и углы наклона аппарата относительно оси ординат. Для решения данной проблемы в работе представлен метод фильтрации шумов в сигнале гироскопического датчика для дифференциальной составляющей пропорционально-интегрально-дифференцирующего регулятора (ПИД). Разработанный метод реализован в виде взаимосвязанной адаптивной системы из двух фильтров и позволяет отфильтровать в исходном сигнале гироскопического датчика высокочастотные электрические шумы, вибрации, вызываемые моторами и резонансными колебаниями рамы БПЛА. В ходе проведенных натурных экспериментов метрика сигнал/шум для обработанных данных достигла максимального значения в 8,40 дБ, что значительно лучше по сравнению с другими научными подходами.

*Ключевые слова:* фильтрация данных, гироскопический датчик, беспилотные летательные аппараты, альфа-бета-фильтр Калмана.

### Введение

Актуальность разработки и эксплуатации беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) мультироторного типа активно растет в последние годы в связи с появлением коммерчески доступных и удобных в использовании аппаратов, а также доказанной эффективностью применения БПЛА как в гражданской, так и в других сферах.

Системы управления БПЛА чаще всего разрабатываются с использованием ПИД-регулятора ввиду его эффективности и простоты реализации. В данном регуляторе наиболее важную функцию в задаче управления БПЛА выполняет дифференциальная составляющая (Д-составляющая), поскольку именно она уменьшает влияние перерегулирования, корректирует положение аппарата при низкоамплитудных (относительно амплитуд необработанного сигнала) скачкообразных отклонениях. Также данная составляющая увеличивает скорость реакции системы с ПИД-регулятором на быстро нарастающие отклонения. Д-составляющая является наиболее чувствительным к шумовым колебаниям элементом ПИД-регулятора, поскольку реагирует на низкоамплитудные всплески сигнала, которые и представляет чаще всего шум. Поэтому входной сигнал для дифференциальной составляющей необходимо подвергать предварительной обработке от шумового загрязнения.

В ряде случаев для осуществления фильтрации сигнала применяют один из усредняющих фильтров, представленных в работах [1–3]. Однако данные фильтры должны иметь достаточно большой порядок для приемлемого качества фильтрации, что ведет к существенной задержке сигнала.

Приемлемым вариантом фильтрации по критерию задержки сигнала мог бы являться фильтр нижних частот [4–8] в последовательной связке с режекторным [9] или полосно-заграждающим фильтром [10]. Однако в задаче фильтрации для дифференциальной составляющей ПИД-

регулятора они не подходят, поскольку подавляют амплитуды колебаний шума в сигнале, но не уменьшают частоты колебаний этих амплитуд.

Наиболее подходящим для обработки сигнала гироскопического датчика для формирования Д-составляющей является альфа-бета-фильтра Калмана [11, 12] благодаря зависимости его коэффициентов альфа и бета от выходного значения фильтра, предварительно обработанного экспоненциальным фильтром. Поэтому далее в основу разработанного метода был выбран именно данный фильтр.

## 1. Постановка задачи

В качестве технической системы, являющейся объектом исследования, рассматривается система обработки данных (СОД) инерциального датчика в рамках системы управления беспилотным летательным аппаратом (СУ БПЛА), представляющая собой совокупность элементов, оснащенных вычислительными средствами для приёма и обработки информации, объединенных каналом передачи данных, и функционирующая в динамически меняющихся условиях, где присутствуют различного рода шумы.

Структура СОД задана множеством последовательно соединенных узлов  $V = \{v_i\} i = 1, 2, \dots, I$ , каждый из которых соответствует определенному элементу в СОД. Задан вектор характеристик  $E_i$  вычислительных средств для каждого элемента  $v_i$ , включающий частоту дискретизации, уровень вносимой элементом задержки сигнала. Обработка информации в СОД происходит в циклическом режиме за время  $T_u$ . Узел рассматриваемой системы – гироскопический датчик ( $v_i$  подвержен шумам, представленным в виде множества  $F_{rf} = \{r, f\}$ , каждый элемент которого включает в себя источник шума  $\{r\}$  и уровень вносимого искажения в сигнал  $\{f\}$ . В результате искажения сигнала в СОД происходит снижение эффективности функционирования СУ БПЛА в целом.

Для обеспечения снижения воздействия искажений сигнала на функционирование СОД имеется множество методов фильтрации данных  $M_g = \{g\}$ , каждый из которых характеризуется типом фильтра  $g = 1, 2, \dots, G$  и вектором характеристик  $Z_g$ , таких как коэффициент сглаживания, RMSE шума, RMSE полезного сигнала. Применение в СОД методов фильтрации  $g$ -го типа требует затрат вычислительных ресурсов  $C_g$ . За счет применения методов фильтрации происходит прирост показателя эффективности функционирования СУ БПЛА в целом. Суммарная стоимость ( $C_\Sigma$ ) метода фильтрации в СОД составляет:

$$C_\Sigma = \sum_{g=1}^G C_g. \quad (1)$$

Поскольку целью данной работы является устранение шумовых искажений в рамках системы управления летательным аппаратом мультироторного типа, то критерием качества решения данной задачи будет являться коэффициент шума ( $NF$ ). Как функция от параметров исходных данных он определяется следующим образом:

$$NF = 10 \times \log_{10} \frac{SNR [V, E_i, F_{rf}]}{SNR_{out} [V, E_i, F_{rf}, M_g, Z_g]} i = 1, 2, \dots, I, \quad (2)$$

где  $SNR$  и  $SNR_{out}$  – это соотношение сигнал (S) / шум (N) на входе и выходе системы фильтрации, которые могут быть представлены как

$$SNR = \frac{S [V, E_i, F_{rf}]}{N [V, E_i, F_{rf}]} i = 1, 2, \dots, I, \quad (3)$$

$$SNR_{out} = \frac{S [V, E_i, F_{rf}, M_g, Z_g]}{N [V, E_i, F_{rf}, M_g, Z_g]} i = 1, 2, \dots, I. \quad (4)$$

Постановка задачи по критерию оптимальности формулируется следующим образом: требуется определить состав комплекса фильтров  $M_g$ , обеспечивающий максимальный  $NF$  в условиях воздействия внешних факторов  $F$  в соответствии с требуемой частотой дискретизации устройства  $SR$  и не превышающий допустимую стоимость  $C_{don}$ . Математическая постановка задачи по критерию оптимальности выглядит следующим образом:

$$M_g^* = \max_{0 \leq NF \leq +\infty} NF[V, E_i, F, M_g, Z_g] \quad g \in M, i = 1, 2, \dots, I, \quad (5)$$

при ограничениях  $C_\Sigma \leq C_{don}$ .

Решением поставленной задачи является выбор состава методов фильтрации  $M_g$ , обеспечивающего максимальное значения  $NF$  в условиях воздействия внешних факторов  $F$ . При использовании данного критерия решение является единственным – выбирается наилучший состав комплекса фильтров  $M_g$ .

## 2. Метод фильтрации шумов в сигнале гироскопического датчика при формировании дифференциальной составляющей ПИД-регулятора

Разработанный метод фильтрации шумов при формировании Д-составляющей ПИД-регулятора функционирует по следующей схеме, состоящей из трех частей:

1. Альфа-бета-фильтр Калмана принимает входное значение и приводит его к значению, близкому к 0, поскольку предполагается, что включение полетного контроллера БПЛА производится из состояния покоя. Корень квадратный из среднеквадратичной ошибки (RMSE) шума предварительно рассчитывается на основе замеров амплитуд вибраций корпуса БПЛА, вызванных вращением двигателей, на всем диапазоне скоростей вращения моторов.
2. Затем сигнал после альфа-бета-фильтра Калмана поступает на вход экспоненциального фильтра, который обратно передает отфильтрованное значение как RMSE сигнала.
3. На последнем этапе рассматриваемый фильтр использует полученные значения RMSE сигнала по обратной связи с экспоненциальным фильтром.

Альфа-бета-фильтр предполагает, что система адекватно аппроксимируется моделью, имеющей два внутренних состояния, где первое состояние получается путем интегрирования значения второго состояния во времени. Измеренные выходные значения системы соответствуют наблюдениям за первым состоянием модели плюс возмущения. Это приближение очень низкого порядка подходит для многих простых систем, например механических систем, в которых положение определяется как интеграл скорости от времени. Основываясь на аналогии с механической системой, эти два состояния можно назвать положением  $x$  и скоростью  $v$ . Предполагая, что скорость остается примерно постоянной в течение небольшого интервала времени  $\Delta T$  между измерениями, состояние положения проецируется вперед для прогнозирования его значения в следующий момент выборки с использованием следующего уравнения:

$$\hat{x}_k \leftarrow \hat{x}_{k-1} + \Delta T \hat{v}_{k-1}. \quad (6)$$

Поскольку переменная скорости  $v$  считается постоянной, ее прогнозируемое значение в следующее время выборки равно текущему значению:

$$\hat{v}_k \leftarrow \hat{v}_{k-1}. \quad (7)$$

Ожидается, что выходное измерение будет отклоняться от прогноза из-за шума и динамических эффектов, не включенных в упрощенную динамическую модель. Эта ошибка прогнозирования ( $r$ ) также называется остатком или нововведением на основе статистической интерпретации или интерпретации фильтрации Калмана:

$$\hat{r}_k \leftarrow \hat{x}_k - x_k. \quad (8)$$

Альфа-бета-фильтр принимает выбранные альфа- и бета-константы (из которых фильтр получил свое название), использует значение альфа, умноженное на отклонение  $r$ , для корректировки оценки положения и использует значение коэффициента бета, умноженное на отклонение  $r$ , для корректировки оценки скорости. Дополнительный коэффициент  $\Delta T$  обычно служит для нормализации величин множителей:

$$\hat{x}_k \leftarrow \hat{x}_k + (\alpha) \hat{r}_k, \quad (9)$$

$$\hat{v}_k \leftarrow \hat{v}_k + \left( \frac{\beta}{[\Delta T]} \right) \hat{r}_k. \quad (10)$$

Параметры альфа-бета-фильтра Калмана можно вычислить из интервала выборки, среднеквадратичного отклонения (RMSE) процесса  $\sigma_\omega$  и среднеквадратичного отклонения (RMSE) шума  $\sigma_v$ :

$$\lambda = \frac{\sigma_\omega T^2}{\sigma_v}, \quad (11)$$

$$r = \frac{4 + \lambda - \sqrt{8\lambda + \lambda^2}}{4}, \quad (12)$$

$$\alpha = 1 - r^2, \quad (13)$$

$$\beta = 2(2 - \alpha) - 4\sqrt{1 - \alpha}. \quad (14)$$

Такой выбор параметров фильтра сводит к минимуму среднеквадратическую ошибку.

Альфа-бета-фильтр Калмана хорошо подходит для предсказуемых систем, где заранее известна дисперсия шума и дисперсия чистого сигнала, что позволяет использовать данное решение в рамках системы управления беспилотного летательного аппарата. Поэтому в данной исследовательской работе коэффициенты альфа и бета выражены через среднеквадратичное отклонение шума и чистого сигнала, которые, в свою очередь, изменяются в зависимости от условий полета.

Экспоненциальный фильтр – это авторегрессионный фильтр скользящего среднего первого порядка, определяемый следующим уравнением:

$$y(kh) = \alpha \times y[(k-1)h] + (1 - \alpha) \times y(kh). \quad (15)$$

Отфильтрованное значение  $y(kh)$  вычисляется суммированием предыдущего значения отфильтрованного сигнала  $y[(k-1)h]$  и последнего значения  $y(kh)$  измерительного сигнала с весовыми коэффициентами. Коэффициент  $\alpha$  лежит в интервале между 0 и 1.

Экспоненциальный фильтр содержит также динамический коэффициент  $k_{exp}$ , который изменяется в зависимости от скорости изменения фильтруемой величины. Полный вид экспоненциального фильтра можно представить в виде следующих выражений:

$$\hat{y}(kh) = (y(kh) - \hat{y}[(k-1)h]) \times k_{exp}, \quad (16)$$

$$k_{exp} = \left| k \times (y(kh) - \hat{y}[(k-1)h]) \right|, \quad (17)$$

где  $k$  – коэффициент сглаживания, который подбирается экспериментально, исходя из величины приемлемой задержки при средних рабочих скоростях изменения фильтруемой величины.

Экспоненциальный фильтр в данном исследовании используется с адаптивным коэффициентом сглаживания, который зависит от скорости изменения принимаемых значений. При увеличении разности между значениями коэффициент увеличивается, а в обратном случае уменьшается. Такое решение позволяет минимизировать задержку сигнала данного фильтра и улучшает сглаживания высокочастотных шумов.

На рисунке представлен реализованный метод в виде каскада фильтров.



Структурная схема метода адаптивной фильтрации при формировании Д-составляющей ПИД-регулятора

## Математика

Представленная на рисунке схема отображает обработку угловых скоростей БпЛА относительно одной из осей XYZ. Вся схема системы управления аппаратом будет иметь вид трех, никак не связанных друг с другом цепей фильтрации для каждой из осей XYZ.

Следует также отметить, что адаптивный альфа-бета-фильтр, представленный в данном исследовании, является новым решением, поскольку в ходе анализа статей не было найдено полностью аналогичного решения, в ходе которого была бы реализована система с обратной связью с ее же выходными значениями.

### 3. Постановка и анализ экспериментов

Для проверки разработанного метода фильтрации шумов в сигнале гироскопического датчика была проведена серия экспериментов. Управляющая программа в ходе эксперимента включала четыре параллельно работающих потока:

1) поток приема данных с передатчика с частотой вызова 1000 Гц;

2) главный поток, где реализована фильтрация данных по ранее выбранным алгоритмам и расчет значений ШИМ-сигнала на моторы через математическую функцию ПИД-регулятора. Частота приема данных с микромеханических датчиков 4000 Гц;

3) поток вывода данных в последовательный UART-порт с частотой вызова 100 Гц.

Управление квадрокоптером осуществлялось посредством изменения угловых скоростей по осям крена, тангажа и рысканья. Было реализовано три различных сценария:

1) квадрокоптер был поднят на высоту 4–5 метров над землей. При помощи команд с пульта управления осуществлял движения по оси угла крена в течение 30 с;

2) квадрокоптер был поднят на высоту 4–5 метров над землей. При помощи команд с пульта управления совершал движения по оси угла тангажа в течение 30 с;

3) квадрокоптер был поднят на высоту 4–5 метров над землей. При помощи команд с пульта управления совершал вращения по оси угла рысканья в течение 30 с.

Все эксперименты производились на открытой местности в безветренную погоду при отсутствии осадков и других внешних явлений. Температура окружающей среды во время проведения эксперимента составляла 21 °С.

В результате экспериментов были получены сигналы гироскопического датчика по всем трем осям на каждом этапе фильтрации. Эти данные представлены в таблице.

Результаты экспериментов для целевых осей

	Сигнал/Шум (дБ)			Коэффициент Пирсона		
	Крен	Тангаж	Рысканье	Крен	Тангаж	Рысканье
Исходный сигнал	2,34	4,47	7,65	0,65	0,80	0,91
Альфа-бета-фильтр Калмана	3,55	4,53	8,40	0,74	0,80	0,92
Экспоненциальный фильтр	3,35	4,35	8,084	0,73	0,79	0,92

Исходя из представленных в таблице данных, можно сделать вывод, что по двум представленным метрикам наилучших показаний достигают выходные данные со звена альфа-бета-фильтра Калмана. По метрике сигнал/шум наблюдается существенный прирост после прохождения альфа-бета-фильтра. Показатели же коэффициента Пирсона сохраняют свою величину с незначительным снижением для значений сигнала после обработки их экспоненциальным фильтром, что свидетельствует об отсутствии искажений сигнала, вызванных обработкой представленным методом.

### Заключение

Из проведенного анализа результатов экспериментов можно сделать вывод, что по всем метрикам альфа-бета-фильтр Калмана обеспечивает наилучшее соотношение сигнал/шум и коэффициент корреляции. А если рассмотреть тот факт, что метрика сигнал/шум имеет значение вплоть до 8,40 дБ по рысканью (т. е. чистый сигнал превосходит все показатели входящих в шум на 8,40

дБ), а в среднем достигает 4 дБ для остальных осей, то можно заключить, что предложенный метод эффективен для фильтрации шумов в сигнале гироскопического датчика по всем осям.

Ухудшение показателей обработки после экспоненциального фильтра объясняется достаточной большой задержкой данного фильтра (20 мс в среднем), которая вносит заметное расхождение между реальными показателями и показателя после обработки фильтром. Однако экспоненциальный фильтр хорошо показывает себя при использовании его для дифференциальной составляющей ПИД-регулятора, поскольку сглаживает амплитуды шумов, делая их более пологими.

Вопросы управления роботами и БПЛА в сложных погодных-климатических условиях и недетерминированной среде тщательно рассматриваются в работах ведущей научной школы профессора Р.В. Мещерякова [13–18] Авторы считают своим приятным долгом поздравить Романа Валерьевича с юбилеем и выражают признательность за плодотворные дискуссии.

### Литература

1. Brownrigg, D.R.K. The Weighted Median Filter / D.R.K. Brownrigg // Communications of the ACM. – 1984. – Vol. 27, no. 8. – pp. 807–818.
2. Moving Average Filter Based Phase-Locked Loops: Performance Analysis and Design Guidelines / S. Golestan, M. Ramezani, J.M. Guerrero *et al.* // IEEE transactions on power electronics. – 2013. – Vol. 29, no. 6. – P. 2750–2763.
3. Greene, N. Creating Raster Omnimax Images From Multiple Perspective Views Using the Elliptical Weighted Average Filter / N. Greene, P.S. Heckbert // IEEE Computer Graphics and Applications. – 1986. – Vol. 6, no. 6. – P. 21–27.
4. Design Strategy for Biquad-Based Continuous-Time Low-Pass Filters / P. Monsurrò, S. Pennisi, G. Scotti, A. Trifiletti // 2011 20th European Conference on Circuit Theory and Design (ECCTD). – IEEE, 2011. – P. 385–388.
5. Matthaei, G.L. Tables of Chebyshev impedance-transforming networks of low-pass filter form / G.L. Matthaei // Proceedings of the IEEE. – 1964. – Vol. 52. – №. 8. – P. 939–963.
6. Roberts, J. Use of the Butterworth Low-Pass Filter for Oceanographic Data / J. Roberts, T.D. Roberts // Journal of Geophysical Research: Oceans. – 1978. – Vol. 83, Iss. C11. – P. 5510–5514.
7. Yang J., Wu W. Compact Elliptic-Function Low-Pass Filter Using Defected Ground Structure // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. – 2008. – Т. 18, no. 9. – P. 578–580.
8. Сорокин Г. А. Фильтры нижних частот // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2015. – Т. 15, № 1. – С. 100–107.
9. Hirano, K. Design of Digital Notch Filters / K. Hirano, S. Nishimura, S. Mitra // IEEE Transactions on Communications. – 1974. – Vol. 22, no. 7. – P. 964–970.
10. Smith, A.P. Agreement Level of Running Temporal Measurements, Kinetics, and Force-Time Curves Calculated from Inertial Measurement Units: PhD thesis / A.P. Smith. – East Tennessee State University, 2021.
11. Penoyer, R. The Alpha-Beta Filter / R. Penoyer // The C Users Journal archive. – 1993. – Vol. 11, Iss. 7. – P. 73–86.
12. Kaba A. Unscented Kalman filter based attitude estimation of a quadrotor. Journal of Aeronautics and Space Technologies. – 2021. – Vol. 14, no. 1. – P. 79–88.
13. Эффективное функционирование смешанной неоднородной команды в коллаборативной робототехнической системе / Р.Р. Галин, А.А. Широкий, Е.А. Магид и др. // Информатика и автоматизация. – 2021. – № 6 (20). – С. 1224–1253.
14. Мещеряков, Р.В. Интеллектуальные робототехнические системы / Р.В. Мещеряков // Датчики и системы. – 2024. – № 2 (274). – С. 12–17.
15. Мещеряков Р.В., Широков А.С. Постановка задачи гетерогенного группового взаимодействия роботов при решении задач умного сада // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Математика. Механика. Физика». – 2024. – Т. 16, № 2. – С. 41–49.
16. Моделирование задач транспортировки грузов в беспилотной авиационной транспортной системе / А.А. Захарова, В.П. Кутахов, Р.В. Мещеряков и др. // Авиакосмическое приборостроение. – 2023. – № 3. – С. 3–15.

17. Galin R., Meshcheryakov R., Mamchenko M. Simple Task Allocation Algorithm in a Collaborative Robotic System / R. Galin, R. Meshcheryakov, M. Mamchenko // *Frontiers in Robotics and Electromechanics. Smart Innovation, Systems and Technologies*. – 2023. – no. 329. – P. 433–447.

18. Evaluation of EEG data for zonal affiliation of brain waves by leads in a robot control task / D. Wolf, Y. Turovsky, A. Iskhakova, R. Meshcheryakov // *Interactive Collaborative Robotics. ICR 2023. Lecture Notes in Computer Science*. – 2023. – Vol. 14214. – P. 103–115. Springer, Cham.

*Поступила в редакцию 3 сентября 2024 г.*

### Сведения об авторах

Волков Данила Михайлович – программист лаборатории автономных робототехнических систем, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: volkov.d@iias.spb.su.

Савельев Антон Игоревич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории автономных робототехнических систем, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1851-2699>, e-mail: saveliev@iias.spb.su.

---

*Bulletin of the South Ural State University  
Series "Mathematics. Mechanics. Physics"  
2024, vol. 16, no. 4, pp. 16–23*

---

DOI: 10.14529/mmph240402

## METHOD OF NOISE FILTERING IN GYROSCOPIC SENSOR SIGNAL BASED ON ADAPTIVE ALPHA-BETA KALMAN FILTER

**D.M. Volkov, A.N. Saveliev**

*St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg,  
Russian Federation*

*E-mail: saveliev@iias.spb.su*

**Abstract.** To ensure flight stabilization of a multirotor UAV, it is necessary to process data from micro-mechanical sensors installed on board and convert them into control signals. During operation, the UAV is affected by many external and internal factors, which leads to the occurrence of noise in these types of sensors. Noise has a negative impact on the operation of the device control system. The gyroscope signals, which are used to calculate the angular velocities and tilt angles of the vehicle, are particularly susceptible to noise. To solve this problem, the paper presents a method for cleaning the signal from a gyroscopic sensor for the differential component of the PID controller. The developed method is implemented as an interconnected adaptive system of two filters and allows for cleaning the original signal from the gyroscopic sensor from high-frequency electrical noise, vibrations caused by motors and resonant oscillations of the UAV frame. During the conducted field experiments, the signal/noise metric for the processed data reached a maximum value of 8,40 dB, which is significantly better compared to the 2 dB figure found in other scientific papers.

**Keywords:** *data filtering, gyroscopic sensor, unmanned aerial vehicles, Kalman alpha-beta filter.*

### References

1. Brownrigg D.R.K. The Weighted Median Filter. *Communications of the ACM*, 1984, Vol. 27, Iss. 8, pp. 807–818. DOI: 10.1145/358198.358222
2. Golestan S., Ramezani M., Guerrero J.M., Freijedo F.D., Monfared M. Moving Average Filter Based Phase-Locked Loops: Performance Analysis and Design Guidelines. in *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, vol. 29, no. 6, pp. 2750–2763, DOI: 10.1109/TPEL.2013.2273461.
3. Greene N., Heckbert P.S. Creating Raster Omnimax Images from Multiple Perspective Views Using the Elliptical Weighted Average Filter. in *IEEE Computer Graphics and Applications*, 1986, Vol. 6, no. 6, pp. 21–27. DOI: 10.1109/MCG.1986.276738.

4. Monsurrò P., Pennisi S., Scotti G., Trifiletti A. Design Strategy for Biquad-Based Continuous-Time Low-Pass Filters. *2011 20th European Conference on Circuit Theory and Design (ECCTD)*, Linköping, Sweden, 2011, pp. 385–388. DOI: 10.1109/ECCTD.2011.6043367.
5. Matthaei G.L. Tables of Chebyshev Impedance–Transforming Networks of Low-Pass Filter Form. *Proc. IEEE*, 1964, Vol. 52, no. 8, pp. 939–963. DOI: 10.1109/PROC.1964.3185.
6. Roberts J., Roberts T.D. Use of the Butterworth Low-Pass Filter for Oceanographic Data. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1978, Vol. 83, Iss. C11, pp. 5510–5514. DOI: 10.1029/JC083iC11p05510
7. Yang J., Wu W. Compact Elliptic-Function Low-Pass Filter Using Defected Ground Structure. In *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2008, Vol. 18, no. 9, pp. 578–580. DOI: 10.1109/LMWC.2008.2002447.
8. Sorokin G. A. Filters of the Lower Frequencies // *Bulletin of South Ural State University. Series “Computer Technologies, Automatic Control & Radioelectronics”*, 2015, Vol. 15, no. 1, pp. 100–107.
9. Hirano K., Nishimura S., Mitra S. Design of Digital Notch Filters. In *IEEE Transactions on Communications*, 1974, Vol. 22, no. 7, pp. 964–970, DOI: 10.1109/TCOM.1974.1092311.
10. Smith A.P. *Agreement Level of Running Temporal Measurements, Kinetics, and Force-Time Curves Calculated from Inertial Measurement Units*: PhD thesis. – East Tennessee State University, 2021.
11. Penoyer R. The Alpha-Beta Filter. *The C Users Journal archive*, 1993, Vol. 11, Iss. 7, pp. 73–86.
12. Kaba A. Unscented Kalman Filter Based Attitude Estimation of a Quadrotor. *Journal of Aeronautics and Space Technologies*, 2021, Vol. 14, no. 1, pp. 79–88.
13. Galin R., Shiroky A., Magid E., Meshcheryakov R., Mamchenko M. Effective Functioning of a Mixed Heterogeneous Team in a Collaborative Robotic System. *Informatics and Automation*, 2021, no. 20(6), pp. 1224–1253. DOI: 10.15622/ia.20.6.2
14. Meshcheryakov R.V. Intelligent Robotic Systems. *Sensors and Systems*, 2024, no. 2 (274), P. 12–17. DOI: 10.25728/datsys.2024.2.2
15. Meshcheryakov R.V., Shirokov A.S. Setting the Task of Heterogeneous Group Interaction of Robots in Solving Smart Garden Tasks. *Bulletin of the South Ural State University. Series “Mathematics. Mechanics. Physics”*, 2024, Vol. 16, no. 2, pp. 41–49. DOI: 10.14529/mmph240204
16. Zakharova A.A., Kutakhov V.P., Meshcheryakov R.V., Podvesovskii A.G., Smolin A.L. Modeling Cargo Transportation Tasks in an Unmanned Air Transportation System. *Aerospace Instrument-Making*, 2023, no. 3, pp. 3–15. DOI: 10.25791/aviakosmos.3.2023.1326
17. Galin R., Meshcheryakov R., Mamchenko M. Simple Task Allocation Algorithm in a Collaborative Robotic System. In: Ronzhin, A., Pshikhopov, V. (eds) *Frontiers in Robotics and Electromechanics. Smart Innovation, Systems and Technologies*, 2023, Vol. 329, Springer, Singapore. DOI: 10.1007/978-981-19-7685-8\_28
18. Wolf D., Turovsky Y., Iskhakova A., Meshcheryakov R. Evaluation of EEG Data for Zonal Affiliation of Brain Waves by Leads in a Robot Control Task. In: Ronzhin A., Sadigov A., Meshcheryakov R. (eds) *Interactive Collaborative Robotics. ICR 2023. Lecture Notes in Computer Science*, 2023, Vol. 14214. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-031-43111-1\_10

Received September 3, 2024

### Information about the authors

Volkov Danila Mikhailovich is Programmer, Laboratory of Autonomous Robotic Systems, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg, Russian Federation, e-mail: volkov.d@iias.spb.su.

Saveliev Anton Igorevich is Cand. Sc. (Engineering), Senior Researcher, Laboratory of Autonomous Robotic Systems, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg, Russian Federation, e-mail: saveliev@iias.spb.su, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1851-2699>.