

УДК 629.05, 629.584

Адаптивный медианный фильтр географических координат с приемника спутниковой навигационной системы

В.В. Вельтищев, А.С. Ромашко

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Adaptive median filter for geographic coordinates of the satellite navigation system receiver

V.V. Veltishchev, A.S. Romashko

Bauman Moscow State Technical University

Приемник спутниковой навигационной системы в подводной робототехнике является источником географических координат, точность определения которых влияет на точность работы навигационной системы подводного аппарата. Погрешности данных приемника спутниковой навигационной системы имеют вид шумов и аperiодических значительных отклонений от реального значения малой продолжительности — выплесков. Разработан алгоритм работы адаптивного медианного фильтра, позволяющего отфильтровывать шумы и выплески в географических координатах приемника спутниковой навигационной системы. Предложенный фильтр работоспособен во всех режимах движения подводного аппарата, не вносит запаздывания и не требует использования данных дополнительных измерителей. Параметры фильтра заданы исходя из динамических характеристик подводного аппарата и не привязаны к характеристикам конкретного приемника спутниковой навигационной системы.

EDN: HXOTCN, <https://elibrary/hxotcn>**Ключевые слова:** фильтрация выплесков, географические координаты, медианный фильтр, адаптивный фильтр, спутниковая навигационная система

Receiver of the underwater vehicle satellite navigation system is a source of geographic coordinates; accuracy in their determination affects the accuracy of the system. Errors in the receiver data of the satellite navigation system appear in the form of noise and aperiодic significant deviations from the real value of short duration, i.e. splashes. The paper presents a developed adaptive median filter algorithm that allows filtering out noise and splashes in the geographic coordinates of the satellite navigation system receiver. The proposed filter is operational in all modes of the underwater vehicle motion, introduces no delays, and does not require the use of data from the additional measurement devices. The filter parameters are set based on dynamic characteristics of the underwater vehicle, and are not associated with characteristics of a specific receiver of the satellite navigation system.

EDN: HXOTCN, <https://elibrary/hxotcn>**Keywords:** splash filtering, geographic coordinates, median filter, adaptive filter, satellite navigation system

Приемник спутниковой навигационной системы (СНС), установленный на подводном аппарате (ПА), предназначен для определения гео-

графических координат. Географические координаты необходимы для привязки маршрута движения ПА в погруженном состоянии к кар-

тографической базе данных с целью дальнейшего применения полученных результатов съемки. Также географические координаты используют при начальной выставке инерциальных навигационных систем в качестве информации о реальном перемещении ПА и в ходе предварительной настройки оборудования как эталонные координаты.

Данные приемника СНС содержат случайные погрешности в виде шумов и значительных аperiodических отклонений от реального значения малой продолжительности — выплесков, которые необходимо отфильтровать. Особенность ПА заключается в неопределенном характере движения, изменяющемся от дрейфа и качки на волнах, до активного маневрирования. Учитывая это, фильтры данных приемника СНС должны, с одной стороны, отсеивать выплески и снижать их зашумленность, а с другой — не вносить большого запаздывания в изначально низкочастотный сигнал (стандартная частота выдачи решения приемника СНС — 1 Гц).

Среди подходов к организации фильтрации географических координат по данным приемника СНС, можно выделить несколько направлений. В области автономной навигации преобладают решения на основе совместной обработки данных нескольких измерителей. Например, данных приемника СНС и акселерометров и гироскопов в составе инерциальной навигационной системы [1–3], одометров [4]. Для совместной обработки данных в таких системах чаще устанавливают адаптивные фильтры на основе фильтра Калмана [5, 6]. В последнее время также получили распространение нейросетевые алгоритмы [7–10]. К недостаткам такого подхода относится требование применения второго измерителя соответствующей точности (что противоречит использованию данных приемника СНС в качестве эталонных), а также сложность настройки фильтров на основе фильтра Калмана, использующего априорную информации о характере шумов измерителей. Последнее справедливо и для применения модификаций фильтра Калмана исключительно к данным приемника СНС [11–13].

В геодезии географические координаты, полученные приемником СНС, используют для оценки циклических колебаний и смещений инженерных сооружений. Применяемые здесь подходы основаны на оценке характера шумов в данных приемника СНС на длительных временных промежутках для построения

их модели и дальнейшего использования полученной модели с целью исключения описываемых ею шумов [14–18]. Недостаток такого подхода заключается в требовании наличия относительно большого объема предварительных данных, что чаще всего является невозможным с учетом работы ПА в разных акваториях, в том числе для первичных исследований. Кроме того, в геодезии работу приемника СНС рассматривают преимущественно в статике, т. е. применяемые фильтры вносят существенные запаздывания в данные, что негативно влияет на точность определения координат ПА в движении.

С учетом наличия в географических координатах не только шумов, но и выплесков, становится перспективным применение оконных и медианных фильтров (МФ). В работе [19] предложено фильтровать данные приемника СНС с помощью МФ для расчета усредненных текущих скорости движения и ускорения объекта по географическим координатам. Полученные значения сравнивают с заданными максимальными и отсеивают в случае их превышения. Фильтр предусматривает подстройку параметра допускаемой скорости движения в процессе работы. Однако ширина окна фильтра, непосредственно влияющего на степень фильтрации данных, остается неизменной с момента начальной конфигурации фильтра.

В работе [20] разработан оконный фильтр с изменяемой шириной окна, подстраиваемой под критерий точности результата осреднения измерений по окну. Однако предложенный фильтр не предусматривает детектирование и отсеивание выплесков, которые оказывают существенное влияние на результат расчета осредненных значений.

Цель статьи — разработка адаптивного МФ (АМФ) с автономной подстройкой под характер движения ПА и описание алгоритма выбора параметров АМФ на основе данных о динамических характеристиках ПА, на котором установлен приемник СНС.

Применение классического МФ. Принцип работы МФ заключается в сортировке по возрастанию или убыванию набора из n последовательных значений величины. Результатом работы фильтра является значение, оказавшееся в середине сортированного набора. Параметр n называют шириной окна МФ. Таким образом, алгоритм работы МФ позволяет ис-

ключить резкие перепады значений величины, т. е. выплески. Чем шире окно, тем более длинные по времени выплески могут быть отфильтрованы и тем более удаленным от текущего момента времени может оказаться результат работы МФ.

Результаты расчета широты ПА по данным приемника СНС до и после фильтрации МФ с шириной окна $n = 3, 5, 7, 9$ и 11 в режимах активного маневрирования (движения) ПА, его

медленного смещения под влиянием течения (дрейфа) и перехода ПА из неподвижного состояния в подвижное приведены на рис. 1, а–в.

Видно, что при движении и дрейфе ПА (см. рис. 1, а и б) большая ширина окна МФ позволяет качественно отфильтровать все выплески, а при переходе ПА из неподвижного состояния в подвижное (см. рис. 1, в) — приводит к существенному запаздыванию, т. е. снижению точности. Для решения этой проблемы необходи-

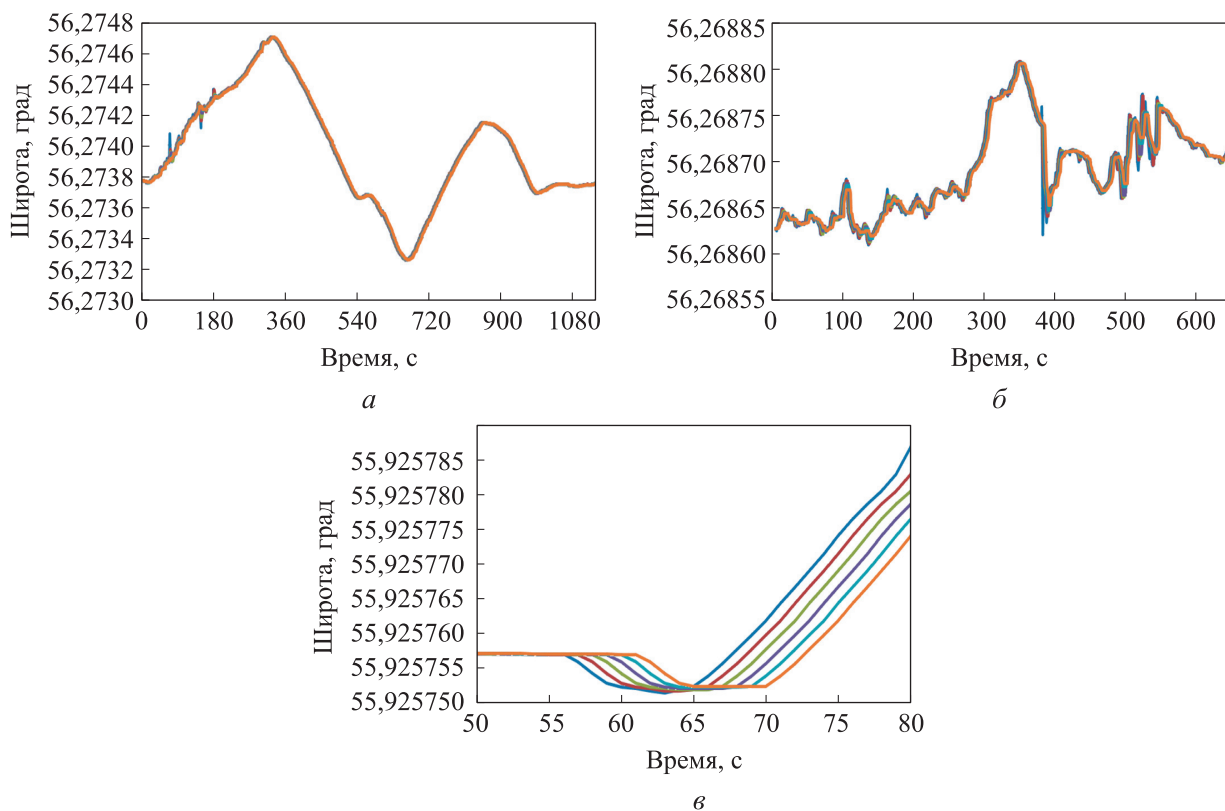


Рис. 1. Результаты расчета широты ПА по данным приемника СНС до (—) и после фильтрации МФ с шириной окна $n = 3$ (—), 5 (—), 7 (—), 9 (—) и 11 (—) при движении (а), дрейфе (б) и переходе ПА из неподвижного состояния в подвижное (в)

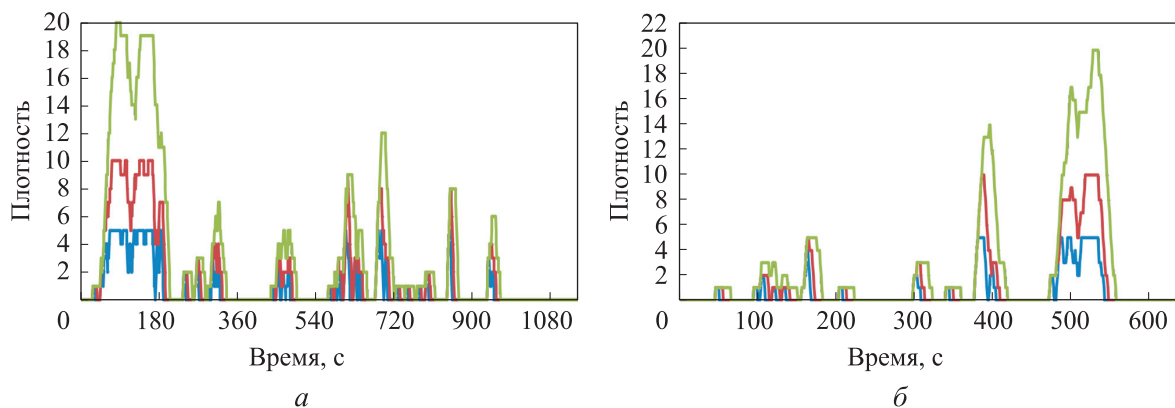


Рис. 2. Результаты расчета плотности выплесков по данным приемника СНС после фильтрации МФ с шириной окна $n = 5$ (—), 10 (—) и 20 (—) при движении (а) и дрейфе (б) ПА

мо адаптировать ширину окна МФ к характеру движения ПА.

Адаптация МФ к скорости движения объекта.

Характеристикой движения ПА является скорость. Мгновенная скорость по географическим координатам приемника СНС определяется как отношение расстояния между точками в соседних измерениях ко времени получения следующего измерения (для большинства приемников СНС период выдачи координат составляет 1 с). Приемник СНС определяет координаты ПА в географической системе координат, где отношение смещения, выраженного в градусах, к тому же смещению, выраженному в метрах, различается в зависимости от широты, на которой проводят измерение. Чтобы исключить влияние этой особенности системы координат на качество работы МФ, географические координаты, определенные по данным приемника СНС, пересчитывают в метрическую систему координат с помощью картографической проекции Меркатора. Таким образом, мгновенная скорость имеет размерность в метрах в секунду.

Выплески в географических координатах приводят к появлению выплесков в мгновен-

ной скорости согласно методике расчета. Вторые представляют собой значительное превышение реальных значений средней и максимальной скоростей движения объекта, а первые являются отклонениями от текущих средних координат. Максимальную скорость движения ПА определяют исходя из его динамических характеристик.

Исходя из принципа работы МФ, ширина его окна, необходимая для полной фильтрации выплеска, должна быть больше продолжительности выплеска. Так как выплеском в мгновенной скорости считается превышение фиксированного значения максимальной скорости движения ПА, проведен расчет плотности выплесков на заданном интервале. Под плотностью выплесков понимают число значений в интервале, определяемом шириной его окна, превышающих заданную максимальную скорость движения ПА.

Результаты расчета плотности выплесков по данным приемника СНС после фильтрации МФ с шириной окна $n = 5, 10$ и 20 при движении и дрейфе ПА приведены на рис. 2, а и б. В расчетах использованы те же данные, что и при построении на рис. 1.

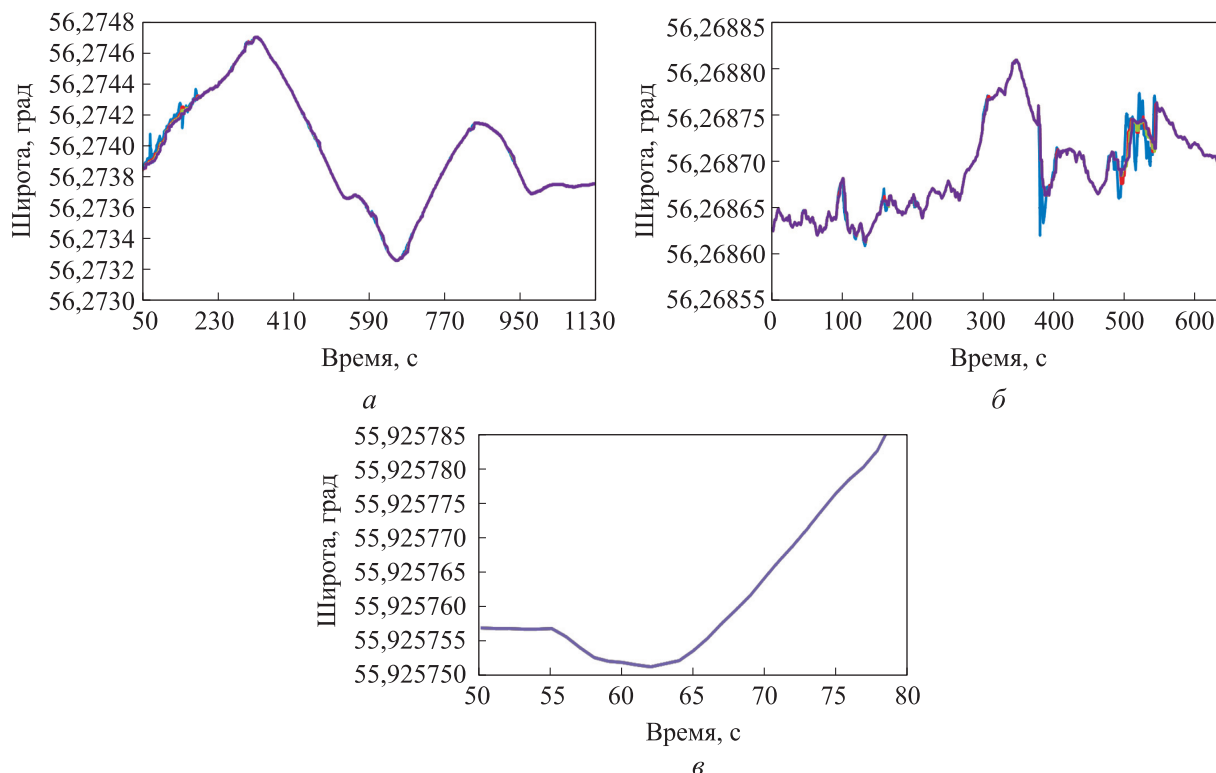


Рис. 3. Результаты расчета широты ПА по данным приемника СНС до (—) и после фильтрации АМФ с коэффициентом пропорциональности $k = 3$ (—), 4 (—) и 5 (—) при движении (а), дрейфе (б) и переходе ПА из неподвижного состояния в подвижное (в)

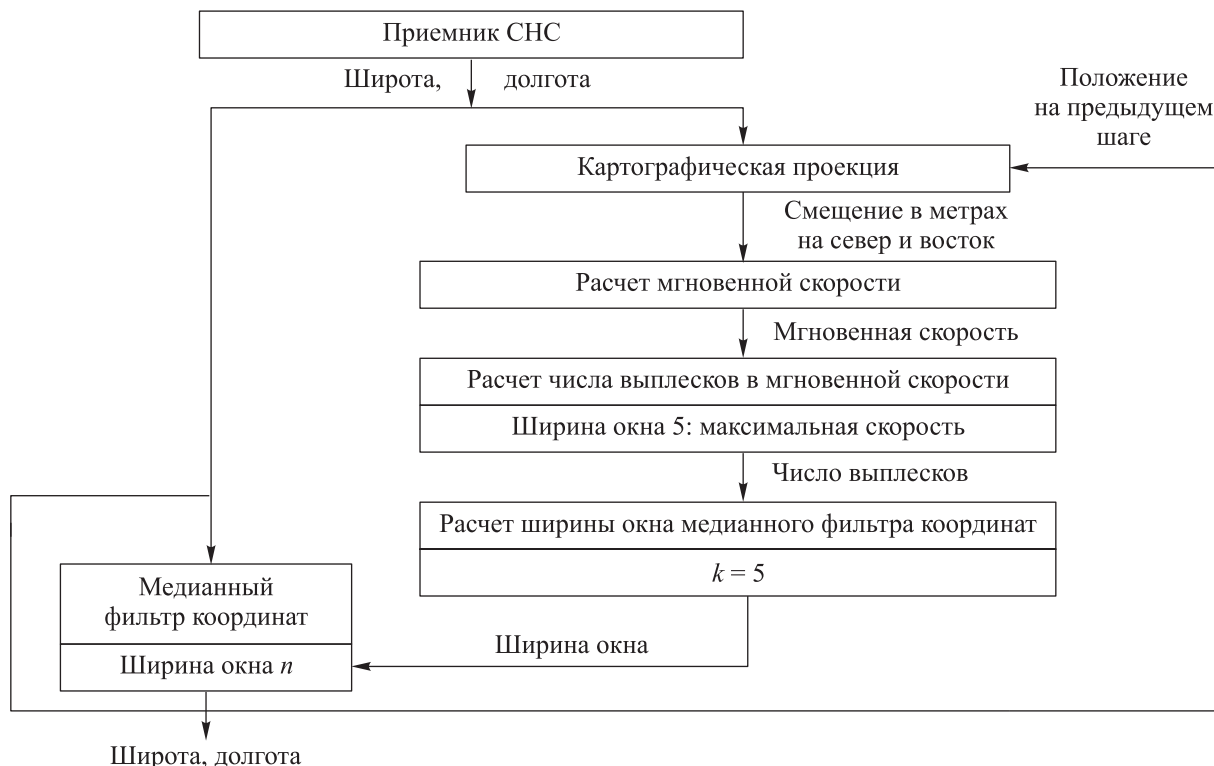


Рис. 4. Блок-схема алгоритма АМФ

Совместный анализ рис. 1 и 2 показывает, что плотность выплесков мгновенной скорости пропорциональна продолжительности выплеска географических координат, определенных приемником СНС. Эту зависимость можно использовать для адаптации ширины окна МФ к выплеску, т. е. увеличивать окно при появлении выплеска для его полной фильтрации и уменьшать при отсутствии выплеска, чтобы снизить значение запаздывания, вносимое МФ. Ширина окна АМФ определяется выражением

$$n = 1 + kp,$$

где k — коэффициент пропорциональности; p — плотность выплесков в мгновенной скорости.

Результаты расчета широты ПА по данным приемника СНС до и после фильтрации АМФ с шириной окна $n = 5$ и коэффициентом пропорциональности $k = 3, 4$ и 5 приведены на рис. 3, а–в. В расчетах использованы те же данные, что и при построении на рис. 1.

Как видно из рис. 3, оптимальным с точки зрения степени фильтрации выплесков является АМФ с коэффициентом пропорциональности $k = 5$. В случае перехода ПА из неподвижного состояния в подвижное АМФ не вносит за-

паздывания в данные при любом значении коэффициента пропорциональности k (на рис 3, в результаты работы фильтров совпадают с исходными данными).

Блок-схема алгоритма АМФ приведена на рис. 4.

Следует отметить, что выплески могут и не превышать максимальную скорость движения ПА. В этом случае можно использовать максимальную скорость ПА, характерную для ожидаемого режима движения, так как для ПА он обычно известен.

Выводы

1. Предложен АМФ, позволяющий отфильтровывать выплески и шумы географических координат, определяемых приемником СНС.

2. Показано, что к преимуществам АМФ перед другими МФ относятся отсутствие запаздывания и необходимости применения дополнительных измерителей, простота настройки, а также отсутствие привязки АМФ к характеристикам конкретного приемника СНС или области его работы (ввиду того, что настраиваемым параметром АМФ является максимальная скорость движения ПА).

Литература

- [1] Kanghai H., Chaoyang D. A fuzzy strong tracking extended Kalman filter for UAV navigation considering interruption of GPS signal. *IEEE ICPICS*, 2019, pp. 254–259, doi: <https://doi.org/10.1109/ICPICS47731.2019.8942402>
- [2] Katwe S., Lyer N., Khan M. et al. Particle filter based localization of autonomous vehicle. *2nd GCAT*, 2021, doi: <https://doi.org/10.1109/GCAT52182.2021.9587461>
- [3] Liang W., Li K. Anti-spoofing Kalman filter for GPS/rotational INS integration. *Measurement*, 2022, vol. 193, art. 110962, doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.110962>
- [4] Chunhakam P., Pummarnin P., Jeen-im P. et al. GPS position predicting system by Kalman filter with velocity from OBD and direction from magnetometer. *9th IEECON*, 2021, pp. 444–447, doi: <https://doi.org/10.1109/IEECON51072.2021.9440239>
- [5] Cahyadi M.N., Asfihani T., Mardiyanto R. et al. Performance of GPS and IMU sensor fusion using unscented Kalman filter for precise i-Boat navigation in infinite wide waters. *Geod. Geodyn.*, 2023, vol. 14, no. 3, pp. 265–274, doi: <https://doi.org/10.1016/j.geog.2022.11.005>
- [6] Рехман А., Шахид Х., Афзал М.А. и др. Пешеходная навигация на основе комплексирования ГНСС-приемника и МЭМС-датчиков смартфона с помощью расширенного фильтра Калмана. *Гироскопия и навигация*, 2020, т. 28, № 2, с. 91–108, doi: <https://doi.org/10.17285/0869-7035.0034>
- [7] Liu Z., Liu J., Xu X. et al. DeepGPS: deep learning enhanced GPS positioning in urban canyons. *IEEE Trans. Mob. Comput.*, 2024, vol. 23, no. 1, pp. 376–392, doi: <https://doi.org/10.1109/TMC.2022.3208240>
- [8] Jiang X., Li Q., Wei D. A BDS/GPS integrated positioning algorithm based on Kalman filter and deep neural networks. *16th CISP-BMEI*, 2023, doi: <https://doi.org/10.1109/CISP-BMEI60920.2023.10373356>
- [9] Жао Ш., Лукьянов В.В. Применение нейронной сети в интегрированной системе навигации БИНС/ГНСС. *XLVII Академические чтения по космонавтике*. Т. 3. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023, с. 189–191.
- [10] Yan S., Wu D., Wang W. et al. An analysis of method and performance for GNSS/SINS integrated navigation assisted by recurrent neural network. *Journal of Air Force Engineering University*, 2021, vol. 22, no. 5, pp. 61–66.
- [11] Kumar N.A., Rao G.S., Arasavali N. Development of advanced extended Kalman filter for precise estimation of GPS receiver position. *WiSPNET*, 2019, pp. 213–216, doi: <https://doi.org/10.1109/WiSPNET45539.2019.9032769>
- [12] Mosavi M.R., Tabatabaei A., Zandi M.J. Positioning improvement by combining GPS and GLONASS based on Kalman filter and its application in GPS spoofing situations. *Gyroscopy Navig.*, 2016, vol. 7, no. 4, pp. 318–325, doi: <https://doi.org/10.1134/S2075108716040088>
- [13] Shokri S., Rahemi N., Mosavi M.R. Improving GPS positioning accuracy using weighted Kalman filter and variance estimation methods. *CEAS Aeronaut. J.*, 2020, vol. 11, no. 2, pp. 515–527, doi: <https://doi.org/10.1007/s13272-019-00433-x>
- [14] Ma J. BDS/GPS deformation analysis of a long-span cable-stayed bridge based on colored noise filtering. *Geod. Geodyn.*, 2023, vol. 14, no. 2, pp. 163–171, doi: <https://doi.org/10.1016/j.geog.2022.08.005>
- [15] Qu X., Ding X., Xu Y.L. et al. Real-time outlier detection in integrated GNSS and accelerometer structural health monitoring systems based on a robust multi-rate Kalman filter. *J. Geod.*, 2023, vol. 97, art. 38, doi: <https://doi.org/10.1007/s00190-023-01724>
- [16] Zhou W., Ding K., Liu P. et al. Spatiotemporal filtering for continuous GPS coordinate time series in mainland China by using independent component analysis. *Remote Sens.*, 2022, vol. 14, no. 12, art. 2904, doi: <https://doi.org/10.3390/rs14122904>
- [17] Li L., Kuhlmann H. Real-time deformation measurements using time series of GPS coordinates processed by Kalman filter with shaping filter. *Survey Review*, 2012, vol. 44, no. 326, pp. 189–197, doi: <https://doi.org/10.1179/1752270611Y.0000000022>
- [18] Wang J., Ding K., Sun H. et al. Noise reduction and periodic signal extraction for GNSS height data in the study of vertical deformation. *Geod. Geodyn.*, 2023, vol. 14, no. 6, pp. 573–581, doi: <https://doi.org/10.1016/j.geog.2023.07.002>
- [19] Yoonsong H., Kim H.G. A real-time filtering method of positioning data with moving window mechanism. *Computer Engineering and Intelligent Systems*, 2012, vol. 3, no. 7, pp. 20–31.

- [20] Фялковский А.Л. Обработка данных при геодезическом мониторинге динамических объектов с использованием ГНСС. *Инженерные изыскания*, 2017, т. 11, № 9, с. 42–52, doi: <https://doi.org/10.25296/1997-8650-2017-9-42-52>

References

- [1] Kanghui H., Chaoyang D. A fuzzy strong tracking extended Kalman filter for UAV navigation considering interruption of GPS signal. *IEEE ICPICS*, 2019, pp. 254–259, doi: <https://doi.org/10.1109/ICPICS47731.2019.8942402>
- [2] Katwe S., Lyer N., Khan M. et al. Particle filter based localization of autonomous vehicle. *2nd GCAT*, 2021, doi: <https://doi.org/10.1109/GCAT52182.2021.9587461>
- [3] Liang W., Li K. Anti-spoofing Kalman filter for GPS/rotational INS integration. *Measurement*, 2022, vol. 193, art. 110962, doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.110962>
- [4] Chunhakam P., Pummarn P., Jeen-im P. et al. GPS positon predicting system by Kalman filter with velocity from OBD and direction from magnetometer. *9th iEECON*, 2021, pp. 444–447, doi: <https://doi.org/10.1109/iEECON51072.2021.9440239>
- [5] Cahyadi M.N., Asfihani T., Mardiyanto R. et al. Performance of GPS and IMU sensor fusion using unscented Kalman filter for precise i-Boat navigation in infinite wide waters. *Geod. Geodyn.*, 2023, vol. 14, no. 3, pp. 265–274, doi: <https://doi.org/10.1016/j.geog.2022.11.005>
- [6] Rekhman A., Shakhid Kh., Afzal M.A. et al. Accurate and direct GNSS/PDR integration using extended Kalman filter for pedestrian smartphone navigation. *Giroskopiya i navigatsiya*, 2020, vol. 28, no. 2, pp. 91–108, doi: <https://doi.org/10.17285/0869-7035.0034> (in Russ.). (Eng. version: *Gyroscopy Navig.*, 2020, vol. 11, no. 2, pp. 124–137, doi: <https://doi.org/10.1134/S2075108720020054>)
- [7] Liu Z., Liu J., Xu X. et al. DeepGPS: deep learning enhanced GPS positioning in urban canyons. *IEEE Trans. Mob. Comput.*, 2024, vol. 23, no. 1, pp. 376–392, doi: <https://doi.org/10.1109/TMC.2022.3208240>
- [8] Jiang X., Li Q., Wei D. A BDS/GPS integrated positioning algorithm based on Kalman filter and deep neural networks. *16th CISP-BMEI*, 2023, doi: <https://doi.org/10.1109/CISP-BMEI60920.2023.10373356>
- [9] Zhao Sh., Lukyanov V.V. [Application of neural network in sins/gnss integrated navigation system]. *XLVII Akademicheskie chteniya po kosmonavtike*. T. 3 [XLVII Academic Readings. Vol. 3]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2023, pp. 189–191. (In Russ.).
- [10] Yan S., Wu D., Wang W. et al. An analysis of method and performance for GNSS/SINS integrated navigation assisted by recurrent neural network. *Journal of Air Force Engineering University*, 2021, vol. 22, no. 5, pp. 61–66.
- [11] Kumar N.A., Rao G.S., Arasavali N. Development of advanced extended Kalman filter for precise estimation of GPS receiver position. *WiSPNET*, 2019, pp. 213–216, doi: <https://doi.org/10.1109/WiSPNET45539.2019.9032769>
- [12] Mosavi M.R., Tabatabaei A., Zandi M.J. Positioning improvement by combining GPS and GLONASS based on Kalman filter and its application in GPS spoofing situations. *Gyroscopy Navig.*, 2016, vol. 7, no. 4, pp. 318–325, doi: <https://doi.org/10.1134/S2075108716040088>
- [13] Shokri S., Rahemi N., Mosavi M.R. Improving GPS positioning accuracy using weighted Kalman filter and variance estimation methods. *CEAS Aeronaut. J.*, 2020, vol. 11, no. 2, pp. 515–527, doi: <https://doi.org/10.1007/s13272-019-00433-x>
- [14] Ma J. BDS/GPS deformation analysis of a long-span cable-stayed bridge based on colored noise filtering. *Geod. Geodyn.*, 2023, vol. 14, no. 2, pp. 163–171, doi: <https://doi.org/10.1016/j.geog.2022.08.005>
- [15] Qu X., Ding X., Xu Y.L. et al. Real-time outlier detection in integrated GNSS and accelerometer structural health monitoring systems based on a robust multi-rate Kalman filter. *J. Geod.*, 2023, vol. 97, art. 38, <https://doi.org/10.1007/s00190-023-01724>
- [16] Zhou W., Ding K., Liu P. et al. Spatiotemporal filtering for continuous GPS coordinate time series in mainland China by using independent component analysis. *Remote Sens.*, 2022, vol. 14, no. 12, art. 2904, doi: <https://doi.org/10.3390/rs14122904>

- [17] Li L., Kuhlmann H. Real-time deformation measurements using time series of GPS coordinates processed by Kalman filter with shaping filter. *Survey Review*, 2012, vol. 44, no. 326, pp. 189–197, doi: <https://doi.org/10.1179/1752270611Y.0000000022>
- [18] Wang J., Ding K., Sun H. et al. Noise reduction and periodic signal extraction for GNSS height data in the study of vertical deformation. *Geod. Geodyn.*, 2023, vol. 14, no. 6, pp. 573–581, doi: <https://doi.org/10.1016/j.geog.2023.07.002>
- [19] Yoonsong H., Kim H.G. A real-time filtering method of positioning data with moving window mechanism. *Computer Engineering and Intelligent Systems*, 2012, vol. 3, no. 7, pp. 20–31.
- [20] Fyalkovskiy A.L. Data processing in the geodetic monitoring of dynamic structures using GNSS. *Inzhenernye izyskaniya* [Engineering Survey], 2017, vol. 11, no. 9, pp. 42–52, doi: <https://doi.org/10.25296/1997-8650-2017-9-42-52> (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 04.09.2024

Информация об авторах

ВЕЛЬТИЩЕВ Вадим Викторович — доктор технических наук, доцент, зав. кафедрой «Подводные роботы и аппараты». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: vvv@bmstu.ru).

РОМАШКО Анна Сергеевна — аспирант кафедры «Подводные роботы и аппараты». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: romashko@bmstu.ru).

Information about the authors

VELTISHCHEV Vadim Viktorovich — Doctor of Science (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Underwater Robots and Vehicles. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: vvv@bmstu.ru).

ROMASHKO Anna Sergeevna — Postgraduate, Department of Underwater Robots and Vehicles. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: romashko@bmstu.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Вельтищев В.В., Ромашко А.С. Адаптивный медианный фильтр географических координат с приемника спутниковой навигационной системы. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 5, с. 29–36.

Please cite this article in English as:

Veltishchev V.V., Romashko A.S. Adaptive median filter for geographic coordinates of the satellite navigation system receiver. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 5, pp. 29–36.