

УДК 629.056.6

DOI: 10.24412/3033-6007-2026-238-58-70

АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ ВЫСОКОТОЧНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ОБЪЕКТОВ

Кузенков Е.А.^{1,1}, Решетникова И.В.^{2,2}

¹ Московский технический университет связи и информатики (МТУСИ), Ростов-на-Дону, Россия.

² Донской государственный технический университет (ДГТУ), Ростов-на-Дону, Россия.

E-mail: ¹ kuzenkov98@mail.ru, ² irina_reshetnikova@mail.ru

Аннотация. В представленной статье описывается адаптивный алгоритм обработки измерений датчиков инерциальных навигационных систем беспилотных летательных аппаратов. Представлены его словесное и аналитическое описания, а также проведено сравнение с существующими алгоритмами: экспоненциально взвешенным скользящим средним (программным фильтром нижних частот) и α - β фильтром. Новизна работы заключается в разработке адаптивного фильтра, который, в отличие от известных адаптивных скользящих средних (например, адаптивной скользящей средней Кауфмана), где коэффициент сглаживания определяется волатильностью либо иными статистическими характеристиками сигнала, использует усреднённую (посредством экспоненциально взвешенного скользящего среднего) разность измеренных значений сигнала для динамической настройки параметра фильтрации. Дополнительно реализована автоматическая компенсация запаздывания через экспоненциально сглаженную ошибку между отфильтрованным и исходным сигналом. Актуальность работы состоит в том, что предложенный алгоритм обеспечивает высокую точность сглаживания сигнала при высокой скорости реакции на изменения сигнала, что особенно важно для управления маневренными беспилотными аппаратами.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты (БПЛА), инерциальные навигационные системы (ИНС), автономная навигация, МЭМС-датчики, акселерометр, обработка сигналов, фильтр нижних частот.

Введение

В современном мире использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) приобретает всё большую популярность и значимость, поскольку эти устройства находят широкое применение в самых различных сферах человеческой деятельности. В частности, они активно применяются в геодезии, где требуется высокая точность картографирования и измерений [1], в сельском хозяйстве – для автоматизированного мониторинга и обработки посевов [2], в логистике – для быстрого и эффективного перемещения грузов [3], а также в военной сфере – для разведки, патрулирования и выполнения специальных заданий [4].

Для цитирования:

Кузенков Е.А., Решетникова И.В. Адаптивный алгоритм обработки инерциальных измерений для высокоточных навигационных систем беспилотных объектов. *Интеллектуальный транспорт*. 2026. № 2(38). С. 58–70. DOI: 10.24412/3033-6007-2026-238-58-70.

Эффективность выполнения их задач напрямую зависит от точности и безотказности работы навигационных систем. В современных условиях зачастую невозможно полагаться на постоянное и стабильное получение данных о положении от спутниковых и других рукотворных радионавигационных систем. Это особенно актуально в городских условиях с плотной застройкой, внутри зданий, в условиях радиоэлектронных помех или при активных боевых действиях, где спутниковые сигналы могут быть слабы, заблокированы или искажены средствами радиоэлектронной борьбы. В таких ситуациях на передний план выходит использование инерциальных навигационных систем (ИНС), работающих независимо от внешних источников информации и получающих данные со специальных датчиков, таких как гироскопы и акселерометры [5].

На сегодняшний день наиболее востребованными являются ИНС на базе микроэлектромеханических систем (МЭМС), примерами чему служат полетные контроллеры Pixhawk и MultiWii [6, 7]. На рисунке 1 представлено фото полетного контроллера MultiWii v2.5, со встроенным МЭМС-акселерометром/гироскопом:

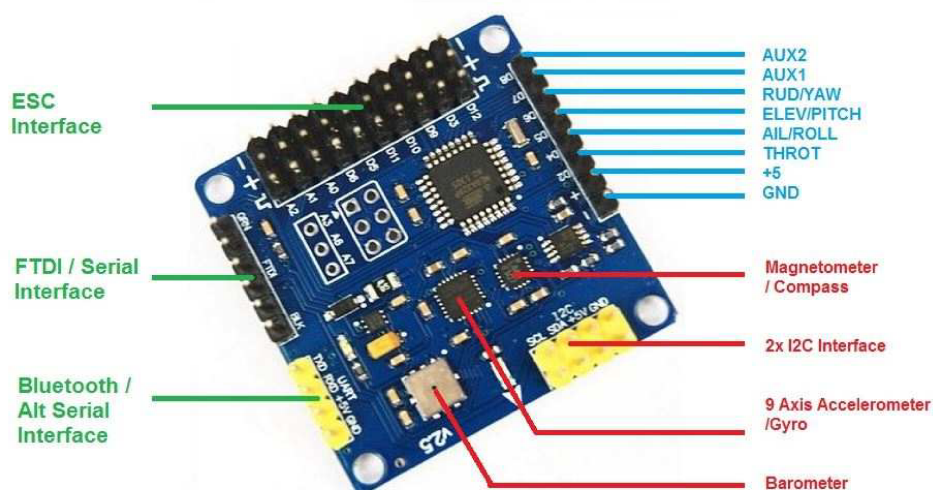


Рис. 1: Полетный контроллер MultiWii v2.5

Эти датчики, благодаря своим небольшим размерам, малому энергопотреблению и относительно низкой стоимости, нашли широкое применение во множестве платформ – от малых беспилотников до сложных многофункциональных систем, используемых в масштабных объектах [8, 9]. Их компактность позволяет надежно интегрировать ИНС в самые небольшие и легкие движущиеся платформы, что особенно важно при разработке миниатюрных беспилотных систем. Тем не менее, такие датчики обладают существенным недостатком – их чувствительность к внешним помехам и шумам, а также к долговременным эффектам накопления ошибок. В результате, данные с МЭМС-датчиков содержат значительные искажения, которые без подходящей обработки способны привести к серьезным погрешностям в оценке положения и движения [8].

1. Анализ современного состояния проблемы

Обработка «сырых» данных МЭМС-датчиков становится неотъемлемым этапом для повышения точности и устойчивости всей навигационной системы. В этом контексте широко применяются различные алгоритмы фильтрации, одним из самых популярных из которых является экспоненциально взвешенное скользящее среднее, программный фильтр нижних частот [10]:

$$\hat{x}_i = z_i \cdot k + \hat{x}_{i-1} \cdot (1 - k), \quad (1)$$

где z_i – измеренное значение сигнала на i -м шаге измерений; $\hat{x}_i$ и $\hat{x}_{i-1}$ – оценки значений сигнала на i -м и $(i - 1)$ -м шагах измерений; k – коэффициент сглаживания, $0 \leq k \leq 1$.

Основные его преимущества – простота реализации, низкая вычислительная сложность и возможность использования без необходимости хранения больших массивов данных, что актуально в условиях ограниченности вычислительных ресурсов. Однако, несмотря на очевидные преимущества, такой алгоритм сталкивается с серьезными ограничениями. Конкретно – его эффективность сильно зависит от значения коэффициента сглаживания, и зачастую возникает необходимость поиска баланса между точностью фильтрации и скоростью реакции алгоритма на изменения сигнала: малое значение коэффициента сглаживания ($k \approx 0, 1$) дает высокую точность сглаживания, но приводит к запаздыванию реакции алгоритма, например, на резкие маневры или внезапные воздействия. И наоборот, высокое значение коэффициента ($k \approx 0, 7$) заметно уменьшает точность сглаживания, но обеспечивает высокую скорость реакции. В большинстве случаев это приводит к задержкам и рассогласованию реального положения и оценки системы, что особенно критично при управлении маневренным беспилотником. В результате, при возникновении опасных ситуаций или экстремальных условий, стандартный экспоненциальный фильтр может не обеспечить своевременного реагирования, что ухудшает безопасность и эффективность эксплуатации аппарата.

В данной работе предложена модификация этого алгоритма, призванная повысить его адаптивность к резким изменениям значений выходных сигналов датчиков ИНС, и обеспечивающая при этом высокую точность сглаживания измерений.

2. Адаптивный коэффициент экспоненциально взвешенного скользящего среднего

Суть предлагаемой модификации алгоритма заключается в использовании адаптивного коэффициента сглаживания, значение которого зависит от значения параметра, характеризующего изменение значения сигнала во времени: значение коэффициента возрастает при полезных изменениях сигнала и стремится к нулю, если полезных изменений сигнала нет. В данной работе в качестве такого параметра d_i предлагается разность значений сигнала на текущем и предыдущем шагах измерений:

$$d_i = z_i - z_{i-1}, \quad (2)$$

где z_i и z_{i-1} – измеренные значения сигнала на i -м и $(i - 1)$ -м шагах измерений.

Однако, поскольку сигнал искажен шумом, «мгновенное» значение d_i не будет отражать реальной картины изменения сигнала. В таком случае, чтобы снизить влияние шума на значение d_i , предлагается использовать усредненное значение разности измерений $\bar{d}_i$, также вычисляемое при помощи экспоненциально взвешенного скользящего среднего:

$$\bar{d}_i = d_i \cdot k_{\Pi} + \bar{d}_{i-1} \cdot (1 - k_{\Pi}), \quad (3)$$

где k_{Π} – коэффициент сглаживания, $0 \leq k_{\Pi} \leq 1$.

Приведенный метод усреднения (3) аналогичен алгоритму (1), с той разницей, что здесь он используется для сглаживания данных об изменениях сигнала d . Выбор такого метода усреднения обусловлен его уже озвученными в первом разделе преимуществами (простота реализации, отсутствие необходимости использования массивов для накопления измерений).

Само по себе значение $\bar{d}_i$ не может выступать в качестве коэффициента сглаживания, поскольку множество значений коэффициента должно лежать в пределах от 0 до 1 [10]. Из этого следует, что для формирования значения адаптивного коэффициента сглаживания k_a необходима функция, область значений которой лежит в заданных пределах, и которая возрастает с увеличением $\bar{d}_i$ по модулю. Ниже приведен один из возможных вариантов такой функции:

$$k_a = \frac{|\bar{d}_i|}{C + |\bar{d}_i|}, \quad (4)$$

где C – константа, задающая неравенство $C + |\bar{d}_i| > |\bar{d}_i|$. Далее для повышения иллюстративности алгоритм рассмотрим при $C = 1$.

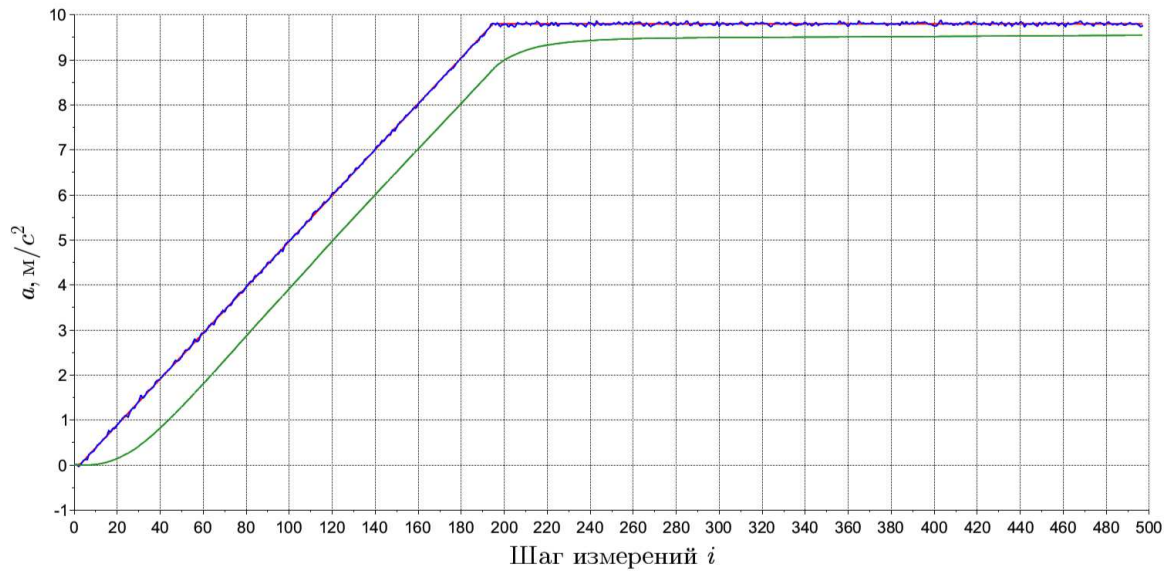
Окончательно рассчитанное значение коэффициента k_a подставляется в основную формулу алгоритма:

$$\hat{x}_i = z_i \cdot k_a + \hat{x}_{i-1} \cdot (1 - k_a) \quad (5)$$

Следует отметить, что использование усредненного значения скорости изменения сигнала $\bar{d}_i$ в качестве критерия подстройки значения коэффициента k_a приводит к запаздыванию реакции на изменения сигнала (пусть и значительно меньшему, чем при применении постоянного малого коэффициента), что проиллюстрировано на рисунке 2. В качестве тестового сценария выбран смоделированный сигнал, имитирующий поведение акселерометра gy-521 [11, 12] при изменении его угла наклона: значение сигнала (в данном случае – ускорение a , м/с²) изначально равно нулю, а затем в течение 5 секунд линейно возрастает до 9,8 м/с². Подробно суть используемой модели будет раскрыта в разделе 3, посвященном испытаниям алгоритма и сравнениям его с аналогами.

На представленном рисунке видно выраженное запаздывание работы алгоритма, о котором говорилось ранее. Такое поведение говорит о наличии систематической ошибки в работе алгоритма. Вызвано оно уже упомянутыми свойствами экспоненциально взвешенного скользящего среднего: значение $\bar{d}_i$ формируется при малом значении коэффициента сглаживания k_{Π} , что вызывает задержку реакции на полезные изменения сигнала в начале фронта. Иными словами, необходимо некоторое время для того, чтобы значение $\bar{d}_i$ начало отражать изменения сигнала.

Кроме того, на постоянном участке сигнала наблюдается убывающее смещение между истинными значениями сигнала и оценками фильтра, которое также вызвано задержкой реакции при полезных изменениях сигнала: поскольку оценка фильтра запаздывает во времени относительно истинного значения сигнала, значение $\bar{d}_i$ (а вместе с ним и значение коэффициента k_a) в конце фронта приходит к значению, близкому к нулю, раньше, чем оценка фильтра приблизится к истинному значению сигнала.



-
- Истинные значения сигнала (обозначим как x)
 - Исканенные шумом измеряемые значения сигнала z ($\sigma = 0,03 \text{ м/с}^2$)
 - Оценки фильтра $\hat{x}$
-

Рис. 2: Результат обработки кусочно-линейного сигнала, искаженного шумом, при $k_{\Pi} = 0,04$

В качестве меры, частично решающей эту проблему, предлагается следующий подход:

- Вычисляется средняя разность между измеренным значением сигнала и оценкой алгоритма на шаге $i - 1$ (обозначим ее как $\bar{D}_i$, метод усреднения тот же – экспоненциально взвешенное скользящее среднее):

$$\bar{D}_i = (z_{i-1} - \hat{x}_{i-1}) \cdot k_{\kappa} + \bar{D}_{i-1} \cdot (1 - k_{\kappa}), \quad (6)$$

где k_{κ} – коэффициент сглаживания, $0 \leq k_{\kappa} \leq 1$;

- Полученное значение $\bar{D}_i$ подставляется в формулу коэффициента k_a :

$$k_a = \frac{|\bar{d}_i| + |\bar{D}_i|}{C + |\bar{d}_i| + |\bar{D}_i|} \quad (7)$$

Смысл модификации состоит в отслеживании появления рассмотренных выше смещений и запаздываний (сигналом чему выступает увеличение значения $\bar{D}_i$ по модулю) и повышении значения коэффициента k_a при их наличии. Результат работы фильтра с описанной модификацией представлен на рисунке 3.

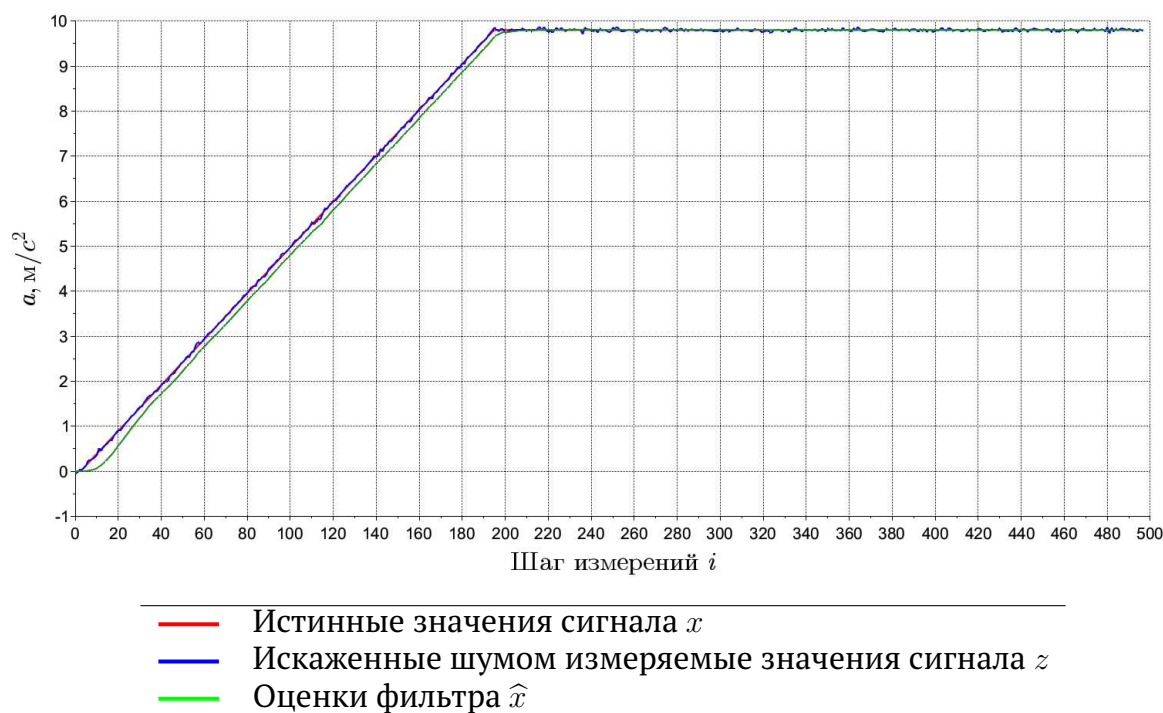


Рис. 3: Результат обработки кусочно-линейного сигнала, искаженного шумом, при помощи фильтра с описанной модификацией, при $k_{\Pi} = 0,04$ и $k_{\kappa} = 0,04$

Итоговый алгоритм выглядит следующим образом:

1. Нахождение разности измеренных значений сигнала d_i и нахождение усредненного значения разности измерений $\bar{d}_i$:

$$\bar{d}_i = (z_i - z_{i-1}) \cdot k_{\Pi} + \bar{d}_{i-1} \cdot (1 - k_{\Pi}) \quad (8)$$

2. Корректировка смещений и запаздываний сигнала относительно истинного значения, согласно формуле (6);
3. Формирование значения адаптивного коэффициента сглаживания k_a , согласно формуле (7);
4. Подстановка значения k_a в основное выражение алгоритма и усреднение измеренного значения сигнала z_i , согласно формуле (5).

3. Испытания алгоритма и сравнение с аналогами

Испытания разработанного алгоритма проводились на моделях сигнала, имитирующих выходные данные акселерометра gy-521 при измерении ускорения по оси X в диапазоне $\pm 2g$. В качестве модели помех измерения использовалась центрированная гауссовская последовательность n , характеризующаяся среднеквадратичным отклонением (СКО) σ_n , равным $0,03 \text{ м/с}^2$.

В формуле (9) приведено аналитическое выражение модели формирования искаженного шумом сигнала:

$$z_i = x_i + n_i, \quad (9)$$

где z_i – измерение значения сигнала на шаге измерения i ; x_i – истинное значение сигнала; n_i – шум, искажающий истинное значение сигнала.

Значение СКО шума выходного сигнала датчика было определено на основе анализа экспериментальных данных, полученных с реального устройства. Приближение истинного значения сигнала определялось как среднее арифметическое его измерений при 10000 измерений с периодом дискретизации сигнала $T = 26 \cdot 10^{-3}$ с. Измерения точности сглаживания производились при постоянном истинном значении сигнала, равном 0. Для параметров алгоритма выбраны следующие значения: $k_{\Pi} = 0,04$ и $k_k = 0,04$. В заданных условиях среднеквадратичное отклонение остаточного шума σ_o оказалось равным $0,00145$ м/с².

В рамках дальнейших исследований было проведено сравнение эффективности предложенного алгоритма с его аналогами. В качестве альтернативных методов были выбраны экспоненциально взвешенное скользящее среднее с постоянным коэффициентом сглаживания и α - β фильтр [13]. Целью такого сравнения было определить преимущества и недостатки каждого из алгоритмов в условиях идентичных начальных настроек.

Процедура сравнения включала этапы подбора параметров каждого алгоритма с целью достижения сопоставимой точности сглаживания при экспериментах с постоянным сигналом. Далее, каждый из алгоритмов тестировался на моделированном сигнале, который предназначен для имитации реальных условий эксплуатации акселерометра. В частности, сигнал моделировал изменение ориентации датчика относительно вертикальной оси. Изначально, сигнал был равен нулю, затем в течение одной секунды он линейно возрастает до значения $9,8$ м/с² – что соответствует изменению угла наклона датчика, при котором проекция ускорения свободного падения на ось чувствительности меняется от 0 до $9,8$ м/с². После достижения пика, сигнал удерживался на этом уровне в течение десяти секунд, что моделирует стабильное вертикальное положение датчика. Далее происходило его линейное снижение до нуля за одну секунду, после чего сигнал оставался на нулевом уровне в течение еще десяти секунд.

Данная модель служит имитацией ситуации, когда датчик изменяет свою ориентацию с горизонтальной на вертикальную (на 90°). Условия, заданные таким образом, позволяют провести объективную оценку скорости реакции каждого алгоритма на быстро меняющийся сигнал.

На рисунке 4 представлен результат обработки описанного сигнала предложенным адаптивным фильтром.

На рисунке 5 для наглядности представлен этот же случай в большем масштабе. Из рисунка 5 можно заметить, что при установлении постоянного значения сигнала алгоритму необходимо некоторое время для того, чтобы значение коэффициента k_a «стабилизировалось», т.е. стало близким к нулю.

Экспоненциально взвешенное скользящее среднее с постоянным коэффициентом сглаживания достигает необходимой точности сглаживания при $k = 0,011$. На рисунке 6 показан результат работы с переменным сигналом.

α - β фильтр достигает аналогичного результата по точности сглаживания в заданных условиях при следующих значениях параметров: $\alpha = 0,04$, $\beta = 0,008$. Результат работы α - β фильтра показан на рисунке 7.



Рис. 4: Фильтрация модели сигнала акселерометра при помощи предложенного алгоритма

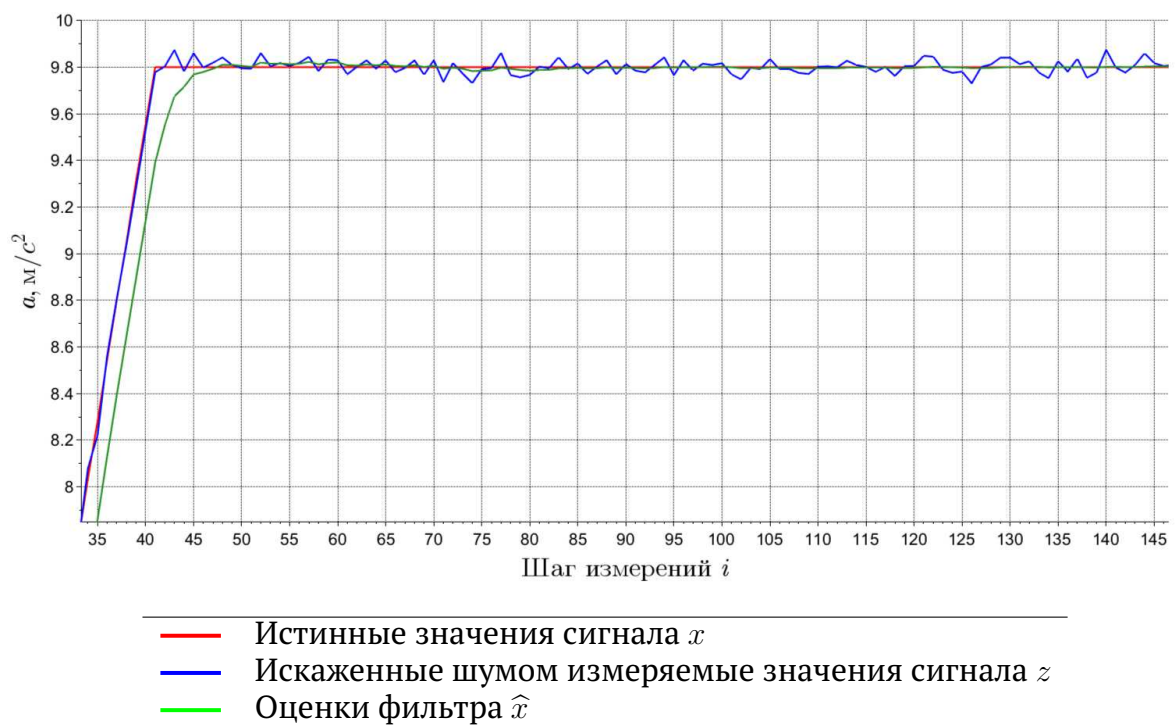


Рис. 5: Увеличенное изображение участков переходного процесса и статического состояния модели сигнала акселерометра с применением предложенного алгоритма фильтрации

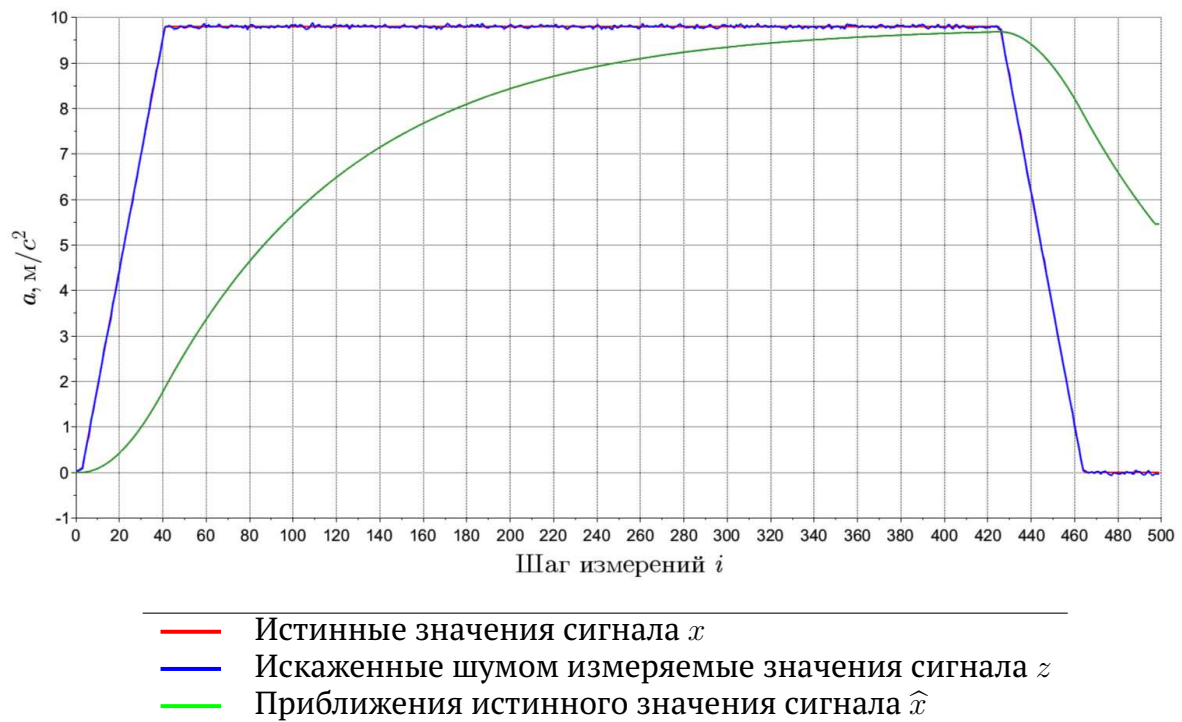


Рис. 6: Фильтрация модели сигнала акселерометра при помощи экспоненциально взвешенного скользящего среднего



Рис. 7: Фильтрация модели сигнала акселерометра при помощи α - β фильтра

4. Обсуждение результатов

На основании анализа результатов проведённых экспериментов можно сделать вывод, что в условиях приведенных тестовых сценариев предложенный алгоритм демонстрирует превосходство по скорости реакции на изменения сигнала по сравнению с аналогичными методами, рассмотренными в работе. При этом важно отметить, что такой результат достигнут при сопоставимой точности сглаживания сигнала, что свидетельствует о сбалансированном сочетании быстродействия и стабильности работы алгоритма.

Заключение

В заданных условиях, по сравнению с рассмотренными аналогами, предложенный метод обеспечивает более оперативное реагирование на быстрые изменения сигнала без ущерба для качества обработки, что можно выделить как преимущество предложенного алгоритма.

К недостатку алгоритма можно отнести то обстоятельство, что в условиях большего СКО шума (относительно приведенного) уменьшается точность сглаживания. Так, в ходе экспериментов было выяснено, что при тех же значениях параметров, но при $\sigma_{\text{ш}} = 0,3 \text{ м/с}^2$, СКО остаточного шума σ_o оказалось равным $0,05 \text{ м/с}^2$. Иными словами, в проведенных испытаниях СКО шума уменьшилось приблизительно в 20 раз, а в условиях большего СКО – приблизительно в 6 раз (что нехарактерно для рассмотренных аналогов, у которых СКО остаточного шума составляет некоторую постоянную долю от СКО изначального шума). Связано это с тем, что увеличение шума сигнала приводит к увеличению ошибки определения значения $\bar{d}_i$ в статике, и, как следствие, ошибочному увеличению значения k_a . Частично этот недостаток решается уменьшением значений коэффициентов $k_{\text{П}}$ и $k_{\text{К}}$, а также масштабированием константы C из формулы (7). Однако следует учитывать, что уменьшение значений $k_{\text{П}}$ и $k_{\text{К}}$ также увеличивает время реакции алгоритма на полезные изменения сигнала, а увеличение значения C делает алгоритм нечувствительным к малым изменениям сигнала.

Благодаря своей высокой адаптивности к резким и внезапным изменениям сигнала, предложенный алгоритм становится особенно востребованным для использования в качестве предварительного фильтра в системах определения угловой ориентации устройства. В частности, возможно его использование в комбинации со специальными алгоритмами, такими как комплементарный фильтр [14, 15] и фильтр Маджвика [16, 17, 18]. Такой комбинированный подход обеспечивает более точное и надёжное определение ориентации аппарата, что особенно важно в приложениях, где требуются высокая точность и оперативность реагирования.

В дальнейшей работе запланированы эксперименты по применению алгоритма совместно с комплементарным фильтром для предварительного сглаживания сигнала акселерометра, а также его применение к фильтрации выходного сигнала электронного компаса.

Список литературы

- [1] Турк Г.Г., Карачёв Н.К. Использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в геодезии // Вектор ГеоНаук. – 2023. – № 6 (2). – С. 56-60. – DOI: 10.24412/2619-0761-2023-2-56-60.
- [2] Зубарев Ю.Н., Фомин Д.С., Чашин А.Н., Заболотнова М.В. Использование беспилотных летательных аппаратов в сельском хозяйстве // Вестник ПФИЦ. – 2019. – № 2. – С. 47-51. – DOI: 10.7242/2658-705X/2019.2.5.
- [3] Машненко Д.В. Перспективы использования БПЛА в логистике // Инновации и инвестиции. – 2023. – № 6. – С. 168-171.
- [4] Барабанов О.Н., Наумова Е.В. Современный вооруженный конфликт: эволюция и влияние беспилотных летательных аппаратов // Россия в глобальном мире. – 2025. – Т. 28. – № 2. – С. 35-53. – DOI: 10.48612/RG/RGW.28.2.3.
- [5] Липанов И.Д., Хомоненко А.Д. Технологии и методы планирования перемещения БПЛА по маршрутным точкам // Интеллектуальные технологии на транспорте. – 2024. – № 3. – С. 30-42.
- [6] MultiWii Multi-Copter Flight Control Board. – URL: https://wiki.geeetech.com/index.php/MultiWii_Multi-Copter_Flight_Control_Board (дата обращения: 08.07.2026).
- [7] Гурлев К.В. Обзор перспектив использования полетного контроллера Pixhawk PX4 для БПЛА малого класса // Международный научный журнал «ВЕСТИК НАУКИ». – 2024. – Т. 3. – № 6 (75). – С. 1511-1514.
- [8] Голощапов А. Применение МЭМС-технологии в навигации // Датчики и компоненты. – 2014. – № 4. – С. 65-69.
- [9] Тимошенко С.П., Кульчицкий А.П. Применение МЭМС-сенсоров в системах навигации и ориентации подвижных объектов // Известия вузов. ЭЛЕКТРОНИКА. – 2012. – № 6 (98). – С. 51-55.
- [10] Exponential Filter. – URL: <https://gregstanleyandassociates.com/whitepapers/Fault-Diagnosis/Filtering/Exponential-Filter/exponential-filter.htm> (дата обращения: 22.03.2026).
- [11] Акселерометр и гироскоп MPU6050. – URL: <https://cxem.net/mc/mc324.php> (дата обращения: 22.03.2026).
- [12] Родунер Д.Д. Измерение ускорения по трем координатам с акселерометра на базе микропроцессорной системы arduino // Международный научный журнал «ВЕСТИК НАУКИ». – 2024. – Т. 3. – № 2 (71). – С. 557-562.
- [13] The Alpha-Beta Filter. – URL: <http://www.pennelynn.com/Documents/CUJ/HTML/93HTML/199301CC.HTM> (дата обращения: 22.03.2026).
- [14] Ермаков П.Г., Гоголев А.А. Программный комплекс алгоритмов автономного определения параметров угловой ориентации беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. – 2022. – № 124. – С. 1-39. – DOI: 10.34759/trd-2022-124-17.
- [15] Зо Мью Наин, Шагин А.В., Ле Винь Тханг, Хтин Линн У. Комплементарный фильтр для оценки угла с использованием микроэлектромеханической системы гироскопа и акселерометра // Инженерный вестник Дона. – 2020. – № 3.
- [16] Брич И.А. Сравнительный анализ алгоритмов фильтрации данных инерциальных датчиков // Политехнический молодежный журнал. – 2023. – № 2.
- [17] Madgwick Orientation Filter. – URL: <https://ahrs.readthedocs.io/en/latest/filters/madgwick.html> (дата обращения: 22.03.2026).
- [18] Исса М., Ахмад А. Оценка ориентации с помощью слияния инерциальных данных на основе нелинейных фильтров (Махони и Мэдджвик) // Международный научный журнал «ВЕСТИК НАУКИ». – 2024. – Т. 1. – № 11 (80). – С. 871-882.

ADAPTIVE INERTIAL MEASUREMENT PROCESSING ALGORITHM FOR HIGH-PRECISION NAVIGATION SYSTEMS OF UNMANNED OBJECTS

Kuzenkov E. A.^{1,1}, Reshetnikova I. V.^{2,2}

¹ Moscow Technical University of Communications and Informatics (MTUCI), Rostov-on-Don, Russia.

² Don State Technical University (DSTU), Rostov-on-Don, Russia.

E-mail: ¹ kuzenkov98@mail.ru, ² irina_reshetnikova@mail.ru

Abstract. The presented article describes an adaptive algorithm for processing measurements of sensors of inertial navigation systems of unmanned aerial vehicles. Its verbal and analytical descriptions are presented, as well as a comparison with existing algorithms: exponentially weighted moving average (software low-pass filter) and α - β filter. The novelty of the work lies in the development of an adaptive filter, which, unlike the well-known adaptive moving averages (for example, the Kaufman adaptive moving average), where the smoothing coefficient is determined by volatility or other statistical characteristics of the signal, uses the averaged (by means of an exponentially weighted moving average) difference of the measured signal values to dynamically adjust the filtering parameter. Additionally, automatic delay compensation is implemented through an exponentially smoothed error between the filtered and the original signal. The relevance of the work lies in the fact that the proposed algorithm ensures high accuracy of signal smoothing at a high response rate to signal changes, which is especially important for controlling maneuverable unmanned vehicles.

Keywords: *unmanned aerial vehicles (UAVs), inertial navigation systems (INS), autonomous navigation, MEMS sensors, accelerometer, signal processing, low-pass filter.*

References

- [1] Turk G.G., Karachev N.K. Ispolzovaniye bespilotnykh letatelnykh apparatov (BPLA) v geodezii (Use of unmanned aerial vehicles (UAVs) in geodesy). *Vektor GeoNauk (Vector of Geo Sciences)*, 2023, no. 6 (2), pp. 56-60. DOI: 10.24412/2619-0761-2023-2-56-60. (in Russian)
- [2] Zubarev Yu.N., Fomin D.S., Chashchin A.N., Zabolotnova M.V. Ispolzovaniye bespilotnykh letatelnykh apparatov v selskom khozyaystve (Use of unmanned aerial vehicles in agriculture). *Vestnik PFITs (Bulletin of PFIC)*, 2019, no. 2, pp. 47-51. DOI: 10.7242/2658-705X/2019.2.5. (in Russian)
- [3] Mashnenkov D.V. Perspektivy ispolzovaniya BPLA v logistike (Prospects for the use of UAVs in logistics). *Innovatsii i investitsii (Innovations and Investments)*, 2023, no. 6, pp. 168-171. (in Russian)
- [4] Barabanov O.N., Naumova E.V. Sovremennyy vooruzhennyy konflikt: evolyutsiya i vliyaniye bespilotnykh letatelnykh apparatov (Modern armed conflict: evolution and impact of unmanned aerial vehicles). *Rossiya v globalnom mire (Russia in the Global World)*, 2025, vol. 28, no. 2, pp. 35-53. DOI: 10.48612/RG/RGW.28.2.3. (in Russian)
- [5] Lipanov I.D., Khomonenko A.D. Tekhnologii i metody planirovaniya peremeshcheniya BPLA po marshrutnym tochkam (Technologies and methods for planning UAV movement along waypoints). *Intellektualnyye tekhnologii na transporte (Intelligent Technologies in Transport)*, 2024, no. 3, pp. 30-42. (in Russian)

For citation:

Kuzenkov E. A., Reshetnikova I. V. Adaptive inertial measurement processing algorithm for high-precision navigation systems of unmanned objects. *Intelligent transport*, 2026, no. 2(38), pp. 58-70. DOI: 10.24412/3033-6007-2026-238-58-70. (in Russian)

- [6] MultiWii Multi-Copter Flight Control Board. – URL: https://wiki.geeetech.com/index.php/MultiWii_Multi-Copter_Flight_Control_Board (accessed 08.07.2026). (in Russian)
- [7] Gurlev K.V. Obzor perspektiv ispolzovaniya poletnogo kontrollera Pixhawk PX4 dlya BPLA malogo klassa (Review of prospects for using the Pixhawk PX4 flight controller for small-class UAVs). *Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal «VESTNIK NAUKI»* (International Scientific Journal «Bulletin of Science»), 2024, vol. 3, no. 6 (75), pp. 1511-1514. (in Russian)
- [8] Goloshchapov A. Primeneniye MEMS-tehnologii v navigatsii (Application of MEMS technology in navigation). *Datchiki i komponenty* (Sensors and Components), 2014, no. 4, pp. 65-69. (in Russian)
- [9] Timoshenkov S.P., Kulchitskiy A.P. Primeneniye MEMS-sensorov v sistemakh navigatsii i orientatsii podvizhnykh ob'yektov (Application of MEMS sensors in navigation and orientation systems for moving objects). *Izvestiya vuzov. ELEKTRONIKA* (Proceedings of Universities. Electronics), 2012, no. 6 (98), pp. 51-55. (in Russian)
- [10] Exponential Filter. URL: <https://gregstanleyandassociates.com/whitepapers/FaultDiagnosis/Filtering/Exponential-Filter/exponential-filter.htm> (accessed 22.03.2026).
- [11] Akselerometr i giroskop MPU6050 (Accelerometer and gyroscope MPU6050). URL: <https://cxem.net/mc/mc324.php> (accessed 22.03.2026). (in Russian)
- [12] Roduner D.D. Izmereniye uskoreniya po trem koordinatam s akselerometra na baze mikroprotsessornoy sistemy arduino (Measurement of acceleration in three coordinates from an accelerometer based on the Arduino microprocessor system). *Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal «VESTNIK NAUKI»* (International Scientific Journal «Bulletin of Science»), 2024, vol. 3, no. 2 (71), pp. 557-562. (in Russian)
- [13] The Alpha-Beta Filter. URL: <http://www.pennelynn.com/Documents/CUJ/HTML/93HTML/199301CC.HTM> (accessed 22.03.2026).
- [14] Ermakov P.G., Gogolev A.A. Programmnyy kompleks algoritmov avtonomnogo opredeleniya parametrov uglovoy orientatsii bespilotnykh letatelnykh apparatov (Software complex of algorithms for autonomous determination of angular orientation parameters of unmanned aerial vehicles). *Trudy MAI* (Proceedings of MAI), 2022, no. 124, pp. 1-39. DOI: 10.34759/trd-2022-124-17. (in Russian)
- [15] Zo Myo Naing, Shagin A.V., Le Vinh Thang, Htin Lynn U. Komplementarnyy filtr dlya otsenki ugla s ispolzovaniyem mikroelektromekhanicheskoy sistemy giroskopa i akselerometra (Complementary filter for angle estimation using a microelectromechanical system gyroscope and accelerometer). *Inzhenernyy vestnik Dona* (Engineering Bulletin of the Don), 2020, no. 3. (in Russian)
- [16] Brich I.A. Sravnitelnyy analiz algoritmov filtratsii dannykh inertialnykh datchikov (Comparative analysis of filtering algorithms for inertial sensor data). *Politekhnicheskii molodezhnyy zhurnal* (Polytechnic Youth Journal), 2023, no. 2. (in Russian)
- [17] Madgwick Orientation Filter. URL: <https://ahrs.readthedocs.io/en/latest/filters/madgwick.html> (accessed 22.03.2026).
- [18] Issa M., Ahmad A. Otsenka orientatsii s pomoshchyu sliyaniya inertialnykh dannykh na osnove ne-lineynykh filtrov (Makhoni i Madzhvik) (Orientation estimation using inertial data fusion based on nonlinear filters (Mahony and Madgwick)). *Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal «VESTNIK NAUKI»* (International Scientific Journal «Bulletin of Science»), 2024, vol. 1, no. 11 (80), pp. 871-882. (in Russian)