

УДК 629.7.05:681.5.015.8:519.876.5  
DOI 10.26118/2821.2026.54.27.026

**Родионова Юлия Исуповна**

Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации им. Главного маршала авиации А.А. Новикова

**Ровейн Рихард Иосифович**

Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации им. Главного маршала авиации А.А. Новикова

**Спиридонов Владислав Юрьевич**

Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации им. Главного маршала авиации А.А. Новикова

### **Энергетически-ограниченная реализация адаптивной фильтрации в БИНС на бортовых SBC/MCU: компромисс между точностью и вычислительной стоимостью**

**Аннотация.** Рассматривается методика робастной инновационной адаптации расширенного фильтра Калмана (ЕКФ) для автономной бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС) на основе МЭМС-IMU в условиях негауссовых выбросов измерений. В MATLAB/Simulink выполняется имитационное моделирование с формированием сценариев одиночных выбросов, пакетов выбросов и смены спектральных характеристик шума IMU. Сравниваются базовая, адаптивная и робастно-адаптивные конфигурации ЕКФ с робастным взвешиванием инноваций (Huber, Tukey). Оценка выполняется по метрикам навигационной точности, NIS-согласованности, вероятности дивергенции фильтра и времени восстановления после выброса в серии Monte-Carlo экспериментов. Дополнительно вводится прикладная интерпретация результатов через снижение эксплуатационных потерь: уменьшение доли срывов оценивания и сокращение времени восстановления рассматриваются как факторы снижения стоимости повторных проходов, остановок миссии и нештатных режимов БАС. Результаты представлены в виде графиков и таблиц и используются для формирования практических рекомендаций по выбору робастной схемы и параметров настройки для типовых помеховых режимов.

**Ключевые слова:** бесплатформенная инерциальная навигационная система, БИНС, ЕКФ, расширенный фильтр Калмана, адаптация по инновациям, робастная фильтрация, Huber, Tukey, МЭМС-IMU, негауссовы выбросы, NIS, дивергенция фильтра, MATLAB/Simulink, имитационное моделирование, Monte-Carlo, эксплуатационная надёжность, экономические потери, операционные издержки, эффективность эксплуатации БАС.

**Rodionova Yulia Isupovna**

St. Petersburg State University of Civil Aviation named after A.A. Novikov

**Rovein Richard Iosifovich**

St. Petersburg State University of Civil Aviation named after A.A. Novikov

**Spiridonov Vladislav Yurievich**

St. Petersburg State University of Civil Aviation named after A.A. Novikov

### **Energy-constrained implementation of adaptive EKF for strapdown INS on board SBC/MCU: trade-off between accuracy and computational cost**

**Abstract.** The paper considers a method for implementing an adaptive extended Kalman filter (EKF) for BINS on SBC/MCU class onboard platforms under constraints on computing resources and power consumption. Simulation modeling is performed in MATLAB/Simulink with variations in filtration frequency, adaptation window, and matrix operation structure. Configurations are compared in terms of navigation accuracy, adaptation stability, and computational cost in a series of

Monte Carlo experiments. Additionally, the results are interpreted in terms of operational efficiency: an increase in computational load and energy consumption is considered as a factor increasing the requirements for onboard power and the cost of the hardware platform, and a deterioration in adaptation stability is considered as a source of potential operational losses due to degradation of navigation quality. The results are presented in graphs, tables, and Pareto analysis; based on them, practical recommendations are formed for 50, 100, and 200 Hz modes, taking into account the target platform class.

**Keywords:** Platform-free inertial navigation system, BINS, adaptive extended Kalman filter, EKF, MEMS sensors, MATLAB/Simulink, simulation modeling, Monte Carlo, computational cost, energy consumption, operational losses, economic efficiency, Pareto analysis, onboard computers, SBC, MCU.

## ВВЕДЕНИЕ

В современных бортовых навигационных модулях для беспилотных авиационных систем (далее – БАС) и робототехнических платформ ключевым ограничением становится не только точность алгоритма оценивания, но и возможность его устойчивого исполнения на целевой вычислительной платформе. Для систем класса БИНС (бесплатформенные инерциальные навигационные системы) на базе МЭМС-датчиков это ограничение особенно существенно: с одной стороны, требуется компенсация накопления ошибок и дрейфа в автономном режиме, с другой – реализация выполняется на аппаратуре с ограничениями по производительности, памяти и энергопотреблению.

В таких условиях задача проектирования фильтрации приобретает прикладной характер и должна рассматриваться как задача совместной оптимизации точности и вычислительной стоимости.

Традиционно при разработке инерциальных алгоритмов основное внимание уделяется точностным характеристикам: снижению среднеквадратической ошибки (далее – СКО или RMS), устойчивости оценивания и корректной компенсации стохастических составляющих ошибок МЭМС-датчиков. Для этой цели широко применяются расширенный фильтр Калмана (далее в работе будет упоминаться как Extended Kalman Filter или же EKF) и его адаптивные модификации, в которых параметры ковариаций модели процесса и измерений корректируются по статистике инноваций. Такой подход позволяет повысить устойчивость фильтра при изменении динамики движения, уровня вибраций и шумовой обстановки. Однако в прикладной реализации **адаптивность неизбежно увеличивает вычислительную нагрузку**: растет число матричных операций, объем буферизации статистик и доля вычислений, выполняемых на каждом шаге фильтрации.

Для бортовых платформ классов MCU/SBC (микроконтроллерный модуль или одноплатный компьютер) **указанное противоречие становится определяющим**. Повышение частоты фильтрации, увеличение окна адаптации и использование полной матричной схемы способны улучшить качество навигационного решения, формируемого БИНС, но одновременно повышают время вычисления шага, требования к памяти и энергетическую цену вычислений. В результате даже алгоритм, демонстрирующий хорошие показатели точности в численном эксперименте, может оказаться практически непригодным для реализации на целевой аппаратуре в реальном времени. Напротив, чрезмерное упрощение фильтра (редкое обновление адаптации, упрощение матричной структуры – грубая аппроксимация, сниженная точность арифметики) часто приводит к деградации точности навигационной информации и снижению устойчивости оценивания. Следовательно, **в инженерной постановке требуется не поиск «максимально точной» конфигурации, а выбор рациональной конфигурации, обеспечивающей баланс между точностью, устойчивостью и стоимостью реализации**.

Несмотря на наличие большого числа работ, посвященных БИНС и адаптивным схемам EKF, в прикладной практике сохраняется дефицит воспроизводимых методик, позволяющих выбирать параметры реализации фильтра с учетом ограничений конкретной бортовой

платформы. Как правило, настройки частоты, окна адаптации и структуры матричных операций задаются эвристически (то есть, проще говоря, исходя из опыта разработчика) или переносом параметров из совершенно другой задачи (например, из настройки фильтра для наземного робота на конфигурацию БПЛА с иной динамикой, вибрационной нагрузкой и частотой обновления датчиков). Такой подход затрудняет обоснование выбора конфигурации и не позволяет формально сравнивать альтернативные варианты реализации для разных классов вычислителей. Дополнительная сложность состоит в том, что критерии качества имеют разнонаправленный характер: уменьшение RMS не гарантирует согласованность адаптации, а снижение времени шага не гарантирует сохранение устойчивости фильтра.

**Научная проблема настоящего исследования заключается в отсутствии единой методики выбора конфигурации адаптивного ЕКФ для БИНС, которая одновременно учитывала бы три группы критериев:** навигационную точность, устойчивость адаптации и вычислительно-энергетическую стоимость реализации на бортовой платформе. Решение данной проблемы требует перехода от изолированного анализа точности фильтра к комплексной постановке, в которой алгоритм рассматривается как часть встраиваемой вычислительной системы с ограниченным ресурсным бюджетом.

Целью работы является разработка и исследование методики энергетически-ограниченной реализации адаптивного ЕКФ для БИНС на платформах классов SBC/MCU с формированием практических рекомендаций по выбору параметров алгоритма для режимов 50, 100 и 200 Гц.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи: формируется имитационная модель БИНС и параметризованная модель ошибок МЭМС-датчиков; задается семейство конфигураций адаптивного ЕКФ с различной вычислительной сложностью; вводится система метрик вычислительной стоимости и нормированной энергетической цены; проводится серия вычислительных экспериментов в среде MATLAB/Simulink с использованием Monte-Carlo подхода; выполняется построение графиков компромисса и Pareto-фронта; разрабатываются практические рекомендации по настройке фильтра для платформ классов MCU и SBC.

Научная новизна работы заключается в постановке и реализации единой методики сравнения конфигураций адаптивного ЕКФ по трем взаимосвязанным группам критериев – точности, устойчивости адаптации и вычислительно-энергетической стоимости – с последующим выбором рациональных режимов по Pareto-принципу\*, то есть по критерию многокритериальной оптимальности. Конфигурация считается Pareto-эффективной, если для неё невозможно одновременно улучшить один из рассматриваемых показателей (например, снизить вычислительную стоимость) без ухудшения другого показателя (например, точности или устойчивости). Такой подход позволяет выделить не единственное решение, а набор рациональных конфигураций, образующих компромиссную область выбора для различных классов бортовых платформ. *В отличие от работ, ориентированных преимущественно на алгоритмическую эффективность адаптации, в настоящем исследовании центральным объектом анализа является реализационно-вычислительный компромисс при сохранении требуемого качества навигационного решения.*

Практическая ценность исследования состоит в формировании воспроизводимой процедуры выбора параметров адаптивного ЕКФ для ограниченных бортовых вычислителей и в получении рекомендаций по конфигурациям фильтра для типовых частотных режимов 50, 100 и 200 Гц. *Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и настройке бортовых навигационных модулей для БПЛА и робототехнических платформ, а также при предварительной оценке реализуемости алгоритма на этапе имитационного моделирования в MATLAB/Simulink.*

## **ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ**

### **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ**

Объектом исследования является встроенная реализация адаптивного расширенного фильтра Калмана в составе бесплатформенной инерциальной навигационной системы,

ориентированной на работу на бортовых вычислителях с ограниченными ресурсами. В отличие от постановок, где фильтр рассматривается только как средство снижения навигационной ошибки, в настоящей работе он рассматривается как алгоритм реального времени, для которого равноправными критериями являются точность оценивания, устойчивость адаптации и вычислительно-энергетическая цена выполнения шага.

Исследование выполняется в среде MATLAB/Simulink как воспроизводимый имитационный эксперимент с последующим профилированием вычислительных характеристик модели. Такая постановка позволяет на одном контуре моделирования варьировать параметры алгоритма, фиксировать метрики качества навигационного решения и одновременно оценивать вычислительную нагрузку без привязки к единственной аппаратной реализации. Структура рассматриваемой задачи приведена на рис. 1: навигационный контур БИНС и адаптивный ЕКФ дополняются отдельным блоком оценки вычислительной стоимости и нормированной энергетической цены, формирующим данные для дальнейшего компромиссного анализа.

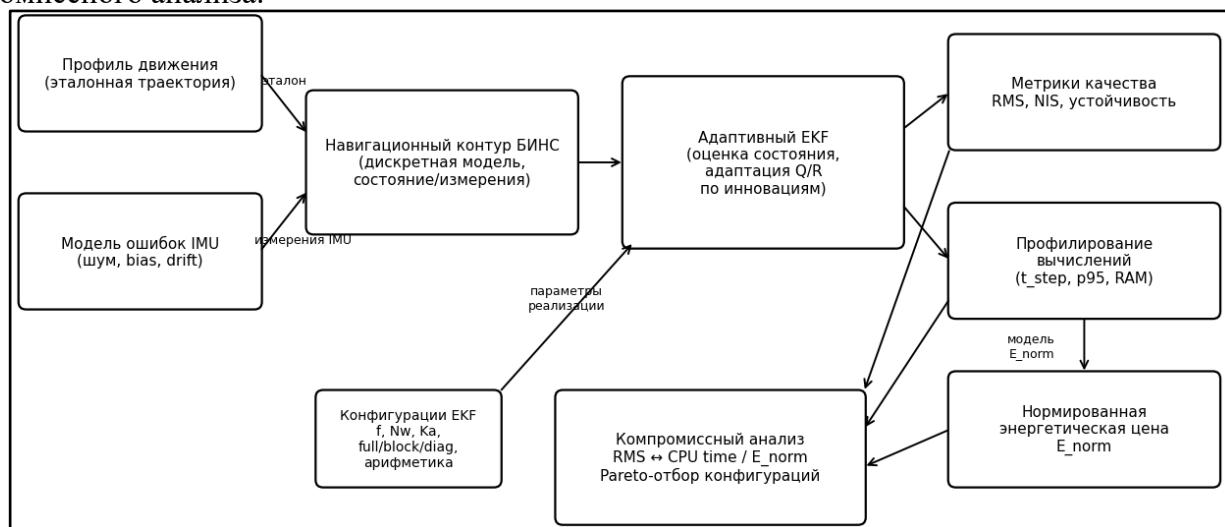


Рис. 1 – Концептуальная схема задачи: БИНС, адаптивный ЕКФ и блок оценки вычислительной/энергетической стоимости.

В качестве базовой области применимости принят режим малой и умеренной маневренности (типовой En-route-контекст), в котором критичным является не кратковременный выигрыш по точности навигации, а устойчивое качество оценки состояния на заданном временном горизонте при ограниченных вычислительных ресурсах. Внешняя коррекция по GNSS, визуальным и радиотехническим источникам в данной постановке не используется, поскольку задача статьи состоит не в сравнении интегрированных архитектур, а в исследовании внутренних настроек адаптивного ЕКФ на автономном инерциальном контуре. В принятой постановке центр анализа смещен с изолированного рассмотрения алгоритмической адаптации на реализацию выбора конфигурации адаптивного ЕКФ с учетом ограничений по времени вычисления шага, памяти и энергетической нагрузке бортовой платформы.

Для обеспечения сопоставимости результатов заранее фиксируются классы целевых платформ и рабочие частотные режимы фильтрации. В работе рассматриваются два класса бортовых вычислителей: MCU-платформа (уровень STM32H7 или эквивалент) и SBC-платформа (уровень compute module/одноплатный вычислитель). Анализ проводится для частот обновления 50, 100 и 200 Гц, поскольку именно эти режимы образуют практически значимый диапазон для навигационных контуров БИНС: нижняя граница соответствует щадящему вычислительному режиму, средняя – типовой реализации, верхняя – режиму повышенной динамической чувствительности с существенно более жесткими требованиями к времени шага.

Переменными исследования принимаются параметры, непосредственно влияющие на компромисс точность–стоимость: частота фильтрации, ширина окна адаптации, период обновления адаптации, структура матричных операций (полная, блочная, диагональная), а также тип арифметики («плавающая точка» / «сниженная точность» / «фиксированная точка»). Одновременно фиксируются ограничения по допустимому времени вычисления шага, объему используемой памяти и устойчивости работы адаптивного контура. Полный перечень варьируемых и фиксируемых параметров приведен в табл. 1; в дальнейшем именно эта таблица используется как базис для факторного плана численных экспериментов.

Отдельно вводится нормированная энергетическая «цена» вычислений. Поскольку в данной статье не используется прямое измерение потребляемой мощности (в Вт) на конкретной аппаратной плате, энергетическая составляющая определяется как расчетная прокси-метрика, связанная с временем выполнения шага, частотой обновления и относительной вычислительной сложностью конфигурации. Это ограничение принципиально фиксируется в постановке, чтобы не смешивать результаты имитационного профилирования с аппаратно-зависимыми измерениями. В таком виде метрика пригодна для сравнения конфигураций внутри единого эксперимента и последующего построения графиков RMS - CPU time и Pareto-фронта.

Таблица 1

Переменные исследования и принятые ограничения

Параметр	Обозначение	Уровни / диапазон	Ед. изм.	Статус в эксперименте	Назначение / комментарий
Частота фильтрации	$f_k$	50; 100; 200	Гц	Варьируемый фактор	Базовый фактор вычислительной интенсивности; определяет число шагов фильтра в единицу времени
Период дискретизации	$T_s$	$1/f_k$	с	Производный параметр	Используется при дискретизации модели и оценке временного бюджета шага
Длина окна адаптации	$N_w$	10–200 (дискретный набор)	отсчёты	Варьируемый фактор	Определяет объём статистики инноваций для адаптации Q/R; влияет на устойчивость и вычислительную нагрузку
Период обновления адаптации	$K_a$	1; 2; 5; 10	шагов фильтра	Варьируемый фактор	Задаёт частоту пересчёта адаптивных параметров; при $K_a=1$ адаптация выполняется на каждом шаге

Структура матриц ковариаций и/или операций	$S_m$	full / block / diag	—	Варьируемый фактор	Полная, блочно-диагональная или диагональная схема матричных операций для снижения вычислительной стоимости
Тип численного представления	$A_n$	float / reduced / fixed-point-oriented	—	Варьируемый фактор	Варианты реализации арифметики: базовая, сниженной точности, ориентированная на fixed-point
Размерность вектора состояния	$n_x$	Фиксируется по принятой модели БИНС	—	Фиксируемый параметр	Должна быть неизменной при сравнении конфигураций для корректности сопоставления
Размерность вектора измерений	$n_z$	Фиксируется по принятой модели IMU	—	Фиксируемый параметр	Обеспечивает сопоставимость вычислительной стоимости между конфигурациями
Горизонт моделирования одного прогона	$T_{sim}$	300–600 (рекомендуемо)	с	Фиксируемый параметр	Должен быть достаточным для проявления накопления ошибок и эффекта адаптации
Число Monte-Carlo прогонов	$N_{MC}$	50–200 (рекомендуемо)	—	Фиксируемый параметр (серия)	Обеспечивает статистическую устойчивость оценки RMS, NIS и вычислительных метрик
Профиль движения	$P_d$	Набор типовых профилей (En-route)	—	Варьируемый по серии	Используется для проверки чувствительности результатов к динамике движения

Модель ошибок МЭМС-датчиков	$\Theta_{IMU}$	Набор параметров шума/дрейфа (по табл. 2)	—	Варьируемы по серии	Включает шум, смещения и случайные блуждания; используется для Monte-Carlo генерации
Среднее время шага фильтра	$\bar{t}_{step}$	Вычисляется	мс	Выходная метрика	Основная метрика вычислительной стоимости; сравнивается между конфигурациями
95-й перцентиль времени шага	$t_{step}^{95}$	Вычисляется	мс	Выходная метрика	Характеризует “хвост” задержек; важен для оценки реализуемости в реальном времени
Допустимое среднее время шага	$\bar{t}_{step}^{max}$	$< \alpha T_s, \alpha = 0.5 \dots 0.7$	мс	Ограничение	Ограничение по вычислительному бюджету; доля периода дискретизации, выделяемая под фильтр
Допустимый p95 времени шага	$t_{step,95}^{max}$	$< \beta T_s, \beta = 0.8 \dots 0.9$	мс	Ограничение	Условие устойчивого real-time выполнения без систематических пропусков шага
Объем используемой оперативной памяти	$M_{RAM}$	Вычисляется / оценивается	КБ / МБ	Выходная метрика	Учитывает состояние, ковариации, буферы окна адаптации и служебные структуры
Допустимый объем памяти (MCU/SBC)	$M_{RAM}^{max}$	Задается по классу платформы	КБ / МБ	Ограничение	Используется для отсеечения конфигураций, не реализуемых на заданном классе платформы
RMS ошибки положения	$RMS_{pos}$	Вычисляется	м	Выходная метрика	Основная метрика навигационной точности

RMS ошибки скорости	$RMS_{vel}$	Вычисляет ся	м/с	Выходная метрика	Дополните льная метрика качества оценивания
RMS ошибки ориентации	$RMS_{att}$	Вычисляет ся	град д	Выходная метрика	Метрика точности оценки ориентации
Крите рий согласованн ости NIS	NIS	Вычисляет ся	—	Выходная метрика	Используй ется для контроля корректности адаптации и согласованности фильтра
Доля насыщений адаптации	$p_{sat}$	Вычисляет ся	%	Выходная метрика	Характериз ует устойчивость адаптивного контура и частоту выхода на ограничения
Норм ированная вычислитель ная стоимость	$C_{norm}$	Вычисляет ся (0...1 или отн. ед.)	от н. ед.	Интегральна я метрика	Формирует ся на основе времени шага, памяти и/или числа операций; используется в сравнении конфигураций
Норм ированная энергетичес кая цена	$E_{norm}$	Вычисляет ся (отн. модель)	от н. ед.	Интегральна я метрика	Прокси -метрика, рассчитываемая по профилированию вычислений; используется для компромиссного анализа
Крите рий Pareto- отбора	$\mathcal{P}$	По множеству метрик (RMS,NIS, $C_{norm}$ / $E_{norm}$ )	—	Процедура отбора	Выделение рациональных конфигураций без доминирования по совокупности критериев

В табл. 1 переменные разделены на варьируемые факторы, фиксируемые параметры, выходные метрики и ограничения, что обеспечивает корректное построение факторного плана эксперимента и последующее многокритериальное сравнение конфигураций адаптивного ЕKF.

#### *Математическая модель БИНС и модель ошибок МЭМС-датчиков*

В данном исследовании используется дискретная имитационная модель бесплатформенной инерциальной навигационной системы, ориентированная на воспроизводимое сравнение конфигураций адаптивного ЕKF в среде MATLAB/Simulink. Модель построена в минимально достаточной постановке: она сохраняет ключевые источники

навигационной ошибки МЭМС-датчиков и динамику их накопления, но не перегружается второстепенными эффектами, не влияющими на решаемую задачу выбора конфигурации фильтра.

Состояние системы задается вектором

$$x_k = [r_k^T \ v_k^T \ \theta_k^T \ b_{a,k}^T \ b_{g,k}^T]^T$$

где  $r_k = [x_k, y_k, z_k]^T$  – положение,  $v_k = [v_{x,k}, v_{y,k}, v_{z,k}]^T$  – скорость,  $\theta_k$  – вектор параметров ориентации (в модели допускается использование углов Эйлера или эквивалентной параметризации),  $b_{a,k}$  – смещения акселерометров,  $b_{g,k}$  – смещения гироскопов. IMU – Inertial Measurement Unit, инерциальный измерительный модуль. Такая структура вектора состояния достаточна для анализа влияния параметров адаптивной фильтрации на точность оценки положения, скорости и ориентации, а также на устойчивость компенсации смещений датчиков.

Дискретная модель движения записывается в общем виде как

$$x_{k+1} = f!(x_k, u_k) + w_k$$

где  $u_k$  – входной вектор инерциальных измерений (удельные силы и угловые скорости),  $f(\cdot)$  – нелинейный оператор перехода состояния за шаг дискретизации  $T_s$ ,  $w_k \sim \mathcal{N}(0, Q_k)$  – шум процесса. В рамках имитационной модели  $f(\cdot)$  реализуется в дискретном виде с шагом  $T_s = 1/f_k$ , где  $f_k$  принимает значения 50, 100 или 200 Гц в соответствии с планом эксперимента (см. табл. 1).

Для воспроизводимости дальнейших расчетов используется стандартная кинематическая структура БИНС: положение обновляется интегрированием скорости, скорость – интегрированием удельной силы с учетом ориентации и гравитационного ускорения, а ориентация – интегрированием угловой скорости. В компактной форме это может быть представлено как

$$\begin{aligned} r_{k+1} &= r_k + v_k T_s \\ v_{k+1} &= v_k + (C_b^n(\theta_k) a_{m,k}^b - g^n) T_s \\ \theta_{k+1} &= \theta_k + G(\theta_k) \omega_{m,k}^b T_s \end{aligned}$$

где  $C_b^n$  – матрица перехода из связанной системы координат в навигационную,  $g^n$  – вектор ускорения свободного падения в навигационной (n) системе координат,  $G(\theta_k)$  – матрица кинематических коэффициентов выбранной параметризации ориентации,  $a_{m,k}^b$  и  $\omega_{m,k}^b$  – измеренные акселерометрами и гироскопами величины.

Модель измерений IMU в дискретном виде задается соотношениями

$$\begin{aligned} a_{m,k}^b &= a_k^b + b_{a,k} + n_{a,k} + d_{a,k} \\ \omega_{m,k}^b &= \omega_k^b + b_{g,k} + n_{g,k} + d_{g,k} \end{aligned}$$

где  $a_k^b$  и  $\omega_k^b$  – истинные (модельные) значения удельной силы и угловой скорости,  $n_{a,k}$ ,  $n_{g,k}$  – белые шумы измерений,  $b_{a,k}$ ,  $b_{g,k}$  – смещения датчиков,  $d_{a,k}$ ,  $d_{g,k}$  – медленная дрейфовая составляющая (включается в расширенных сериях экспериментов как отдельный фактор чувствительности). Указанная запись разделяет быстрые и медленные компоненты ошибок и позволяет параметризовать их независимо при генерации Monte-Carlo реализаций.

Белый шум датчиков моделируется как гауссовская последовательность с нулевым математическим ожиданием:

$$n_{a,k} \sim \mathcal{N}(0, \sigma_a^{2l}), n_{g,k} \sim \mathcal{N}(0, \sigma_g^{2l})$$

где  $\sigma_a$  и  $\sigma_g$  – среднеквадратические уровни шумов акселерометров и гироскопов. Эти параметры относятся к варьируемым параметрам модели IMU и задаются в соответствии с диапазонами, приведенными в табл. 2.

Таблица 2

Параметры модели IMU и диапазоны варьирования

Параметр	Диапазон / уровни	Ед. изм.	Статус	Примечание
----------	-------------------	----------	--------	------------

СКО шума акселерометров	0,01– 0,10	м/с <sup>2</sup>	Варьируемый	Белый шум измерений акселерометра
СКО шума гироскопов	0,05– 0,50	град/с	Варьируемый	Белый шум измерений гироскопа
Начальное смещение акселерометров	0,02– 0,30	м/с <sup>2</sup>	Варьируемый	Начальный bias по осям (по сценарию)
Начальное смещение гироскопов	0,05– 1,00	град/с	Варьируемый	Начальный bias по осям (по сценарию)
Интенсивность случайного блуждания bias акселерометров	$10^{-6} - 10^{-4}$	аг (м/с <sup>2</sup> ) <sup>2</sup> /ш	Варьируемый	Для модели $b_{a,k+1} = b_{a,k} + \eta_{a,k}$
Интенсивность случайного блуждания bias гироскопов	$10^{-6} - 10^{-4}$	шаг (град/с) <sup>2</sup> /ш	Варьируемый	Для модели $b_{g,k+1} = b_{g,k} + \eta_{g,k}$
Скорость медленного дрейфа акселерометров*	$0 - 5 \cdot 10^{-4}$	м/с <sup>3</sup>	Опционально	Включается в сериях чувствительности
Скорость медленного дрейфа гироскопов*	$0 - 5 \cdot 10^{-3}$	град/с <sup>2</sup>	Опционально	Включается в сериях чувствительности
Частота фильтрации	50; 100; 200	Гц	Фиксированный уровень серии	По плану эксперимента
Длительность одного прогона	300– 600	с	Фиксируемый	Должна обеспечивать проявление накопления ошибок
Число Monte-Carlo прогонов	50– 100	—	Фиксируемый	Для устойчивой статистики метрик

Смещения датчиков описываются как случайные процессы с медленно меняющейся компонентой. В базовой постановке используется модель случайного блуждания смещений:

$$b_{a,k+1} = b_{a,k} + \eta_{a,k}, b_{g,k+1} = b_{g,k} + \eta_{g,k}$$

$$\eta_{a,k} \sim \mathcal{N}(0, q_{ba}), \eta_{g,k} \sim \mathcal{N}(0, q_{bg})$$

где  $q_{ba}$  и  $q_{bg}$  – интенсивности случайного блуждания смещений. Такая модель обеспечивает воспроизведение накопительного характера ошибки БИНС и одновременно допускает корректную работу адаптивной подстройки ковариаций в ЕКФ.

В расширенной серии расчетов допускается включение медленного детерминированного дрейфа, моделируемого линейным или кусочно-линейным законом:

$$d_{a,k+1} = d_{a,k} + \dot{d}_a T_s; d_{g,k+1} = d_{g,k} + \dot{d}_g T_s$$

где  $\mathbf{d}_a, \mathbf{d}_g$  – малые скорости дрейфа. Данный компонент не является обязательным для всех серий эксперимента и используется как фактор чувствительности при анализе устойчивости конфигураций фильтра к медленному смещению статистики ошибок.

Для обеспечения сопоставимости результатов параметры модели разделяются на *фиксируемые* и *варьируемые*. К *фиксируемым* относятся размерность вектора состояния, структура кинематической модели, выбранная система координат и набор выходных переменных для оценки точности. К *варьируемым* относятся шумовые параметры МЭМС-датчиков, интенсивности случайного блуждания смещений и (при необходимости) параметры медленного дрейфа. Это разделение позволяет исследовать влияние конфигурации фильтра отдельно от влияния структуры самой навигационной модели.

Практическая реализация модели в MATLAB/Simulink выполнена в виде последовательности функциональных блоков: генератор эталонной траектории, блок формирования истинных инерциальных сигналов, блок модели ошибок IMU, блок адаптивного ЕКФ и блок вычисления метрик качества и вычислительной стоимости. Такая структура обеспечивает единообразную процедуру запуска Monte-Carlo серий и последующего агрегирования результатов.

Параметры модели IMU, используемые в вычислительных экспериментах, а также диапазоны их варьирования по сериям Monte-Carlo сведены в табл. 2. В дальнейшем эти параметры используются при формировании набора сценариев, на котором оценивается устойчивость компромиссных конфигураций адаптивного ЕКФ.

#### *Адаптивный ЕКФ и варианты облегченной реализации*

В данном разделе задается семейство сравниваемых конфигураций адаптивного расширенного фильтра Калмана, используемых в составе БИНС в условиях ограниченных вычислительных ресурсов. Базой сравнения является опорная конфигурация ЕКФ с полной матричной схемой и обновлением адаптивных параметров на каждом шаге. Относительно этой конфигурации далее рассматриваются варианты облегченной реализации, различающиеся частотой фильтрации, длиной окна адаптации, периодом обновления адаптации, структурой матричных операций и типом численного представления.

В качестве базовой логики адаптивного ЕКФ используется подстройка ковариаций модели процесса и/или измерений по статистике инноваций. На каждом шаге формируется вектор инновации

$$v_k = z_k - \widehat{z}_k$$

где  $z_k$  – вектор измерений,  $\widehat{z}_k$  – прогноз измерений, вычисленный по текущей оценке состояния. Для уменьшения влияния единичных выбросов адаптация выполняется не по одиночной инновации, а по окну из  $N_w$  последних значений. Длина окна  $N_w$  входит в число варьируемых параметров и определяет компромисс между чувствительностью адаптации и устойчивостью оценок: малые значения окна быстрее реагируют на изменение статистики, но увеличивают разброс адаптивных коэффициентов; большие значения окна сглаживают подстройку, но повышают инерционность и увеличивают объём вычислений.

Отдельно вводится период обновления адаптации  $K_a$ , задающий, как часто пересчитываются адаптивные параметры. При  $K_a = 1$  подстройка выполняется на каждом шаге фильтра, при  $K_a > 1$  – один раз в несколько шагов. Такой параметр используется как прямой инструмент снижения вычислительной нагрузки: при сохранении основной частоты ЕКФ уменьшается число операций, связанных с анализом статистики инноваций и пересчетом ковариаций. В дальнейшем влияние  $K_a$  оценивается совместно с частотой фильтрации и длиной окна адаптации.

Для исследования вычислительно-алгоритмического компромисса рассматриваются три варианта матричной структуры. В конфигурации **full** используется полная матричная схема без структурных упрощений, что обеспечивает опорный уровень точности и наибольшую вычислительную нагрузку. В конфигурации **block-diagonal** матричные операции выполняются в блочно-диагональном виде, что снижает вычислительную стоимость за счет частичного исключения межкомпонентных связей. В конфигурации **diagonal** используется

диагональное представление для части ковариационных и вспомогательных матриц, что дает максимальное упрощение вычислений, но потенциально ухудшает точность и согласованность оценивания. Указанные варианты задают контролируемый уровень огрубления матричной схемы и позволяют количественно оценить, насколько допустимо упрощение структуры при заданных ограничениях платформы.

В качестве дополнительного фактора сравнения вводится тип численного представления. В базовом варианте используется реализация с плавающей точкой (**float**). В облегченных вариантах рассматриваются режимы **reduced precision** (пониженная численная точность по сравнению с базовым вариантом) и **fixed-point** (реализация с фиксированной точкой или fixed-point-ориентированная настройка вычислений). Этот фактор включен в экспериментальную постановку как аппаратно значимый: для MCU-платформ снижение разрядности и переход к фиксированной точке могут существенно уменьшать время шага и требования к памяти, однако влияют на численную устойчивость и точность фильтра.

Важным элементом методики являются ограничения на адаптацию, предотвращающие неустойчивую работу фильтра. В реализации вводятся нижние и верхние границы для изменяемых параметров ковариаций, а также контроль насыщения адаптивных коэффициентов. **Если очередная коррекция приводит к выходу параметра за допустимый диапазон, значение принудительно ограничивается.**

С практической точки зрения рассматриваемая схема сравнения устроена следующим образом. Для каждого частотного режима (50, 100, 200 Гц) задается набор конфигураций, отличающихся длиной окна  $N_w$ , периодом обновления  $K_a$ , структурой матриц и типом численного представления. Каждая конфигурация затем прогоняется в единой имитационной постановке MATLAB/Simulink, после чего для нее рассчитываются метрики точности, согласованности адаптации и вычислительной стоимости. Такой подход обеспечивает прямую сопоставимость результатов и позволяет выделять рациональные конфигурации не по одному показателю, а по совокупности критериев.

Полный перечень исследуемых конфигураций адаптивного ЕKF, используемых в вычислительных экспериментах, приведен в табл. 3. В таблице фиксируются идентификаторы конфигураций, частота фильтрации, длина окна адаптации, период обновления адаптации, тип матричной структуры и тип численного представления.

Таблица 3

Исследуемые конфигурации адаптивного ЕKF

ИД конфигурации	Частота $f_k$ , Гц	Окно адаптации и $N_w$ , отсч.	Период обновления $K_a$ , шагов	Структура матриц	Тип численного представления
C1	50	20	1	full	float
C2	50	50	1	full	float
C3	50	50	5	full	float
C4	50	50	5	block	float
C5	50	100	10	diag	reduced precision
C6	100	20	1	full	float
C7	100	50	1	full	float
C8	100	50	5	block	float
C9	100	100	5	block	reduced precision
C10	100	100	10	diag	reduced precision
C11	200	20	1	full	float

C12	200	50	2	full	float
C13	200	50	5	block	float
C14	200	100	5	block	reduce d precision
C15	200	100	10	diag	fixed- point

Состав таблицы обеспечивает сопоставление влияния частоты фильтрации, параметров адаптации и численного представления на точность, устойчивость и вычислительную стоимость.

#### План имитационного эксперимента в MATLAB/Simulink

Имитационный эксперимент выполняется в MATLAB/Simulink в факторной постановке. Для каждой конфигурации адаптивного EKF из табл. 3 проводится серия запусков на фиксированном наборе профилей движения и шумовых реализаций IMU. Такой подход обеспечивает статистически корректное сравнение конфигураций по метрикам точности, устойчивости адаптации и вычислительной стоимости.

В эксперимент включаются три типовых профиля движения, различающихся характером изменения скорости и курса: *профиль с малыми возмущениями, профиль с выраженными участками манёвра и профиль с повышенной динамической изменчивостью*. Их иллюстративное представление приведено на рис. 2.

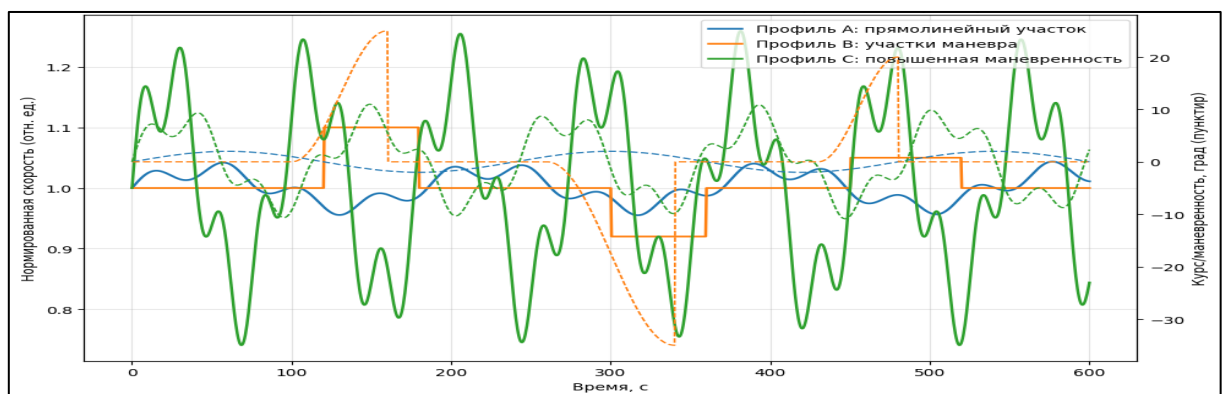


Рис. 2 – Профили движения для моделирования.

План эксперимента формируется как декартово произведение факторов: частота фильтрации  $f_k \in \{50, 100, 200\}$  Гц, длина окна адаптации  $N_w$ , период обновления адаптации  $K_a$ , структура матриц (full / block / diag) и тип численного представления (float / reduced precision / fixed-point). Для каждого сочетания параметров выполняется одинаковое число Monte-Carlo прогонов  $N_{MC}$ , заданное в табл. 2.

Шумовые реализации IMU генерируются в воспроизводимом режиме: используется фиксированный набор значений, одинаковый для всех конфигураций EKF. Это позволяет сравнивать конфигурации на одной и той же выборке возмущений. В логах каждого запуска сохраняются: ID конфигурации, ID профиля движения, шум, параметры модели IMU, метрики точности ( $RMS_{pos}$ ,  $RMS_{vel}$ ,  $RMS_{att}$ ), показатели согласованности (NIS, доля насыщений адаптации), а также вычислительные метрики.

Вычислительный этап организован как пакетный цикл с автоматическим сбором результатов: *запуск модели* → *расчет метрик* → *запись результата* → *переход к следующей конфигурации/реализации*. После завершения серии выполняется агрегирование по каждой конфигурации (средние значения, 95-й перцентиль, доля насыщений), и формируется итоговая таблица для последующего компромиссного анализа.

Профилирование вычислений проводится в MATLAB/Simulink для каждой конфигурации и каждого частотного режима. Фиксируются среднее время шага, 95-й

перцентиль времени шага и оценка используемой памяти. На основе этих данных далее рассчитываются нормированная вычислительная стоимость и нормированная энергетическая «стоимость».

#### Метрики качества и критерии сравнения

Сравнение конфигураций адаптивного ЕКФ выполняется по трём группам показателей: точность навигационного решения, устойчивость адаптации и вычислительная стоимость. Такое разделение необходимо для корректной постановки задачи выбора конфигурации, поскольку минимизация только навигационной ошибки не гарантирует реализуемости алгоритма на целевой бортовой платформе.

Первая группа включает метрики точности. В качестве основных используются среднеквадратические ошибки оценки положения, скорости и ориентации:

$$RMS_{pos} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |\hat{r}_k - r_k|^2}$$

$$RMS_{vel} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |\hat{v}_k - v_k|^2}$$

$$RMS_{att} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |\hat{\theta}_k - \theta_k|^2}$$

Здесь  $r_k, v_k, \theta_k$  – эталонные значения,  $\hat{r}_k, \hat{v}_k, \hat{\theta}_k$  – оценки фильтра,  $N$  – число отсчетов в прогоне. Для анализа чувствительности к редким выбросам дополнительно используется 95-й перцентиль ошибки положения  $P95_{pos}$  (по аналогии при необходимости – для скорости и ориентации).

Вторая группа характеризует устойчивость адаптивного контура. Основной показатель — критерий согласованности фильтра NIS (Normalized Innovation Squared):

$$NIS_k = v_k^T S_k^{-1} v_k$$

где  $v_k$  – вектор инновации,  $S_k$  – ковариация инновации. В расчетах используется как временной ряд  $NIS_k$ , так и агрегированные характеристики (среднее значение и доля выходов за допустимый диапазон). Дополнительно оценивается дисперсия нормированной инновации, которая показывает стабильность статистики адаптации: рост дисперсии указывает на переусиленную или неустойчивую подстройку параметров. Отдельно вводится доля насыщенных параметров адаптации  $p_{sat}$ , определяемая как отношение числа срабатываний ограничений адаптации к общему числу шагов пересчёта. Этот показатель позволяет выявлять конфигурации, в которых фильтр формально работает, но значительную часть времени находится в режиме принудительных ограничений.

Третья группа метрик описывает вычислительную стоимость реализации. Для каждой конфигурации и частоты фильтрации фиксируются среднее время вычисления шага  $\bar{t}_{step}$ , 95-й перцентиль времени шага  $t_{step}^{95}$  и оценка объема используемой памяти  $M_{RAM}$ . Среднее время шага характеризует типовую вычислительную нагрузку, а 95-й перцентиль – риск превышения допустимого временного бюджета в реальном времени. Метрика памяти используется как ограничение реализуемости для классов MCU/SBC и одновременно как компонент интегральной оценки вычислительной стоимости.

Для сопоставления конфигураций в единой шкале вводятся нормированная вычислительная стоимость  $C_{norm}$  и нормированная энергетическая цена  $E_{norm}$ . Первая формируется на основе времени шага и памяти, вторая – как расчетная прокси-метрика, связанная с частотой обновления и вычислительной нагрузкой. В данной работе  $E_{norm}$  используется как относительный показатель для ранжирования конфигураций в рамках одного

экспериментального контура, без привязки к конкретной аппаратной плате и прямым измерениям мощности.

Итоговое сравнение конфигураций выполняется не по одному показателю, а по совокупности метрик. Для этого используется Pareto-принцип: конфигурация считается рациональной, если не существует другой конфигурации, которая одновременно лучше по всем ключевым критериям (точность, устойчивость, вычислительная стоимость). Проще говоря, Pareto-фронт – это набор «лучших компромиссов», где улучшение одного показателя требует ухудшения хотя бы одного другого. Такой подход соответствует практической задаче проектирования, в которой невозможно одновременно получить минимальную ошибку, минимальное время шага и минимальную энергетическую цену.

Состав используемых метрик точности и устойчивости, их обозначения и интерпретация приведены в табл. 4.

Таблица 4

Метрики точности и устойчивости адаптивного ЕКФ

Группа	Метрика	Обозначение	Формула (краткая запись)
Точность	RMS ошибки положения	$RMS_{pos}$	$\sqrt{\frac{1}{N} \sum  \hat{r}_k - r_k ^2}$
Точность	RMS ошибки скорости	$RMS_{vel}$	$\sqrt{\frac{1}{N} \sum  \hat{v}_k - v_k ^2}$
Точность	RMS ошибки ориентации	$RMS_{att}$	$\sqrt{\frac{1}{N} \sum  \hat{\theta}_k - \theta_k ^2}$
Точность	95-й перцентиль ошибки положения	$P95_{pos}$	$Q_{0.95}( \hat{r}_k - r_k )$
Устойчивость адаптации	NIS (на шаге)	$NIS_k$	$v_k^T S_k^{-1} v_k$
Устойчивость адаптации	Среднее NIS	$\overline{NIS}$	$\frac{1}{N} \sum NIS_k$
Устойчивость адаптации	Дисперсия нормированной инновации	$Var(\tilde{v})$	$Var(S_k^{-1/2} v_k)$
Устойчивость адаптации	Доля выходов NIS за допустимый диапазон	$p_{NIS,out}$	$\frac{N_{out}}{N} \cdot 100\%$
Устойчивость адаптации	Доля насыщений	$p_{sat}$	$\frac{N_{sat}}{N_{upd}} \cdot 100\%$

	параметров адаптации		
Устойчивость адаптации	Максимальная длительность серии насыщений	$L_{sat}^{max}$	max(длина подряд идущих насыщений)

### Результаты моделирования навигационной точности

По результатам серии имитационных экспериментов установлено, что рост частоты фильтрации с 50 до 100 Гц дает выраженное снижение ошибок оценки положения, скорости и ориентации для всех матричных схем. Переход от 100 к 200 Гц также улучшает точность, однако эффект становится менее линейным: для части конфигураций наблюдается режим насыщения, при котором прирост точности уже существенно меньше прироста вычислительной нагрузки.

Наиболее устойчивые результаты по точности показали конфигурации с полной матричной схемой и плавающей точкой (C7, C11, C12), что ожидаемо для опорного класса реализаций. При этом увеличение окна адаптации с  $N_w = 20$  до  $N_w = 50$  в большинстве случаев улучшает  $RMS_{pos}$  и  $P95_{pos}$ , поскольку снижает чувствительность адаптации к локальным выбросам инноваций. Дальнейшее увеличение окна до  $N_w = 100$  не дает сопоставимого выигрыша по точности и в ряде конфигураций приводит к росту инерционности адаптации.

Упрощение матричной структуры с full до block-diagonal сопровождается умеренным ухудшением точности, которое в диапазоне 100–200 Гц остается приемлемым для компромиссных конфигураций. Переход к диагональной схеме дает более заметный рост ошибок; это видно как по интегральным метрикам, так и по временным реализациям ошибки положения. Для конфигурации C5 на временной реализации наблюдается накопительный рост ошибки и увеличение разброса к концу интервала моделирования; аналогичная тенденция по интегральным метрикам фиксируется и для конфигурации C15.

Характерные временные реализации ошибки положения для трех репрезентативных конфигураций приведены на рис. 3.

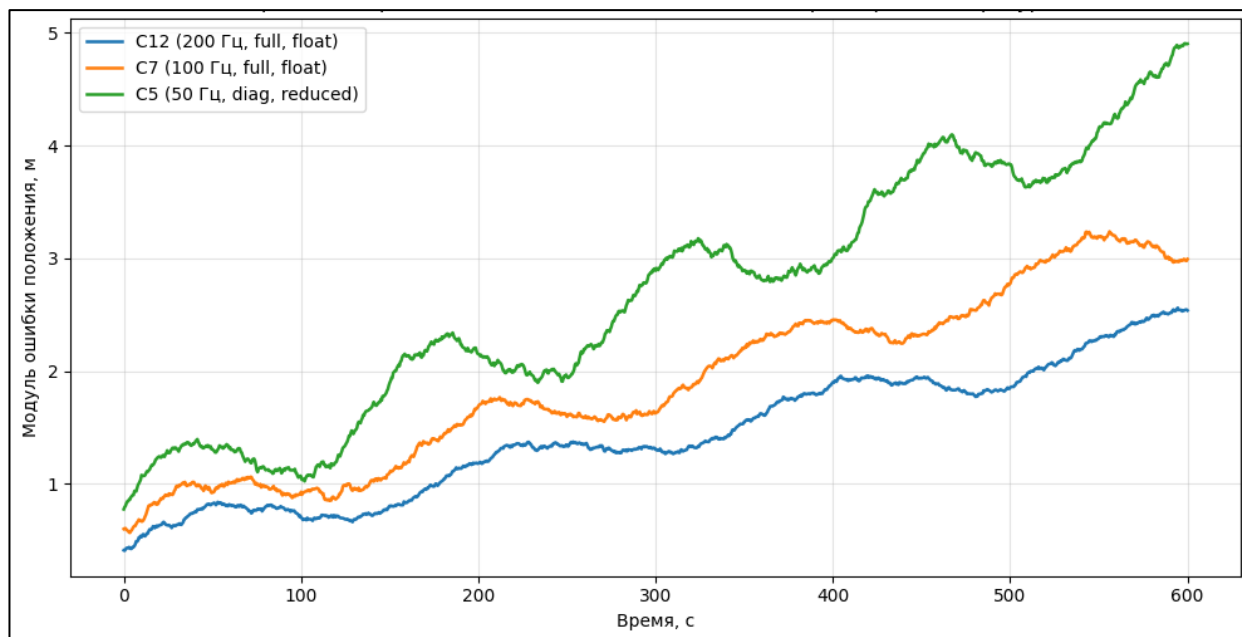


Рис. 3 – Временные реализации ошибки положения для характерных конфигураций ЕКФ.

Конфигурация C12 (200 Гц, full, float) демонстрирует наименьший уровень накопления ошибки, C7 (100 Гц, full, float) занимает промежуточное положение, а C5 (50 Гц, diag, reduced

precision) показывает наибольшую амплитуду и более выраженный дрейф. Это подтверждает, что основной вклад в деградацию точности вносит не только снижение частоты, но и совмещение нескольких упрощающих факторов – редкого обновления адаптации, диагональной структуры и пониженной численной точности.

Сводные результаты по метрикам точности представлены в табл. 6. Для дальнейшего компромиссного анализа целесообразно рассматривать в качестве «кандидатов» конфигурации C8, C9, C13 и C14 как промежуточные варианты между опорными full/float и предельно облегченными diag-конфигурациями.

Таблица 5

Сводные результаты моделирования навигационной точности для исследуемых конфигураций адаптивного ЕКФ

D	, Гц	$N_w$	$K_a$	М атрицы	Ч исл. предста вление	$R_L$ , м	$R_L$ , м/с	$R_L$ , град	$R_L$ , м
1	0	0		fu ll	fl oat	4 .60	0 .62	1 .90	7 .80
2	0	0		fu ll	fl oat	4 .15	0 .56	1 .72	6 .95
3	0	0		fu ll	fl oat	4 .28	0 .58	1 .78	7 .15
4	0	0		bl ock	fl oat	4 .40	0 .60	1 .83	7 .34
5	0	00	0	di ag	r educed precisio n	5 .05	0 .69	2 .15	8 .90
6	00	0		fu ll	fl oat	3 .75	0 .51	1 .55	6 .20
7	00	0		fu ll	fl oat	3 .35	0 .46	1 .40	5 .55
8	00	0		bl ock	fl oat	3 .55	0 .48	1 .47	5 .82
9	00	00		bl ock	r educed precisio n	3 .72	0 .50	1 .58	6 .05
10	00	00	0	di ag	r educed precisio n	4 .22	0 .58	1 .82	7 .10
11	00	0		fu ll	fl oat	3 .10	0 .42	1 .28	5 .05
12	00	0		fu ll	fl oat	2 .82	0 .39	1 .16	4 .62
13	00	0		bl ock	fl oat	3 .00	0 .41	1 .24	4 .90
14	00	00		bl ock	r educed	3 .18	0 .44	1 .34	5 .24

					precisio n				
15	00	00	0	di ag	fi xed- point	3 .78	0 .53	1 .66	6 .35

*Результаты оценки вычислительной стоимости*

Результаты профилирования показывают, что вычислительная стоимость исследуемых конфигураций определяется сочетанием трех факторов: частоты фильтрации, структуры матриц и типа численного представления. Наибольший рост времени вычисления шага наблюдается при переходе к частоте 200 Гц в конфигурациях с полной матричной схемой (C11, C12). Переход к block- и diag-структурам, а также использование reduced precision / fixed-point, приводит к систематическому снижению как среднего времени шага, так и 95-го перцентиля.

Для конфигураций full/float фиксируется ожидаемая зависимость: при увеличении частоты 50 → 100 → 200 Гц вычислительная нагрузка возрастает почти монотонно. Наиболее затратной является конфигурация C12 (200 Гц, full, float,  $N_w = 50$ ): именно она имеет максимальные значения  $\bar{t}_{step}$  и  $t_{step}^{95}$ , что связано с одновременным влиянием высокой частоты и более ресурсоемкой адаптации. В диапазоне 100 Гц конфигурации full/float остаются вычислительно реализуемыми, однако запас по времени шага уменьшается, особенно по метрике  $t_{step}^{95}$ .

Упрощение матричной структуры с full до block дает устойчивое снижение вычислительной стоимости без резкого ухудшения точности (см. табл. 5). На практике это наиболее заметно для конфигураций C8, C9, C13 и C14, которые занимают промежуточное положение между опорными full/float и предельно облегченными diag-конфигурациями. Переход к diag в сочетании с reduced precision или fixed-point дополнительно уменьшает время шага и потребление памяти; наибольший эффект по вычислительной стоимости наблюдается для C5, C10 и C15.

Проверка условия работы в реальном времени выполняется по критерию

$$t_{step}^{95} \leq T_s, \quad T_s = \frac{1}{f_k}$$

где  $T_s$  – период дискретизации фильтра. Для 50 Гц ( $T_s=20$  мс) и 100 Гц ( $T_s=10$  мс) все исследованные конфигурации удовлетворяют этому условию по метрике  $t_{step}^{95}$ . Для 200 Гц ( $T_s = 5$ мс) все конфигурации группы C11–C15 превышают допустимый предел по 95-му перцентилю, то есть в текущей постановке не обеспечивают устойчивую работу в реальном времени на MCU-классе без дополнительной оптимизации. Конфигурация C15 является наименее затратной в группе 200 Гц и ближайшей к границе real-time, однако также не проходит по условию  $t_{step}^{95} \leq 5$  мс.

По объему памяти наиболее затратными остаются full/float-конфигурации, тогда как block/diag и reduced/fixed-point уменьшают потребление RAM. Для MCU-платформ это имеет самостоятельное значение, поскольку ограничение по памяти может быть критичным даже при формальном выполнении временного ограничения. Введенные нормированные показатели  $C_{norm}$  и  $E_{norm}$  позволяют привести вычислительные характеристики к единой шкале и использовать их далее в компромиссном анализе и построении Pareto-фронта.

Сводные результаты оценки вычислительной стоимости приведены в табл. 6, а динамика  $\bar{t}_{step}$ ,  $t_{step}^{95}$  и предельного периода дискретизации – на рис. 4.

Таблица 6

Сводные результаты вычислительной стоимости

D	, Гц	$N_w$	$K_a$	M атриц ы	Числ. представлен ие	$\bar{t}_s$ , мс	$t_{step}^{95}$ , мс	RA , кБ	$C_{norm}$	$E_{norm}$	R eal-time (MCU)
1	0	0		f ull	float	4 .8	5. 6	2 20	1 .76	1 .78	д а
2	0	0		f ull	float	5 .4	6. 4	2 40	1 .96	2 .00	д а
3	0	0		f ull	float	4 .6	5. 4	2 36	1 .75	1 .70	д а
4	0	0		b lock	float	3 .9	4. 6	1 98	1 .50	1 .44	д а
5	0	0 0	0	d iag	reduced precision	2 .7	3. 2	1 42	1 .09	1 .00	д а
6	00	0		f ull	float	6 .9	8. 2	2 24	2 .31	5 .11	д а
7	00	0		f ull	float	7 .8	9. 4	2 44	2 .61	5 .78	д а
8	00	0		b lock	float	5 .6	6. 7	2 02	1 .96	4 .15	д а
9	00	0 0		b lock	reduced precision	4 .8	5. 8	1 76	1 .68	3 .56	д а
10	00	0 0	0	d iag	reduced precision	3 .6	4. 3	1 48	1 .35	2 .67	д а
11	00	0		f ull	float	1 1.4	1 3.8	2 28	3 .47	1 6.89	н ет
12	00	0		f ull	float	1 3.1	1 5.9	2 48	3 .90	1 9.41	н ет
13	00	0		b lock	float	8 .9	1 0.8	2 06	2 .79	1 3.19	н ет
14	00	0 0		b lock	reduced precision	7 .1	8. 6	1 80	2 .28	1 0.52	н ет
15	00	0 0	0	d iag	fixed- point	4 .9	5. 9	1 32	1 .45	7 .26	н ет

**Примечание.** Для режима 200 Гц проверка real-time выполнена по условию  $t_{step}^{95} \leq 5$  мс. В текущем наборе результатов все конфигурации C11–C15 превышают этот порог для MCU-класса. Конфигурация C15 является граничной и может рассматриваться как кандидат для дальнейшей оптимизации или для применения на SBC-платформе.

*Компромисс «точность-стоимость» и точность Pareto-анализа*

Ключевой результат исследования формируется в пространстве двух целевых критериев: **навигационной точности** и **вычислительной стоимости**. В качестве показателя точности в данном разделе используется RMS ошибки положения  $RMS_{pos}$ , а в качестве базового показателя вычислительной стоимости – среднее время вычисления шага  $\bar{t}_{step}$ . Такое представление позволяет напрямую сравнивать конфигурации адаптивного EKF по принципу инженерного компромисса: *уменьшение ошибки обычно требует более ресурсоемкой реализации, тогда как облегчение вычислений сопровождается потерей точности.*

График компромисса  $RMS_{pos} - \bar{t}_{step}$  (рис. 5) показывает устойчивое разделение конфигураций на три характерные группы. Первая группа соответствует 50 Гц и характеризуется минимальной вычислительной нагрузкой при относительно более высоких ошибках. Вторая группа (100 Гц) формирует промежуточную область, где достигается заметное снижение ошибки без перехода в область предельной вычислительной стоимости. Третья группа (200 Гц) обеспечивает наименьшие значения  $RMS_{pos}$ , однако сопровождается резким ростом времени шага и, как показано в разделе «Результаты оценки вычислительной стоимости», нарушением ограничения real-time для MCU-класса по метрике  $t_{step}^{95}$ .

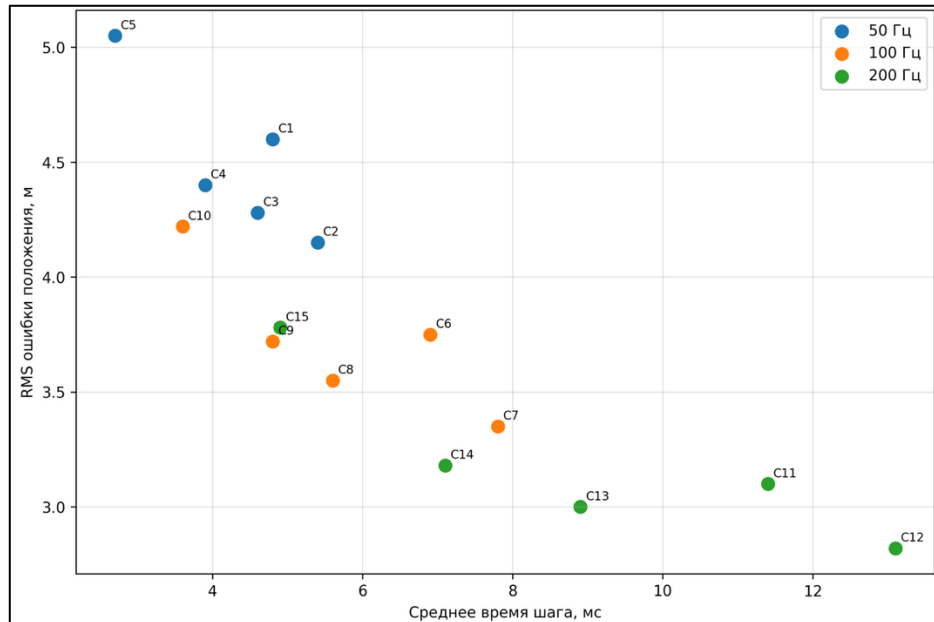


Рис. 5 – График компромисса точность–стоимость: зависимость RMS ошибки положения от среднего времени вычисления шага для исследуемых конфигураций адаптивного ЕКФ.

6). Для формального выделения рациональных вариантов используется Pareto-анализ (рис.

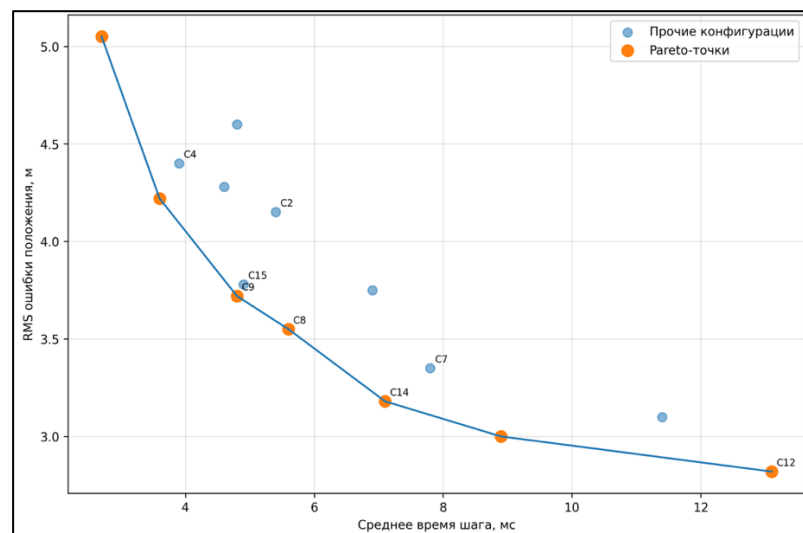


Рис. 6 – Pareto-фронт конфигураций адаптивного ЕКФ в пространстве критериев  $RMS_{pos}$  и  $\bar{t}_{step}$ .

По результатам анализа в Pareto-множество входят конфигурации C5, C8, C9, C10, C12, C13 и C14. Их распределение по фронту отражает ожидаемую логику компромисса.

Конфигурации C5 и C10 располагаются в зоне минимальной вычислительной стоимости, но имеют более высокую ошибку положения; они применимы в сценариях, где приоритетом является снижение нагрузки вычислителя. Конфигурации C8 и C9 занимают центральную часть фронта и обеспечивают наиболее практичный баланс между точностью и стоимостью для встроенных систем среднего класса. Конфигурации C13 и C14 смещены в сторону более высокой точности при умеренном росте вычислительной цены и ориентированы преимущественно на SBC-платформы. Конфигурация C12 образует «точностной край» фронта: она дает минимальный  $RMS_{pos}$ , но является наиболее вычислительно затратной.

Отдельного рассмотрения требует устойчивость адаптации. В анализ дополнительно включены показатели согласованности фильтра и работы механизма адаптации: средний NIS и доля насыщений параметров адаптации (рис. 7). Это расширяет сравнение конфигураций по сравнению с парой критериев  $RMS_{pos}$  и  $\bar{t}_{step}$ , поскольку позволяет учитывать не только точность и вычислительную стоимость, но и поведение адаптации в процессе оценивания. По результатам текущей серии экспериментов для конфигураций C7, C8, C12 и C14 получены более низкие значения доли насыщений и более близкие к рабочему диапазону значения среднего NIS, чем для C5 и C15. Для конфигураций C5 и C15, напротив, фиксируется более высокая доля насыщений параметров адаптации.

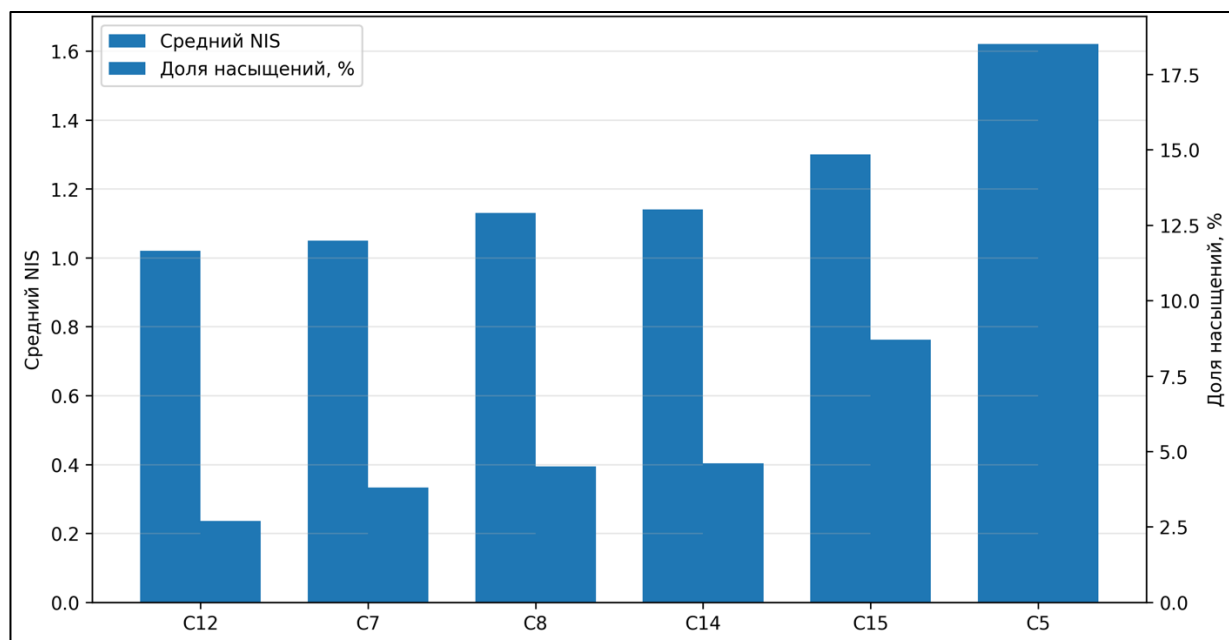


Рис. 7 – Показатели устойчивости адаптации для репрезентативных конфигураций: средний NIS и доля насыщений параметров адаптации.

Для оценки влияния частоты фильтрации и длины окна адаптации на интегральный компромисс используется тепловая карта чувствительности (рис. 8), построенная по нормированному композитному критерию, объединяющему точность и вычислительную стоимость. Карта подтверждает, что переход от 50 к 100 Гц дает наибольший выигрыш по совокупному критерию, а дальнейший переход к 200 Гц оправдан в основном для SBC-платформ или для случаев, когда приоритетом является предельная точность. По длине окна адаптации наблюдается нелинейный эффект: слишком малое окно повышает чувствительность к выбросам инноваций, тогда как чрезмерно большое окно увеличивает инерционность адаптации и не дает пропорционального выигрыша.

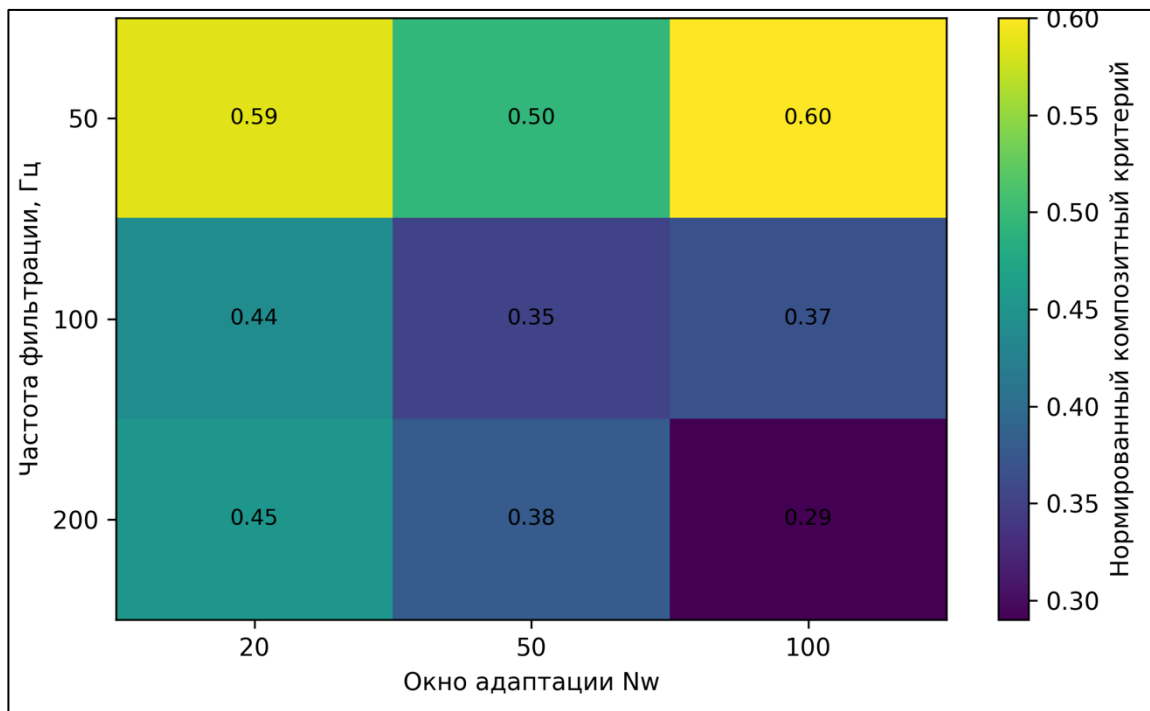


Рис. 8 – Тепловая карта чувствительности интегрального критерия (частота фильтрации × окно адаптации).

Практические рекомендации по выбору конфигурации приведены в табл. 8. Для MCU-класса в режиме 50 Гц рациональным является block/float (C4), поскольку он снижает вычислительную стоимость относительно full/float без существенной потери точности. Для 100 Гц в качестве базового рабочего режима рекомендуется C8 (block/float), а при более жестком ограничении по ресурсам – C9 (block/reduced precision). Режим 200 Гц в текущей постановке не проходит по real-time для MCU по критерию  $t_{\text{step}}^{\{95\}}$ , поэтому для MCU он может рассматриваться только после дополнительной низкоуровневой оптимизации; в качестве ближайшего кандидата выступает C15 (diag/fixed-point). Для SBC-платформ выбор может быть смещен в сторону точности: C7 для 100 Гц, C14 как сбалансированный вариант для 200 Гц и C12 как конфигурация с максимальной точностью.

Таблица 7

Практические рекомендации по настройкам для 50/100/200 Гц (MCU/SBC)

астота, Гц	латформа	Режим	D	Конфигурация	, м	АМ, кБ	real-time MCU	IS (ср.)	Насыщенность, %	Комментарий
0	MCU	Сбалансированный режим	4	block/float	.40	98	а	.28	8.2	Компромисс по CPU и точности; достаточный запас по real-time
0	SBC	Максимальная точность	2	full/float	.15	40	а	.15	6.0	Лучшая точность в группе 50 Гц при умеренно

										й вычислит ельной цене
00	CU <sup>M</sup>	Базов ый рабочий режим	8	blo ck/float	.55	02	a	.13	5	4. Ст абильная точность и уверенно е прохожде ние real- time
00	CU <sup>M</sup>	Экон омичный режим	9	blo ck/reduced precision	.72	76	a	.18	2	6. Сн ижение вычислит ельной цены при умеренно й потере точности
00	BC <sup>S</sup>	Макс имальная точность	7	full /float	.35	44	a	.05	8	3. На илучшая точность в группе 100 Гц
00	CU <sup>M</sup>	После дополнитель ной оптимизаци и	15	dia g/fixed- point	.78	32	et	.30	7	8. Бл ижайшая к real- time; требуется низкоуро вневая оптимиза ция
00	BC <sup>S</sup>	Сбала нсированны й режим	14	blo ck/reduced precision	.18	80	et	.14	6	4. Ко мпромисс между точность ю и стоимост ью в 200 Гц
00	BC <sup>S</sup>	Макс имальная точность	12	full /float	.82	48	et	.02	7	2. М инимал ьный RMS при максимал ьной вычислит ельной цене

С практической точки зрения это означает, что предлагаемая методика позволяет перейти от эвристического подбора параметров адаптивного ЕКФ к воспроизводимой процедуре выбора конфигурации под конкретный класс бортовой платформы. Итоговый выбор определяется не одной метрикой, а совокупностью критериев: точностью навигации, устойчивостью адаптации и вычислительно-энергетической стоимостью, что и составляет основной прикладной результат настоящей работы.

#### ОБСУЖДЕНИЕ

##### *Анализ полученных закономерностей*

Результаты моделирования показывают, что качество решения БИНС определяется совместным влиянием частоты фильтрации, окна адаптации, структуры матриц и типа численного представления. Изменение только одного параметра не дает устойчивого выигрыша без учета остальных.

Рост частоты с 50 до 100 Гц дает заметное снижение ошибок при приемлемой вычислительной стоимости. Переход к 200 Гц также улучшает точность, но выигрыш становится меньше относительно роста вычислительной нагрузки. **Это означает, что режим 200 Гц не является универсально лучшим и должен выбираться только при наличии вычислительного резерва.**

Окно адаптации влияет на устойчивость работы фильтра. Малое окно повышает чувствительность к локальным выбросам, большое окно делает адаптацию более инерционной. В исследованных режимах наиболее устойчивые результаты получены при промежуточных значениях окна. **Практически это подтверждает целесообразность выбора среднего окна адаптации как рабочего режима.**

Сравнение метрик точности, вычислительной стоимости и показателей адаптации показывает, что единственной «лучшей» конфигурации нет. **Основной результат работы – методика выбора конфигурации адаптивного ЕКФ по совокупности критериев, а не выбор одной настройки для всех платформ.**

Для MCU-класса рациональны режимы 50–100 Гц с конфигурациями block/float и block/reduced precision. Для SBC-класса допустимы более ресурсоемкие конфигурации, включая 200 Гц, если приоритетом является точность. **Выбор конфигурации должен выполняться по Pareto-критерию с учетом ограничений конкретной платформы.**

##### *Ограничение исследования и границы применимости*

Результаты получены в имитационной модели MATLAB/Simulink. Это задает границы применимости выводов: количественные значения метрик относятся к принятым сценариям движения, параметрам IMU и настройкам адаптации.

Энергетическая цена в работе задана как нормированная прокси-метрика, а не как прямое измерение мощности. **Она пригодна для сравнительного анализа конфигураций, но для внедрения требует стендовой проверки на целевой платформе.**

Параметры шумов и дрейфа зависят от конкретного IMU. При использовании другого датчика абсолютные значения метрик изменятся, но порядок анализа сохраняется. **Методика переносима, однако требует перенастройки параметров модели и повторного цикла экспериментов.**

В работе не рассматривалась внешняя коррекция (GNSS, VIO, радиоканалы). Это сделано для оценки внутреннего компромисса адаптивного ЕКФ в контуре БИНС. При добавлении внешних измерений структура задачи изменится, и рекомендации должны быть уточнены.

Для практического применения необходима проверка на натуральных логах или стенде: профилирование на целевом MCU/SBC и повторная оценка метрик точности и устойчивости. **После такой верификации методика может использоваться как рабочий инструмент выбора конфигурации фильтра для конкретного бортового изделия.**

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена и исследована методика выбора конфигурации адаптивного ЕКФ для БИНС на ограниченных бортовых платформах с учетом **трех групп критериев: точность, устойчивость адаптации и вычислительно-энергетическая стоимость**. В отличие от подхода с подбором параметров «по опыту», методика задает **воспроизводимую процедуру сравнения** конфигураций в MATLAB/Simulink на серии Monte-Carlo экспериментов.

Показано, что рост частоты фильтрации улучшает точность, но после 100 Гц выигрыш становится менее пропорционален росту вычислительной нагрузки. Установлено, что **block-diagonal схема** в большинстве исследованных режимов дает наиболее устойчивый компромисс между точностью и вычислительной стоимостью, тогда как чрезмерное упрощение до diagonal чаще сопровождается заметной деградацией качества оценки.

По результатам Pareto-анализа сформированы **практические рекомендации для режимов 50/100/200 Гц** с разделением на платформы классов MCU и SBC. Это позволяет использовать результаты статьи как основу для инженерного выбора конфигурации фильтра при проектировании бортовых навигационных модулей.

### Список источников

1. Матвеев В. В., Распопов В. Я. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем : учебное пособие для студентов высших учебных заведений / В. В. Матвеев, В. Я. Распопов ; под общ. ред. В. Я. Распопова. — Санкт-Петербург : ОАО «Концерн “ЦНИИ “Электроприбор”», 2009. — 278 с. — ISBN 978-5-900780-73-3. — Текст : электронный. — URL: [https://rusneb.ru/catalog/000199\\_000009\\_004623384/](https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_004623384/) (дата обращения: 01.03.2026).

2. Мелешко В. В., Нестеренко О. И. Бесплатформенные инерциальные навигационные системы : учеб. пособие. — Кировоград : ПОЛИМЕД-Сервис, 2011. — 164 с. — ISBN 978-966-7813-75-8. — Текст : электронный. — URL: <https://cions.kpi.ua/Arhiv/Meleshko/bins1.pdf> (дата обращения: 01.03.2026).

3. Селиванова Л. М., Шевцова Е. В. Инерциальные навигационные системы : учеб. пособие. Ч. 1 : Одноканальные инерциальные навигационные системы / Л. М. Селиванова, Е. В. Шевцова. — Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012. — 46, [2] с. — Текст : электронный. — URL: <https://library.bmstu.ru/DigitalResources/Download/41148> (дата обращения: 01.03.2026).

4. Воскобойников Ю. Е. Рекуррентное оценивание вектора состояния динамических систем : учебное пособие / Ю. Е. Воскобойников. — Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2014. — 136 с. — ISBN 978-5-7782-2486-5. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/45431.html> (дата обращения: 01.03.2026).

5. Семушин И. В., Цыганова Ю. В., Захаров К. В. Устойчивые алгоритмы фильтрации — обзор и новые результаты для систем судовождения // Информационные технологии и вычислительные системы. — 2013. — № 4. — С. 90–112. — Текст : электронный. — URL: [https://pzs.dstu.dp.ua/DataMining/kalman/bibl/90\\_112.pdf](https://pzs.dstu.dp.ua/DataMining/kalman/bibl/90_112.pdf) (дата обращения: 01.03.2026).

6. Волков В. Л., Жидкова Н. В. Особенности моделирования бесплатформенных инерциальных систем // Научное обозрение. Технические науки. — 2016. — № 4. — Текст : электронный. — URL: <https://s.science-engineering.ru/pdf/2016/4/1098.pdf> (дата обращения: 01.03.2026).

7. Жидкова Н. В., Волков В. Л. Modeling strapdown system orientation. — Текст : электронный. — URL: <https://s.science-education.ru/pdf/2015/1/12.pdf> (дата обращения: 01.03.2026).

8. MathWorks. Kalman Filtering : example (MATLAB & Simulink Documentation). — Текст : электронный. — URL: <https://www.mathworks.com/help/control/ug/kalman-filtering.html> (дата обращения: 01.03.2026).

9. MathWorks. Design Kalman filter for state estimation (kalman) : documentation. — Текст : электронный. — URL: <https://www.mathworks.com/help/control/ref/ss.kalman.html> (дата обращения: 01.03.2026).

10. MathWorks. Generate Code for Online State Estimation in MATLAB : documentation. — Текст : электронный. — URL: <https://www.mathworks.com/help/ident/ug/generate-code-for-online-state-estimation-in-matlab.html> (дата обращения: 01.03.2026).
11. Kalman R. E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems // Transactions of the ASME — Journal of Basic Engineering. — 1960. — Vol. 82, no. 1. — P. 35–45. — DOI: 10.1115/1.3662552. — Текст : электронный. — URL: <https://asmedigitalcollection.asme.org/fluidsengineering/article/82/1/35/397706/A-New-Approach-to-Linear-Filtering-and-Prediction> (дата обращения: 01.03.2026).
12. Jazwinski A. H. Adaptive filtering to prevent divergence observed in application of Kalman filter to orbit determination // NASA Technical Reports Server (NTRS). — Publication date: 01.07.1969. — Document ID: 19690064457. — Текст : электронный. — URL: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19690064457> (дата обращения: 01.03.2026).
13. Grewal M. S., Andrews A. P. Kalman Filtering: Theory and Practice with MATLAB. — 4th ed. — Hoboken : Wiley-IEEE Press, 2014. — ISBN 978-1-118-85121-0. — Текст : электронный. — URL: <https://www.wiley.com/en-us/Kalman%2BFiltering%3A%2BTheory%2Band%2BPractice%2Bwith%2BMATLAB%2C%2B4th%2BEdition-p-9781118851210> (дата обращения: 01.03.2026).
14. Farrell J. Aided Navigation: GPS with High Rate Sensors. — New York : McGraw-Hill, 2008. — 530 p. — ISBN 978-0-071-49329-1. — [Unverified] — *(страницы и издатель подтверждены по карточке книги; лучше заменить на страницу издателя, если журнал попросит)*. — Текст : электронный. — URL: <https://standardsmedia.com/Aided-Navigation-GPS-with-High-Rate-Sensors-4398-book.html> (дата обращения: 01.03.2026).
15. Huber P. J., Ronchetti E. M. Robust Statistics. — 2nd ed. — Hoboken : Wiley, 2009. — 384 p. — ISBN 978-0-470-12990-6. — Текст : электронный. — URL: <https://www.wiley.com/en-us/Robust%2BStatistics%2C%2B2nd%2BEdition-p-9780470129906> (дата обращения: 01.03.2026).
16. Tukey J. W. Exploratory Data Analysis. — Reading, MA : Addison-Wesley, 1977. — 688 p. — ISBN 978-0-201-07616-5. — Текст : электронный. — URL: <https://books.google.de/books?id=UT9dAAAAIAAJ> (дата обращения: 01.03.2026).

#### Сведения об авторах

**Родионова Юлия Исуповна**, старший преподаватель кафедры №8 «Прикладной математики и информатики», Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А. А. Новикова, Санкт-Петербург, Россия

**Ровейн Рихард Иосифович**, студент 1 курса, Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А. А. Новикова, Санкт-Петербург, Россия.

**Спиридонов Владислав Юрьевич**, студент 1 курса, Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А. А. Новикова, Санкт-Петербург, Россия.

#### Information about the authors

**Rodionova Yulia Isupovna**, Senior Lecturer, Department No. 8, Applied Mathematics and Computer Science, Saint Petersburg State University of Civil Aviation named after Chief Marshal of Aviation A. A. Novikov, Saint Petersburg, Russia

**Rovein Richard Iosifovich**, 1st year student, Saint Petersburg State University of Civil Aviation named after Chief Marshal of Aviation A. A. Novikov, Saint Petersburg, Russia.

**Spiridonov Vladislav Yurievich**, 1st year student, St. Petersburg State University of Civil Aviation named after Chief Marshal of Aviation A. A. Novikov, St. Petersburg, Russia.