

РАДИОФИЗИКА

УДК 53.084.6:681.783.322.3

DOI: 10.34680/2076-8052.2024.3(137).363-378

Поступила в редакцию / Received 25.06.2024

ГРНТИ 47.49.31

Специальность ВАК 1.3.4

Принята к публикации / Accepted 19.09.2024

Научная статья

АЛГОРИТМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ И НАВИГАЦИИ СО СТРУКТУРНОЙ ИЗБЫТОЧНОСТЬЮ

Павлов Д. В.¹, Телина И. С.², Самуйлова К. Д.¹

¹АО ИЦ «ИКАР» (Великий Новгород, Россия)

²Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия)

Аннотация В данной статье рассмотрен подход к построению инерциальных систем ориентации и навигации с использованием структурной избыточности. Структурная избыточность инерциального модуля достигается за счёт установки избыточного числа датчиков первичной информации, оси чувствительности которых неортогональны друг к другу. Такой подход к построению системы ориентации и навигации повышает её надёжность, точность и отказоустойчивость. Приведён пример технического решения малогабаритной инерциальной системы ориентации и навигации со структурной избыточностью на основе MEMS-акселерометра, MEMS-гироскопа и магнетометра для авиационного применения. Приведена математическая модель и алгоритм обработки выходных сигналов системы ориентации и навигации со структурной избыточностью. Выполнена оценка сравнения точности систем ориентации и навигации со структурной избыточностью и без неё.

Ключевые слова: *структурная избыточность, чувствительные оси, инерциальная система, навигация*

Для цитирования: Павлов Д. В., Телина И. С., Самуйлова К. Д. Алгоритмическая модель системы ориентации и навигации со структурной избыточностью // Вестник НовГУ. 2024. 3 (137). 363-378. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.3(137).363-378

Research Article

EVALUATION OF THE IMPROVEMENT OF THE ACCURACY OF THE ORIENTATION AND NAVIGATION SYSTEM WITH STRUCTURAL REDUNDANCY

Pavlov D. V.¹, Telina I. S.², Samuilova K. D.¹

¹JSC «ECICARUS» (Veliky Novgorod, Russia)

²Yaroslav-the-Wise Novgorod State University (Veliky Novgorod, Russia)

Abstract. This article discusses an approach to the construction of inertial orientation and navigation systems using structural redundancy. The structural redundancy of the inertial module is achieved by installing an excessive number of primary information sensors the sensitivity axes of which are non-orthogonal to each other. This approach to building an orientation and navigation system increases its reliability, accuracy and fault tolerance. An example of a technical solution for a small-sized inertial orientation and navigation system with structural redundancy based on a MEMS accelerometer, a MEMS gyroscope and a magnetometer for aviation applications is given. A mathematical model and algorithm for processing the output signals of an orientation and navigation system with structural redundancy are presented. The evaluation of the comparison of the accuracy of orientation and navigation systems with and without structural redundancy was performed.

Keyword: *structural redundancy, sensitive axes, inertial system, navigation*

For citation: Pavlov D. V., Telina I. S., Samuilova K. D. Evaluation of the improvement of the accuracy of the orientation and navigation system with structural redundancy // Vestnik NovSU. 2024. 3 (137). 363-378. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.3(137).363-378

Введение

Задача разработки и совершенствования интегрированных систем навигации в основном направлена на повышение точности и надёжности инерциальной системы ориентации и навигации. Ведь, как известно, любые автономные инерциальные системы ориентации и навигации (ИСОИ) имеют недостаток – дрейф нуля и зашумлённость каналов модуля [1]. Из-за дрейфа нуля выходного сигнала возникает аккумулируемая ошибка, из-за которой возникает необходимость её коррекции. Проблемой уменьшения и коррекцией систематических и случайных составляющих ошибок сегодня занимаются многие институты и организации, деятельность которых направлена на создание высокоточных систем ориентации и навигации. Зачастую, для коррекции дрейфа нуля прибегают к современным алгоритмам [2, 3] с целью усовершенствования малогабаритных ИСОИ.

Сегодня существует несколько различных подходов к созданию усовершенствованных ИСОИ. Наряду с развитием научно-технического прогресса на мировом рынке появляются датчики с новыми технологиями, которые успешно внедряются разработчиками в навигационные системы. Инерциальные датчики, выполненные по новейшим технологиям, обладают высокой точностью первичных выходных сигналов и расширенными эксплуатационными характеристиками. Но, современный анализ рынка показывает, что использование таких датчиков приводят к существенному удорожанию (ИСОИ). К тому же большинство современных высокоточных инерциальных датчиков приведут к увеличению массо-габаритных характеристик ИСОИ. Увеличение габаритов и массы модуля и стоимости изделия, например, уже невыгодно использовать в современных малоразмерных БПЛА ближней авиации. Для создания более высокоточных малогабаритных ИСОИ необходимо прорабатывать математический аппарат, алгоритмы предварительной обработки навигационной информации и алгоритмы коррекции дрейфа нуля.

Одним из современных подходов для повышения точности и надёжности ИСОИ является использование функционально избыточных блоков гироскопов и акселерометров с неортогональной ориентацией их осей чувствительности. Такая конструкция ИСОИ будет давать результат эффективной коррекции дрейфа нуля. Повышение точности достигается из-за противоположных знаков проекций случайного дрейфа датчиков на оси системы координат. При операции суммирования дрейфов разного знака результирующий дрейф оказывается минимальным и стремится к нулю.

Этот принцип построения инерциальных систем навигации активно развивается в работах у отечественных авторов: Бельский Л. Н., Туркин В. А., Водичева Л. В., Алёшкин М. В., Алёшкин В. В. Матвеев А. С. и др. [4-8]. В этом

направлении вклад внесли и зарубежные и авторы [9-12]: Zotov S. A., Rivers M. C., Potter J. E., Harrison I. V., Daly K. C., Mark J. G. и другие. Однако ожидаемая эффективность этого способа построения ИСОН напрямую зависит от алгоритмов предварительной обработки навигационной информации и алгоритмов коррекции дрейфа нуля. Согласно анализу основных источников [5-18] по данному направлению было выяснено, что сегодня не так много работ ведётся в этом направлении по сравнению с работами, которые направлены на создание классических ортогональных ИСОН.

В данной работе приведён пример разработанной математической и алгоритмической модели ИСОН с неортогональными осями чувствительности и со структурной избыточностью. Даны сравнительные оценки точности моделей ИСОН неортогонального и ортогонального исполнения, в которых использовались одни и те же датчики.

Анализ целесообразности структурной избыточности инерциальных систем навигации

Согласно анализу источников [4-17] можно сделать вывод, что подход к структурной избыточности инерциальных модулей в основном позволяет повысить надёжность, точность и отказоустойчивость системы. Такой подход к построению ИСОН не является новым и рассматривался ещё в 1960-1970 годах. Но, такие инерциальные системы в основном разрабатывались для ракетно-космической техники, где необходимо было повышение надёжности и отказоустойчивости систем. Создание избыточных отказоустойчивых инерциальных модулей требовало решения такой одной из основных задач [15-17], как определение оптимальной ориентаций осей чувствительности измерителей и построение эффективных алгоритмов неортогональных избыточных блоков. В области создания ракетно-космической техники ведущими специалистами эти задачи успешно решались и решаются на сегодняшний день.

Кроме ракетно-космической сферы, ИСОН со структурной избыточностью ещё применяются в пешеходных и транспортных системах персональной навигации. Исходя из аналитического обзора, разработка пешеходно-транспортных систем навигации основана на применении MEMS-датчиков. И как правило, такие навигационные системы в основном малогабаритные.

Главная идея создания неортогональных малогабаритных ИСОН с избыточными осями чувствительности состоит в дублировании измерительных осей. Этот подход приводит к повышению надёжности и точности ИСОН. Для этих целей используют в основном MEMS-датчики. Если использовать датчики других технологий, например, волоконно-оптические гироскопы или лазерные гироскопы, то это может привести к неоправданному усложнению и повышению стоимости систем пешеходной навигации.

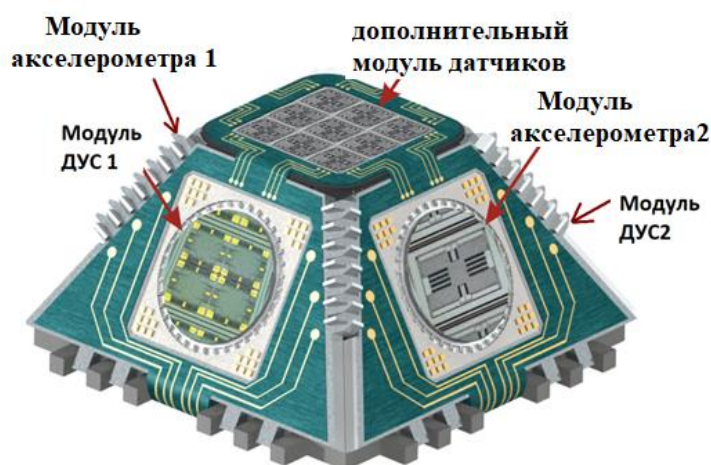
Аналитический обзор [5-21] показывает, что ИСОН со структурной избыточностью применяются в ракетно-космических системах, где в основном требуется высокая надёжность и отказоустойчивость.

Таким образом, можно резюмировать, что подход к построению ИСОН со структурной избыточностью с неортогональными осями чувствительности инерциальных датчиков является одним из эффективных способов повышения точности и надёжности системы. Однако, структурная избыточность при использовании более дорогостоящих и габаритных датчиков (лазерные и волоконно-оптические гироскопы, электромеханические акселерометры и т. д.) приведёт к удорожанию изделия и увеличения массо-габаритных характеристик. К структурной избыточности с неортогональными осями чувствительности прибегают обычно при наличии миниатюрных инерциальных датчиков. Каналы таких датчиков более зашумлены, чем у датчиков других технологий. Эффективная коррекция дрейфа за счёт избыточной структуры ИСОН в совокупности с малыми размерами даёт более высокую точность, чем ИСОН без структурной избыточности.

Техническое предложение ортогональных и неортогональных ИСОН

Для сравнительной оценки точности проведено моделирование двух вариантов ИСОН: ортогональной и неортогональной со структурной избыточностью.

Идея модульного исполнения неортогональной ИСОН со структурной избыточностью основывалась на использовании малогабаритных MEMS-датчиков: датчик угловой скорости (ДУС) и MEMS-акселерометрах. Конструктивно ДУС и MEMS-акселерометры предполагается расположить на 4 гранях усечённой 4-угольной пирамиды (рисунок 1).



БЧЭ

Рисунок 1. Предполагаемое конструктивное исполнение неортогональной ИСОН со структурной избыточностью

Здесь БЧЭ – блок чувствительных элементов представляет корпусное исполнения из сплава Д16Т. Модули ДУС 1 и ДУС 2 предлагается располагать на противоположных гранях усечённой пирамиды. Модули акселерометров могут быть расположены на других противоположных гранях. Каждый модуль представляют собой одноосные устройства акселерометра или ДУС с фильтром и 12-разрядным аналогово-цифровым преобразователем (АЦП). Внутри аналоговых датчиках ДУС и акселерометре используются встроенные датчики температуры.

Дополнительный модуль датчиков предполагается установить на 5-ю грань усечённой пирамиды. В него входят барометрический датчик и датчик температуры.

Внутри корпуса помещен модуль навигационного спецвычислителя. Навигационный спецвычислитель собирает данные с датчиков, выполняет алгоритм предварительной обработки (приём данных пакетов, прореживание, усреднение), производит комплексирование датчиков, фильтрацию и вычисление углов ориентации объекта и координат местоположения.

В данном конструктивном исполнении ИСОН предполагается использовать MEMS-акселерометр МА-20» и датчик угловой скорости ДУС ТГ-100 фирмы «Лаборатория микроприборов».

На рисунке 2 показана ориентация осей чувствительности ДУС и акселерометров и приборная система координат, которая связана с корпусом усечённой пирамиды.

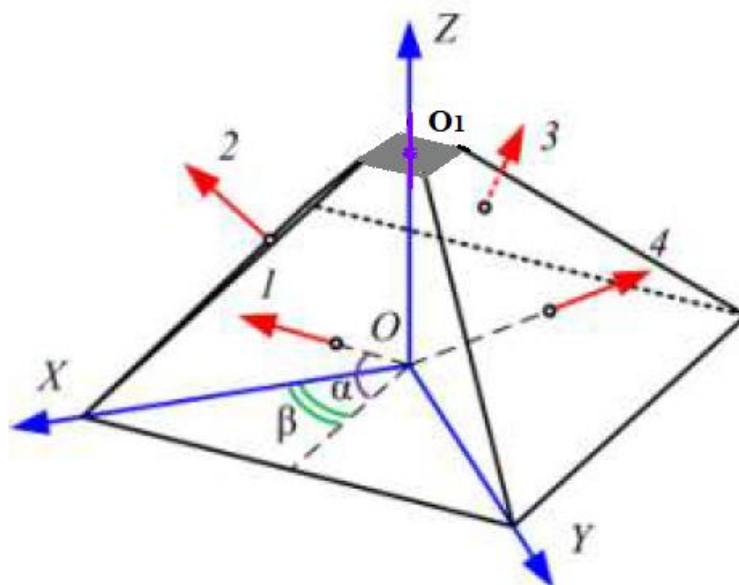


Рисунок 2. Ориентация осей чувствительностей ДУС и акселерометров и положение приборной системы координат: 1, 2, 3 и 4 – оси чувствительности комбинации ДУС и акселерометров; $OXYZ$ – приборная система координат, связанная с центром основания правильной усечённой пирамиды

Оси чувствительности 4-х комбинированных датчиков направлены под углом α к плоскости основания перпендикулярно боковым граням пирамиды и развернуты

друг относительно друга на углы, кратные 2β . Углы α и β определяют взаимную ориентацию осей чувствительности комбинированных датчиков. Данные углы являются основными параметрами при выборе конфигурации ИСОН. Именно от этих углов зависят погрешности определения составляющих измеряемых векторов кажущегося ускорения и угловой скорости.

У ортогональной ИСОН оси чувствительности датчиков располагаются под углом 90° относительно друг друга. Идея конструктивного исполнения ортогональной ИСОН заключается в обеспечении совмещения осей чувствительности датчиков с приборной системой координат. Оси приборной системы координат ортогональны граням куба, а начало её находится в центре куба.

Алгоритмическая и математическая модель неортогональной ИСОН

На рисунке 3 показана структурная схема алгоритма избыточной ИСОН.

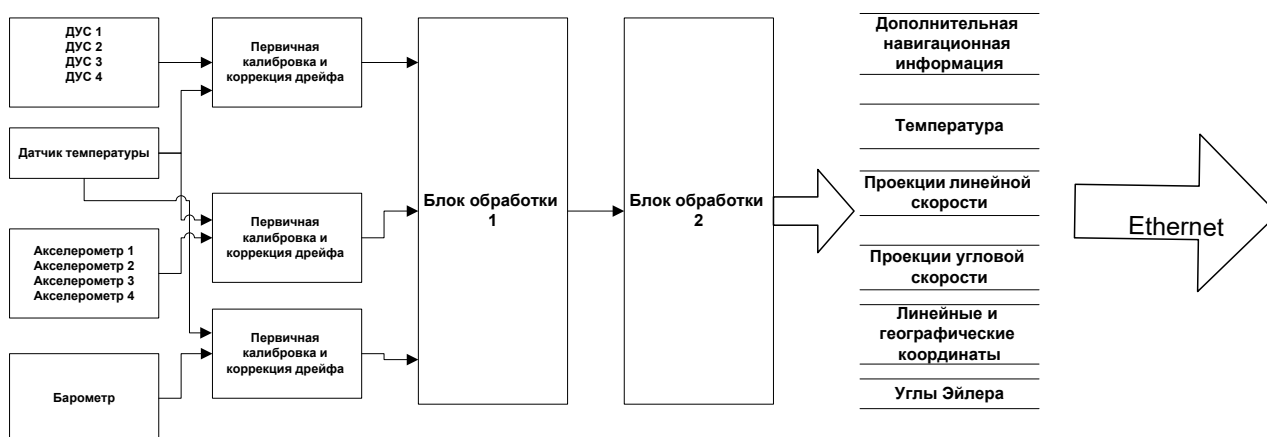


Рисунок 3. Структурная схема алгоритма работы избыточной ИСОН

Выходные навигационные данные ИСОН предполагается передавать с помощью интерфейса Ethernet. Выбор Ethernet обусловлен требованием высокой скорости передачи данных на бортовые компьютерные системы.

В блоке обработки 1 выполняются следующие алгоритмы:

- 1) формирование векторов измерения угловой скорости и кажущего ускорения;
- 2) оптимизация осей чувствительности датчиков;
- 3) комплексирования данных с 4 ДУС и 4 акселерометров;
- 4) пересчёт угловой скорости и кажущего ускорения в приборную систему координат ИСОН.

Комплексирования датчиков происходит с использованием фильтра Калмана. В блоке обработки 2 выполняется навигационный алгоритм вычисления географических координат и углов ориентации имитируемого объекта.

С учётом предполагаемой конструктивной модели расположения датчиков (рисунок 2) и схемы алгоритма работы неортогональной ИСОН (рисунок 3),

рассмотрим математическую модель на примере акселерометрического и гироскопического измерительного канала.

Орт ориентации оси акселерометра A_i :

$$\vec{A}_i = \vec{i} \cdot \cos(\alpha_A) \cdot \cos(\beta_A) + \vec{j} \cdot \cos(\alpha_A) \cdot \sin(\beta_A) + \vec{k} \cdot \sin(\alpha_A) \quad (1)$$

Орт ориентации оси ДУС Ω_i :

$$\vec{\Omega}_i = \vec{i} \cdot \cos(\alpha_\Omega) \cdot \cos(\beta_\Omega) + \vec{j} \cdot \cos(\alpha_\Omega) \cdot \sin(\beta_\Omega) + \vec{k} \cdot \sin(\alpha_\Omega) \quad (2)$$

где $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ - орты осей связанной приборной системы координат с правильной усечённой пирамидой. α_A и β_A – углы, определяющие ориентацию осей чувствительности акселерометра; α_Ω и β_Ω – углы, определяющие ориентацию осей чувствительности ДУС.

Предполагается, что при начальной выставке датчиков, оси чувствительности акселерометра и ДУС совпадают, т.е.: $\alpha_A \approx \alpha_\Omega \approx \alpha$ и $\beta_A \approx \beta_\Omega \approx \beta$.

Тогда матрица измерений для гироскопического и акселерометрического канала будет одинакова:

$$H = \begin{pmatrix} \cos(\alpha) \cdot \cos(\beta) & \cos(\alpha) \cdot \sin(\beta) & \sin(\alpha) \\ -\cos(\alpha) \cdot \cos(\beta) & \cos(\alpha) \cdot \cos(\beta) & \sin(\alpha) \\ -\cos(\alpha) \cdot \cos(\beta) & -\cos(\alpha) \cdot \cos(\beta) & \sin(\alpha) \\ \cos(\alpha) \cdot \cos(\beta) & -\cos(\alpha) \cdot \cos(\beta) & \sin(\alpha) \end{pmatrix} \quad (3)$$

На основании равномерного распределения комбинированных датчиков избыточной ИСОН предполагается, что угол $\beta = 45^\circ$. В данном расположении оценка угла составила $\alpha \approx 28,7^\circ$.

Для избыточной системы ориентации с 4-мя акселерометрами вектор состояния $\mathbf{x}$ с вектором измерений $\mathbf{z}$ можно выразить по следующей формуле:

$$\mathbf{z}_A = H \cdot \mathbf{x}_A + \boldsymbol{\varepsilon}_A \quad (4)$$

Здесь $\mathbf{z}_A = (a_{x1} \ a_{x2} \ a_{x3} \ a_{x4})^T$ – вектор выходных сигналов акселерометров; $\mathbf{x}_A = (a_x \ a_y \ a_z)^T$ – вектор кажущегося ускорения на оси приборной системы координат ИСОН; $\boldsymbol{\varepsilon}$ – вектор случайных помех акселерометрического канала, имеющий нормальное распределение с нулевым математическим ожиданием.

Модель измерения для ДУС:

$$\mathbf{z}_\Omega = H \cdot \mathbf{x}_\Omega + \boldsymbol{\xi} \quad (5)$$

где $\mathbf{z}_\Omega = (\omega_{x1} \ \omega_{x2} \ \omega_{x3} \ \omega_{x4})^T$ – вектор выходных сигналов угловой скорости; $\mathbf{x}_\Omega$ – вектор угловой скорости на оси приборной системы координат ИСОН; $\boldsymbol{\xi}$ – вектор случайных помех гироскопического канала, имеющий нормальное распределение с нулевым математическим ожиданием.

Из матричных уравнений (4) и (5) можно выразить $\mathbf{x}_A$ и $\mathbf{x}_\Omega$:

$$x_A = (H^T \cdot H)^{-1} \cdot H^T \cdot z_A \quad (6)$$

$$x_\Omega = (H^T \cdot H)^{-1} \cdot H^T \cdot z_\Omega \quad (7)$$

Далее, полученные значения x_A и x_Ω используются для расчёта углов ориентации и географических координат местоположения.

В блоке обработке 2 (рисунок 3) реализуется алгоритм вычисления географического местоположения и углов Эйлера летательного аппарата (ЛА). Данный алгоритм основан на базе решений кинематических уравнений кватернионов ориентации.

В указанной модели неортогонального ИСОН (рисунок 4):

$\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – проекции угловой скорости на оси связанной системы координат;

a_x, a_y, a_z – усреднённые проекции ускорения на оси связанной системы координат;

$\psi(t_0), \theta(t_0), \gamma(t_0)$ – углы курса, крена и тангажа в начальный момент времени;

$\psi = \psi(t), \theta = \theta(t), \gamma = \gamma(t)$ – углы курса, крена и тангажа в произвольные моменты времени;

$\omega_{xg}, \omega_{yg}, \omega_{zg}$ – пересчитанные угловые скорости в географической системе координат;

R – радиус Земли;

$\lambda(t_0), \varphi(t_0), h(t_0)$ – долгота, широта и барометрическая высота в начальный момент времени;

$\lambda = \lambda(t), \varphi = \varphi(t), h = h(t)$ – долгота, широта и высота в произвольные моменты времени;

$V_{xg}(t_0), V_{yg}(t_0), V_{zg}(t_0)$ – проекции скоростей ЛА в географической системе координат в начальный момент времени;

$\dot{\lambda}, \dot{\varphi}$ – производные от долготы и широты по времени;

$\Lambda, \bar{\Lambda}$ – простой и сопряжённый кватернион ориентации, соответственно;

$\dot{\Lambda}$ – скорость изменения кватерниона по времени;

$N_g = \Lambda \circ N \circ \bar{\Lambda}$ – пересчёт вектора ускорения в географическую систему координат;

a_{xg}, a_{yg}, a_{zg} – линейные ускорения, пересчитанные в географическую систему координат;

$\Omega = (\omega_x \ \omega_y \ \omega_z)^T$ – вектор угловой скорости в связанной системе координат;

$\Omega_g = (\omega_{xg} \ \omega_{yg} \ \omega_{zg})^T$ – вектор угловой скорости, пересчитанный в географическую систему координат;

$N = (a_x \ a_y \ a_z)^T$ – вектор линейного ускорения в связанной системе координат;

$h = h(t)$ – барометрическая высота, получаемая в произвольные моменты времени;

$t = n \cdot \Delta\tau$ – время усреднения датчиков;

$\Delta\tau$ – отчёт времени АЦП;

n – число отчётов времени АЦП.

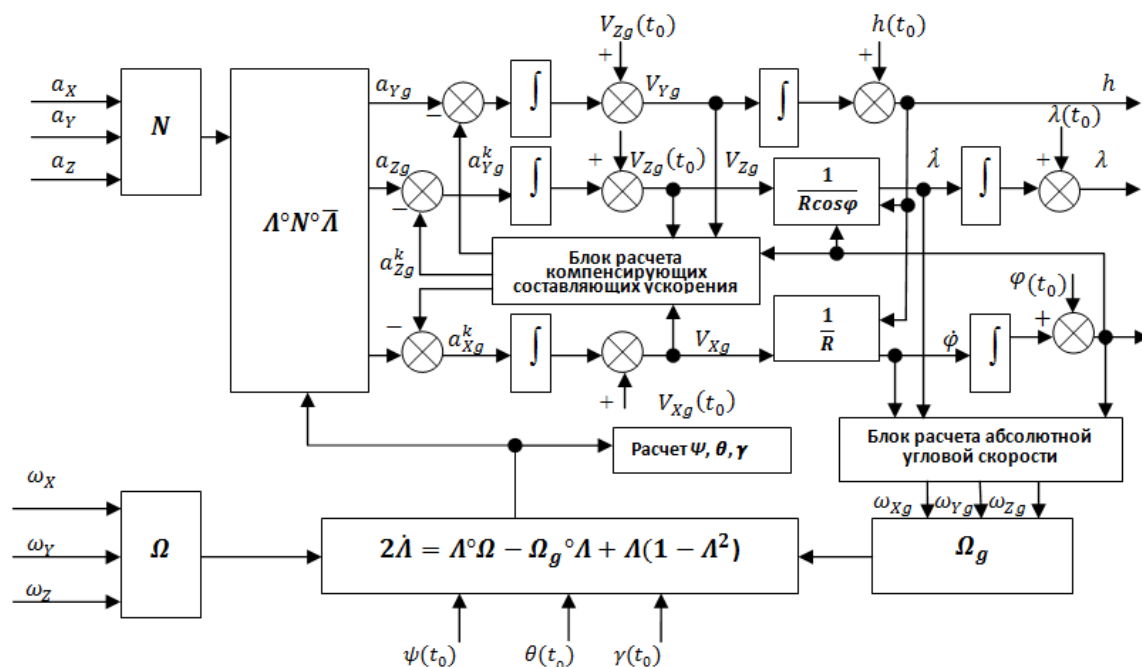


Рисунок 4. Математическая модель неортогональной ИСОН с использованием кватернионов ориентации

Алгоритмическая и математическая модель ортогональной ИСОН

На рисунке 5 показана структурная схема алгоритма ортогональной ИСОН.

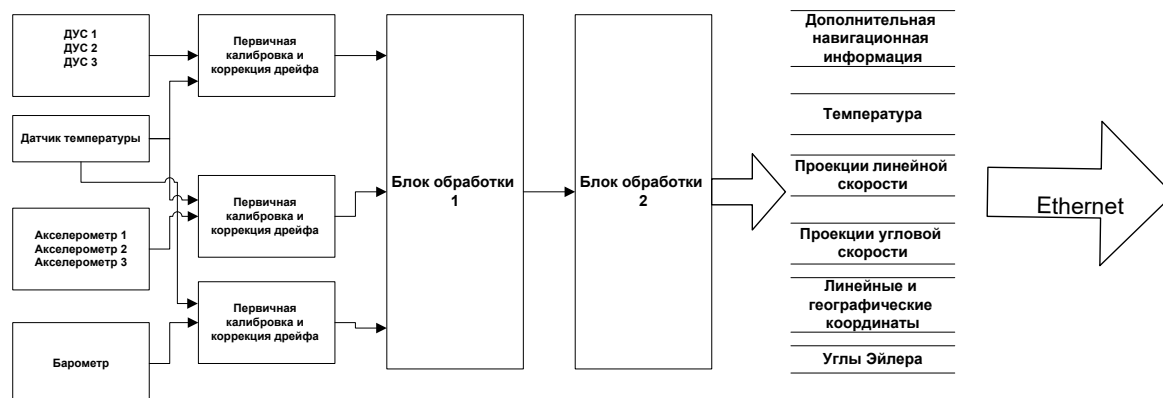


Рисунок 5. Структурная схема алгоритма работы ортогональной ИСОН

Интерфейс передачи данных предполагается использовать такой же, как и у модели неортогональной ИСОН.

В блоке обработке 1 выполняются следующие алгоритмы:

1) формирование векторов измерения угловой скорости и кажущего ускорения;

2) комплексирование данных с 3 ДУС и 3 акселерометров;

В блоке обработки 2 также, как и в неортогональной ИСОН выполняется навигационный алгоритм вычисления географических координат и углов ориентации имитируемого объекта (рисунок 5).

Состав выходной навигационной информации предполагается использовать одинаковый для двух ИСОН.

Сравнительная оценка точности неортогональной и ортогональной ИСОН

Для сравнительной оценки двух моделей инерциальных систем создана имитационная модель объекта. В качестве модели использовали БПЛА самолётного типа. Имитационные характеристики представляют собой кинематические характеристики, характер глиссады, координаты полёта. На рисунке 6 показана имитируемая траектория полёта БПЛА.

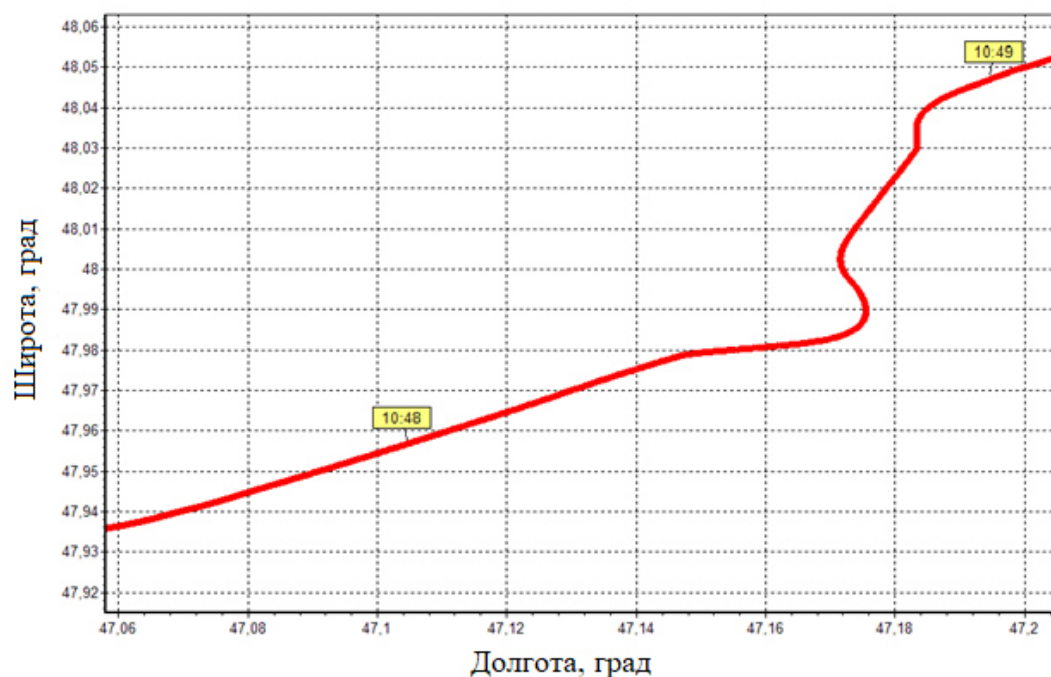


Рисунок 6. Имитируемая траектория полёта БПЛА

На рисунке 7 показаны результаты моделируемых погрешностей географических координат модели неортогональной ИСОН со структурной избыточностью.

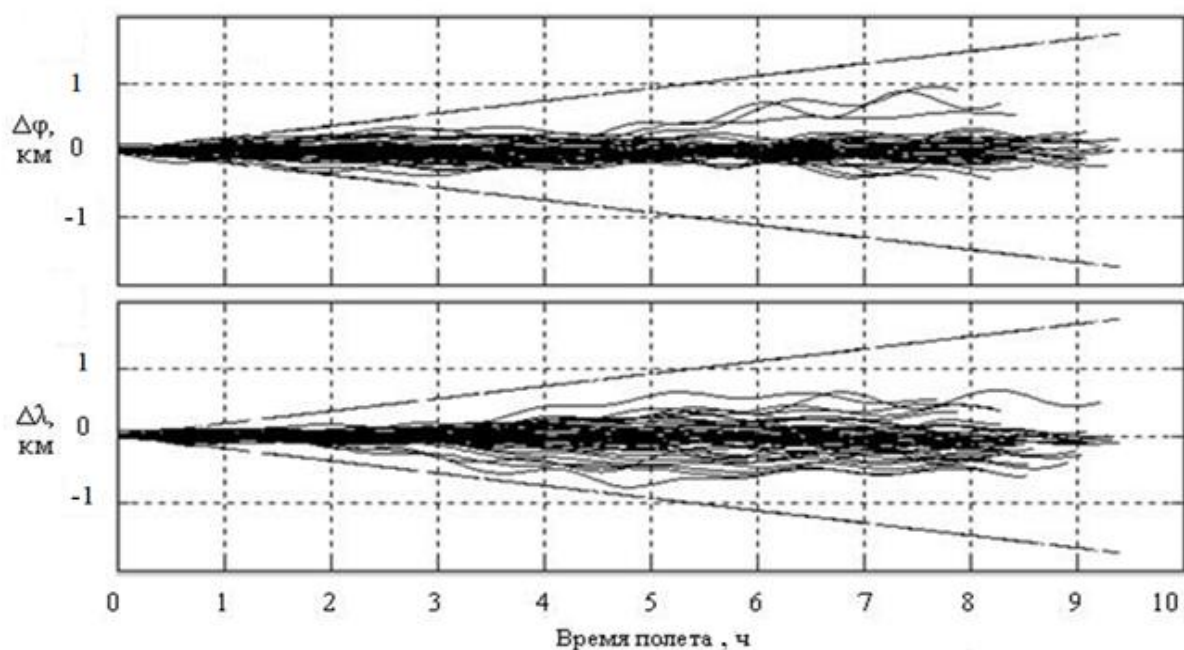


Рисунок 7. Результаты моделируемых погрешностей координат широты $\Delta\varphi$ и долготы $\Delta\lambda$

На рисунке 8 приведены графики моделируемых погрешностей угла курса БПЛА. Семейство графиков получено при многократных экспериментах.

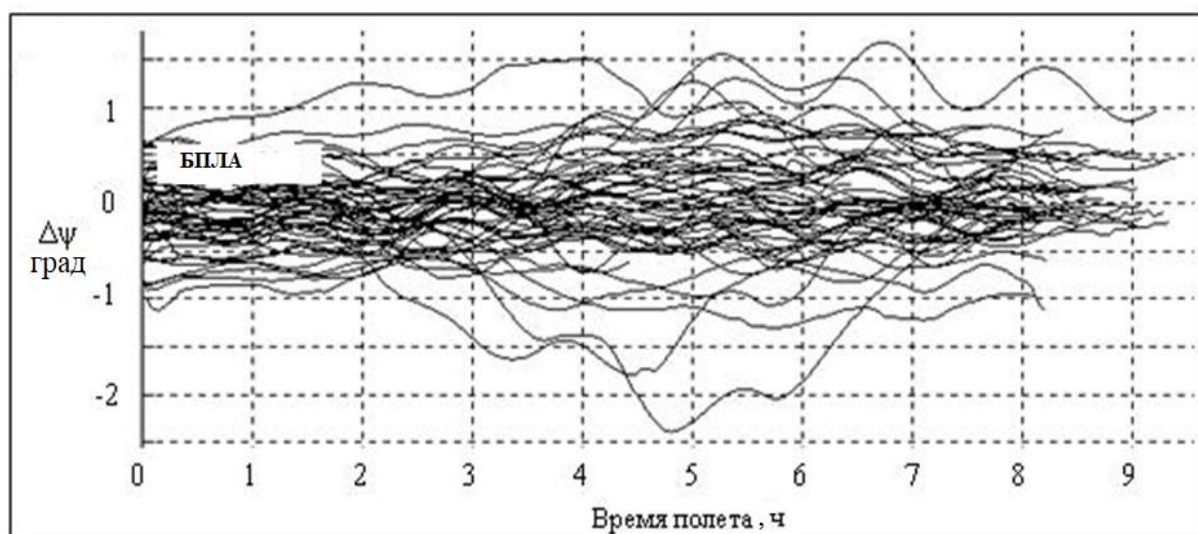


Рисунок 8. Графики погрешностей курса БПЛА по данным модели неортогональной ИСОН

В таблицу 1 сведены сравнительные точностные характеристики двух ИСОН.

На основе проведённого моделирования получили, что модель неортогональной ИСОН со структурной избыточностью обладает потенциально большей точностью, чем ортогональная.

Таблица 1. Точностные характеристики ортогональной и неортогональной ИСОН

Параметр	Неортогональная избыточная ИСОН	Ортогональная ИСОН
Точность определения географических координат местоположения (2σ) (за 5 часов полёта)	± 600 м	$\pm 1,4$ км
Точность определения горизонтальных координат местоположения (2σ) (за 5 часов полёта)	± 450 м	± 800 км
Точность определения углов ориентации (2σ) (крен, тангаж) (за 5 часов полёта)	$\pm 0,22^\circ$	$\pm 0,38^\circ$
Точность определения курса (2σ) (за 5 часов полёта)	$\pm 0.3^\circ / \cos(\varphi)$	$\pm 0.45^\circ / \cos(\varphi)$
Точность определения высоты (2σ) (за 5 часов полёта)	5% от высоты полёта БПЛА	5% от высоты полёта БПЛА
Точность определения путевой скорости (2σ) (за 5 часов полёта)	± 8 м/с	± 12 м/с
Погрешность измерения барометрической высоты (2σ)	$\pm 1,3$ м	$\pm 2,1$ м

Выводы

В данной работе разработана математическая модель и предложены алгоритмы обработки навигационных данных ортогональной и неортогональной ИСОН. Приведены сравнительные точностные характеристики результатов работы двух моделей ИСОН. Результаты моделирования показывают, что более высокие точностные характеристики даёт модель неортогональной ИСОН со структурной избыточностью.

Таким образом, подход к построению неортогональных ИСОН со структурной избыточностью является эффективным с целью повышения точностей автономных систем навигации. Также, согласно исследованиям [2-20] структурная избыточность даёт повышенную надёжность и отказоустойчивость работы ИСОН.

Список литературы

1. Павлов Д. В., Петров М. Н., Лукин К. Г. Метод температурной калибровки блока микромеханических акселерометров бесплатформенной инерциальной навигационной системы // Метрология. 2015. 2. 25-35.
2. Narasimhappa M., Mahindrakar A. D., Guizilini V. C., Terra M. H., Sabat S. L. MEMS-Based IMU Drift Minimization: Sage Husa Adaptive Robust Kalman Filtering // IEEE Sensors Journal. 2020. 20 (1). 250-260. DOI: 10.1109/JSEN.2019.2941273
3. Степанов О. А., Литвиненко Ю. А., Васильев В. А., Торопов А. Б., Басин М. В. Алгоритм полиномиальной информации при квадратичных нелинейностях в уравнениях динамики и измерений. Часть 1: Описание и сопоставление с алгоритмами калмановского типа // Гироскопия и навигация. 2021. 29, 3 (114). 3-33. DOI: 10.17285/0869-7035.0068

4. Водичева Л. В., Бельский Л. Н., Парышева Ю. В., Лысцов А. А. Инерциальные измерительные блоки перспективных изделий ракетно-космической техники: обеспечение отказоустойчивости // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроения. 2018. 17 (1). 28-44. DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-1-28-44
5. Алешкин В. В., Алешкин М. В., Сокольский А. С., Матвеев А. С. Исследование алгоритмов обработки информации избыточного блока микромеханических акселерометров // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2007. 1 (21). 96-105.
6. Алешкин В. В., Матвеев А. С., Алешкин М. В. Математические модели, методы и алгоритмы обработки избыточной информации измерительного блока // Интернет и инновации: практические вопросы информационного обеспечения инновационной деятельности: сборник трудов Международной конференции, 19-20 ноября 2008 г. Саратов: Изд-во СГТУ, 2008. С. 377-380.
7. Туркин В. А. Применение математического моделирования при разработке методики проектирования блоков чувствительных элементов для БИНС с неортогональной ориентацией измерительных осей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. 4. 326-334. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-4-326-335
8. Туркин В. А. Результаты разработки методики контроля блоков чувствительных элементов для БИНС с неортогональной ориентацией измерительных осей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. 2. 257-264. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-2-257-264
9. Zotov S. A., Rivers M. C., Trusov A. A., Shkel A. M. Folded MEMS pyramid inertial measurement unit // IEEE Sensors Journal. 2011. 11 (11). 2780-2789. DOI: 10.1109/JSEN.2011.2160719
10. Potter J. E., Deckert J. C. Minimax Failure Detection and Identification in Redundant Gyro and Accelerometer Systems // Journal of Spacecraft and Rockets. 1973. 10 (4). 236-243. DOI: 10.2514/3.27753
11. Ebner R. E., Mark J. G. Redundant Integrated Flight-Control/Navigation Inertial Sensor Complex // Journal of Guidance, Control, and Dynamics. 1978. 1 (2). 143-149. DOI: 10.2514/3.55757
12. Daly K. C., Gai E., Harrison J. V. Generalized Likelihood Test for FDI in Redundant Sensor Configurations // Journal of Guidance, Control, and Dynamics. 1979. 2 (1). 9-17. DOI: 10.2514/3.55825
13. Маринушкин П. С., Нестеренко Т. Г. Малогабаритная система персональной навигации на базе неортогонального инерциального измерительного блока с избыточной структурой // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана: электронный журнал: сетевое научное издание. 2016. 8. 121-134. URL: <https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/45802/1/reprint-nw-20198.pdf> (Дата обращения: 28.02.2024). DOI: 10.7463/0816.0843239
14. Неортогональная БИНС для малых БПЛА // Хабр: официальный сайт. 2011. URL: <http://special.habrahabr.ru/kyocera/p/114513/> (Дата обращения: 28.02.2024).
15. Маринушкин П. С., Нестеренко Т. Г. Избыточный измерительный модуль на микромеханических датчиках для малогабаритных систем персональной навигации // Инженерный вестник Дона: сетевое издание. 2016. 42 (3). 38-46. URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_43_Marinushkin_Nesterenko_N.pdf_189517c8b2.pdf (Дата обращения: 28.02.2024).

16. Калихман Д. М., Туркин В. А. Методика контроля блоков чувствительных элементов с неортогональной ориентацией измерительных осей // Гироскопия и навигация. 2023. 31, 4 (123). 44-63.
17. Калихман Д. М., Туркин В. А., Депутатова Е. А., Акмаев А. А. Математическая модель измерительного канала шестиосного измерителя линейного ускорения с неортогональной ориентацией осей чувствительности – прибора БИЛУ // Навигация и управление летательными аппаратами. 2023. 4 (43). 2-37.
18. Алехова Е. Ю., Жбанов Ю. К., Климов Д. М. Использование избытка осей чувствительности для повышения точности измерений // Известия РАН. Механика твердого тела. 2013. 5. 24-27.
19. Водичева Л. В. Повышение надежности и точности бесплатформенного инерциального измерительного блока при избыточном количестве измерений // Гироскопия и навигация. 1997. 1 (16). 55-67.
20. Хамидуллин В. К. Технические средства навигации и управления движением: учебное пособие. Санкт-Петербург: Изд-во БГТУ "Военмех" им. Д. Ф. Устинова, 2019. 142 с.

References

1. Pavlov D. V., Petrov M. N., Lukin K. G. Metod temperaturnoy kalibrovki bloka mikromekhanicheskikh akselerometrov besplatformennoy inertsiyal'noy navigatsionnoy sistemy [Method of temperature calibration of the micromechanical accelerometer block of the strapdown inertial navigation system] // Metrologiya. 2015. 2. 25-35.
2. Narasimhappa M., Mahindrakar A. D., Guizilini V. C., Terra M. H., Sabat S. L. MEMS-Based IMU Drift Minimization: Sage Husa Adaptive Robust Kalman Filtering // IEEE Sensors Journal. 2020. 20 (1). 250-260. DOI: 10.1109/JSEN.2019.2941273
3. Stepanov O. A., Litvinenko Yu. A., Vasiliev V. A., Toropov A. B., Basin M. V. Polynomial Filtering Algorithm Applied to Navigation Data Processing under Quadratic Nonlinearities in System and Measurement Equations. Part 1. Description and Comparison with Kalman Type Algorithms // Giroskopiya i Navigatsiya. 2021. 29, 3 (114). 3-33. DOI: 10.17285/0869-7035.0068
4. Vodicheva L. V., Bel'skiy L. N., Parysheva Yu. V., Lystsov A. A. Inertial measuring units for future-generation aerospace products: fault-tolerance // Vestnik of Samara University. Aerospace and mechanical engineering. 2018. 17 (1). 28-44. DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-1-28-44
5. Aleshkin V. V., Aleshkin M. V., Sokolsky A. S., Matveev A. S. Issledovaniye algoritmov obrabotki informatsii izbytochnogo bloka mikromekhanicheskikh akselerometrov [Information processing algorithms research of the micromechanical accelerometers superfluous block] // Vestnik of Saratov State Technical University. 2007. 1. 96-105.
6. Aleshkin V. V., Matveev A. S., Aleshkin M. V. Matematicheskiye modeli, metody i algoritmy obrabotki izbytochnoy informatsii izmeritel'nogo bloka [Mathematical models, methods and algorithms for processing redundant information of the measuring block]. Internet and Innovation: Proceedings of the International Conference. Saratov: Izd-vo SSTU, 2008. P. 377-380.
7. Turkin V.A. Primeneniye matematicheskogo modelirovaniya pri razrabotke metodiki proyektirovaniya blokov chuvstvitel'nykh elementov dlya BINS s neortogonal'noy oriyentatsiyey izmeritel'nykh osey [Application of mathematical modeling in design methodology of inertial measurement units for strapdown inertial systems with non-orthogonal orientation of measurement axes] // Izvestiya Tula State University. Technical sciences. 2023. 4. 326-334. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-4-326-335

8. Turkin V. A. Rezul'taty razrabotki metodiki kontrolya blokov chuvstvitel'nykh elementov dlya BINS s neortogonal'noy oriyentatsiyey izmeritel'nykh osey [Results of the development of a methodology for the control of inertial measurement units for sins with non-orthogonal orientation of measuring axes] // Izvestiya Tula State University. Technical sciences. 2023. 2. 257-264. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-2-257-264
9. Zotov S. A., Rivers M. C., Trusov A. A., Shkel A. M. Folded MEMS pyramid inertial measurement unit // IEEE Sensors Journal. 2011. 11 (11). 2780-2789.
10. Potter J. E., Deckert J. C. Minimax Failure Detection and Identification in Redundant Gyro and Accelerometer Systems // Journal of Spacecraft and Rockets. 1973. 10 (4). 236-243. DOI: 10.2514/3.27753.
11. Ebner R. E., Mark J. G. Redundant Integrated Flight-Control/Navigation Inertial Sensor Complex // Journal of Guidance, Control, and Dynamics. 1978. 1 (2). 143-149. DOI: 10.2514/3.55757.
12. Daly K. C., Gai E., Harrison J. V. Generalized Likelihood Test for FDI in Redundant Sensor Configurations // Journal of Guidance, Control, and Dynamics. 1979. 2 (1). 9-17. DOI: 10.2514/3.55825.
13. Marinushkin P. S., Nesterenko T. G. Malogabaritnaya sistema personal'noy navigatsii na baze neortogonal'nogo inertsial'nogo izmeritel'nogo bloka s izbytochnoy strukturoy [Miniature personal navigation system based on non-orthogonal redundant inertial measurement unit] // Science and Education of Bauman MSTU. 2016. 8. 121-134. URL: <https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/45802/1/reprint-nw-20198.pdf> (Accessed: 28.02.2024). DOI: 10.7463/0816.0843239
14. Neortogonal'naya BINS dlya malyykh BPLA [Non-orthogonal BINS for small UAVs] // Habr, 2011. URL: <http://special.habrahabr.ru/kyocera/p/114513/> (Accessed: 28.02.2024).
15. Marinushkin P. S., Nesterenko T. G. Redundant measurement unit based on micromechanical sensors for miniature personal navigation systems // Engineering journal of Don. 2016. 3 (42). 38-46. URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_43_Marinushkin_Nesterenko_N.pdf_189517c8b2.pdf (Accessed: 28.02.2024).
16. Kalikhman D. M., Turkin V. A. Metodika kontrolya blokov chuvstvitel'nykh elementov s neortogonal'noy oriyentatsiyey izmeritel'nykh osey [Methodology for monitoring blocks of sensitive elements with non-orthogonal orientation of measuring axes] // Gyroscopy and Navigation. 2023. 31, 4 (123). 44-63.
17. Kalikhman D. M., Turkin V. A., Deputatova Ye. A., Akmayev A. A. Matematicheskaya model' izmeritel'nogo kanala shestiosnogo izmeritelya lineynogo uskoreniya s neortogonal'noy oriyentatsiyey osey chuvstvitel'nosti – pribora BILU [Mathematical model of the measurement channel for the six-axis linear acceleration sensor with non-orthogonal orientation of sensitivity axes – BILU device] // Navigation and control of aircraft. 2023. 4 (43). 2-37.
18. Alekhova E.Y., Zhdanov Y.K., Klimov D.M. Ispol'zovaniye izbytko osey chuvstvitel'nosti dlya povysheniya tochnosti izmereniy [Using redundancy of sensitivity axes to improve measurement accuracy] // Mechanics of Solids. 2013. 5. 24-27.
19. Vodicheva L. V. Povysheniye nadezhnosti i tochnosti besplatformennogo inertsial'nogo izmeritel'nogo bloka pri izbytochnom kolichestve izmereniy [Increasing reliability and accuracy of strapdown inertial measuring unit with redundant measurement quantity] // Gyroscopy and Navigation. 1997. 1. 55-67.

20. Khamidullin V. K. Tekhnicheskiye sredstva navigatsii i upravleniya dvizheniyem: uchebnoye posobiye [Technical means of navigation and traffic control: tutorial]. Kaliningrad: Izd-vo BGTU, 2019. 142 p.

Информация об авторах

Павлов Денис Викторович – ведущий инженер-математик, АО «ИЦ ИКАР» (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0003-0461-6945, energidriver@mail.ru

Телина Ирина Сергеевна – кандидат технических наук, доцент, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0003-4429-272X, Irina.Telina@novsu.ru

Самуйлова Ксения Дмитриевна – инженер, АО «ИЦ ИКАР» (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0001-3818-2503, s244581@std.novsu.ru