

Научная статья

УДК 629.7.054.07, 004.67

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=186885>

EDN: <https://www.elibrary.ru/IXDRTO>

АНАЛИЗ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОЧНОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ БЕСПЛАТФОРМЕННОГО ИНЕРЦИАЛЬНОГО ПРИБОРА ПРИ КАЛИБРОВКЕ КАНОНИЧЕСКИМ МЕТОДОМ И МЕТОДОМ ЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИИ

П.А. Илюшин ✉

Филиал акционерного общества «Центр эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры» – «Научно-исследовательский институт прикладной механики имени академика В.И. Кузнецова», г. Москва, Россия

✉ p.ilyushin@russian.space

Цитирование: Илюшин П.А. Анализ относительной погрешности определения точностных параметров бесплатформенного инерциального прибора при калибровке каноническим методом и методом линейной регрессии // Труды МАИ. 2025. № 145. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=186885>

Аннотация. В настоящей работе исследуется метрологическая цепь, возникающая при калибровке бесплатформенного инерциального блока, включающего в свой состав акселерометрические и гироскопические измерительные каналы. В качестве чувствительных элементов рассматриваемого прибора используются прецизионные вибрационно-струнные акселерометры и волоконно-оптические гироскопы. Но эти чувствительные элементы в составе бесплатформенной инерциальной системы не имеют возможности предстартовой самокалибровки на борту объекта управления, а значит необходима достоверная калибровка их постоянных точностных параметров на предприятии изготовителе. В настоящий момент использование нелинейных моделей, описывающих измерения прибора, невозможно вследствие

ограниченной производительности, применяемых в космических аппаратах высоконадежных бортовых вычислительных системах. Поэтому для описания модели измерений и погрешности прибора применяются линейные или степенные (не выше 3 порядка) формулы. Проводится оценка относительных погрешностей при калибровке каноническим методом по строгим формулам для отдельных точностных параметров, учитывающим часть измерений в положениях поворотного стенда, и методом линейной регрессии, использующим полный набор имеющихся измерений. При помощи этой оценки делается заключение о пригодности калибровки методом линейной регрессии с точки зрения сравнимости погрешностей с каноническим методом калибровки, и приводятся результаты экспериментально проведенной калибровки методом линейной регрессии для трех типов приборов. Полученные результаты подтверждают преимущества предложенного способа калибровки и открывают дополнительные перспективы при введении сервисных файлов, содержащих информацию об особенностях отдельных приборов. На текущем этапе считается, что при эксплуатации прибора будет реализована слабосвязанная схема комплексирования, в которой значения ускорений для гироскопических измерительных каналов получаются в отдельном алгоритме более высокого уровня. Однако, преимущества описываемого подхода еще сильнее проявляются в глубоко интегрированных системах измерений. Причем применяемое при испытаниях прибора оборудование позволяет работать с сервисными файлами, имеющими распространенный формат XML, что позволяет значительно упростить подготовку к испытаниям и анализ получаемых результатов. Дальнейшим развитием предлагаемого подхода является исключение понятия акселерометрических, гироскопических, температурных каналов, поскольку адресные коэффициенты матрицы преобразования будут нивелировать необходимость учета чувствительности датчиков к входной величине конкретного типа.

Ключевые слова: бесплатформенный инерциальный прибор, калибровка, линейная регрессия, метрологическая цепь, метод вариаций.

STRAPDOWN INERTIAL MEASUREMENT UNIT PRECISION PARAMETERS CALCULATION ERRORS DURING CALIBRATION WITH CANONICAL METHOD AND LINEAR REGRESSION METHOD ANALYSIS

P.A. Ilyushin ✉

Branch of Joint Stock Company «TsENKI» - «NII PM», Moscow, Russia

✉ p.ilyushin@russian.space

Citation: Ilyushin P.A. Strapdown inertial measurement unit precision parameters calculation errors during calibration with canonical method and linear regression method analysis // Trudy MAI. 2025. No. 145. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=186885>

Abstract. Metrological chain described in the article occurs during calibration of the strapdown inertial measurement unit with accelerometric and gyroscopic measuring channels. Sensitive elements of the considering unit are high-precision vibrational-string accelerometers and fiber-optic gyroscopes. However, these sensitive elements as a part of strapdown inertial system mounted in control object, despite of gimbal inertial system, do not have a possibility to self-calibrate. Thus, manufacturer must reliably calibrate precision parameters at the end of the inertial measurement unit production. Currently, it is not possible to use non-linear models describing the instrument measurements due to limits in productivity in high-reliability spacecraft on-board computing systems. Therefore, linear or power (three order and lower) functions describes the model of measurements and instrument error. The paper estimates relative mistakes of canonical calibration with exact formulas for individual measurement parameters, when used a part of measurements in positions of turntable, and for calibration via linear regression when used the whole measurements set. This estimation makes a conclusion about the calibration via linear regression suitability in terms of closeness its mistakes to canonical method calibration mistakes, and allows providing experimental calibration via linear regression results for units of three different types. The obtained results confirm the advantages of suggested calibration method and open up additional perspectives with service files consisting information about the device features. Moreover, the research equipment allows working with

service files that have a common XML format, which makes it much easier to prepare for experiments and to analyze the results. At this stage, the device during its exploitation includes in the measurement system of a spacecraft by loosely coupled scheme, where higher-level algorithm calculates acceleration values for gyroscope channels. However, the advantages of described approach are even more evident in the deeply integrated measurement systems. Further development of the proposed approach excludes the terms of accelerometers, gyroscopes, temperatures sensors, because transform matrix coefficients neutralize the sensitivity to the input value of a specific type.

Keywords: strapdown inertial measurement unit, calibration, linear regression, metrological chain, variation method.

Введение

В составе космических аппаратов и средств выведения применяются инерциальные навигационные системы, позволяющие с высокой точностью решать задачи ориентации, навигации и стабилизации объекта управления [1]. Данные системы обладают рядом преимуществ перед неинерциальными системами: быстродействие, точность, защита канала измерений от внешних помех. Инерциальные системы разделяются на платформенные и бесплатформенные. Преимуществом вторых являются более широкие полосы пропускания и диапазон измерений, меньшие габариты и потребляемая мощность, что критично в условиях развития современных систем выведения и подходов к их применению [2]. Но бесплатформенные системы не имеют возможности предстартовой самокалибровки на борту объекта управления [3], а значит необходима достоверная калибровка их постоянных точностных параметров на предприятии изготовителе.

Принцип принимаемой в отрасли калибровки каноническими методами [4] заключается в вычислении средних значений первичных показаний в необходимых положениях скоростного стенда и применении этих значений в соответствующих формулах для определения инструментальных погрешностей инерциальных систем. За счет этого инструментальные погрешности измерений

при учете метрологических цепей измерений прибора снижаются до допустимых значений. В настоящее время на предприятии применяются трехосные скоростные стенды с задаваемыми ориентациями и скоростями вращения независимо по всем 3 осям, причем с потенциально достижимыми малыми погрешностями.

В упомянутых актуальных научных работах, посвященных калибровке датчиков, общим является то, что для вычисления поправок акселерометров и гироскопов используются их средние показания в продолжительном замера и проводятся отдельные испытания для каждого типа поправки, вместо калибровки по всему массиву данных по мгновенным показаниям датчиков.

Поскольку модель измерений прибора применяется в модели измерений бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС), она должна быть приемлемой для бортового комплекса управления, а на текущем этапе развития техники сложные нелинейные зависимости у потребителей не реализуются. Следовательно, применение глубоких нейронных сетей [5], даже при существенном повышении точности измерений будет невозможно на борту КА, но линейная регрессионная модель соответствует этим ограничениям.

При реализации нейронных сетей применяются разнообразные архитектуры моделей, наиболее эффективные для решения частных задач. Подобные модели обучаются перед эксплуатацией на высокопроизводительных вычислительных системах, в том числе кластерах суперкомпьютеров. Затем довольно сложные модели с подобранными коэффициентами реализуются в бортовых системах. Применение нейронных сетей в актуальных научных работах сводится к созданию моделей, в основном глубокого обучения, наиболее детально решающих поставленные задачи. Работа с ограниченными ресурсами, в общем случае не является приоритетной.

Имеющаяся модель измерений линейна с точки зрения зависимости компонентов выходного сигнала от входного. Причем входной сигнал представляет собой вектор, в котором могут содержаться степенные функции от исходных входных величин и результат их поэлементного перемножения. В случае калибровки, и в более широком смысле – измерений прибора, входной

сигнал формируется из первичных показаний чувствительных элементов прибора в формате единиц младших разрядов (е.м.р.), а выходной сигнал – полезной информацией прибора, применимой в работе БИНС в формате векторов физических величин, спроецированных на корпусные оси прибора.

Остается открытым вопрос: какой точностью задания ориентации должны обладать скоростные стенды для приборов разного класса точности, а также какие возможности предоставит калибровка современными методами, в том числе методом линейной регрессии? Задачей настоящей работы является сравнение теоретических погрешностей, получаемых при калибровке параметров прибора и экспериментальное применение метода линейной регрессии для калибровки нескольких типов приборов.

Актуальность научной проблемы кроется в том, что несмотря на высокую производительность современных встроенных вычислительных систем в космических аппаратах и средствах выведения, а также наличие большого объема данных, получаемых при имитации различных внешних условий в процессе изготовления инерциальных измерительных приборов, их математические модели измерений строятся с косвенным введением искусственных ограничений, проявляющихся вследствие применения строгих формул при наземной калибровке.

Математическая модель калибровки

В показаниях любого инерциального измерительного прибора содержатся постоянные погрешности и их шумовые составляющие [6]. При теоретической оценке погрешностей измерения будет исследоваться бесплатформенный инерциальный блок (БИБ), включающий 6 измерительных каналов (ИК), разделяющихся на 3 акселерометрических и 3 гироскопических (АИК и ГИК соответственно). Суть канонического и предлагаемого подходов заключается в том, что величины, которые измеряет прибор известны в каждый момент времени, а реально измеренные им величины определяются на основе его первичной информации с применением матрицы преобразования, формируемой определенным образом из точностных параметров ИК:

$$K^+ \left(\mu_{U_i}, \beta_{U_i}, \tau_{U_i}, \rho_{U_i}, \varepsilon_{U_i}, \alpha_{U_i}^X, \alpha_{U_i}^Z \right) \times N = R$$

$$R = \begin{bmatrix} 1 & a_X & a_Y & a_Z & \omega_X & \omega_Y & \omega_Z \end{bmatrix}^T$$

$$U \in [A \quad G]$$
(1)

где K^+ – псевдообратная матрица к матрице преобразования измеряемых физических величин в показания прибора; R – вектор физических измерений, задаваемых на стенде; N – вектор первичных цифровых показаний ИК прибора; a – проекция кажущегося ускорения на соответствующую ось прибора; ω – проекция угловой скорости на соответствующую ось прибора; U – тип ИК (A – АИК, G – ГИК); μ – нулевой сигнал соответствующего ИК; β – масштабный коэффициент соответствующего ИК; τ – нулевой сигнал, пропорциональный перегрузке по оси \square соответствующего ИК; ρ – нулевой сигнал, пропорциональный перпендикулярной по 1-й оси \otimes перегрузке соответствующего ИК; ε – нулевой сигнал, пропорциональный перпендикулярной по 2-й оси \perp перегрузке соответствующего ИК; α – угол поворота вокруг указанной оси соответствующего ИК; i – номер ИК; X, Y, Z – оси ортогональной прямоугольной системы координат корпуса прибора.

Матрица преобразования в каноническом понимании состоит из матрицы ориентации ИК и матрицы измерения прибора, которые в рассматриваемом случае сведены в одну матрицу, которая и определяется при калибровке в реальности. Ожидаемые измерения прибора зависят от ориентации стенда и задаваемого на нем воздействия [7], посредством поворота вектора при начальном положении стенда:

$$R_U = M \left(\psi^I, \psi^M, \psi^O \right) \times R_U^o$$

$$R_A^o = g \cdot \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; R_G^o = \Omega_3 \cdot \begin{bmatrix} \sin \varphi \\ 0 \\ \cos \varphi \end{bmatrix} + \Omega_C \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; R = \begin{bmatrix} 1 \\ R_A \\ R_G \end{bmatrix}$$
(2)

Где M – матрица ориентации стенда; R^o – вектор, задаваемый стендом в начальной ориентации; ψ – угол поворота стенда, вокруг внутренней (I), промежуточной (M), внешней осей (O); g – модуль вектора ускорения свободного падения Земли в месте проведения калибровки; Ω_3 – угловая

скорость вращения Земли; Ω_c – угловая скорость, задаваемая стендом; φ – широта места проведения калибровки.

Для упрощения записи далее будут введены следующие обозначения тригонометрических операций:

$$\begin{aligned}
 CF &= \cos \varphi & SF &= \sin \varphi \\
 CM &= \cos \psi^M & SM &= \sin \psi^M \\
 CO &= \cos \psi^O & SO &= \cos \psi^O \\
 CI &= \cos \psi^I & SI &= \sin \psi^I \\
 CX_{Ui} &= \cos \alpha_{Ui}^X & SX_{Ui} &= \sin \alpha_{Ui}^X \\
 CZ_{Ui} &= \cos \alpha_{Ui}^Z & SZ_{Ui} &= \sin \alpha_{Ui}^Z \\
 CC_{Ui} &= \cos \alpha_{Ui}^Z \cdot \cos \alpha_{Ui}^X & CS_{Ui} &= \cos \alpha_{Ui}^Z \cdot \sin \alpha_{Ui}^X \\
 SC_{Ui} &= \sin \alpha_{Ui}^Z \cdot \cos \alpha_{Ui}^X & SS_{Ui} &= \sin \alpha_{Ui}^Z \cdot \sin \alpha_{Ui}^X
 \end{aligned} \tag{3}$$

Вводится коэффициент k_c , равный 0 в статических положениях, а в динамических для упрощения считается, что за счет полного поворота погрешности в плоскости поворота пропорциональны отклонению угла поворота от 360° , описываемому коэффициентом χ , номинально равным 1. Этот коэффициент в дальнейшем применяется для учета погрешности поворота:

$$R = \begin{bmatrix} 1 \\ -g \cdot CM \\ -g \cdot SO \cdot SM \\ -g \cdot CO \cdot SM \\ (\Omega_3 \cdot SF + k_c \cdot \Omega_c) \cdot CM \cdot \chi + (1 - k_c) \cdot \Omega_c \cdot CF \cdot SM \cdot CI \cdot \chi \\ (\Omega_3 \cdot SF + k_c \cdot \Omega_c) \cdot SO \cdot SM \cdot \chi - (1 - k_c) \cdot \Omega_c \cdot CF \cdot (CO \cdot SI + SO \cdot CM \cdot CI) \cdot \chi \\ -(\Omega_3 \cdot SF + k_c \cdot \Omega_c) \cdot CO \cdot SM \cdot \chi - (1 - k_c) \cdot \Omega_c \cdot CF \cdot (-SO \cdot SI + CO \cdot CM \cdot CI) \cdot \chi \end{bmatrix} \tag{4}$$

Для калибровки удобно приводить измеряемые величины к показаниям прибора, в этом случае модель калибровки прибора с учетом шумов ИК δN будет следующей:

$$N = K \times R + \delta N \tag{5}$$

Эта формула пригодна для калибровки, в том числе, на установке, задающей линейные ускорения, а не только при применении проекций

ускорения свободного падения. Дальнейшим развитием предлагаемого подхода унифицированной калибровки [8] является исключение понятия акселерометрических, гироскопических каналов и термодатчиков, поскольку адресные коэффициенты матрицы преобразования будут нивелировать необходимость учета чувствительности датчиков к входной величине конкретного типа. Еще одно преимущество унифицированной калибровки заключается в том, что эксплуатирующая прибора организация будет получать готовую матрицу преобразования из первичных показаний в физические величины без необходимости последовательного применения вычислительных математических операций.

При построении матрицы преобразования ГИК проявляется интересная особенность – при калибровке ускорения для ГИК берутся из показаний стенда, а при эксплуатации из показаний АИК, т.е. с учетом их собственных погрешностей. При эксплуатации возможно построение систем измерения с разными подходами к комплексированию [9, 10]:

- слабосвязанная – по показаниям прибора решаются задачи навигации, ориентации и стабилизации, результат уточняется при помощи внешних датчиков;
- тесносвязанная – задачи решаются в единой схеме с учетом преобразованных измерений прибора и датчиков;
- глубокоинтегрированная – первичные показания приборов и датчиков используются в единой схеме измерений с взаимной компенсацией погрешностей.

На текущем этапе будет считаться, что при эксплуатации будет реализована слабосвязанная система, в которой значения ускорений для ГИК получаются в отдельном алгоритме более высокого уровня. При калибровке будут использоваться ожидаемые проекции ускорения, идентичные используемым при калибровке АИК. Также, считается, что показания АИК не зависят от угловой скорости.

Модель измерений будет следующая:

$$\begin{cases} a_1 = \mu_{A1} + \beta_{A1} \cdot n_{A1} \\ a_2 = \mu_{A2} + \beta_{A2} \cdot n_{A2} \\ a_3 = \mu_{A3} + \beta_{A3} \cdot n_{A3} \\ \omega_1 = \mu_{G1} + \beta_{G1} \cdot n_{G1} + \tau_{G1} \cdot a_1^{\square} + \rho_{G1} \cdot a_1^{\otimes} + \varepsilon_{G1} \cdot a_1^{\perp} \\ \omega_2 = \mu_{G2} + \beta_{G2} \cdot n_{G2} + \tau_{G2} \cdot a_2^{\square} + \rho_{G2} \cdot a_2^{\otimes} + \varepsilon_{G2} \cdot a_2^{\perp} \\ \omega_3 = \mu_{G3} + \beta_{G3} \cdot n_{G3} + \tau_{G3} \cdot a_3^{\square} + \rho_{G3} \cdot a_3^{\otimes} + \varepsilon_{G3} \cdot a_3^{\perp} \end{cases} \quad (6)$$

Формула, описывающая проекции вектора измеряемой физической величины на соответствующие ИК для ГИК и АИК идентична:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} CZU1 & -SCU1 & SSU1 \\ CZU2 & -SCU2 & SSU2 \\ CZU3 & -SCU3 & SSU3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{bmatrix} \quad (7)$$

Для учета влияния ускорения в ГИК нужно использовать матрицы, получаемые поворотом каждого ИК на 2 уникальных угла, характеризующих ориентацию этого ИК в приборе, и на угол 45° для совмещения с осями других ИК, что существенно для модели измерений рассматриваемого прибора:

$$\begin{bmatrix} a_i^{\square} \\ a_i^{\otimes} \\ a_i^{\perp} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \begin{bmatrix} \sqrt{2} \cdot CZGi & -\sqrt{2} \cdot SCGi & \sqrt{2} \cdot SSGi \\ SZGi & CCGi - SZGi & -CSGi - CXGi \\ SZGi & CCGi + SXGi & -CSGi + CXGi \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} \quad (8)$$

При унифицированном подходе можно построчно заполнять матрицу для каждого ИК без ограничений на их тип и число и без разделения ИК по их типу. В штатном понимании, учитывающем тип ИК строки матрицы будут следующие:

$$K_{Ai} = \frac{\begin{bmatrix} -\mu_{Ai} & CZAi & -SCAi & SSAi & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}{\beta_{Ai}} \cdot \begin{bmatrix} -\mu_{Gi} \\ \sqrt{2} \cdot CZGi \cdot \tau_{Gi} + SZGi \cdot \rho_{Gi} + SZGi \cdot \varepsilon_{Gi} \\ -\sqrt{2} \cdot SCGi \cdot \tau_{Gi} + (CCGi - SXGi) \cdot \rho_{Gi} + (CCGi + SXGi) \cdot \varepsilon_{Gi} \\ \sqrt{2} \cdot SSGi \cdot \tau_{Gi} - (CSGi + CXGi) \cdot \rho_{Gi} - (CSGi - CXGi) \cdot \varepsilon_{Gi} \\ CZGi \\ -SCGi \\ SSGi \end{bmatrix}^T \quad (9)$$

Постановка задачи

Таким образом, научной задачей, рассматриваемой в настоящей работе, будет привлечение методов машинного обучения при калибровке инерциальных измерительных приборов без явного разделения на типы применённых чувствительных элементов в их ИК.

Оценка погрешностей калибровки

Для вычисления погрешностей будет использоваться метод вариаций [11], применимый в предположении о линеаризации погрешностей в окрестности номинальных значений оцениваемых величин, что для БИБ прецизионного класса точности обеспечивается применёнными в нём конструктивными и схемотехническими решениями:

$$(\sigma N)^2 = \sum_p \left(\frac{\partial N}{\partial p} \cdot \delta p \right)^2 \quad (10)$$

Где $\frac{\partial N}{\partial p}$ – частная производная измерений прибора по параметру p ;

σ – обозначение погрешности, зависящей от анализируемых факторов;

δ – обозначение постоянной в рамках анализа погрешности.

Поэлементное дифференцирование исходной формулы позволяет выделить отдельные блоки и оценивать их независимо. Таким образом, общая погрешность может быть сгруппирована по ее источнику:

$$(\sigma N)^2 = (\sigma N_R)^2 + (\sigma N_K)^2 + (\delta N)^2 \quad (11)$$

Для вектора измерений погрешности определяются погрешностями параметров стенда. Результирующая формула в общем виде будет следующая:

$$\begin{aligned} (\sigma N_R)^2 &= (K \times R')^2 \times (\delta R)^2 = (K_R)^2 \times (\delta R)^2 \\ R' &= [R'_1 \quad R'_g \quad R'_3 \quad R'_C \quad R'_\varphi \quad R'_I \quad R'_M \quad R'_O \quad R'_\chi] \\ \delta R &= [0 \quad \delta g \quad \delta \Omega_3 \quad \delta \Omega_C \quad \delta \varphi \quad \delta \psi_I \quad \delta \psi_M \quad \delta \psi_O \quad \delta \chi] \end{aligned} \quad (12)$$

Для матрицы преобразования присутствует идентичная зависимость от параметров каждого ИК, как для ГИК, так и для АИК. Однако, при каноническом подходе строки для АИК и ГИК различаются порядком следования параметров, и стоит рассматривать их отдельно. Поэлементные производные будут матрицами

с одной ненулевой строкой, т.е. фактически векторами, причем идентичными для одного типа ИК, что позволяет описать погрешности в матричном виде:

$$\begin{aligned}
 (\sigma N_K)^2 &= (K'_{Ui} \times R)^2 \times (\delta P_{Ui})^2 = (P_{KUi})^2 \times (\delta P_{Ui})^2 \\
 K'_{Ui} &= [K_{\mu Ui} \quad K_{\beta Ui} \quad K_{\tau Ui} \quad K_{\rho Ui} \quad K_{\varepsilon Ui} \quad K_{XUi} \quad K_{ZUi}] \\
 (\delta P_{Ui})^2 &= [\delta \mu_{Ui} \quad \delta \beta_{Ui} \quad \delta \tau_{Ui} \quad \delta \rho_{Ui} \quad \delta \varepsilon_{Ui} \quad \delta \alpha_{Ui}^X \quad \delta \alpha_{Ui}^Z]
 \end{aligned} \tag{13}$$

Для шумовой составляющей составляющая погрешности получается наиболее простая:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial N}{\partial p} \cdot \delta p &= \delta p \\
 p &\in [\delta n_{A1} \quad \delta n_{A2} \quad \delta n_{A3} \quad \delta n_{G1} \quad \delta n_{G2} \quad \delta n_{G3}]
 \end{aligned} \tag{14}$$

Для исследования шумовой составляющей был написан скрипт, вычисляющий среднеквадратическое отклонение в замере по всем экспериментально полученным файлам и формирующий общий набор данных (Рисунок 1).

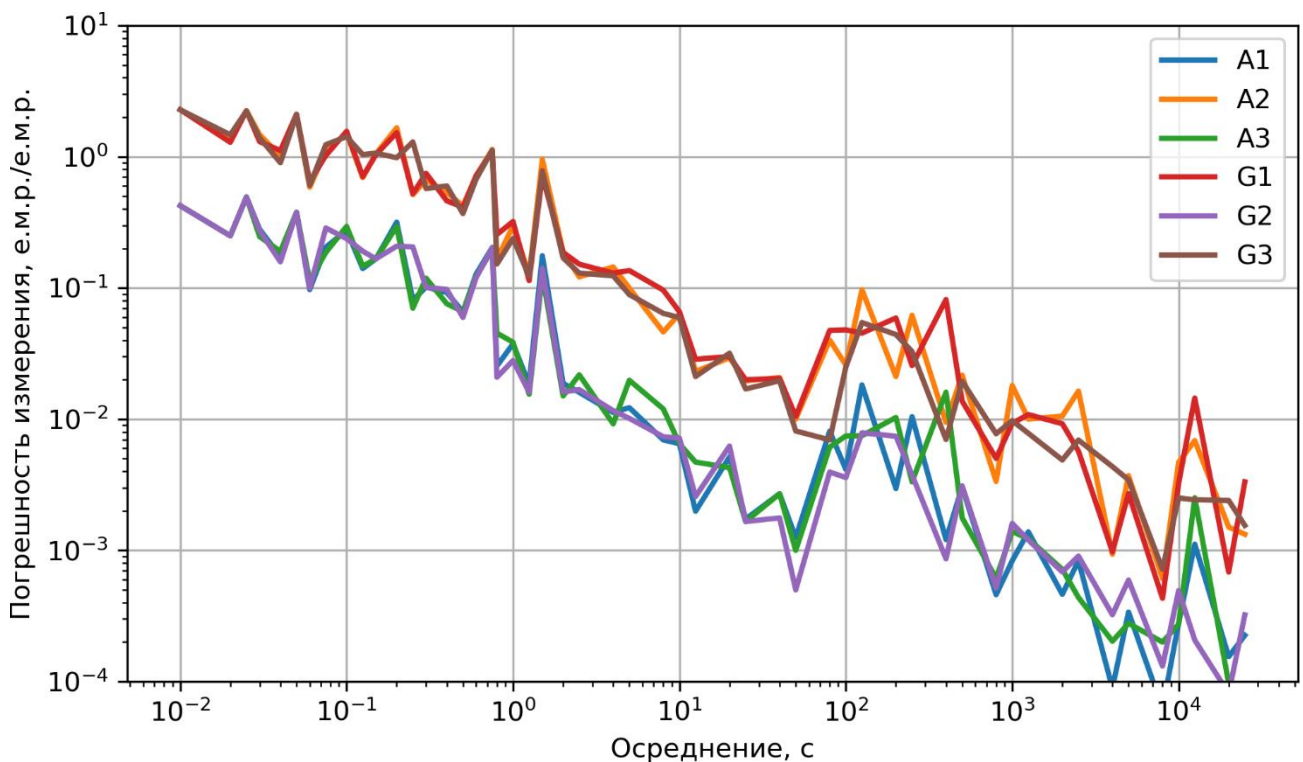


Рисунок 1 – Зависимость погрешности измерений от времени осреднения.

Для простоты в дальнейших расчетах будет считаться, что погрешность во всех замерах равна медианному значению при осреднении по 50 с. Считается, что погрешности шумов каналов никак не связаны с внешними условиями испытаний, а погрешности параметров, используемые при вычислении

погрешностей прибора можно определить исходя из применяемых при калибровке формул:

$$(\sigma N)^2 = (P_K)^2 \times (\sigma K_{Ui})^2 + (K_R)^2 \times (\delta R)^2 + (\delta N_{Ui})^2 \quad (15)$$

В штатном понимании параметры прибора определяются по строгим формулам в которых используются агрегированные результаты измерений ИК прибора в заданных положениях. Тогда погрешность измерений каждого компонента определяется на основании погрешностей измерения прибора с введением матриц, определяемых из упомянутых формул:

$$(\delta K_{Ui})^2 = (H_{Ui})^2 \times (\sigma N_{Ui})^2 + (H_{Ri})^2 \times (\delta R)^2 \quad (16)$$

В итоге можно представить общее матричное уравнение погрешности измерений и наконец определить погрешности параметров прибора из этого уравнения, как зависимость от погрешностей стенда и собственных шумов прибора, где E – единичная матрица:

$$(\delta K_{Ui})^2 = [E - (H_{Ui})^2 \times (P_K)^2]^{-1} \times \left[[(H_{Ui})^2 \times (K_R)^2 + (H_{Ri})^2] \times (\delta R)^2 + (\delta N_{Ui})^2 \right] \quad (17)$$

Чтобы вычислить общую погрешность и парциальный вклад составляющих можно вернуться к исходной формуле и свести все погрешности к одному вектору. Причем при вычислении параметров каноническим методом для АИК используется 16 из 217 значений замеров в различных положениях стенда, т.е. около 7%, для ГИК 58 из 217, т.е. около 27%. Это дополнительно подчеркивает важность разработки новых методов калибровки и обновления модели измерения в целом, что уже внедряется в смежных научно-технических областях.

Работа [12] посвящена калибровке погрешностей вращающейся инерциальной навигационной системы с применением комплексной модели анализа погрешностей и с учетом коэффициента важности при построении оптимального исполнения. В работе [13] приводится результат построения платформы для развязки сил в массивных космических телескопах при помощи методов оптимизации, в частности алгоритма полной регрессионной линейной развязки, что позволяет сохранить разрешающую способность при воздействии вибрации. В работе [14] применяются нейронные сети для частного случая температурной калибровки параметров гироскопов. В работе [15], посвященной

привычному в отрасли для определения характеристик шума анализу вариации Аллана, предлагается отойти от подхода, при котором экспериментальная кривая описывается приближенно при помощи ограниченного числа известных типов шумов, а применять методы линейной регрессии для максимально точного описания наблюдаемого процесса. В работе [16] рассматривается алгоритм калибровки инерциальной измерительной системы морского назначения без применения поворотных столов и с привлечением метода наименьших квадратов при вычислении параметров калибровки. В работе [17] прямая калибровка инерциального измерительного прибора расширяется дополнительным этапом калибровки в составе инерциальной навигационной системы с учетом данных прямой калибровки и с использованием градиентов скорости. В работе [18] предложен новый метод быстрой самокалибровки позволяющий достигать требуемой точности быстрее штатных методов.

При калибровке с использованием машинного обучения напрямую минимизируется разница Δ между ожидаемыми и полученными значениями:

$$\lim_{j \rightarrow \infty} \left[\sum_j (N - K \times R)^2 \right] = \Delta^2 \quad (18)$$

Если снова обратиться к методу вариаций, то в этом случае неизвестными будут только погрешности матрицы преобразования. Явных формул для определения ее компонентов при машинном обучении нет, однако можно сделать предположение, что при минимизации погрешности методом наименьших квадратов парциальные погрешности каждого компонента становятся примерно равны. Т.е. в приведенной матрице все компоненты строки для конкретного ИК равны приведенной погрешности для этого ИК:

$$\begin{aligned} (\delta K)^2 \times (R)^2 + (K)^2 \times (\delta R)^2 + (\delta N)^2 &= \Delta^2 \Rightarrow (\delta K)^2 \times (R)^2 < \Delta^2 \\ |\delta K_1 / w_1| = \dots &= |\delta K_{U_i} / w_{U_i}| < \Delta_{U_i} \Rightarrow |\delta K_{U_i}| < w_{U_i} \cdot \Delta_{U_i} \\ w_{U_i} &= \frac{|K_{U_i} \cdot R_{U_i}|}{\sum_{U_i} |K_{U_i} \cdot R_{U_i}|} \end{aligned} \quad (19)$$

Иными словами, обеспечивается определение коэффициентов с погрешностью, не превышающей их парциальный вклад в общую погрешность измерений, апостериорно известную по результатам калибровки методом линейной регрессии, проведенной ранее.

Результаты оценки погрешности калибровки

При задании конкретных значений погрешностей физических измерений можно получить значение погрешности измерений прибора во всех имеющихся положениях стенда (Рисунок 2).

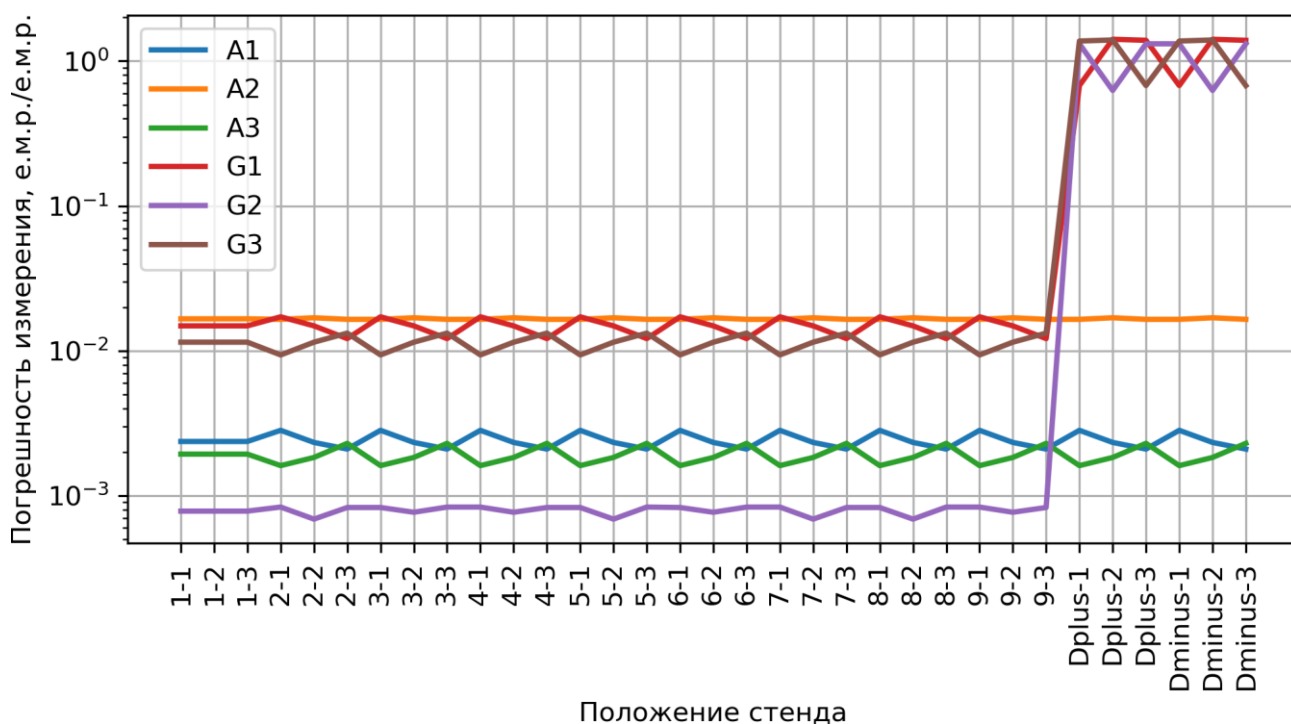


Рисунок 2 – Зависимость погрешности измерений от положения стенда

Если выделить из общей погрешности измерения прибора ее составляющие, то визуализация парциального вклада погрешностей в характерных положениях позволяет заранее оценивать критичность составляющих погрешностей при разработке приборов (Рисунок 3).

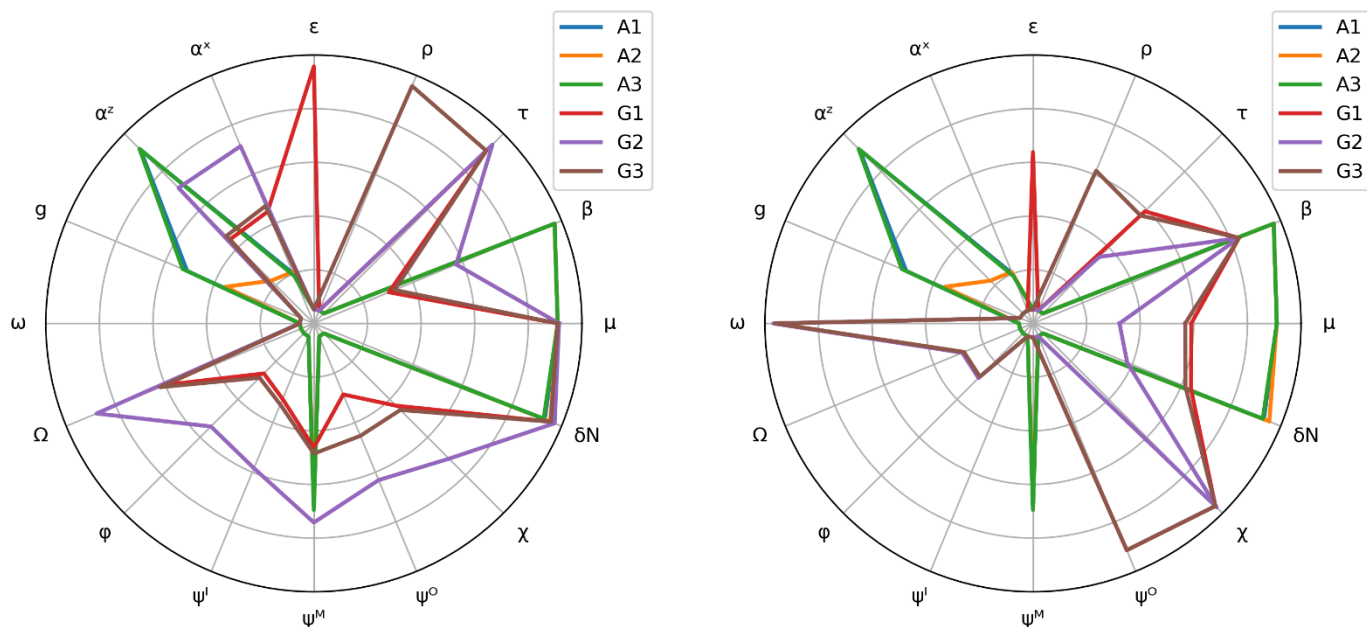


Рисунок 3 – Парциальный вклад параметров в общую погрешность ИК в логарифмическом масштабе по радиальной оси (слева в статическом положении, справа в динамическом положении)

В результате теоретической оценки можно сформировать сводную матрицу погрешностей точностных параметров (Таблица 1). Причем, теоретическая погрешность компонентов матрицы при машинном обучении сравнима с полученными погрешностями отдельных параметров при штатной калибровке.

Таблица 1

Вычисленные значения погрешностей ИК при штатной калибровке приведенные к максимальному значению

ИК	μ	β	τ	ρ	ε	α_x	α_z
A1	0,0328	0,0067	0,0000	0,0000	0,0000	0,0074	0,0050
A2	0,1960	0,0399	0,0000	0,0000	0,0000	0,0477	0,0389
A3	0,0266	0,0054	0,0000	0,0000	0,0000	0,0054	0,0043
G1	1,0000	0,0369	0,1023	0,1443	0,1768	0,0010	0,0008
G2	0,0426	0,0003	0,0060	0,0099	0,0099	0,0009	0,0007
G3	0,7718	0,0004	0,0789	0,1366	0,1114	0,0010	0,0007

Для калибровки БИБ был написан скрипт на Python. Матрица преобразования, полученная при машинном обучении, получилась также близкой к ожидаемым теоретическим значениям. Было установлено, что наилучший результат получается при описании модели измерений методом линейной регрессии со степенью 2 (Рисунок 4). Дальнейшее увеличение степени приводит к увеличению погрешности, а квадратичная зависимость фактически

нужна только для учета переносных ускорений при вращении стенда в динамических положениях.

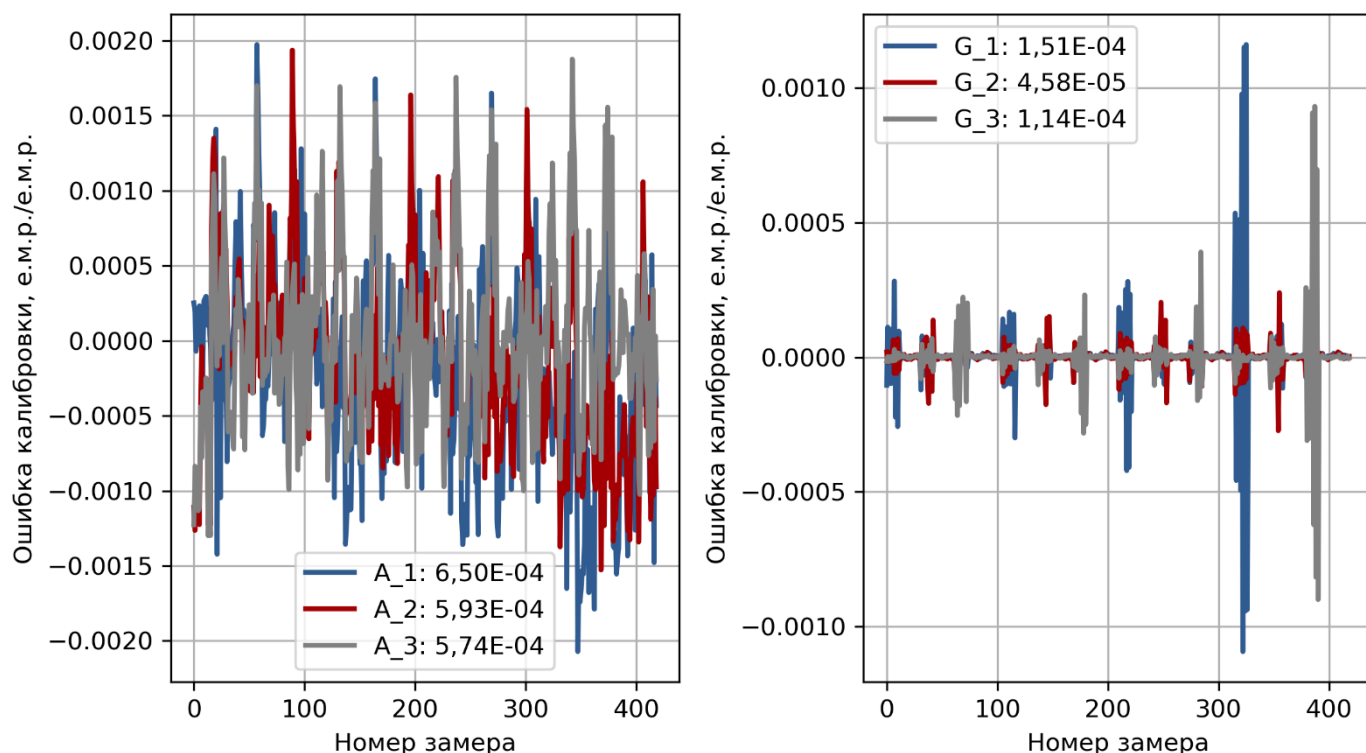


Рисунок 4 – Ошибка калибровки БИБ, слева АИК, справа ГИК (зависимость 2-го порядка)

Также осуществлена калибровка менее точных блоков датчиков угловых скоростей с динамически настраиваемыми гироскопами (БДУС-Д) и блока датчиков угловых скоростей с волоконно-оптическими гироскопами (БДУС-В). Первичная информация для БДУС-Д имеет вид средне структурированного текстового файла, но данные из него получается вполне успешно интерпретировать и преобразовать в пригодный формат при помощи Python. Первичные показания БДУС-В представлены отдельными файлами, как и в БИБ, но отличаются от них по внутренней структуре и формату записываемой информации. В результате калибровки БДУС обнаружено, что погрешность измерений уменьшается при увеличении степени до 3, затем уменьшение больше не происходит (Рисунок 5, Рисунок 6).

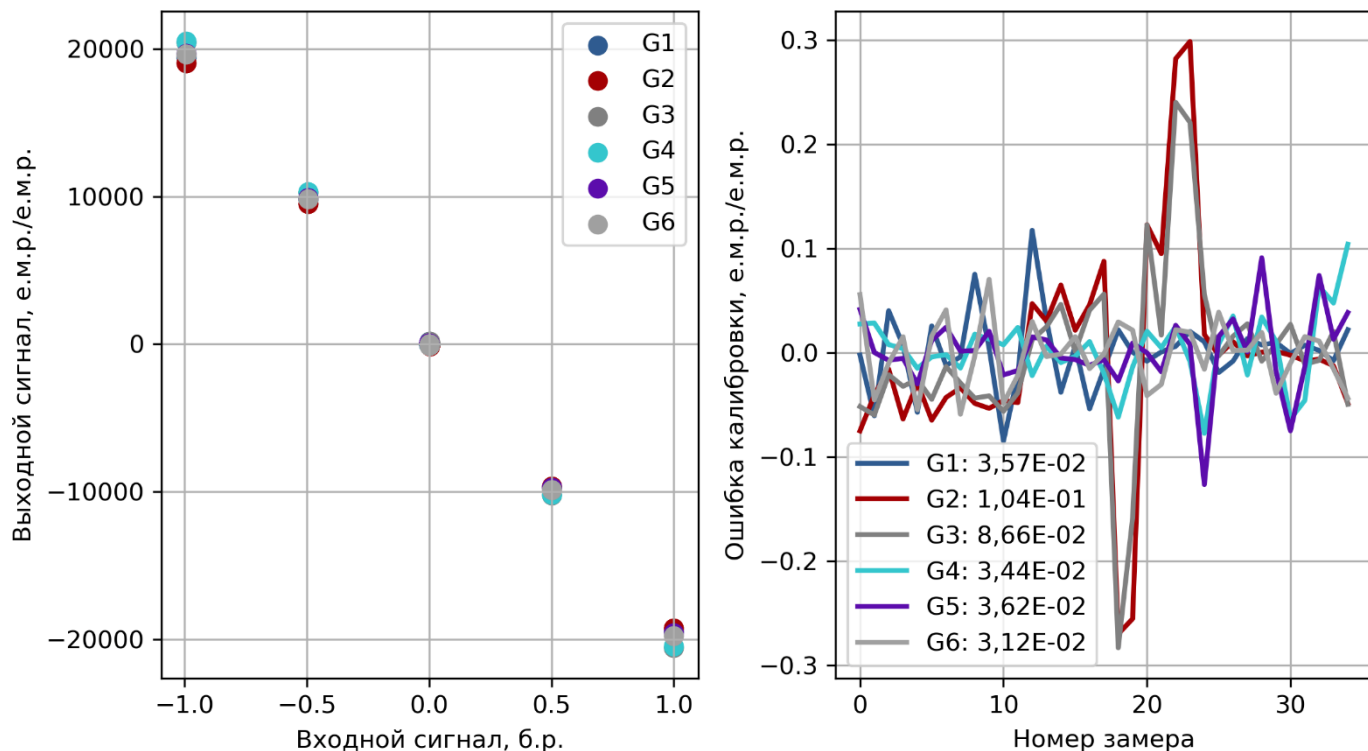


Рисунок 5 – Зависимость выхода БДУС-Д от соответствующего входа слева, ошибка калибровки БДУС-Д справа (зависимость 3-го порядка)

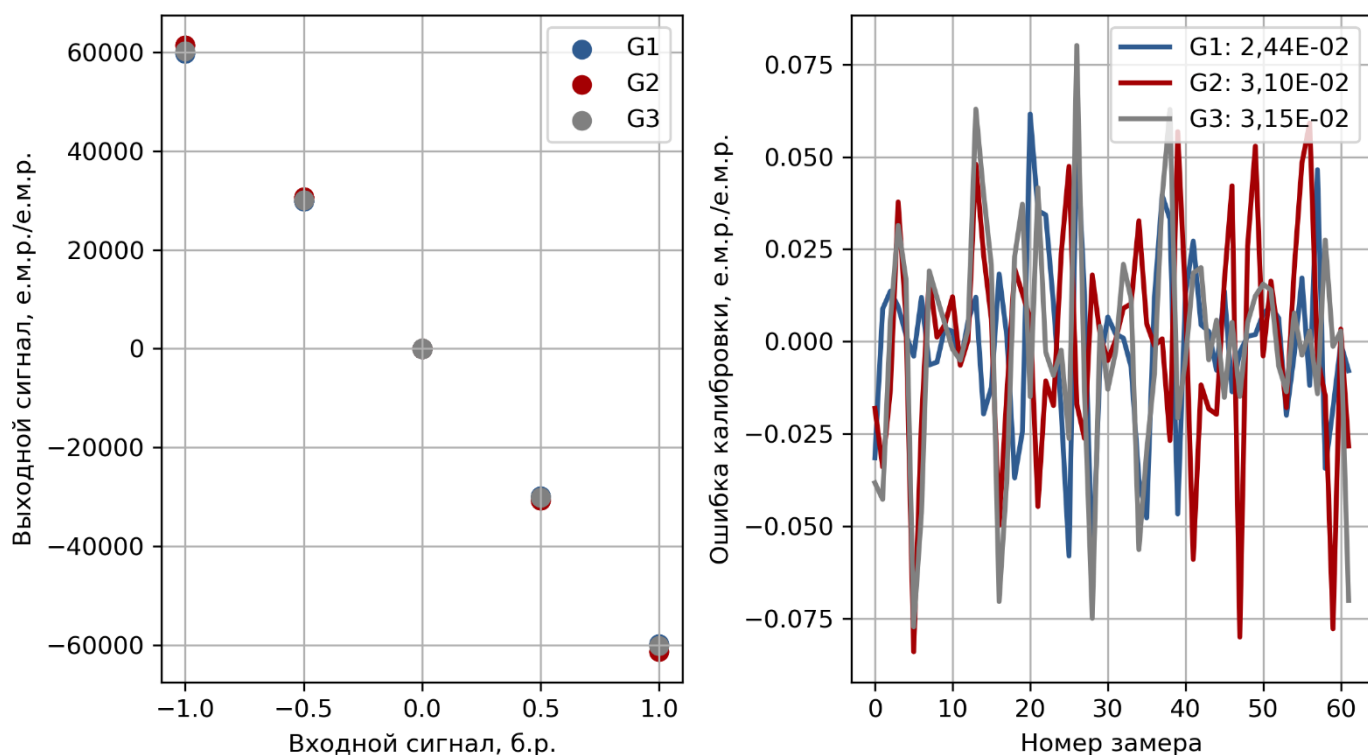


Рисунок 6 – Зависимость выхода БДУС-В от соответствующего входа слева, ошибка калибровки БДУС-В справа (зависимость 3-го порядка)

В результате калибровки формируется матрица зависимости выхода (отношения числа тактов измерения к числу тактов времени ИК прибора) от входа (проекций ускорений и угловых скоростей на конструктивные оси

прибора). Эта матрица при числе ИК равном 3 однозначно позволяет получить обратную матрицу для преобразования показаний ИК в измеряемые прибором физические величины. Если число ИК больше 3, то возникает избыточность информации. Для преобразования показаний в измерения в простейшем случае можно ввести матрицу понижения размерности, которая, в том числе, может зависеть от условий работы прибора и изменяться при выключении из расчёта одного или нескольких ИК. Фактически для преобразования из показаний ИК в показания прибора, с технической точки зрения необходимо решить задачу резервирования показаний, а с математической точки зрения определять псевдообратную матрицу. Или можно независимо использовать в работе набор матриц при базисе из 3 ИК, что является особенно полезным в рамках современного понимания управления космическими аппаратами, оперативного анализа их телеметрической информации и своевременного принятия решений [19].

Наиболее интересен сценарий использования сервисного файла со всей необходимой для калибровки информацией, позволяющего применять идентичные скрипты или ПО для различных приборов, а также автоматически формировать протоколы калибровки и отдельные части комплекта конструкторской и эксплуатационной документации. Применение распространенного формата, например, XML позволяет передавать сервисную информацию стенду и аппаратуре подачи питания и опроса прибора. Это, в свою очередь позволяет существенно уменьшить количество сопутствующих операций при изготовлении приборов [20].

Анализ результатов исследования

В рамках проведенного исследования была сформирована подробная метрологическая цепь погрешностей измерения прибора. Это позволило детально оценить вклад погрешностей от разных составляющих в общую погрешность измерения. Были подтверждены существующие гипотезы, в частности прогнозируемый существенный вклад скорости вращения стенда в погрешность определения параметров. Но вместе с этим получены и новые

полезные результаты: шумовые погрешности не отличаются в динамических и статических замерах, степень применяемого полинома для высокоточного прибора может быть ограничена 1, а для менее точных приборов 3 степень заметно сокращает погрешности. Также с использованием этих результатов в строгом виде подтверждена пригодность калибровки методом линейной регрессии.

Предлагаемый подход, позволяет исключить следующие допущения, требуемые при канонической калибровке: показания стенда идеальны, а только показания прибора имеют погрешности, погрешности прибора стабильны в течение замера, погрешности прибора полностью компенсируются набором положений. Выявлена еще одна причина погрешностей при калибровке каноническим методом – последовательное вычисление параметров ИК приводит к неоднократному включению погрешностей этих параметров в результаты калибровки. К примеру, при определении нулевого сигнала используется вычисленный масштабный коэффициент, таким образом погрешность определения масштабного коэффициента входит в погрешность определения нулевого сигнала, хотя можно было бы проводить вычисления напрямую по имеющимся данным. Было подтверждено, что предлагаемый подход калибровки индифферентен по отношению к виду прибора, его конструкции, составу его ИК. А имеющиеся частности калибровки – интерфейс обмена прибора и способы управления стенда можно учесть в сервисных файлах.

Выводы и рекомендации

В итоге этих рассуждений можно утверждать, что использование машинного обучения для калибровки приборов обоснованно, поскольку с точки зрения погрешности показывает результат сравнимый с канонической калибровкой, а с точки зрения удобства применения значительно его превосходит. Хотя в настоящей работе для каждого прибора был разработан свой скрипт подготовки данных для калибровки, в дальнейшем следует решать эту задачу при помощи сервисного файла.

В последующих исследованиях имеет смысл проверить чувствительность акселерометрических каналов к угловой скорости вращения, а гироскопических каналов к линейному ускорению не только при воздействии проекции ускорения свободного падения. Также имеет смысл внести в набор входных воздействий температуру ИК и иные факторы, которые могут оказывать влияние на измерения прибора.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Список источников

1. Matejček M., Šostronek M. The influence of inertial sensors parameters on guidance systems // New trends in signal processing (NTSP), Demanovska dolina, Slovakia, 2020. P. 1–6.
2. Кузнецов Ю.Л., Владимиров А.В. Применение ракеты-носителя сверхлёгкого класса для запуска полезных нагрузок на высокоэнергетические орбиты // Труды МАИ : электрон. журн. 2024. № 139. 27 с. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=183470>.
3. Оптимизационный подход к начальной выставке платформенной инерциальной системы при воздействии шумов / В.П. Наумченко, П.А. Илюшин, Д.Г. Пикунов, А.В. Соловьев // Вестник Московского авиационного института. 2023. Т. 30, № 2. С. 158–168. DOI 10.34759/vst-2023-2-158-168.
4. Богданов М.Б., Прохорцов А.В., Смирнов В.А. Аналитический обзор существующих моделей и методов калибровки БИНС // Известия ТулГУ. Технические науки. 2021. № 5. С. 180–184. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiticheskiy-obzor-suschestvuyuschih-modeley-i-metodov-kalibrovki-bins> (дата обращения: 25.06.2025).

5. Николенко С.И., Кадури́н А.А., Архангельская Е.О. Глубокое обучение. Погружение в мир нейронных сетей. Спб. : Питер, 2024. 480 с.
6. Зубков А.В. Имитационная модель функционирования бесплатформенной инерциальной навигационной системы ракеты-носителя с учетом стохастических погрешностей инерциальных приборов // Труды МАИ: электрон. журн. 2024. № 139. 24 с. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=183466>;
7. A separated calibration method for inertial measurement units mounted on three-axis turntables / C. Dong, S. Ren, X. Chen, Z. Wang // Sensors. 2018. Vol. 18, no. 9. Art. 2846. DOI 10.3390/s18092846.
8. Обработка показаний инерциальных приборов на унифицированном программно-математическом комплексе / В.П. Наумченко, П.А. Илюшин, Д.Г. Пикун, А.В. Соловьев // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2023. Т. 195, № 4. С. 8–16.
9. Ташков С.А., Булочников Д.Ю., Шатовкин Р.Р. Исследование существующих подходов к комплексированию информационных датчиков навигационных систем беспилотных летательных аппаратов // NovaInfo. 2018. № 91 С. 49–62. URL: <https://novainfo.ru/article/15811> (дата обращения: 24.06.2025);
10. Бобронников В.Т., Кадочникова А.Р. Алгоритм комплексирования бесплатформенной инерциальной навигационной системы и магнитометрической системы для решения задачи навигации летательных аппаратов // Труды МАИ: электрон. журн. 2013. № 71. 17 с. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/algoritm-kompleksirovaniya-besplatformennoy-inertsialnoy-navigatsionnoy-sistemy-i-magnitometricheskoy-sistemy-dlya-resheniya> (дата обращения: 24.06.2025);
11. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. М. : Наука, 1972. 768 с.
12. Abbasi J., Hashemi M., Alasty A. Sensitivity analysis of RINS using a comprehensive error analysis // IEEE Sensors Journal. 2025. Vol. 25, no. 12. P. 21322–21330. DOI 10.1109/JSEN.2025.3567594.

13. Zhou Ch., Xia M., Xu Zh. A six dimensional dynamic force/moment measurement platform based on matrix sensors designed for large equipment // Sensors and Actuators A: Physical. 2023. Vol. 349. Art. 114085. [DOI 10.1016/j.sna.2022.114085](https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.114085).
14. MEMS gyros temperature calibration through artificial neural networks / R. Fontanella, D. Accardo, R.S.L. Moriello, L. Angrisani, D. Simone // Sensors and Actuators A: Physical. 2018. Vol. 279. P. 553–565. [DOI 10.1016/j.sna.2018.04.008](https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.04.008).
15. Jurado J., Schubert Kabban C.M., Raquet J. A regression-based methodology to improve estimation of inertial sensor errors using Allan variance data // NAVIGATION: Journal of the Institute of Navigation. 2019. Vol. 66, no. 1. P. 251–263. DOI 10.1002/navi.278.
16. Rahimi H., Nikkhah A.A. Improving the calibration process of inertial measurement unit for marine applications // NAVIGATION: Journal of the Institute of Navigation. 2020. Vol. 67, no. 4. P. 763–774. [DOI 10.1002/navi.400](https://doi.org/10.1002/navi.400).
17. Performance improvement of an inertial navigation system based on FOG and SA using a two-step indirect calibration method / H. Yu, I. Lee, J. Oh, C.-K. Sung, T. Lee, C. Kim // IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL). 2025. P. 1–4. DOI 10.1109/INERTIAL63280.2025.11036733.
18. Fast self – calibration of fiber – optic strapdown inertial navigation system / D. Xu, P. Jiang, Y. Zhang, Sh. Fan, G. Wan. // 2018 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), Monterey, CA, 23–26 April 2018. P. 541–545. DOI 10.1109/PLANS.2018.8373424.
19. Румянцев Н.В., Соловьёв С.В., Павлов Д.В. Интеллектуализированная система контроля, диагностики и прогнозирования состояния бортовых систем космических аппаратов // Труды МАИ : электрон. журн. 2024. № 136. 32 с. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=180688>.
20. Рябев В.И. Методика применения визуально-диалогового интерфейса средства отображения информации автоматизированной системы управления. Труды МАИ : электрон. журн. 2025. № 140. 27 с. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=184073>.

References

1. Matejček M. and Šostronek M., The influence of inertial sensors parameters on guidance systems. New trends in signal processing (NTSP), Demanovska dolina, Slovakia, 2020, pp. 1–6.
2. Kuznetsov Yu.L., Vladimirov A.V. Trudy MAI: elektron. zhurn., 2024, no. 139, 27 p. Available at: <https://trudymai.ru/published.php?ID=183470>.
3. Naumchenko V.P., Ilyushin P.A., Pikunov D.G., Solovyov A.V. Aerospace MAI Journal, 2023, vol. 30, no. 2, pp. 158–168. DOI 10.34759/vst-2023-2-158-168.
4. Bogdanov M.B., Prokhortsov A.V., Smirnov V.A. Izvestiya Tula State University (Izvestiya TulGU), 2021, no. 5, pp. 180–184. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiticheskiy-obzor-suschestvuyuschih-modeley-i-metodov-kalibrovki-bins> (access date: 25.06.2025).
5. Nikolenko S.I., Kadurin A.A., Arkhangel'skaya E.O. Glubokoe obuchenie. Pogruzhenie v mir neironnykh setei [Deep learning. Immersion in the world of neural networks], St. Petersburg, Piter, 2024, 480 p.
6. Zubkov A.V. Trudy MAI: elektron. zhurn., 2024, no. 139, 24 p. Available at: <https://trudymai.ru/published.php?ID=183466>.
7. Dong C., Ren S., Chen X., Wang Z. A separated calibration method for inertial measurement units mounted on three-axis turntables. Sensors, 2018, vol. 18, art. 2846. DOI 10.3390/s18092846.
8. Naumchenko V.P., Ilushin P.A., Pikunov D.G., Solovyov A.V. Voprosy jelektromehaniki. Trudy VNIIJeM, 2023, vol. 195, no 4, pp. 8–16.
9. Tashkov S.A., Bulochnikov D.Yu., Shatovkin R.R. NovalInfo, 2018, no. 91, pp. 49–62. Available at: <https://novainfo.ru/article/15811> (access date: 24.06.2025).
10. Bobronnikov V.T., Kadochnikova A.R. Trudy MAI: elektron. zhurn., 2013, no. 71, 17 p. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/algoritm-kompleksirovaniya-besplatformennoy-inertsialnoy-navigatsionnoy-sistemy-i-magnitometricheskoy-sistemy-dlya-resheniya> (access date: 24.06.2025).
11. Besekerskiy V.A., Popov E.P. Teoriya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya [Theory of automatic control systems], Moscow, Nauka, 1972, 768 p.
12. Zhou Ch., Xia M., Xu Zh. A six dimensional dynamic force/moment

measurement platform based on matrix sensors designed for large equipment. Sensors and Actuators A: Physical, 2023, vol. 349, art. 114085. DOI 10.1016/j.sna.2022.114085.

13. Fontanella R., Accardo D., Moriello R.S.L., Angrisani L., Simone D. MEMS gyros temperature calibration through artificial neural networks. Sensors and Actuators A: Physical, 2018, vol. 279, pp. 553–565. DOI 10.1016/j.sna.2018.04.008.

14. Jurado J., Schubert Kabban C.M., Raquet J. A regression-based methodology to improve estimation of inertial sensor errors using Allan variance data. NAVIGATION: Journal of the Institute of Navigation, 2019, vol. 66, no. 1, pp. 251–263. DOI 10.1002/navi.278.

15. Rahimi H., Nikkhah A.A. Improving the calibration process of inertial measurement unit for marine applications. NAVIGATION: Journal of the Institute of Navigation, 2020, vol. 67, no. 4, pp. 763–774. DOI 10.1002/navi.400.

16. Yu H., Lee I., Oh J., Sung C.-K., Lee T., Kim C. Performance improvement of an inertial navigation system based on FOG and SA using a two-step indirect calibration method. IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL), 2025, pp. 1–4. DOI 10.1109/INERTIAL63280.2025.11036733.

17. Xu D., Jiang P., Zhang Y., Fan Sh., Wan G. Fast self – calibration of fiber – optic strapdown inertial navigation system. 2018 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), Monterey, CA, 23–26 April 2018, pp. 541–545. DOI 10.1109/PLANS.2018.8373424.

18. Rumyancev N.V., Solovyov S.V., Pavlov D.V. Trudy MAI: elektron. zhurn., 2024, no. 136, 32 p. Available at: <https://trudymai.ru/published.php?ID=180688>

19. Ryabev V.I. Trudy MAI: elektron. zhurn., 2025, no. 140, 27 p. . Available at: <https://trudymai.ru/published.php?ID=184073>.

Информация об авторах

Павел Алексеевич Илюшин, главный специалист, Филиал АО «Центр эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры» – «Научно-исследовательский институт прикладной механики имени академика В.И. Кузнецова», г. Москва, Россия; e-mail: p.ilyushin@russian.spacer.

Information about the authors

Pavel A. Ilyushin, Senior specialist, JSC «TsENKI» – «NII PM»Moscow, Russia;
e-mail: p.ilyushin@russian.space

Получено 18 сентября 2025 ● Принято к публикации 10 ноября 2025 ● Опубликовано 30 декабря 2025
Received 28 September 2025 ● Accepted 10 November 2025 ● Published 30 December 2025
