

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9397/2024.2.03

УДК 531.383

**Ю.В. Ившина**Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Пермь, Российская Федерация

## **ВЛИЯНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИМИТАТОРА ДВИЖЕНИЯ НА КАЛИБРОВКУ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ**

Вопрос о высокой точности инерциальных навигационных систем представляет особую актуальность благодаря повышенному интересу к навигации без использования информации глобальных навигационных спутниковых систем. На точность систем влияет качество проведения процедуры калибровки. Анализ телеметрии, полученной при проведении испытаний инерциальных датчиков, показал, что имитаторы движения имеют геометрические погрешности. **Целью исследования** является анализ влияния геометрических погрешностей испытательного оборудования на точность проведения процедур калибровки инерциальных измерительных блоков навигационных систем. Для этого предлагается модель погрешностей трёхосного стенда, учитывающая неточность установки прибора на платформе стенда и перекосы, характеризующие отклонение осей вращения имитатора движения от идеального положения в инерциальном пространстве. **Анализ полученных** выражений оценивания калибровочных параметров показал, что при наличии погрешностей имитатора движения возникает рассогласование показаний инерциальных датчиков: привязка калибровочных коэффициентов гироскопов к осям стенда, а калибровочных коэффициентов – к вектору ускорения силы тяжести. Следовательно, погрешности имитатора движения непосредственно присутствуют в выражениях калибровочных параметров акселерометров, их необходимо учесть и, таким образом, свести оси чувствительности акселерометров и гироскопов до точности установки прибора на платформе стенда. В работе представлены результаты математического моделирования уточнения калибровочных коэффициентов с применением косвенного метода калибровки на примере трёхосного поворотного стенда и адаптированной методики для двухосного стенда. **Проведенный эксперимент** показал уменьшение отклонения координат с использованием доуточненных коэффициентов в среднем до 43,5 % с применением методики, использующей трехосный имитатор движения, и до 37,6 % с применением методики, использующей двухосный имитатор движения, в сравнении с решением, построенным с использованием калибровочных коэффициентов, рассчитанных при калибровке по прямым измерениям.

**Ключевые слова:** калибровка, бесплатформенная инерциальная навигационная система, акселерометр, гироскоп, погрешность, имитатор движения.

Iu.V. Ivshina

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

## INFLUENCE OF ERRORS IN MOTION SIMULATOR ON NAVIGATION SYSTEM CALIBRATION

The issue of inertial navigation systems high accuracy is of particular relevance due to the increased interest in navigation without use of information from global navigation satellite systems. The accuracy of the systems is affected by the quality of the calibration procedure. Analysis of the telemetry obtained during tests of inertial sensors on bench equipment showed that motion simulators have geometric errors. **The purpose of this paper** is to analyses of the impact of geometric errors of the motion simulators errors on the calibration procedure accuracy inertial measurement units of navigation systems. To study the motion simulator geometric imperfection, a model of three-axis table errors is suggested, taking into account the device installation inaccuracy on the table platform and distortions characterizing the motion simulator rotation axes deviation from the ideal position in inertial space. **Analysis of the expressions** obtained showed that in the presence of the motion simulator errors, there is a mismatch of the inertial sensors readings: binding of the gyroscopes calibration coefficients to the table axes, and the calibration coefficients to the acceleration vector of gravity. Consequently, the motion simulator errors are directly present in the accelerometer calibration parameter expressions, they must be taken into account and, thus, the sensitivity axes of the accelerometers and gyroscopes must be reduced to the accuracy of the device installation on the bench platform. The paper presents the results of modeling of the indirect calibration method is carried out on the example of the three-axis rotary table and the adapted technique for the two-axis table. **The conducted experiment** showed a reduction in coordinate deviation using the refined coefficients to an average of 43.5 % with the technique using a three-axis motion simulator, and to 37.6 % with the technique using a two-axis motion simulator, compared to the solution constructed using calibration coefficients calculated by calibration from direct measurements.

**Keywords:** calibration, strapdown inertial navigation system, accelerometer, gyroscope, error, motion simulator.

### Введение

Основа работы инерциальных навигационных систем заключается в преобразовании по определенному алгоритму информации, полученной по показаниям инерциальных датчиков: акселерометров и гироскопов. Базовая комплектация бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС) содержит триаду акселерометров и триаду гироскопов, жестко связанных с корпусом подвижного объекта [1–5]. Наличие погрешностей в показаниях инерциальных чувствительных элементов непосредственно влияет на точность выходных характеристик навигационных систем. Вопрос о высокой точности инерциальных навигационных систем представляет особую актуальность благодаря повышенному интересу к навигации без использования информации глобальных навигационных спутниковых систем [6]. Актуальность автономной работы навигационных систем подтверждается

научными работами, направленными на конструктивные изменения БИНС. К примерам таких изменений можно отнести карданов подвес, позволяющий совершать принудительное вращение блока чувствительных элементов [7, 8], навигационную систему, содержащую четыре и более гироскопов в конфигурации «тетраэдр» [9] и др.

Однако точность инерциальных систем в большей степени зависит от стабильности и повторяемости выходных характеристик инерциальных данных и качества проведения калибровки чувствительных элементов. В процессе калибровки инерциального измерительного блока определяются систематические погрешности датчиков по заранее выбранной модели ошибок. При выборе модели погрешностей инерциальных измерителей необходимо учитывать конструктивные особенности и условия эксплуатации прибора, такие как, например, наличие широкого диапазона изменения температур при отсутствии систем термостатирования, расположение измерительного блока относительно центра масс подвижного объекта и другие.

В качестве стендового оборудования чаще всего используются одноосные, двухосные или трёхосные имитаторы движения. Несмотря на то, что уделяется большое внимание калибровке на грубых стендах [10–13], актуальность использования точных наклонно-поворотных стендов остается высокой [14, 15]. Кроме того, наклонно-поворотные столы применяются не только для калибровки, но и в качестве стендов для приемо-сдаточных испытаний. Это предъявляет требования к точности оборудования при производстве инерциальных систем навигационного класса. Таким образом, использование точных стендов обусловлено необходимостью унификации испытательного и калибровочного оборудования, что позволяет сократить номенклатуру оборудования и, как результат, снизить затраты на его обслуживание.

На качество проведения процесса калибровки также влияют несовершенства стендового оборудования. Анализ телеметрии, полученной при испытаниях инерциальных датчиков, показал, что имитаторы движения имеют геометрические погрешности, которые могут возникать вследствие различных причин, например, из-за структурно-неустойчивого грунта места. Целью данной работы является анализ влияния геометрических погрешностей испытательного оборудования на точность проведения процедур калибровки инерциальных измерительных блоков навигационных систем.

### Математическая модель инерциальных датчиков

Инерциальными измерителями навигационной системы являются акселерометры и гироскопы. В качестве инструментальных систематических погрешностей в данной работе рассматриваются погрешности масштабных коэффициентов, смещения нулевого сигнала и отклонения осей чувствительности датчиков от осей приборного трёхгранника, ориентация которого принимается в качестве ориентации навигационной системы. Математическая зависимость указанных выше погрешностей триады акселерометров описывается выражением (1), подобная модель погрешностей инерциальных датчиков представлена во многих источниках, например, [3, 4, 8, 11, 16] и др.:

$$\begin{bmatrix} A_X \\ A_Y \\ A_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_X & 0 & 0 \\ 0 & \mu_Y & 0 \\ 0 & 0 & \mu_Z \end{bmatrix} \cdot \left( \begin{bmatrix} 1 & \mu_{XY} & -\mu_{XZ} \\ -\mu_{YX} & 1 & \mu_{YZ} \\ \mu_{ZX} & -\mu_{ZY} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} n_X \\ n_Y \\ n_Z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \tau_X \\ \tau_Y \\ \tau_Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta n_X \\ \delta n_Y \\ \delta n_Z \end{bmatrix} \right), \quad (1)$$

где  $A_X$ ,  $A_Y$ ,  $A_Z$  – измеренные показания триады акселерометров;  $n_X$ ,  $n_Y$ ,  $n_Z$  – составляющие вектора удельной внешней силы;  $\mu_X$ ,  $\mu_Y$ ,  $\mu_Z$  – значения масштабных коэффициентов акселерометров;  $\tau_X$ ,  $\tau_Y$ ,  $\tau_Z$  – погрешности типа смещения нуля;  $\mu_{XY}$ ,  $\mu_{XZ}$ ,  $\mu_{YX}$ ,  $\mu_{YZ}$ ,  $\mu_{ZX}$ ,  $\mu_{ZY}$  – перекосы осей чувствительности акселерометров;  $\delta n_X$ ,  $\delta n_Y$ ,  $\delta n_Z$  – высокочастотные погрешности типа белого шума. Математическая зависимость погрешностей гироскопов аналогично зависимости (1) погрешностей акселерометров включает в себя погрешности типа смещения нуля, ошибки, вызванные неточностью определения масштабного коэффициента и перекосов осей чувствительности, а также случайные составляющие погрешности.

Для упрощения некоторые авторы [10, 11, 17] приборную систему координат привязывают к осям чувствительности двух базовых акселерометров, тем самым уменьшают количество оцениваемых калибровочных параметров ( $\mu_{XY} = \mu_{XZ} = \mu_{YZ} = 0$ ). Однако, как показали практические испытания, выбранная плоскость, образованная осями чувствительности базовых акселерометров, не остается постоянной при широком температурном диапазоне работы изделия, что приводит к ошибкам привязки бесплатформенной инерциальной навигационной системы к конечному объекту. Для исключения ошибки привязки в данном исследовании был выбран общий случай, при котором пере-

косы осей чувствительности инерциальных датчиков рассматриваются относительно модельного ортогонального приборного трехгранника ( $\mu_{xy} \neq 0$ ,  $\mu_{xz} \neq 0$ ,  $\mu_{yz} \neq 0$ ) [16, 18, 19].

### **Погрешности имитатора движения**

Следует отметить, что учет влияния геометрических погрешностей испытательного оборудования, вызванных отклонением осей вращения имитатора и установкой изделия на платформу, рассматривается в работах [14, 15, 17]. Анализ этих источников показал, что геометрические погрешности рассматриваются не относительно горизонтально-географической системы координат (ГГСК), а относительно осей чувствительности двух выбранных акселерометров, называемых базовыми. В разделе описания модели инерциальных датчиков введено пояснение неприменимости данного способа учета калибровочных параметров. В работе [20] рассмотрено влияние инструментальных и геометрических погрешностей имитатора движения при калибровке только триады акселерометров, без триады датчиков угловой скорости: ошибки выставки блока акселерометров на испытательном стенде; инструментальные погрешности испытательного стенда, влияющие на точность калибровки триады акселерометров; ошибки выставки испытательного стенда. Также можно отметить, что в работах [20, 21] для того, чтобы исключить влияние инструментальных погрешностей имитатора движения, применяют скалярный (инвариантный) способ калибровки, который, в свою очередь, имеет ряд недостатков. В качестве существенного недостатка скалярной калибровки можно отметить невозможность оценки углов неортогональности отдельных чувствительных элементов – оценка производится для пары измерителей. С точки зрения неудовлетворительности применения предложенных в источниках литературы способов учета погрешностей испытательного оборудования в данной работе рассматривается описанная ниже модель погрешностей трёхосного стенда.

Предлагается модель погрешностей трёхосного стенда, учитывающая неточность установки прибора на платформе стенда (рис. 1) и перекосы, характеризующие отклонение осей вращения имитатора движения от идеального положения в инерциальном пространстве (рис. 2). На рис. 1–2 приняты обозначения:  $(N, Up, E)^T$  – трехгранник, характеризующий ГГСК, оси ориентированы по сторонам света

( $N$  – север,  $E$  – восток) и направлению географической вертикали ( $U_p$ );  $(X_{oc}, Y_{oc}, Z_{oc})^T$  – оси, связанные с осями вращения стенда;  $(X_{п}, Y_{п}, Z_{п})^T$  – оси, связанные с прибором.

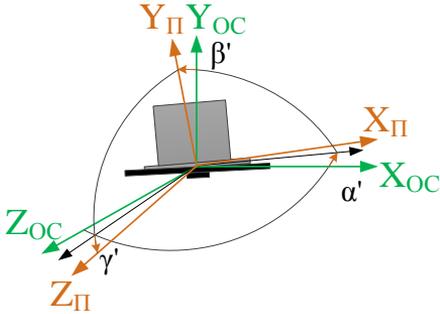


Рис. 1. Неточность установки прибора на платформе стенда (планшайбе)

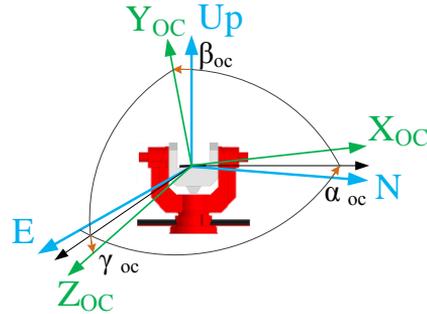


Рис. 2. Отклонение осей вращения имитатора движения от ГГСК

В процессе калибровки по прямым измерениям оцениваемые калибровочные коэффициенты акселерометров и смещения нулей гироскопов определяются в статических положениях прибора, а остальные калибровочные коэффициенты гироскопов определяются в динамическом режиме. Используя описанную калибровку по прямым измерениям, возможно получить аналитические выражения, не зависящие от погрешностей имитатора движения, для масштабных коэффициентов и смещения нулей акселерометров и гироскопов. Выражения для перекосов осей чувствительности акселерометров и гироскопов имеют зависимость от погрешностей стенда, при этом выражения для оценки перекосов осей чувствительности датчиков угловой скорости зависят только от углов, соответствующих перекосам установки прибора на планшайбе ( $\beta'$ ,  $\gamma'$ ), а выражения для оценки перекосов осей чувствительности акселерометров зависят от углов, соответствующих перекосам установки прибора на планшайбе ( $\beta'$ ,  $\gamma'$ ), и углов, характеризующих погрешность установки стенда в плоскости горизонта ( $\beta_{oc}$ ,  $\gamma_{oc}$ ). Анализ полученных выражений показал, что при наличии погрешностей имитатора движения возникает рассогласование показаний инерциальных датчиков: привязка калибровочных коэффициентов гироскопов к осям стенда, а калибровочных коэффициентов – к вектору ускорения силы тяжести.

Значения углов отклонения осей вращения имитатора движения от идеального положения в инерциальном пространстве могут быть получены на стадии периодической аттестации наклонно-поворотных столов и могут быть учтены в калибровочных коэффициентах.

### **Результаты моделирования**

Проведено моделирование показаний инерциального модуля с учетом погрешностей наклонно-поворотного стола в соответствии с планом калибровки по прямым измерениям для подтверждения полученных аналитических зависимостей в среде MatLab. При моделировании не учитывалось влияние температурных факторов на показания инерциальных датчиков. Математическое моделирование подтвердило предполагаемое влияние погрешностей стенда, в частности, зависимость от углов, соответствующих перекосам установки прибора на планшайбе, и углов, характеризующих погрешность установки стенда в плоскости горизонта на значения перекосов осей чувствительности акселерометров ( $\mu_{xy}$ ,  $\mu_{xz}$ ,  $\mu_{yx}$ ,  $\mu_{yz}$ ,  $\mu_{zx}$ ,  $\mu_{zy}$ ) и датчиков угловой скорости.

Для оценки качества проведения калибровки можно проанализировать проекции линейного ускорения или горизонтальной скорости в ГГСК [22–25] с учетом калибровочных коэффициентов, полученных по прямым измерениям инерциальных датчиков. В некоторых научных трудах эта методика называется «косвенный метод калибровки» [10, 26], или «калибровка с использованием вторичной выходной навигационной информации» [27]. Косвенный метод калибровки [23, 24] подразумевает вращение каждой из осей триады инерциальных датчиков вокруг горизонтально расположенной оси. Эту программу испытаний без переустановки прибора на планшайбе возможно провести только на трехосном наклонно-поворотном столе. Если для косвенного метода применять одноосные или двухосные стенды и проводить калибровку на различных температурных режимах, то время калибровки может увеличиться в два-три раза.

Для математического моделирования калибровки по навигационным данным был разработан комплекс программ в среде MatLab, посредством которого формируются показания инерциальных датчиков в соответствии методиками калибровок с учетом геометрических погрешностей имитатора движения, и далее по этим данным решается навигационная задача. Моделирование навигационной задачи реализо-

вано с применением параметров Родрига–Гамильтона [1, 3, 4], при этом не использована дополнительная компенсационная информация. Для расчёта навигационной задачи по инерциальным датчикам необходимо задать начальные значения местоположения испытательного оборудования и параметров ориентации. В данном случае параметры ориентации заданы по информации установки наклонно-поворотного стола. Математическое моделирование калибровки по навигационной информации показало, что полученные невязки коррелируют с углами отклонения осей вращения имитатора движения от идеального положения в инерциальном пространстве, а углы, соответствующие перекосам установки прибора на планшайбе, не наблюдаемы. Оцененные погрешности имитатора движения  $\beta_{0c}$ ,  $\gamma_{0c}$  непосредственно присутствуют в выражениях калибровочных параметров акселерометров ( $\mu_{xy}$ ,  $\mu_{xz}$ ,  $\mu_{yx}$ ,  $\mu_{yz}$ ,  $\mu_{zx}$ ,  $\mu_{zy}$ ), следовательно, их необходимо учесть и, таким образом, свести оси чувствительности акселерометров и гироскопов до точности установки прибора на платформе стенда.

Математическое моделирование показало эффективность метода косвенной калибровки, благодаря чему было принято решение адаптации данного метода [22] к производственным особенностям. В лаборатории калибровки имеется большой парк двухосных поворотных столов с термокамерой, которая позволяет проводить докалибровку не только в нормальных климатических условиях, но и на других температурных калибровочных точках. Следовательно, разработана методика, позволяющая уточнить калибровочные коэффициенты на двухосном наклонно-поворотном стенде без переустановки изделия на планшайбе. Для этого был разработан план из 12 испытаний, включающих в себя разворот изделия вокруг каждой из осей трехгранника при последовательном расположении этой оси в горизонтальное положение. Для наблюдаемости всех перекосов необходимо дважды расположить каждую из осей в горизонтальную плоскость и в каждом положении совершить два разворота на 180 градусов. По выбранным положениям формируются аналитические выражения как разность средних значений проекций кажущегося ускорения по горизонтальным осям в заданных положениях в конце и в начале разворота. Полученные выражения являются линейными зависимостями от смещения нулей акселерометров, погрешности масштабного коэффициента гироскопов и разности перекосов осей чувствительности гироскопов и акселерометров. По предложенной методи-

ке также проведено математическое моделирование и сделаны аналогичные выводы, что полученные невязки коррелируют с углами отклонения осей вращения имитатора движения от идеального положения в инерциальном пространстве, а углы, соответствующие перекосам установки прибора на планшайбе, не наблюдаемы.

### **Анализ экспериментальных данных**

Математическое моделирование косвенного метода калибровки с использованием экспериментальных данных показал, что в выходных данных навигационной системы кроме рассмотренных выше геометрических погрешностей имитатора движения существуют дополнительные невязки, предположительно зависящие от индивидуальных особенностей инерциальных датчиков, неактуальных метрологических данных аттестации стенда или иных причин. Используя эти невязки, можно доуточнить коэффициенты, рассчитанные по прямым измерениям.

По причине непосредственного присутствия в выражениях калибровочных параметров акселерометров  $\mu_{xy}$ ,  $\mu_{xz}$ ,  $\mu_{yx}$ ,  $\mu_{yz}$ ,  $\mu_{zx}$ ,  $\mu_{zy}$  углов, соответствующих отклонению осей вращения имитатора движения от идеального значения, предлагается приводить сведение перекосов осей чувствительности к осям гироскопов, которые привязываются к ортогональным осям имитатора движения. Помимо этого, сведение калибровочных коэффициентов к осям акселерометров неверно с точки зрения взаимозаменяемости изделия на объекте, так как не будет выполнено условие повторяемости привязки посадочной поверхности к инерциальным датчикам, а невязка будет зависеть от геометрических погрешностей имитаторов движения.

Для апробации доуточненных калибровочных коэффициентов проведен следующий эксперимент: изделие устанавливается в горизонте в статическое положение на 15 минут, далее совершается поворот по углу курса на 45 градусов и снова фиксируется в статическом положении на 15 минут. Так совершается полный оборот изделия на 360 градусов.

Инерциальные навигационные системы характеризуются принципиальными ограничениями по точности. Эти ограничения зависят как от внешних факторов, так и от особенностей их динамики. Описанные возмущения приводят к ошибкам определения навигационных

параметров. Погрешности определения горизонтальных составляющих линейной скорости и ошибки определения координат изменяются по гармоническому закону с периодом М. Шулера [25]. Тенденция изменения погрешностей инерциальной навигационной системы также зависит от траектории движения.

Эксперимент проводится на имитаторе движения, который не меняет своего местоположения в пространстве, следовательно, погрешности скоростей и координат «идеальной» навигационной системы должны стремиться к нулю. Поскольку инерциальные датчики содержат различного рода погрешности, то для сравнительного анализа влияния погрешностей имитатора движения на точность параметров, вырабатываемых навигационной системой, были рассчитаны относительные величины. Сравнение ведется относительно максимальных величин погрешностей скоростей и координат в текущем эксперименте с применением калибровочных коэффициентов по прямым измерениям. Для построения характера поведения составляющих линейных скоростей найдены относительные ошибки по выражениям:

$$\delta V_E = \frac{V_{E_i}}{|\max V_{E_0}|}, \quad \delta V_N = \frac{V_{N_i}}{|\max V_{N_0}|}, \quad i = 0, 2, 3, \quad (2)$$

а для построения характера изменения линейных координат также определяются относительные ошибки по выражениям:

$$\delta S_E = \frac{S_{E_i}}{|\max S_{E_0}|}, \quad \delta S_N = \frac{S_{N_i}}{|\max S_{N_0}|}, \quad i = 0, 2, 3. \quad (3)$$

В выражениях (2) и (3) применяются следующие обозначения:  $V_{E_i}$ ,  $V_{N_i}$  – изменяющиеся во времени погрешности восточной и северной составляющих линейной скорости, рассчитанные с применением: 0 – калибровочных коэффициентов, полученных по прямым измерениям, 2 – доуточненных калибровочных коэффициентов на двухосном имитаторе движения, или 3 – доуточненных калибровочных коэффициентов на трехосном имитаторе движения;  $\delta V_E$ ,  $\delta V_N$  – относительные погрешности восточной и северной составляющих линейной скорости;  $S_{E_i}$ ,  $S_{N_i}$  – изменяющиеся во времени погрешности восточной и северной составляющих линейных координат;  $\delta S_E$ ,  $\delta S_N$  – относительные погрешности восточной и северной составляющих линейных координат.

Характер поведения погрешности определения восточной и северной составляющих линейной скорости по данным проведенного эксперимента представлен на рис. 3 и 4 соответственно.

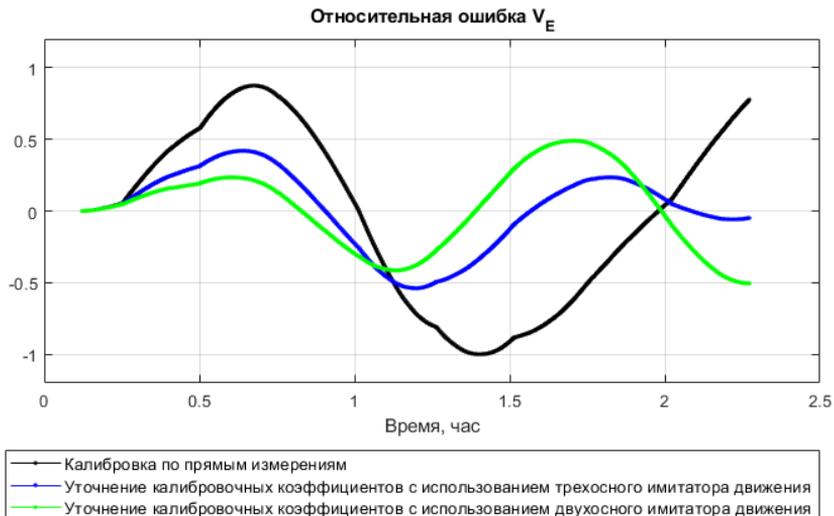


Рис. 3. Относительная ошибка восточной составляющей линейной скорости объекта относительно Земли

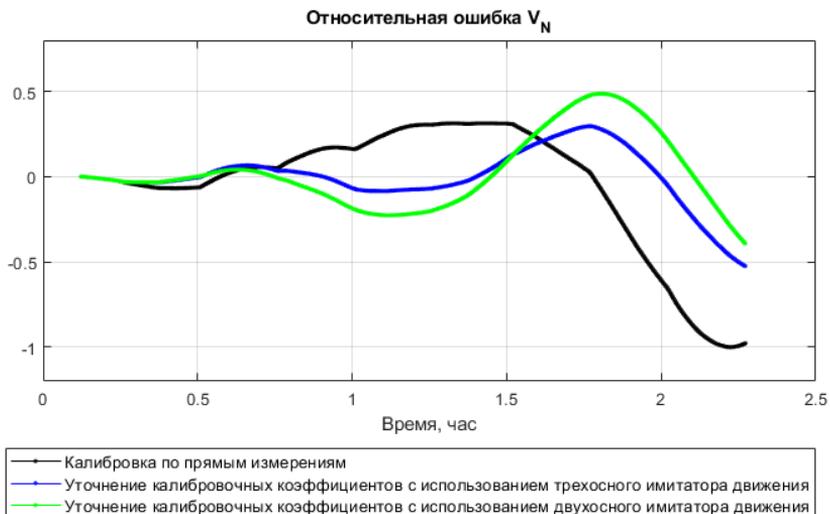


Рис. 4. Относительная ошибка северной составляющей линейной скорости объекта относительно Земли

Относительные погрешности определения координат по данным проведенного эксперимента представлены на рис. 5.

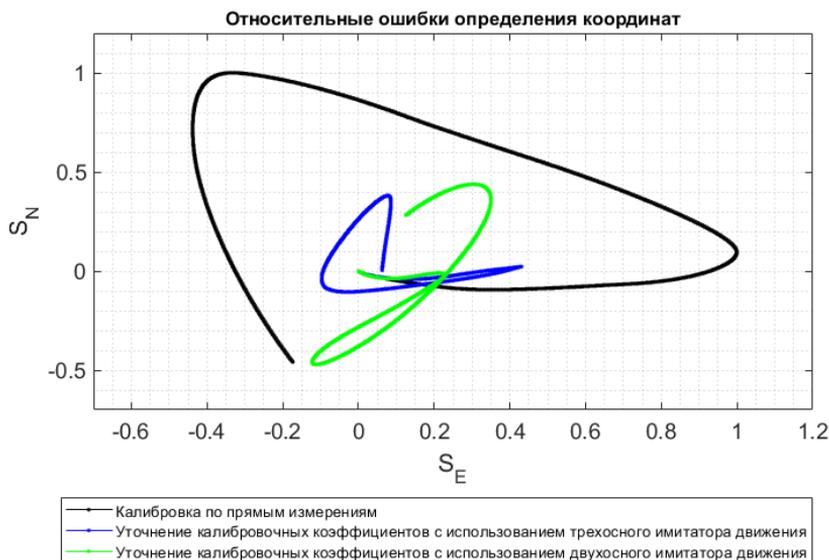


Рис. 5. Относительные погрешности оценивания положения

Для сравнительного анализа в каждый момент времени определяется суммарная погрешность координат по принципу суперпозиции двух составляющих:  $S_{i_0} = \sqrt{S_{E_0}^2 + S_{N_0}^2}$  при учете калибровочных коэффициентов, полученных по прямым измерениям, и относительно этой суммарной погрешности определяется относительная суммарная погрешность для случаев с применением методик для двух- и трехосного испытательного стенда. Анализ показал уменьшение отклонения координат с использованием доуточненных коэффициентов в среднем до 43,5 % с применением методики, использующей трехосный имитатор движения, и до 37,6 % с применением методики, использующей двухосный имитатор движения, в сравнении с решением, построенным с использованием калибровочных коэффициентов, рассчитанных при калибровке по прямым измерениям.

### Заключение

В работе рассмотрено влияние геометрических погрешностей имитаторов движения на калибровку инерциальных измерителей навигационных систем. В качестве погрешностей рассмотрены углы, характеризующие неточность установки прибора на платформе стенда, и углы, характеризующие отклонение осей вращения имитатора движения

от географической системы координат. Последние углы невозможно определить в процессе юстировки, и, как следствие, они должны быть определены на стадии калибровки. Углы, характеризующие неточность установки прибора на платформе стенда на стадии калибровки, не определяются, их уменьшение возможно конструктивным способом, например, доведение плоскости крепления поворотных стендов до требуемого состояния.

Аналитические выражения для перекосов осей чувствительности акселерометров и гироскопов имеют зависимость от погрешностей стенда при применении калибровки по прямым измерениям инерциальных датчиков. При этом выражения для оценки перекосов осей чувствительности датчиков угловой скорости зависят только от углов, соответствующих перекосам установки прибора на планшайбе, а выражения для оценки перекосов осей чувствительности акселерометров зависят от углов, соответствующих перекосам установки прибора на планшайбе, и углов, характеризующих погрешность установки стенда в плоскости горизонта.

Проведено математическое моделирование уточнения калибровочных коэффициентов с применением косвенного метода на примере трёхосного поворотного стенда и адаптированной методики для двухосного стенда. Оцененные невязки коррелируют с углами отклонения осей вращения имитатора движения от идеального положения в инерциальном пространстве, а углы, соответствующие перекосам установки прибора на планшайбе, не наблюдаемы.

Анализ математического моделирования с использованием экспериментальных данных по косвенному методу показал, что существуют дополнительные невязки, предположительно, зависящие от индивидуальных особенностей инерциальных датчиков или неполных метрологических данных аттестации стенда. По причине непосредственного присутствия в выражениях калибровочных коэффициентов акселерометров углов, соответствующих отклонению осей вращения имитатора движения от идеального значения, принято решение приводить сведение перекосов осей чувствительности к осям гироскопов, которые привязываются к ортогональным осям имитатора движения. Проведенный эксперимент показал уменьшение отклонения координат с использованием доуточненных коэффициентов в среднем до 43,5 %

с применением методики, использующей трехосный имитатор движения, и до 37,6 % с применением методики, использующей двухосный имитатор движения, в сравнении с решением, построенным с использованием калибровочных коэффициентов, рассчитанных при калибровке по прямым измерениям.

### Библиографический список

1. Матвеев, В.В. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем / В.В. Матвеев, В.Я. Распопов. – СПб.: Изд-во ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2009. – 280 с.
2. Мелешко, В.В. Бесплатформенные инерциальные навигационные системы / В.В. Мелешко. – Кировоград: Полимед-Сервис, 2011. – 172 с.
3. Titterton, D. Strapdown inertial navigation technology / D. Titterton, J.L. Weston. – IET, 2004. – Vol. 17.
4. Salychev, O.S. Verified approaches to inertial navigation / O.S. Salychev. – M., BMSTU Publ, 2017.
5. Biezd, D.J. Integrated navigation and guidance systems / D.J. Biezd. – Aiaa, 1999.
6. Пешехонов, В.Г. Высокоточная навигация без использования информации глобальных навигационных спутниковых систем / В.Г. Пешехонов // Гироскопия и навигация. – 2022. – № 1 (116). – С. 3–11.
7. A new self-calibration and compensation method for installation errors of uniaxial rotation module inertial navigation system / M. Niu [et al.] // Sensors. – 2022. – Vol. 22, № 10. – P. 3812.
8. Драницына, Е.В. Вращение инерциального измерительного модуля как способ повышения точности бесплатформенной инерциальной навигационной системы. Аналитический обзор / Е.В. Драницына, А.И. Соколов // Гироскопия и навигация. – 2023. – Т. 31, № 4 (123). – С. 22–43.
9. On ground calibration of tetrahedron gyro package for attitude determination / Н.К. Kuga [et al.] // Advances in the Astronautical Sciences. – 2012. – Vol. 145. – P. 353–364.
10. Водичева, Л.В. Оценка точностных параметров датчиков бесплатформенного инерциального измерительного блока с помощью относительно грубого поворотного стола / Л.В. Водичева, Ю.В. Парышева // Гироскопия и навигация. – 2019. – № 2 (105). – С. 162–178.

11. Климкович, Б.В. Точная калибровка БИНС на грубых стендах / Б.В. Климкович // Гироскопия и навигация. – 2022. – № 4 (119). – С. 54–70.

12. Сравнительный анализ различных вариантов калибровки бескарданной инерциальной навигационной системы / Н.Б. Вавилова, А.А. Голован, А.В. Козлов, И.А. Папуша, Н.А. Парусников // Юбилейная XXV Санкт-Петербург. междунар. конф. по интегрированным навигационным системам. – СПб.: Изд-во ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2018. – С. 249–251.

13. Козлов, А.В. Калибровка инерциальных измерительных блоков на грубых стендах с оценкой температурных зависимостей по эксперименту с переменной температурой / А.В. Козлов, И.Е. Тарыгин, А.А. Голован // Сб. материалов XXI Санкт-Петербург. междунар. конф. по интегрированным навигационным системам. – СПб.: Изд-во ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2014. – С. 319–322.

14. Методы калибровки бескарданных инерциальных навигационных систем на грубых и точных стендах / Н.Б. Вавилова, А.А. Голован, И.А. Васинева, А.В. Козлов, Н.А. Парусников, О.А. Зорина, С.Е. Кухтевич, А.В. Фомичев // Тр. Московского института электромеханики и автоматики (МИЭА). – М., 2016. – Т. 12.

15. Васинёва, И.А. Калибровка бескарданной инерциальной навигационной системы в сборе на точных стендах: дис. ... канд. ф-м. наук: 01.02.01 / И.А. Васинёва. – М., 2017. – 99 с.

16. Емельянцева, Г.И. О калибровке бескарданного инерциального измерительного модуля на ВОГ / Г.И. Емельянцева, Е.В. Драницына, Б.А. Блажнов // Гироскопия и навигация. – 2012. – № 3 (78). – С. 55–63.

17. Голован, А.А. Задача стендовой калибровки инерциально-измерительных блоков / А.А. Голован // Навигация и управление движением: материалы XXI конф. молодых ученых. – 2019. – С. 18–29.

18. Егоров, Ю.Г. Исследование программ скалярной калибровки векторного измерителя / Ю.Г. Егоров, Г.Ю. Кирыченко, Е.А. Попов // Гироскопия и навигация. – 2022. – № 3 (118). – С. 20–30.

19. Savage, P.G. Improved Strapdown Inertial System Calibration Procedures. Part 3. Numerical Examples WBN-14020-3 Strapdown Associates Inc / P.G. Savage. – 2018.

20. Мьинт, Х.Н. Метод калибровки блока акселерометров инерциальной навигационной системы на испытательном стенде / Х.Н. Мьинт // *Машиностроение и компьютерные технологии*. – 2014. – С. 38–54.

21. Кутовой, И.А. Методики оценки погрешностей, присущих блоку чувствительных элементов в составе бесплатформенных инерциальных навигационных систем: дис. ... канд. тех. наук: 2.3.01 / Д.А. Кутовой. – СПб., 2023. – 146 с.

22. Diesel, J.W. Calibration of a ring laser gyro inertial navigation system / J.W. Diesel // *13th Biennial Guidance Test Symposium, Holloman AFB, New Mexico, 1987*. – Vol. 1. – P. SO1A 1–37.

23. Savage, P.G. Calibration procedures for laser gyro strapdown inertial navigation systems / P.G. Savage // *9th Annual Electro-Optics Laser Conference and Exhibition, Anaheim, California, October 25–27, 1977*.

24. Rogers, R.M. Applied Mathematics in Integrated Navigation Systems, Second Edition / R.M. Rogers; American Institute of Aeronautics and Astronautics. – P. 334.

25. Brown, A. A calibration technique for laser gyro strapdown inertial navigation system / A. Brown, R. Ebner, J. Mark // *DGON Proceedings, Gyro Technology Symposium, Stuttgart, 1982*.

26. О калибровке измерительного модуля прецизионной БИНС и построении связанного с ним ортогонального трехгранника / Г.И. Емельянцева, Б.А. Блажнов, Е.В. Драницына, А.П. Степанов // *Гироскопия и навигация*. – 2016. – № 1 (92). – С. 36–48. DOI: 10.17285/0869-7035.2016.24.1.036-048

27. Ориентация и навигация подвижных объектов: современные информационные технологии / Б.С. Алёшин [и др.]; под ред. Б.С. Алёшина, К.К. Веремеенко, А.И. Черноморского. – М.: Физматлит, 2006. – 424 с.

### References

1. Matveev V.V., Raspopov V.Ia. Osnovy postroeniia besplatformennykh inertsiyal'nykh navigatsionnykh sistem [Fundamentals of building free-form inertial navigation systems]. Saint Petersburg: GNTs RF OAO “Kontsern “TsNII “Elektropribor”, 2009, 280 p.

2. Meleshko V.V. Besplatformennyye inertsiyal'nye navigatsionnyye sistemy [Free-form inertial navigation systems]. Kirovograd: Polimed-Servis, 2011, 172 p.

3. Titterton D., Weston J.L. Strapdown inertial navigation technology. IET, 2004, vol. 17.

4. Salychev O.S. Verified approaches to inertial navigation. Moscow, BMSTU Publ, 2017.

5. Biezad D.J. Integrated navigation and guidance systems. Aiaa, 1999.

6. Peshekhonov V.G. Vysokotochnaia navigatsiia bez ispol'zovaniia informatsii global'nykh navigatsionnykh sputnikovykh sistem [High-precision navigation independently of global navigation satellite systems data]. *Giroskopiia i navigatsiia*, 2022, no. 1 (116), pp. 3-11.

7. Niu M. et al. A new self-calibration and compensation method for installation errors of uniaxial rotation module inertial navigation system. *Sensors*, 2022, vol. 22, no. 10, 3812 p.

8. Dranitsyna E.V., Sokolov A.I. Vrashchenie inertsial'nogo izmeritel'nogo modul'ia kak sposob povysheniia tochnosti besplatformennoi inertsial'noi navigatsionnoi sistemy. Analiticheskii obzor [Strapdown Inertial Navigation System Accuracy Improvement Methods Based on Inertial Measuring Unit Rotation. Analytical Review]. *Giroskopiia i navigatsiia*, 2023, vol. 31, no. 4 (123), pp. 22-43.

9. Kuga H.K. et al. On ground calibration of tetrahedron gyro package for attitude determination. *Advances in the Astronautical Sciences*, 2012, vol. 145, pp. 353-364.

10. Vodicheva L.V., Parysheva Iu.V. Otsenka tochnostnykh parametrov datchikov besplatformennogo inertsial'nogo izmeritel'nogo bloka s pomoshch'iu odnositel'no grubogo povorotnogo stola [Estimating the Accuracy Parameters of Sensors in a Strapdown Inertial Measurement Unit with the Use of a Relatively Coarse Turntable]. *Giroskopiia i navigatsiia*, 2019, no. 2 (105), pp. 162-178.

11. Klimkovich B.V. Tochnaia kalibrovka BINS na grubyykh stendakh [Precise Calibration of Strapdown INS using Low-Accuracy Turntables]. *Giroskopiia i navigatsiia*, 2022, no. 4 (119), pp. 54-70.

12. Vavilova N.B., Golovan A.A., Kozlov A.V., Papusha I.A., Parusnikov N.A. Sravnitel'nyi analiz razlichnykh variantov kalibrovki beskardannoi inertsial'noi navigatsionnoi sistemy [Comparative study of several variants of strapdown inertial navigation system calibration]. *Iubileinaia XXV Sankt-Peterburgskaia mezhdunarodnaia konferentsiia po integrirovannym navigatsionnym sistemam*. Saint Petersburg: GNTs RF OAO "Kontsern "TsNII "Elektropribor", 2018, pp. 249-251.

13. Kozlov A.V., Tarygin I.E., Golovan A.A. Kalibrovka inertsi- al'nykh izmeritel'nykh blokov na grubyykh standakh s otsenkoi tempera- turnykh zavisimostei po eksperimentu s peremennoi temperaturoi [Calibra- tion of inertial measurement units on a low-grade turntable with simultane- ous estimation of temperature coefficients]. *Sbornik materialov XXI Sankt- Peterburgskoi mezhdunarodnoi konferentsii po integrirovannym navi- gatsionnym sistemam*. Saint Petersburg: GNTs RF OAO "Kontsern "TsNII "Elektropribor", 2014, pp. 319-322.

14. Vavilova N.B., Golovan A.A., Vasineva I.A., Kozlov A.V., Pa- rusnikov N.A., Zorina O.A., Kukhtevich S.E., Fomichev A.V. Metody kali- brovki beskardannykh inertsi- al'nykh navigatsionnykh sistem na grubyykh i tochnyykh standakh [Calibration methods for cardless inertial navigation sys- tems on rough and precise stands]. *Trudy Moskovskogo instituta el- ektromekhaniki i avtomatiki (MIEA)*. Moscow, 2016, vol. 12.

15. Vasineva I.A. Kalibrovka beskardannoi inertsi- al'noi navigatsion- noi sistemy v sbore na tochnyykh standakh [Calibrations of a cardless inertial navigation system assembled on precision stands]. Ph. D. thesis. Moscow, 2017, 99 p.

16. Emel'iantsev G.I., Dranitsyna E.V., Blazhnov B.A. O kalibrovke beskardannogo inertsi- al'nogo izmeritel'nogo modulia na VOG [Test bed cal- ibration of FOG-based strapdown inertial measurement unit]. *Girokopiia i navigatsiia*, 2012, no. 3 (78), pp. 55-63.

17. Golovan A.A. Zadacha stendovoi kalibrovki inertsi- al'no- izmeritel'nykh blokov [The task of bench calibration of inertial measure- ment units]. *Navigatsiia i upravlenie dvizheniem. Materialy XXI konferentsii molodykh uchenykh*, 2019, pp. 18-29.

18. Egorov Iu.G., Kiriachenko G.Iu., Popov E.A. Issledovanie pro- gramm skaliarnoi kalibrovki vektornogo izmeritel'ia [Study of Scalar Cali- bration Problems for a Vector Meter]. *Girokopiia i navigatsiia*, 2022, no. 3 (118), pp. 20-30.

19. Savage P.G. Improved Strapdown Inertial System Calibration Procedures. Part 3. Numerical Examples WBN-14020-3 Strapdown Associ- ates Inc, 2018.

20. M'int Kh.N. Metod kalibrovki bloka akseleretrov inertsi- al'noi navigatsionnoi sistemy na ispytatel'nom stende [Calibration method of the

inertial navigation system accelerometer unit on the test bench]. *Mashinostroenie i komp'yuternye tekhnologii*, 2014, pp. 38-54.

21. Kutovoi I.A. Metodiki otsenki pogreshnostei, prisushchikh bloku chuvstvitel'nykh elementov v sostave besplatformennykh inertsial'nykh navigatsionnykh sistem [Methods for estimating errors inherent in a block of sensitive elements as part of strapless inertial navigation systems]. Ph. D. thesis. Saint Petersburg, 2023, 146 p.

22. Diesel J.W. Calibration of a ring laser gyro inertial navigation system. *13th Biennial Guidance Test Symposium, Holloman AFB, New Mexico*, 1987, vol. 1, pp. SO1A 1-37.

23. Savage P.G. Calibration procedures for laser gyro strapdown inertial navigation systems. *9th Annual Electro-Optics Laser Conference and Exhibition, Anaheim, California, October 25-27, 1977*.

24. Rogers R.M. Applied Mathematics in Integrated Navigation Systems, Second Edition. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 334 p.

25. Brown A., Ebner R., Mark J. A calibration technique for laser gyro strapdown inertial navigation system. *DGON Proceedings, Gyro Technology Symposium, Stuttgart*, 1982.

26. Emel'iantsev G.I., Blazhnov B.A., Dranitsyna E.V., Stepanov A.P. O kalibrovke izmeritel'nogo modulia pretsizionnoi BINS i postroenii svyazannogo s nim ortogonal'nogo trekhgrannika [Calibration of a Precision SINS IMU and Construction of IMU-bound Orthogonal Frame]. *Giroskopiia i navigatsiia*, 2016, no. 1 (92), pp. 36-48. DOI: 10.17285/0869-7035.2016.24.1.036-048

27. Aleshin B.S. et al. Orientatsiia i navigatsiia podvizhnykh ob"ektov: sovremennye informatsionnye tekhnologii [Orientation and navigation of mobile objects: modern information technologies]. Eds. B.S. Aleshin, K.K. Veremeenko, A.I. Chernomorskii. Moscow: Fizmatlit, 2006, 424 p.

### **Сведения об авторе**

**Ившина Юлия Владимировна** (Пермь, Российская Федерация) – старший преподаватель кафедры «Прикладная математика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: ivk-distance-iuv@yandex.ru).

### About the author

**Iuliia V. Ivshina** (Perm, Russian Federation) – Head Teacher Department of Applied Mathematics Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: ivk-distance-iuv@yandex.ru).

Поступила: 08.04.2024. Одобрена: 26.04.2024. Принята к публикации: 08.07.2024.

**Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.

**Конфликт интересов.** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов по отношению к статье.

**Вклад** 100 %.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Ившина, Ю.В. Влияние погрешностей имитатора движения на калибровку навигационных систем / Ю.В. Ившина // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2024. – № 50. – С. 41–60. DOI: 10.15593/2224-9397/2024.2.03

Please cite this article in English as:

Ivshina Iu.V. Influence of errors in motion simulator on navigation system calibration. *Perm National Research Polytechnic University Bulletin. Electrotechnics, information technologies, control systems*, 2024, no. 50, pp. 41-60. DOI: 10.15593/2224-9397/2024.2.03