

Б. В. КЛИМКОВИЧ, А. М. ТОЛОЧКО

## УЧЕТ SIZE-ЭФФЕКТА ПРИ КАЛИБРОВКЕ БИНС

*Предложен метод учета size-эффекта при калибровке БИНС. Метод основан на применении фильтра Калмана в инерциальном режиме БИНС и позволяет получать оценку погрешностей калибровки акселерометров, гироскопов и координат чувствительных масс акселерометров. Метод не привязан к конкретному плану поворотов стола, не требует аналитических расчетов и проводит калибровку size-эффекта одновременно с калибровкой остальных параметров БИНС в единой итерационной процедуре.*

**Ключевые слова:** бесплатформенная инерциальная навигационная система, калибровка, инерциальный режим работы, size-эффект, фильтр Калмана.

### Введение

Калибровка бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС) в процессе производства является важнейшей технологической операцией, от результатов которой в большей степени зависит точность работы БИНС у потребителя. Задачей калибровки БИНС является нахождение параметров моделей погрешностей чувствительных элементов, приводящих в соответствие систему уравнений инерциальной навигации с выходными данными реальных чувствительных элементов (гироскопов и акселерометров).

Гироскопы и акселерометры, применяемые для БИНС навигационного класса точности, обладают рядом погрешностей, из которых важнейшими являются погрешности ориентации осей чувствительности, масштабных коэффициентов и смещений нулей, задержки выходных данных относительно входных воздействий, невозможность установки координат чувствительных масс акселерометров в одной точке вследствие конечных ( $\sim 3\div 5$  см) геометрических размеров акселерометров.

Последний вид погрешности, называемый size-эффектом [1], приводит к тому, что измеряемые акселерометрами проекции кажущегося ускорения на свои оси чувствительности при вращении БИНС не соответствуют кажущимся ускорениям полюса связанной с БИНС системы координат, что приводит к систематическим погрешностям выходных данных по скоростям и координатам вырабатываемых БИНС [2-5], в то время как метод инерциальной навигации основан на решении уравнения движения одной материальной точки под действием известных сил [6].

Указанный вид погрешности тем больше, чем больше скорость вращения и (или) ускорение скорости вращения БИНС. Для устранения этой погрешности в

---

**Климкович** Борис Владимирович. Кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник НП ООО «ОКБ ТСП» (Республика Беларусь, г. Минск). Действительный член международной общественной организации «Академия навигации и управления движением».

**Толочко** Александр Михайлович. Инженер-конструктор 1-й категории НП ООО «ОКБ ТСП».

алгоритм расчета навигационных данных вводят поправки, учитывающие фактическое расположение акселерометров относительно связанной системы координат.

При проведении калибровки БИНС эти координаты чувствительных масс акселерометров должны быть определены совместно с остальными калибровочными параметрами гироскопов и акселерометров. В стандарте [7] предусмотрено проведение специального теста для определения координат чувствительных масс акселерометров при калибровке БИНС. Поскольку калибровка БИНС проводится при его вращении на поворотном столе при изменении температуры и занимает достаточно продолжительное время, желательно процедуру оценки параметров size-эффекта совместить по времени с процедурой оценки остальных параметров калибровки.

В работе [8] предложен метод калибровки БИНС навигационного класса точности с учетом полной системы уравнений погрешностей и с оценкой калибровочных параметров при помощи фильтра Калмана. В качестве измеряемых параметров фильтра Калмана использованы вырабатываемые инерциальным алгоритмом скорости БИНС в горизонтной системе координат. В настоящей работе предлагается расширить метод калибровки, описанный в работе [8], с целью учета и коррекции погрешностей, связанных с size-эффектом. Следует провести сравнение предлагаемого метода калибровки БИНС с учетом size-эффекта с другими работами [9, 10].

В работе [9] оценка параметров калибровки с учетом size-эффекта проводится по прямым измерениям физических величин чувствительными элементами. Этим из процесса калибровки исключаются канал передачи данных и алгоритм счета навигационной задачи. Такой подход более предпочтителен для БИНС низкого и среднего классов точности. Необходимость проведения дополнительных циклов вращения только для определения параметров size-эффекта увеличивает время калибровки, что повышает стоимость изделия.

В работе [10] калибровка БИНС с учетом size-эффекта проводится на основе метода [11] при определенных положениях поворотного стола, обеспечивающих аналитическое решение для искомым коэффициентов калибровки. Источником информации о погрешностях служат скорости, вырабатываемые навигационным алгоритмом. Уравнения погрешностей упрощаются для оценки линейных по времени коэффициентов калибровки. Такое упрощение не дает возможности проводить адекватную оценку смещения нулей гироскопов, требующих большого (сравнимого с периодом колебаний Шулера) времени наблюдения. Кроме того, погрешности акселерометров, связанные с size-эффектом, оцениваются приближенным методом. Учитываются только диагональные члены центробежных сил и пренебрегаются слагаемые, связанные с тангенциальным ускорением. Такое приближение справедливо, если полюс связанной системы координат находится на общей точке пересечения осей чувствительности трех акселерометров и вращение поворотного стола происходит без участков разгона и торможения. В общем случае оси чувствительности акселерометров могут не иметь точек пересечения, а участки разгона и торможения всегда присутствуют при вращении поворотного стола.

Предлагаемый в настоящей работе метод обеспечивает калибровку при точном учете погрешностей, связанных с size-эффектом. Источником информации о погрешностях служат, как и в работах [10, 11], скорости навигационного алгоритма в горизонтном базисе. Это обеспечивает калибровку БИНС в целом с учетом канала передачи данных и вычислительных алгоритмов. Время наблю-

дения в статических тестах (при неподвижном поворотном столе относительно Земли) может быть достаточно большим для корректной оценки смещения нулей гироскопов. Эволюция погрешностей БИНС при калибровке оценивается фильтром Калмана. Поскольку определение параметров size-эффекта проводится в едином цикле со всеми остальными параметрами калибровки, значение всех параметров согласовано и минимизирует результат – вырабатываемую инерциальным алгоритмом линейную скорость БИНС как при покое относительно Земли, так и при вращении.

### Учет size-эффекта при калибровке БИНС

Следует отметить, что в методе инерциальной навигации движение БИНС рассматривается как сложение поступательного движения материальной точки под действием измеренных триадой акселерометров сил и вращения связанной системы координат, измеряемого триадой гироскопов. Выбор положения этой эффективной точки, называемой полюсом, для которой и производится решение уравнений движения при работе навигационного алгоритма, произволен. В частности, полюс не обязан совпадать с центром масс БИНС либо жестко связанного с ним транспортного средства. Важно лишь, чтобы эта точка имела постоянное и известное положение относительно корпуса БИНС.

При калибровке на поворотном столе удобно считать, что полюс, движение которого рассчитывается инерциальным методом, совпадает с точкой пересечения осей поворотного стола. Тогда при любых вращениях и положениях БИНС на поворотном столе известно, что в горизонтном базисе линейная скорость, вырабатываемая БИНС, должна быть точно равна нулю.

При необходимости выработки БИНС координат и скоростей какой-либо другой точки, в том числе не находящейся внутри БИНС, возможен пересчет координат и скоростей по правилу поступательно-вращательного движения твердого тела [12].

В данной работе рассматривается калибровка БИНС на двух- или трехкоординатном поворотном столе.

Рассмотрим акселерометр, имеющий центр чувствительности в точке с вектором  $\vec{r}$  в связанном базисе. Измеряемое им ускорение  $\vec{G}$  отличается от ускорения  $\vec{G}_0$  полюса связанной системы координат в соответствии со следующим уравнением [12]:

$$\vec{G} = \vec{G}_0 + \vec{\omega}' \times \vec{r} + \vec{\omega} \times \vec{\omega} \times \vec{r}, \quad (1)$$

где  $\vec{\omega}$  – вектор мгновенной скорости вращения связанной системы координат относительно горизонтной,  $\vec{\omega}'$  – его производная по времени.

В уравнении (1) второе слагаемое соответствует тангенциальному ускорению, третье слагаемое – центробежному ускорению.

Учитывая, что каждый акселерометр из триады ориентирован вдоль соответствующей оси, выражение для погрешностей акселерометров, обусловленных size-эффектом, в координатной форме имеет вид:

$$\Delta_{sx}^a = -(\omega_z^2 + \omega_y^2)r_{xx} + (\omega_x\omega_y - \omega_z')r_{xy} + (\omega_x\omega_z + \omega_y')r_{xz}, \quad (2)$$

$$\Delta_{sy}^a = (\omega_x\omega_y + \omega_z')r_{yx} - (\omega_z^2 + \omega_x^2)r_{yy} + (\omega_y\omega_z - \omega_x')r_{yz}, \quad (3)$$

$$\Delta_{sz}^a = (\omega_x \omega_z - \omega'_y) r_{zx} + (\omega_y \omega_z + \omega'_x) r_{zy} - (\omega_x^2 + \omega_y^2) r_{zz}, \quad (4)$$

где  $r_{ij}$  – координаты центра чувствительности  $i$ -го акселерометра ( $i, j=0, 1, 2$  ( $x, y, z$ )) в связанной системе координат.

Погрешности акселерометров (2)–(4) должны быть учтены в работе инерциального алгоритма вычитанием их из показаний акселерометров при найденных в процессе калибровки БИНС значениях  $r_{ij}$ .

В фильтре Калмана используются уравнения погрешностей БИНС в горизонтной системе ENU, имеющие вид, аналогичный указанному в работах [8, 13]:

$$\frac{\partial \Delta V_x}{\partial t} = \Delta V_y 2U \sin(\varphi) - \Delta V_z 2U \cos(\varphi) - g_0 \gamma_y + \Delta B_x^a, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \Delta V_y}{\partial t} = -\Delta V_x 2U \sin(\varphi) + g_0 \gamma_x + \Delta B_y^a, \quad (6)$$

$$\frac{\partial \Delta V_z}{\partial t} = \Delta V_x 2U \sin(\varphi) + \Delta B_z^a, \quad (7)$$

$$\frac{\partial \gamma_x}{\partial t} = -U \cos(\varphi) \gamma_z + U \sin(\varphi) \gamma_y - \frac{\Delta V_y}{\rho_1 + h} - \Delta B_x^g, \quad (8)$$

$$\frac{\partial \gamma_y}{\partial t} = -U \sin(\varphi) \gamma_x + \frac{\Delta V_x}{\rho_2 + h} - \Delta B_y^g, \quad (9)$$

$$\frac{\partial \gamma_z}{\partial t} = U \cos(\varphi) \gamma_x + \frac{\Delta V_x}{\rho_2 + h} \operatorname{tg}(\varphi) - \Delta B_z^g, \quad (10)$$

где  $\Delta V_i$  – ( $i=0,1,2$  ( $x,y,z$ )) погрешности скоростей в горизонтной системе координат;  $\Delta B_i^{a(g)}$  – погрешности калибровки акселерометров (гироскопов) в горизонтной системе координат;  $\gamma_i$  – погрешности ориентации связанной системы координат;  $U$  – скорость вращения Земли;  $\varphi, h$  – широта и высота места калибровки;  $g_0$  – ускорение свободного падения места калибровки;  $\rho_1, \rho_2$  – радиусы кривизны земного эллипсоида.

Модели погрешностей акселерометров и гироскопов в связанном базисе имеют вид:

$$\Delta B_i^a = b_i^a + \sum_{j=0}^2 M_{ij}^a G_j + \Delta_{si}^a(\vec{r}) + T_i^a + \sqrt{Q_i^a} \zeta_i^a(t) + N_i^a(\vec{G}, \vec{\Omega}), \quad (11)$$

$$\Delta B_i^g = b_i^g + \sum_{j=0}^2 M_{ij}^g \Omega_j + T_i^g + \sqrt{Q_i^g} \zeta_i^g(t) + N_i^g(\vec{G}, \vec{\Omega}), \quad (12)$$

где коэффициенты  $b_i^a$  ( $b_i^g$ ) определяют смещение нулей; матрицы  $M_{ij}^a$  ( $M_{ij}^g$ ) – погрешности масштабных коэффициентов и ориентаций акселерометров (гироскопов);  $T_i^a$  ( $T_i^g$ ) – погрешности, обусловленные различием групповых задержек в акселерометрах (гироскопах);  $\zeta_i^{g(a)}(t)$  – производящий белый шум с интенсивностью  $Q_i^{a(g)}$ ;  $N_i^{a(g)}(\vec{G}, \vec{\Omega})$  – погрешности, обусловленные нелинейностью масштабных коэффициентов и взаимным влиянием ускорения (вращения) на параметры калибровки  $b_i^{g(a)}, M_{ij}^{g(a)}$ .

Дальнейшее рассмотрение продолжим для случая применения БИНС в наземном маломаневренном транспортном средстве. Положим также, что ранее, с помощью дополнительного теста при вращении БИНС вокруг горизонтально расположенной оси [2], была проведена калибровка и последующая аппаратная корректировка стробирующими сигналами различия групповых задержек в акселерометрах и гироскопах.

Принятые упрощения позволяют опустить в уравнениях (11), (12) слагаемые  $T_i^a(T_i^g)$  и  $N_i^{a(g)}(\vec{G}, \vec{\Omega})$ .

Для величин  $b_i^g, M_{ij}^g, b_i^a, M_{ij}^a, r_{ij}$  принимается модель винеровского процесса

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \sqrt{Q_w} \zeta_w(t), \quad (13)$$

где  $w$  – каждая из величин  $b_i^g, M_{ij}^g, b_i^a, M_{ij}^a, r_{ij}$  с соответствующей интенсивностью  $Q_w$  производящего белого шума  $\zeta_w(t)$ .

Вектор измерения фильтра Калмана  $z$  определяется скоростями навигационного алгоритма  $z^T = \vec{v}^{ins}$ .

Переходная матрица фильтра Калмана  $\Phi_{ij}$  и матрица измерений  $H_{ij}$  образуются в соответствии с уравнениями (2)–(13).

Перевод погрешностей из связанного базиса в горизонтный проводится посредством умножения на матрицу поворота  $C_{ij}$ .

Как и в работе [8], для выполнения калибровки (определения параметров  $b_i^g, M_{ij}^g, b_i^a, M_{ij}^a, r_{ij}$ ) зададим последовательность  $N$  статических (неподвижных относительно Земли) положений стола длительностью  $\sim 5 \div 30$  мин (определяется требованиями к точности калибровки и качеством акселерометров, гироскопов). Между статическими положениями осуществляются одноосные либо двухосные повороты.

Статические тесты определяют калибровочные параметры акселерометров и смещения нулей гироскопов. Вектор состояния фильтра Калмана  $x$  в этом случае имеет следующий вид:

$$x^T = [\Delta V_x, \Delta V_y, \Delta V_z, \gamma_x, \gamma_y, \gamma_z, \Delta B_x^a, \Delta B_y^a, \Delta B_z^a, \Delta B_x^g, \Delta B_y^g, \Delta B_z^g].$$

Динамические тесты определяют матрицу  $M_{ij}^g$  для гироскопов и параметры size-эффекта  $r_{ij}$ .

Калибровка в статических тестах проводится по методике, представленной в работе [8], и здесь рассматриваться не будет.

### Алгоритм динамического теста

При динамическом тесте происходит поворот стола из одного статического положения в другое. Перед поворотом обнуляются инерциальные скорости, инициализируются матрица  $C_{ij}$  и фильтр Калмана.

В уравнениях (5)–(10) погрешности гироскопов и акселерометров  $\Delta B_i^{a(g)}$  являются переменными из-за изменения матрицы перехода между связанной и горизонтной системой координат  $C_{ij}$ . Вектор состояния фильтра Калмана  $x$  должен содержать  $6+24+9=39$  элементов, быть образован погрешностями ско-

ростей, ориентации и погрешностями калибровочных параметров  $b_i^g, M_{ij}^g, b_i^a, M_{ij}^a, r_{ij}$  и иметь следующий вид:

$$x^T = \begin{bmatrix} \Delta V_x, \Delta V_y, \Delta V_z, \gamma_x, \gamma_y, \gamma_z, b_x^a, b_y^a, b_z^a, M_{xx}^a, M_{xy}^a, M_{xz}^a, M_{yx}^a, \\ M_{yy}^a, M_{yz}^a, M_{zx}^a, M_{zy}^a, M_{zz}^a, b_x^g, b_y^g, b_z^g, M_{xx}^g, M_{xy}^g, M_{xz}^g, M_{yx}^g, \\ M_{yy}^g, M_{yz}^g, M_{zx}^g, M_{zy}^g, M_{zz}^g, r_{xx}, r_{xy}, r_{xz}, r_{yx}, r_{yy}, r_{yz}, r_{zx}, r_{zy}, r_{zz} \end{bmatrix}.$$

Настройка фильтра Калмана для динамических тестов должна обеспечивать окончание переходного процесса в ковариационных матрицах к окончанию поворота.

Рассмотрим условия, обеспечивающие наблюдаемость переменных  $r_{ij}$  в динамическом тесте. Отметим, что вследствие нестационарности фильтра Калмана во время проведения динамических тестов оценку наблюдаемости калибровочных коэффициентов БИНС необходимо проводить, используя не матрицу наблюдаемости, а характер временной зависимости дисперсий элементов вектора состояний фильтра Калмана. Известно [14], что ненаблюдаемые переменные имеют линейный рост дисперсий со временем, что отражает поведение ненаблюдаемой случайной величины типа «gandom walk».

Учитывая структуру уравнений погрешностей (5)–(10) видно, что при наличии измерений погрешностей скоростей  $\Delta V_x, \Delta V_y, \Delta V_z$  наблюдаемыми величинами  $r_{ij}$  будут те из них, которые имеют ненулевые значения в скобках выражений (2)–(4). Степень наблюдаемости (время выхода  $r_{ij}$  на стационарное значение при проведении динамического теста) прямо пропорциональна коэффициентам при  $r_{ij}$  в выражениях (2)–(4) и определяется характером вращения стэнда при калибровке.

Диагональные члены выражений (2)–(4) пропорциональны сумме квадратов проекций угловых скоростей в связанном базисе, поэтому достаточно ненулевого значения одной из них для возникновения наблюдаемости соответствующей величины  $r_{ii}$ .

Коэффициенты при недиагональных  $r_{ij}$  образованы суммой (разностью) произведения проекций угловых скоростей по разным осям и производной по времени от угловой скорости по третьей оси. При одноосном вращении БИНС на двухкоординатном или однокоординатном поворотном столе с постоянной скоростью произведения  $\omega_i \omega_j$  для некоторых недиагональных  $r_{ij}$  могут обратиться в ноль, что приведет к потере наблюдаемости данного коэффициента  $r_{ij}$ .

Для таких элементов  $r_{ij}$  наблюдаемость возникает только во время разгона и торможения одноосных поворотов.

Для проверки указанных выше положений проводилось численное моделирование процесса калибровки БИНС при динамическом тесте с учетом size-эффекта при вращении в процессе калибровки на двухкоординатном поворотном столе вокруг внутренней оси  $Z$  и затем вокруг внешней оси  $X$ . Время поворота по каждой из осей составляло 2,5 с, суммарное время разгона и торможения – 2,4 с. Результаты моделирования для дисперсий погрешностей и погрешностей величин  $r_{ij}$  приведены на рис. 1.

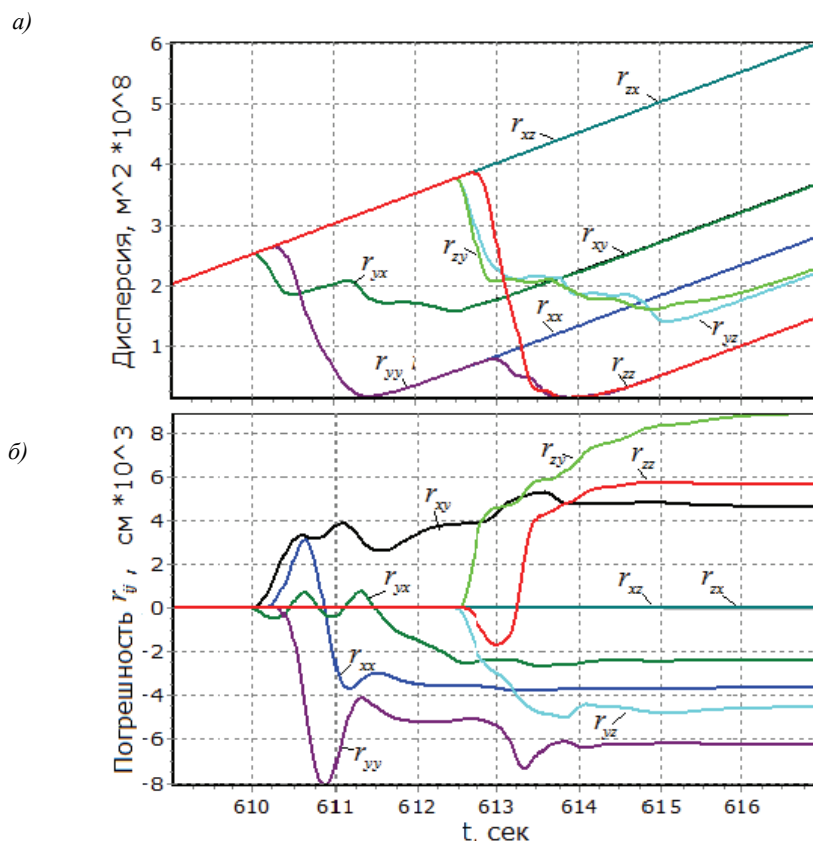


Рис. 1. Пример зависимости дисперсии погрешностей параметров size-эффекта  $r_{ij}$  (а) и погрешностей величин  $r_{ij}$  (б) при последовательном вращении (сначала на интервале времени 610-612,5 с по оси  $z$  на  $720^\circ$ , потом на интервале времени 612,5-615 с вокруг внешней оси  $x$  на  $810^\circ$ ) двухкоординатного поворотного стола

Видно, что дисперсии параметров  $r_{xz}$ ,  $r_{zx}$  сохранили линейный рост со временем, что свидетельствует об их ненаблюдаемости. За время обоих одноосных поворотов оценку получили 7 параметров:  $r_{xx}$ ,  $r_{xy}$ ,  $r_{yx}$ ,  $r_{yy}$ ,  $r_{yz}$ ,  $r_{zy}$ ,  $r_{zz}$ . Из них  $r_{xx}$ ,  $r_{xy}$ ,  $r_{yx}$  получили оценку при вращении вокруг оси  $Z$ ;  $r_{yz}$ ,  $r_{zy}$ ,  $r_{zz}$  – при вращении вокруг оси  $X$ ;  $r_{yy}$  – получили оценку вокруг оси  $Z$  и  $X$  (рис. 2).

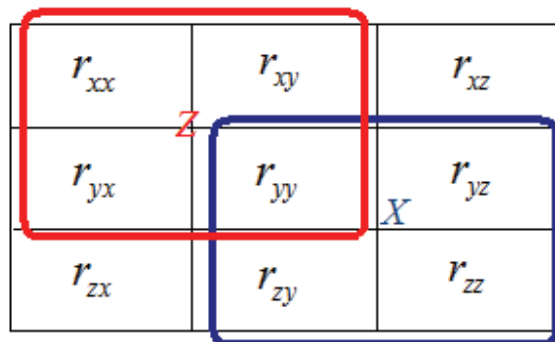


Рис. 2. Наблюдаемые параметры size-эффекта при последовательном вращении осей двухкоординатного поворотного стола (выделены жирной линией)

Для обеспечения наблюдаемости параметров size-эффекта  $r_{ij}$  при одноосных вращениях необходимо обеспечить время разгона и торможения, сравнимое со временем переходного процесса оценки фильтром Калмана параметров size-эффекта  $r_{ij}$ .

Этот вывод подтверждается результатом численного моделирования сходимости оцениваемых в динамическом тесте параметров калибровки матрицы гироскопов (масштабные коэффициенты  $Sf$ , параметры разориентации  $Mg$ ) и погрешностей определения параметров size-эффекта  $r_{ij}$  при различных временах разгона и торможения (рис. 3). Приведены значения среднеквадратичного отклонения по однотипным элементам.

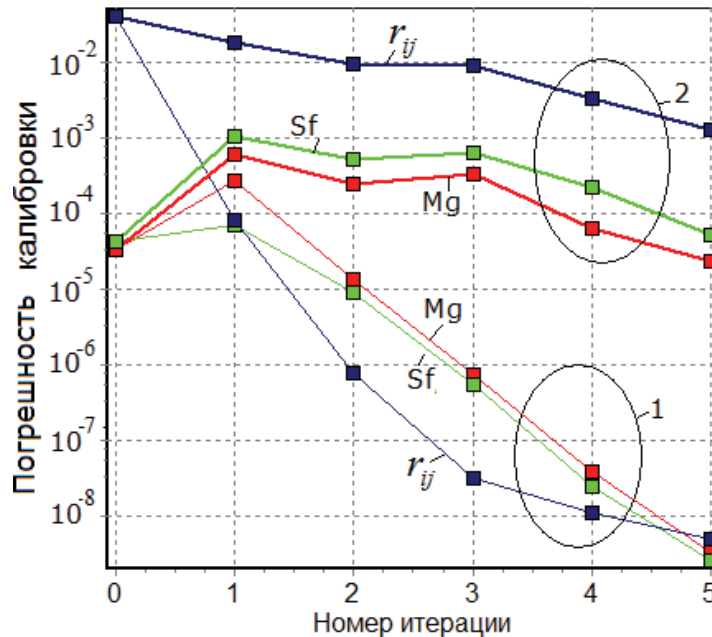


Рис. 3. Погрешность калибровки гироскопов и параметров size-эффекта при последовательном вращении (сначала на интервале времени 610-612,5 с по оси  $z$  на  $720^\circ$ , потом на интервале 612,5-615 с вокруг внешней оси  $x$  на  $810^\circ$ ) двухкоординатного поворотного стола. Масштабные коэффициенты  $Sf$  и параметры разориентации  $Mg$  гироскопов - безразмерные, параметры size-эффекта  $r_{ij}$  в метрах

Время поворота по каждой из осей составляло 2,5 с. Группа линий 1 соответствует суммарному времени разгона и торможения 2,4 с, группа линий 2 суммарному времени разгона и торможения 0,01 с.

Из приведенных на рис. 3 графиков видно, что при хорошей наблюдаемости недиагональных параметров  $r_{ij}$  (большое время разгона и торможения) сходимость итераций высокая – примерно порядок на итерацию.

При малой наблюдаемости недиагональных параметров  $r_{ij}$  сходимость итерационного процесса калибровки низкая.

Численное моделирование показывает, что при одновременном вращении поворотного стола по двум (трем) осям при динамическом тесте имеет место высокая наблюдаемость как всей матрицы калибровки гироскопов, так и параметров  $r_{ij}$ .

## Экспериментальные результаты калибровки БИНС

Рассмотренный выше метод был применен для калибровки БИНС навигационного класса точности на волоконно-оптических гироскопах. Калибровка проводилась с использованием двухкоординатного поворотного стола Acutronic.

В одной итерации совершались 5 статических и 5 динамических тестов. При проведении динамических тестов последовательно совершались повороты вокруг внутренней оси  $Z$  и внешней  $X$ .

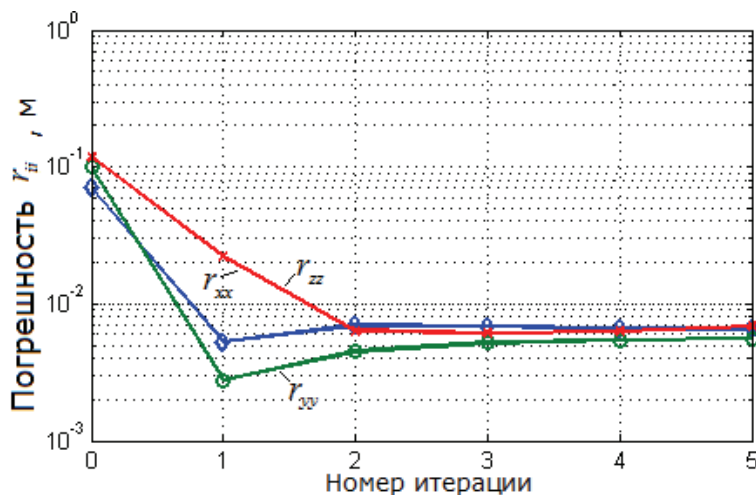
Расчётные значения положений центров акселерометров в связанной системе координат с центром в полюсе, совпадающим с точкой пересечения осей вращения поворотного стола, были определены из известных геометрических размеров корпуса БИНС по конструкторской документации и измерений переходной плиты и стола Acutronic. Предполагалось, что центр чувствительности акселерометра совпадает с его геометрическим центром. Оценка погрешности полученных таким образом параметров  $r_{ij}$  составляет  $\pm 4\text{--}7$  мм.

Сравнение расчетных и полученных при калибровке БИНС параметров  $r_{ij}$  в миллиметрах представлено в таблице.

Оценка параметров  $r_{ij}$ 

|                        | $r_{xx}$ | $r_{xy}$ | $r_{xz}$ | $r_{yx}$ | $r_{yy}$ | $r_{yz}$ | $r_{zx}$ | $r_{zy}$ | $r_{zz}$ |
|------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Вычислено по КД        | -70.5    | -43.0    | 64.5     | -20.5    | -100     | 61.5     | -42.5    | -71.0    | 117.5    |
| Оценено при калибровке | -63.9    | -42.2    | 63.8     | -20.5    | -94.4    | 64.8     | -41.0    | -74.4    | 124.3    |

На рис. 4, 5 представлены графики погрешностей оценки (определяемой как модуль разности вычисленной величины и оцененной при калибровке) соответственно диагональных и недиагональных элементов матрицы параметров  $r_{ij}$  в зависимости от номера итерации.

Рис. 4. Погрешность определения диагональных элементов матрицы параметров  $r_{ij}$

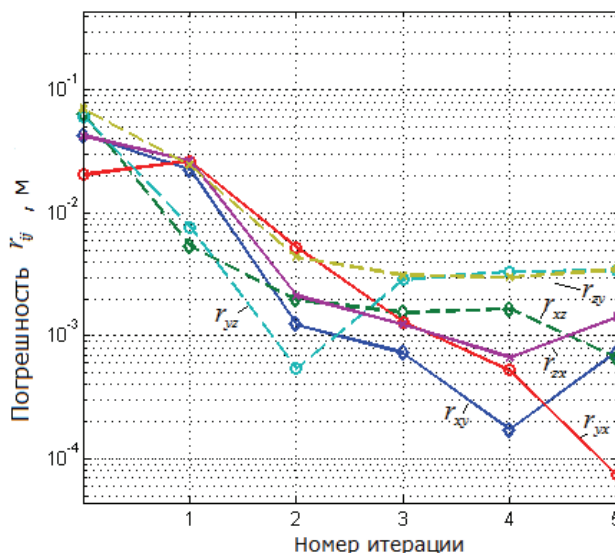


Рис. 5. Погрешность определения недиагональных элементов матрицы параметров  $r_{ij}$

Из рисунков видно, что предложенный алгоритм обеспечивает экспоненциальную сходимость диагональных элементов  $r_{xx}$ ,  $r_{yy}$ ,  $r_{zz}$  за 2 итерации, в то время как сходимость недиагональных элементов обеспечивается за 3 итерации. Скорость схождения итерации совпадает с результатами численного моделирования – примерно порядок на итерацию.

Выход погрешностей на стационарные значения порядка  $4\div 7$  мм обусловлен наличием погрешностей расчетных величин в связи с отсутствием точной информации о положении центров чувствительных элементов акселерометров относительно своих корпусов, а также наличием конечных значений допусков изготовления и сборки БИНС.

На рис. 6 представлена экспериментальная зависимость дисперсии погрешностей параметров size-эффекта  $r_{ij}$  от времени. Суммарное время поворота стола по двум осям составляло 28 с. Время разгона (торможения) по каждой оси составляло 5 с.

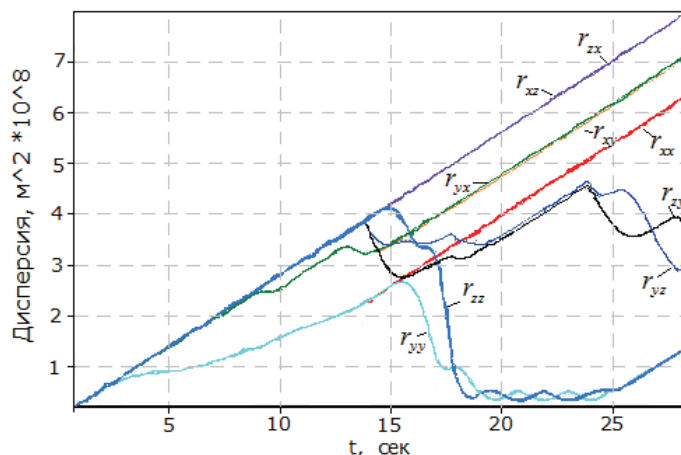


Рис. 6. Экспериментальная зависимость дисперсии погрешностей параметров size-эффекта  $r_{ij}$  при последовательных одноосных поворотах

Из рисунка видно качественное соответствие экспериментальной зависимости дисперсии и результатов численного моделирования (см. рис. 1). Ненаблюдаемыми параметрами являются  $r_{xz}$ ,  $r_{zx}$  в соответствии с рис. 2.

### Выводы

Представлен метод калибровки БИНС, учитывающий полную систему погрешностей и наличие разнесения чувствительных масс акселерометров с плюсом связанной системы координат. Нахождение параметров калибровки проводится применением фильтра Калмана при проведении динамических тестов, что обеспечивает одновременное определение матрицы  $M_{jk}^g$  гироскопов и параметров size-эффекта  $r_{ij}$ .

Экспоненциальная сходимость итераций позволяет эффективно проводить калибровку БИНС.

При корректной настройке фильтра Калмана и времени разгона и торможения поворотного стола скорость схождения итераций высокая – примерно порядок на итерацию.

Для обеспечения наблюдаемости недиагональных элементов  $r_{ij}$  при одноосных поворотах необходимо обеспечить время разгона и торможения поворотного стола, сравнимое со временем переходного процесса оценки фильтром Калмана параметров size-эффекта  $r_{ij}$ .

Метод не привязан к конкретному плану поворотов стола и не требует аналитических расчетов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. IEEE Standard for Inertial Systems. Terminology. IEEE Std 1559 -2009.
2. Кухтневич С.Е., Рафельсон В.Ф., Фомичев А.В. О погрешностях БИНС, обусловленных несинхронностью трактов измерения угловых скоростей и линейных ускорений и геометрией блока акселерометров // Тр. Московского института электромеханики и автоматики. – М.: ОАО «МИЭА». - 2011.- Вып. 3.- С. 86-95.
3. Голован А.А., Парусников Н.А. Математические основы навигационных систем. Ч. II.- 2-е изд. испр. и доп. - М.: МАКС Пресс.- 2012. - 172 с.
4. Hung J.C., Hunter J.S., Stripling W.W., White H.V. Size Effect on Navigation using a Strapdown IMU. Guidance and Control Directorate Technology Laboratory. Technical Report T-79-73, 1979.
5. Titterton D.H., Weston J.L. Strapdown Inertial Navigation Technology. 2<sup>nd</sup> Edition, p.581, 2004.
6. Бранец В.Н., Шмыглевский И.П. Введение в теорию бесплатформенных инерциальных навигационных систем. –М.: Наука, 1992.-280 с.
7. IEEE Recommended Practice for Inertial Sensor Test Equipment, Instrumentation, Data Acquisition, and Analysis. IEEE Aerospace and Electronic System Society. IEEE Std. 1554 - 2005.
8. Климович Б.В. Калибровка БИНС в инерциальном режиме. Объединение скоростного и скалярного методов // Гироскопия и навигация.- 2014.- №3 (86).- С. 29-40.
9. Козлов А.В., Сазонов И.Ю. Калибровка инерциальных навигационных систем на грубых стендах с учетом разнесения чувствительных масс ньютонометров // Научный вестник МГТУ ГА. №189.- С. 27-35, 2013.
10. Zhu Lufeng, Zhang Chunxi. The Fine System-level Calibration of Size Effect Error for the Fiber-SINS // 2010 International Conference on Electrical Engineering and Automatic Control (ICEE AC 2010) pp.VI-360-363.

11. **Diesel J.W.** Calibration of a ring laser gyro inertial navigation system. Proc. of the 13<sup>th</sup> Biennial Guidance Test Symposium, vol. 1, Holloman AF, New Mexico, pp. SO1A.1-SO.1A.37, 1987.
12. **Лурье А.И.** Аналитическая механика. М.: Наука, 1961.- 824 с.
13. **Матвеев В.В., Распопов В.Я.** Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем.- СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2009.- 280 с.
14. **Степанов О.А.** Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Ч. 2. Введение в теорию фильтрации.- СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2012.- 417 с.

**Abstract.** A method to account for size effect in SINS calibration is proposed. The method uses Kalman filter in SINS inertial mode and estimates the calibration errors for accelerometers, gyros, and accelerometer proof mass positions. The method does not depend on a specific calibration scenario, does not require analytical calculations, and calibrates size effect simultaneously with other SINS parameters in common iteration procedure.

**Key words:** strapdown inertial navigation system (SINS), calibration, inertial mode, size effect, Kalman filter

Материал поступил 23.09.14