

## КАЛИБРОВКА БИНС В ИНЕРЦИАЛЬНОМ РЕЖИМЕ. ОБЪЕДИНЕНИЕ СКОРОСТНОГО И СКАЛЯРНОГО МЕТОДОВ

*Предложен метод калибровки бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС) навигационного класса точности, учитывающий полное уравнение погрешностей при произвольных вращениях поворотного стола. Применение фильтра Калмана в навигационном режиме БИНС позволяет получать оценку погрешностей калибровки акселерометров и гироскопов. Учет полученных погрешностей позволяет проводить калибровку БИНС за 3-4 итерационных повторения. Источником измерений фильтра Калмана являются скорости навигационной системы. Метод не привязан к конкретному плану поворотов стола, не требует аналитических расчетов и позволяет получать количественную оценку как плану поворотов стола, так и погрешности получаемых калибровочных параметров.*

### Введение

Калибровка бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС) навигационного класса точности предназначена для коррекции погрешностей в установке чувствительных элементов (гироскопов и акселерометров) относительно связанной системы координат, погрешностей масштабных коэффициентов и смещений нулей. Возрастающие требования к точности БИНС, повышение качества гироскопов и акселерометров, распространение в производстве БИНС точных поворотных столов для калибровки требуют пересмотра существующих методов калибровки.

Традиционно калибровка БИНС навигационного класса точности проводится в два этапа [1–5]. На первом этапе данные от чувствительных элементов сравниваются с их эталонными внешними значениями при определенных положениях БИНС относительно гравитационной вертикали (для акселерометров) и эталонными углами поворотов (для гироскопов).

На втором этапе уточнение параметров калибровки проводится по скоростному либо скалярному методу.

В скоростном методе БИНС находится в инерциальном режиме и совершает определенные эволюции на поворотном столе с выдержкой по времени в статических положениях. Выработка навигационным алгоритмом значений ненулевой скорости в горизонтном базисе свидетельствует об остаточной (нескомпенсированной на первом этапе калибровки) погрешности калибровочных параметров. В распространенном методе определения калибровочных параметров [2] оцениваются погрешности, приводящие к линейной зависимости вырабатываемой БИНС скорости от времени. При этом существуют аналитические зависимости между погрешностями выработки скорости и калибруемыми параметрами. Для некоторых специальных его положений погрешность выработки ско-

---

**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».

рости от времени зависит только от двух неизвестных калибровочных параметров. Совокупность измерений для всех положений стола дает возможность определить калибровочные параметры акселерометров. Для гироскопов таким образом определяются только погрешности масштабных коэффициентов и погрешности рассогласования установки. Смещения нулей гироскопов требуют большой (сравнимой с периодом Шулера) длительности испытаний, что приводит к косинусоидальной (а не линейной) зависимости погрешности выработки скорости от времени. Попытки аналитического решения этой задачи предпринимались в работах [6, 7].

В скалярном методе [8] в качестве источника информации о погрешностях калибровочных параметров используется квадрат модуля измеряемой векторной величины: для акселерометров – ускорения свободного падения в месте проведения калибровки БИНС, для гироскопов – скорости вращения Земли. Эти физические величины известны с высокой степенью точности, что позволяет значительно снизить погрешность определения калибровочных параметров. Недостатком этого метода является определение только части параметров калибровки, что связано с инвариантностью модуля вектора относительно произвольного вращения. Определенные таким образом параметры затем объединяются с параметрами, найденными по погрешностям скоростей [2].

Следует отметить ограничения как скоростного, так и скалярного методов.

Аналитические выражения для коэффициентов линейной зависимости погрешности выработки скорости от времени при калибровке по скоростям получены для определенных поворотов трехкоординатного (двухкоординатного) стола [2, 3]. При выводе этих аналитических выражений сделаны упрощения уравнений погрешностей БИНС: учтены только линейные члены, зависящие от времени. Следовательно, оценки коэффициентов калибровки имеют смещения относительно истинных значений. При последующей работе фильтра Калмана в БИНС и использовании полной системы уравнений погрешностей на длительных интервалах времени неизбежны систематические погрешности инерциальной системы, связанные только с несоответствием условий калибровки условиям эксплуатации.

Существенным является и выбор поворотов стола, значительно упрощающий аналитические выражения, но не оптимальный для проведения эффективной калибровки. Повороты выбраны одноосными, и возможность сравнения результатов калибровки при двухосном (в частности, конусном) вращении стола требует сложных аналитических расчетов. Параметры калибровки, полученные скалярным методом, должны быть объединены с параметрами, полученными скоростным методом, что является проблематичным при отсутствии информации о дисперсиях величин, получаемых различными методами. Логичным представляется использование для калибровки фильтра Калмана с полной системой уравнений погрешностей БИНС [9].

Оценка фильтром Калмана вектора состояний при совершении поворотным столом определенных планов эволюций позволяет (при определенной настройке параметров фильтра Калмана) получать наиболее вероятные оценки параметров калибровки и их дисперсии. После очередного прохода всех положений стола проводится суммарная обработка полученных значений методом наименьших квадратов с учетом известных величин дисперсий. Полученная оценка погрешностей параметров калибровки должна быть вычтена из использовавшихся параметров калибровки перед итерационным повторением процедуры. Важными вопросами эффективности метода калибровки являются наличие не-

смещенности получаемых оценок, скорость сходимости итерационного процесса, возможность получения количественных оценок эффективности плана вращения стола и оценок дисперсий результата.

Предлагаемый метод позволяет дать положительные ответы на указанные вопросы. Ближким к предлагаемому в настоящей работе методу является метод, изложенный в работе [10]. В отличие от работы [10], где источником измерений для работы фильтра Калмана используются линейные скорости и координаты в горизонтном базисе, в настоящей работе используются только линейные скорости. Причина, по которой применение координат является избыточным, состоит в том, что при выборе полюса связанной системы в точке пересечения осей поворотного стола в системе уравнений погрешностей БИНС искомые параметры калибровки напрямую связаны только с производными по времени от скоростей, но не с координатами [11]. Координаты, будучи интегралами от скоростей, не содержат новой информации в условиях калибровки.

### Метод калибровки БИНС

Запишем систему уравнений погрешностей БИНС для правой системы координат ENU. Погрешности координат опустим по причине отсутствия в них новой информации при использовании скоростей в качестве измерений фильтра Калмана.

Система уравнений погрешностей БИНС в горизонтной системе координат имеет вид [11]:

$$\frac{\partial \Delta V_x}{\partial t} = \Delta V_y 2U \sin(\varphi) - \Delta V_z 2U \cos(\varphi) - g_0 \gamma_y + \Delta B_x^a, \quad (1)$$

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

$$\frac{\partial \Delta V_z}{\partial t} = \Delta V_x 2U \cos(\varphi) + \Delta B_z^a, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \gamma_x}{\partial t} = -U \cos(\varphi) \gamma_z + U \sin(\varphi) \gamma_y - \frac{\Delta V_y}{\rho_1 + h} - \Delta B_x^g, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \gamma_y}{\partial t} = -U \sin(\varphi) \gamma_x + \frac{\Delta V_x}{\rho_2 + h} - \Delta B_y^g, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \gamma_z}{\partial t} = U \cos(\varphi) \gamma_x + \frac{\Delta V_x}{\rho_2 + h} \operatorname{tg}(\varphi) - \Delta B_z^g, \quad (6)$$

где  $\Delta V_i$  – ( $i=0, 1, 2$  ( $x, y, z$ )) – погрешности выработки составляющих скорости 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 в месте калибровки;  $\rho_1$ ,  $\rho_2$  – радиусы кривизны Земного эллипсоида.

В уравнениях (1)–(6) принимается модель материальной точки (акселерометры скорректированы на size-эффект [12]), отсутствует задержка между выходными данными акселерометров и гироскопов.

Примем следующие линейные уравнения погрешностей калибровки в связанной системе координат:

$$\Delta B_i^a = b_i^a + \sum_{j=0}^2 M_{ij}^a G_j, \quad (7)$$

$$\Delta B_i^g = b_i^g + \sum_{j=0}^2 M_{ij}^g \Omega_j, \quad (8)$$

где  $G_j$  ( $\Omega_j$ ) – фактические значения ускорения (мгновенная скорость вращения) в связанной системе.

Такая модель погрешностей чувствительных элементов обычно принимается при калибровке БИНС на кольцевых лазерных или оптоволоконных гироскопах. Для перехода между связанной и горизонтной системой координат имеется ортогональная матрица  $C_{ij}$ . Коэффициенты  $b_i^a$  ( $b_i^g$ ) определяют смещение нулей; матрицы  $M_{ij}^a$  ( $M_{ij}^g$ ) – погрешности масштабных коэффициентов и ориентаций акселерометров (гироскопов).

Для выполнения калибровки (определения параметров  $b_i^g, M_{ij}^g, b_i^a, M_{ij}^a$ ) зададим последовательность  $N$  статических (неподвижных относительно Земли) положений стола длительностью  $\sim 5 \div 30$  мин. Между статическими положениями осуществляются одноосные либо двухосные повороты. Таким образом, для одной итерации калибровки имеем  $N$  статических и  $N$  динамических тестов (стол неподвижен (в первом случае) и стол вращается (во втором) относительно Земли).

Статические тесты определяют калибровочные параметры акселерометров и смещения нулей гироскопов, динамические – матрицу  $M_{ij}^g$  для гироскопов.

### Алгоритм статического теста

В начале временного интервала статического теста проводится инициализация матрицы  $C_{ij}$ , обнуляются скорости навигационного алгоритма БИНС, инициализируется фильтр Калмана: принимаются нулевыми значениями компоненты вектора состояния и диагональными элементами – ковариационные матрицы. Инициализация матрицы  $C_{ij}$  для первых итераций проводится по известному положению поворотного стола относительно горизонтной системы координат [9], на последних итерациях инициализация проводится методом гирокомпасирования в целях устранения погрешностей, связанных с поворотным столом.

Вектор состояния фильтра Калмана для статических тестов имеет 12 компонентов и состоит из погрешностей скоростей, ориентации и калибровки акселерометров (гироскопов) в горизонтной системе координат ( $\Delta B_i^{a(g)}$ ). Поскольку поворотный стол в процессе статической калибровки не меняет своего положения, в первом приближении считаем величины  $\Delta B_i^{a(g)}$  постоянными и, соответственно, уравнениями движения  $\Delta B_i^{a(g)}$  будут равенства нулю их производных по времени. Скорости БИНС, полученные навигационным алгоритмом, определяют погрешности  $\Delta V_i$  и являются измерениями для фильтра Калмана.

Эволюция состояний фильтра Калмана при больших временах наблюдения статического теста показывает шулеровские и суточные колебания  $\Delta B_z^a$  и отсутствие наблюдаемости  $\Delta B_z^g$  (рис. 1). Время наблюдения увеличено для иллюстрации характера изменения погрешностей.

Следует отдельно остановиться на вопросе наблюдаемости компонентов  $\Delta B_x^a$  и  $\Delta B_y^a$ . Принято считать, что эти компоненты фильтра Калмана являются ненаблюдаемыми при статическом положении БИНС [13]. Это утверждение справедливо для больших времен наблюдений. При надлежащей настройке фильтра Калмана (выбор значений дисперсий измерений и порождающих шумов) в течение переходного процесса после начала работы фильтра указанные компоненты наблюдаемы. С окончанием переходного процесса дисперсия компонент  $\Delta B_x^a$  и  $\Delta B_y^a$  переходит на линейный рост, что свидетельствует о потере наблюдаемости (рис. 2).

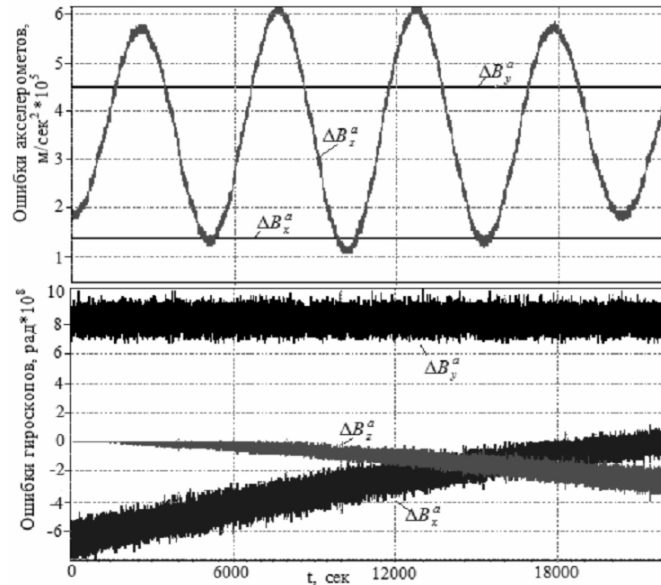


Рис. 1. Пример зависимости погрешностей калибровки акселерометров и гироскопов при статическом тесте

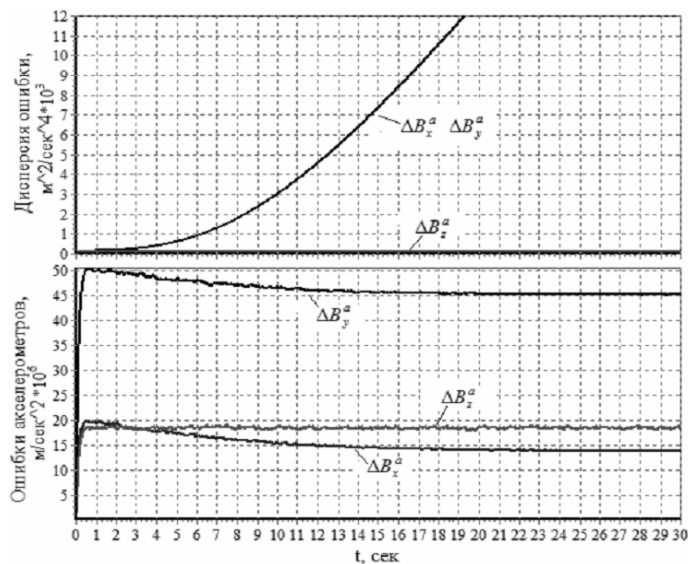


Рис. 2. Пример зависимости дисперсии погрешностей калибровки акселерометров (вверху) при статическом тесте и переходных процессов погрешностей калибровки акселерометров (внизу)

Такая временная наблюдаемость компонент  $\Delta B_x^a$  и  $\Delta B_y^a$  позволяет, учитывая несмещенность получаемых оценок  $\Delta B_x^a$  и  $\Delta B_y^a$ , использовать их для итерационного уточнения калибровочных коэффициентов акселерометров. При практическом применении рассматриваемого алгоритма при настройке фильтра Калмана следует добиваться выхода временной зависимости дисперсий  $\Delta B_x^a$  и  $\Delta B_y^a$  на плато в начале работы. При неправильной настройке фильтра Калмана линейный рост дисперсий  $\Delta B_x^a$  и  $\Delta B_y^a$  начинается сразу после его запуска.

Получаемые по окончании статического теста три компоненты погрешностей акселерометров и две горизонтальные компоненты погрешностей гироскопов в одном положении стола должны быть аппроксимированы на начало работы теста к нулевым погрешностям по скоростям  $\Delta V_i$  и ориентации  $\gamma_i$ . Значения дисперсий оценок  $\Delta B_i^{a(g)}$  образуют вектор ковариации  $R$ .

После прохождения всех  $N$  статических тестов будет получено  $5N$  значений оценок погрешностей акселерометров и гироскопов (кроме  $z$ -компоненты горизонтного базиса). Образованный из них вектор измерения  $Z$  в совокупности с вектором ковариации  $R$  используется для оценки методом наименьших квадратов интересующих нас коэффициентов калибровки  $b_i^a, M_{ij}^a, b_i^g$ .

Матрица измерений  $H$  получается в соответствии со следующими уравнениями:

$$Z_i^a = \sum_{j=0}^2 C_{ij} b_j^a + g_0 \sum_{jk=0}^2 C_{ij} C_{2k} M_{jk}^a \quad (i=0,1,2), \quad (9)$$

$$Z_i^g = \sum_{j=0}^2 C_{ij} b_j^g + \sum_{jk=0}^2 C_{ij} \Omega_k M_{jk}^g \quad (i=0,1), \quad (10)$$

$$\Omega_k = \sum_{j=0}^2 C_{jk} \omega_j, \quad (11)$$

где  $\omega = (0, U \cos(\varphi), U \sin(\varphi))^T$  – скорость вращения Земли в горизонтном базисе.

Вектор  $x \equiv b_i^a, M_{ij}^a, b_i^g$  получает наиболее вероятную оценку [9]

$$x = (H^+ R^{-1} H)^{-1} H^+ R^{-1} Z. \quad (12)$$

Дисперсия  $\delta x$  вектора  $x$  имеет вид

$$\delta x = \text{diag}(H^+ R^{-1} H)^{-1}. \quad (13)$$

Из выражений (12), (13) следует критерий оптимальности плана положений поворотного стола для статических тестов.

Критерием является степень обусловленности матрицы  $(H^+ R^{-1} H)$ , которая количественно определяется как отношение модулей минимального к максимальному собственным значениям этой матрицы, что дает простой вычисляемый критерий, учитывающий план положений стола, характеристики БИНС и качество настройки фильтра Калмана.

### Алгоритм динамического теста

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

В уравнениях (1)–(6) параметры  $\Delta B_i^{a(g)}$ , соответствующие погрешностям гироскопов и акселерометров, следует рассматривать переменными из-за изменения матрицы перехода между связанной и горизонтной системой координат  $C_{ij}$ . В связи с этим вектор состояния фильтра Калмана должен содержать  $6+24=30$  элементов, включая погрешности скоростей, ориентации и калибровочных параметров  $b_i^g, M_{ij}^g, b_i^a, M_{ij}^a$ . Уравнениями движения последних являются равенства нулю производных  $b_i^g, M_{ij}^g, b_i^a, M_{ij}^a$  по времени. Настройка фильтра Калмана для динамических тестов должна обеспечивать окончание переходного процесса к окончанию поворота. Для повышения точности определения  $M_{ij}^g$  целесообразно производить повороты стола на возможно большие углы. При заданном конечном положении каждой оси стола можно добавлять в угол поворота дополнительные полные обороты.

Последовательность вращений осей стола может выбираться из целей калибровки. Возможно последовательное одноосное вращение по отдельным осям, либо одновременное вращение двух (трех) осей. В последнем случае калибровка может проводиться в том числе и при конусном вращении. Сравнение результатов калибровки для двух вариантов вращений может служить основанием для оценки эффективности алгоритмической компенсации конусного вращения навигационным алгоритмом.

В рамках модели погрешностей (7), (8) предполагается пренебрежимо малая зависимость масштабных коэффициентов от скорости вращения. При этом задаваемая скорость вращения стола должна соответствовать диапазону условий эксплуатации БИНС.

Одноосное либо двухосное конусное вращение ведет к различным характеристикам наблюдаемости погрешностей калибровочных параметров  $M_{ij}^g$ . На рис. 3, 4 представлены результаты моделирования работы фильтра Калмана для поворотов внутренней оси двухосного поворотного стола на  $720^\circ$  и внешней на  $810^\circ$  для конического (рис. 3) и последовательного одноосного вращения (рис. 4).

Видно, что коническое вращение создает условия для наблюдаемости всех элементов матрицы  $M_{ij}^g$ , в то время как одноосное вращение позволяет в одном динамическом тесте определить часть элементов матрицы  $M_{ij}^g$ .

Последовательное выполнение  $N$  динамических тестов в соответствии с планом поворотов стола дает возможность сформировать вектор измерения  $Z$  размерности  $9N$  и вектор ковариации  $R$  для оценки методом наименьших квадратов интересующих нас погрешностей коэффициентов калибровки  $M_{ij}^g$ . Оценка величин коэффициентов и доверительных интервалов проводится по выражениям (12), (13) при единичной матрице измерений.

Аналогично статическим тестам можно сформировать количественную оценку оптимальности плана вращений стола как обусловленность матрицы  $(H^+ R^{-1} H)$ .

Оценка всех погрешностей калибровочных параметров  $b_i^g, M_{ij}^g, b_i^a, M_{ij}^a$ , полученная после окончания серии  $N$  статических и динамических тестов, вычисляется из использовавшихся навигационным алгоритмом калибровочных параметров. Этим завершается итерационный шаг калибровки. Экспоненциальная сходимость итераций обычно требует 3-4 прохода для достижения требуемой точности калибровки.

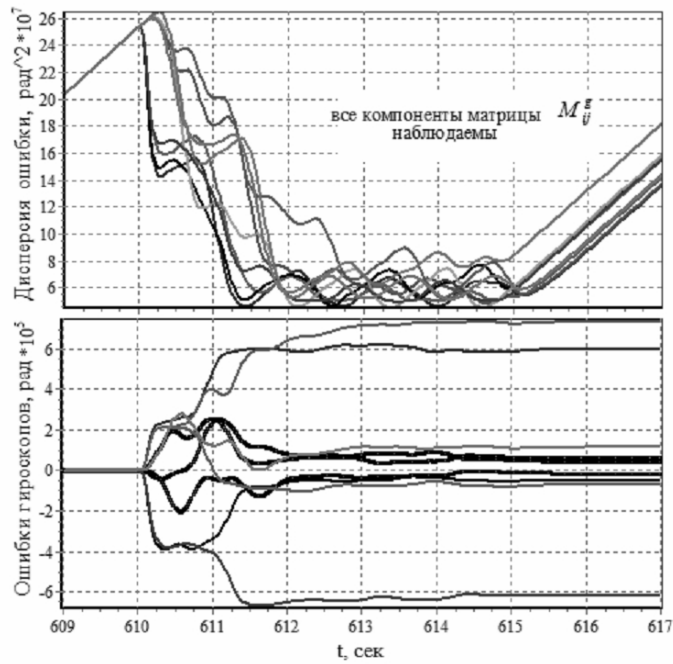


Рис. 3. Пример зависимости дисперсии погрешностей калибровки гироскопов (вверху) и переходных процессов погрешностей  $M_{ij}^g$  гироскопов (внизу) при коническом вращении двухкоординатного стола (одновременное вращение внутренней оси Z на  $720^\circ$  и вокруг внешней оси X на  $810^\circ$  на интервале 610-615 с)

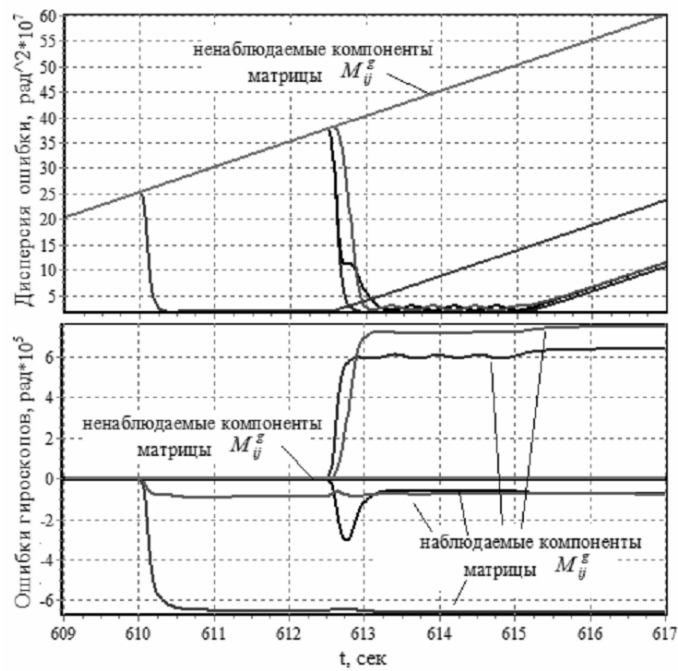


Рис. 4. Пример зависимости дисперсии погрешностей калибровки гироскопов (вверху) и переходных процессов погрешностей калибровки гироскопов  $M_{ij}^g$  (внизу) при последовательном вращении (сначала на интервале 610-612,5 с по оси Z на  $720^\circ$ , потом на интервале 612,5-615 с вокруг внешней оси X на  $810^\circ$ ) двухкоординатного поворотного стола

### Сравнение предлагаемого метода с калибровкой по скоростям и скалярным методом

Как было отмечено выше, основное ограничение калибровки БИНС по скоростям [2, 3, 12] состоит в трудности определения смещений нулей гироскопов  $b_i^g$ . Причиной этой трудности является упрощение точной системы уравнений погрешностей (1)–(6), сводящееся к рассмотрению только начальных (по времени) этапов эволюции погрешностей. При малых (по сравнению с периодом Шулера) временах из уравнений (1), (2), (4), (5) следует упрощенная связь между вторыми производными по времени погрешностей выработки горизонтальной скорости БИНС и ошибками гироскопов:

$$\frac{\partial^2 \Delta V_x}{\partial t^2} = -g_0 \Delta B_y^g, \quad (14)$$

$$\frac{\partial^2 \Delta V_y}{\partial t^2} = g_0 \Delta B_x^g. \quad (15)$$

С математической точки зрения это упрощение эквивалентно приближению косинусоиды колебаний Шулера погрешностей горизонтальных скоростей параболой при малых (по сравнению с периодом Шулера) временах.

При необходимости точной калибровки БИНС и увеличения времени проведения статических тестов упрощенная оценка погрешностей гироскопов (14), (15) значительно снижает сходимость итерационного процесса.

Этот вывод подтверждается численным моделированием, результаты которого приведены на рис. 5. При моделировании погрешности гироскопов типа “random walk” принимались равными  $0.008 \text{ }^\circ/\sqrt{ч}$ , смещения нулей –  $1 \text{ }^\circ/ч$ . Время проведения статических тестов бралось 10 и 20 мин.

Кривые 1, 2 соответствуют использованию точной системы уравнений погрешностей (1)–(6), кривые 3, 4 – упрощению (14), (15) при нахождении  $\Delta B_x^g, \Delta B_y^g$ .

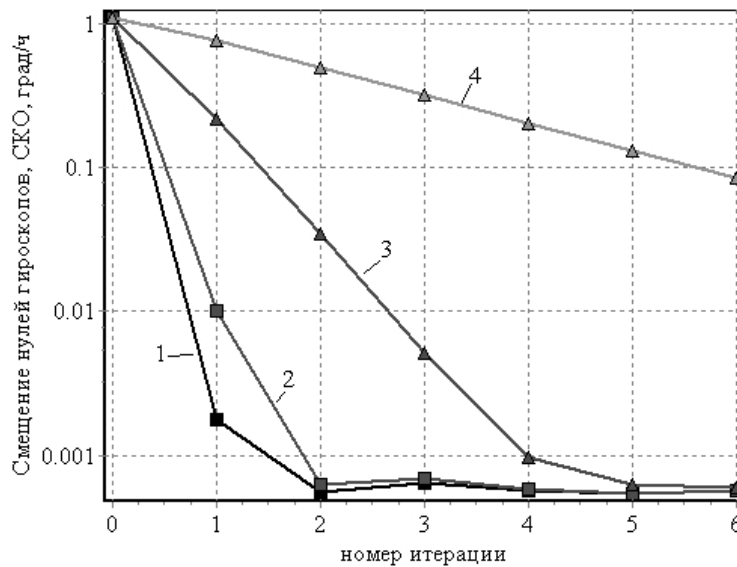


Рис. 5. Зависимость погрешности калибровки смещений нулей гироскопов от номера итерации для предлагаемого метода [2, 3, 11]:  
1, 3 – время проведения статического теста 10 мин; 2, 4 – 20 мин

Рассмотрим вопрос: можно ли получить дополнительную точность (или скорость сходимости итераций) по сравнению с рассматриваемым методом при использовании скалярной калибровки [8].

Для этого рассмотрим выражение для вектора ускорения свободного падения  $g_i^a$  в связанном базисе, измеренного с учетом принятой модели погрешностей

$$g_i^a = b_i^a + \sum_{k=0}^2 G_k (M_{ik}^a + \delta_{jk}),$$

где  $\delta_{ik}$  – символ Кронекера.

Квадрат модуля  $g_i^a$  в первом порядке малости по величинам  $b_i^a, M_{ij}^a$  имеет вид

$$\frac{\sum_{i=0}^2 (g_i^a)^2 - g_0^2}{2} = \sum_{i=0}^2 G_i b_i^a + \sum_{jk=0}^2 G_j G_k M_{jk}^a. \quad (16)$$

В первом приближении по величинам  $b_i^a, M_{ij}^a$  в выражение (16) вместо точных значений  $G_i$  можно подставить измеренные значения  $g_i^a$ , что дает уравнение скалярной калибровки акселерометров (выражение (7) работы [8]) при условии линейной модели погрешностей.

В то же время, учитывая, что  $G_i = g_0 C_{2i}$ , из (16) следует

$$\frac{\sum_{i=0}^2 (g_i^a)^2 - g_0^2}{2} = g_0 \left[ \sum_{j=0}^2 C_{2j} b_j^a + g_0 \sum_{jk=0}^2 C_{2j} C_{2k} M_{jk}^a \right] = g_0 Z_2^a. \quad (17)$$

Выражение (17) показывает, что разность между измеренным значением модуля вектора ускорения свободного падения и его известным (“точным”) значением определяется линейной комбинацией определяемых погрешностей калибровки акселерометров. Такая же комбинация погрешностей калибровки акселерометров определяется фильтром Калмана для вертикальной компоненты  $Z_2^a$  (9).

Аналогичное выражение можно получить и для измеренной проекции вектора скорости вращения Земли  $\Omega_i^n$  на плоскость горизонта в навигационном базисе

$$\frac{\sum_{i=0}^1 (\Omega_i^n)^2 - (U \cos(\varphi))^2}{2} = U \cos(\varphi) \left[ \sum_{i=0}^2 C_{1i} b_i^g + \sum_{jk=0}^2 C_{1j} \Omega_k M_{jk}^g \right] = U \cos(\varphi) Z_1^g. \quad (18)$$

Таким образом, определения при помощи фильтра Калмана компонентов вектора  $Z_i^{a(g)}$  (9), (10) в статических тестах содержат в себе информацию о модулях векторов ускорения свободного падения и скорости вращения Земли, что позволяет сделать вывод, что рассматриваемый алгоритм содержит в себе скалярную калибровку как частный случай.

Учитывая, что фильтр Калмана дает 5 измеряемых величин в статических тестах (9), (10) взамен трёх в скалярной калибровке (модули ускорения свободного падения, вращения Земли и их скалярное произведение) можно считать, что метод, рассматриваемый в настоящей работе, дает более точную оценку величин  $b_i^a, M_{ij}^a, b_i^g, M_{ij}^g$  в одной итерации и, соответственно, имеет итерационную сходимость не ниже, чем для скалярного метода.

Причина, по которой фильтр Калмана обеспечивает более точную, нежели скалярный метод, оценку калибровочных параметров в статических тестах, состоит в том, что уравнения погрешностей (1)–(6), используемые в фильтре Калмана, помимо информации о величинах векторов ускорения свободного падения, скорости вращения Земли и широты места проведения калибровки используют известные (“точные” при пренебрежении квантовыми эффектами и для скоростей, малых по сравнению со скоростью света) уравнения движения.

Рассмотренный выше метод калибровки БИНС основан на указанных выше допущениях о линейности модели погрешностей, ранее проведенной компенсации size – эффекта, отсутствии задержек между данными от гироскопов и акселерометров. Однако алгоритм позволяет расширить соответствующим образом вектор состояния фильтра Калмана для учета указанных эффектов. Соответственно, необходимо скорректировать и план вращения поворотного стола для обеспечения наблюдаемости и итерационной сходимости соответствующих параметров.

### Выводы

Представлен метод калибровки БИНС навигационного класса точности, учитывающий полную систему погрешностей. Для нахождения параметров калибровки применяется фильтр Калмана.

Калибровка данным методом проводится для всего БИНС в целом – чувствительных элементов (гироскопов и акселерометров), канала передачи информации в вычислитель, вычислителя с погрешностями округления конечной разрядной сеткой и применяемыми методами численного интегрирования.

Для выполнения работы фильтра Калмана и сходимости итерационного алгоритма необходима оптимальная настройка фильтра Калмана, обеспечивающая временную наблюдаемость горизонтальных погрешностей акселерометров.

Статические тесты обеспечивают калибровку акселерометров и смещений нулей гироскопов, динамические тесты – определение матрицы  $M_{jk}^g$  гироскопов.

Одноосное вращение стола при одном динамическом тесте обеспечивает оценку части матрицы  $M_{jk}^g$  гироскопов. При двухосном вращении стола оцениваются все элементы матрицы  $M_{jk}^g$  гироскопов в одном динамическом тесте.

Совместная обработка методом наименьших квадратов с учетом матрицы ковариации по одному проходу всех положений стола дает возможность получить наиболее вероятную оценку всех калибровочных параметров и их доверительных интервалов для акселерометров и гироскопов.

Экспоненциальная сходимость итераций позволяет эффективно проводить калибровку БИНС навигационного класса точности.

Метод не привязан к конкретному плану поворотов стола, не требует аналитических расчетов и позволяет получать количественную оценку плану поворотов отдельно для статических и динамических тестов.

При необходимости количественной оценки качества конусной коррекции в инерциальном алгоритме можно проводить сравнение калибровочных параметров при конусном и одноосном вращении.

Применение данного метода и его развитие позволяет проводить математически корректную обработку данных и получать более точные значения калибровочных параметров БИНС навигационного класса точности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. IEEE Recommended Practice for Inertial Sensor Test Equipment, Instrumentation, Data Acquisition, and Analysis. IEEE Aerospace and Electronic System Society. IEEE Std. 1554 -2005.
2. 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.
3. Brown A., Ebner R., Mark J., A calibration technique for a laser gyro strapdown inertial navigation system. DGON Proceedings, Gyro Technology Symposium, Stuttgart, 1982.
4. Златкин Ю.М., Калногуз А.Н., Воронченко В.Г., Лихолит Н.И., Вахлаков А.Ю., Сладкий А.М., Слюсарь В.М. Лазерная БИНС для ракеты-носителя «Циклон-4» // XIX Санкт-Петербургская межд. конф. по интегрированным навигационным системам.- 2012.- С. 68-77.
5. Tae-Gyoo Lee, Chang-Ky Sung. Estimation Technique of Fixed Sensor Error for SDINS Calibration. International Journal of Control, Automation, and Systems, vol. 2, no.4 pp.536-541, December 2004.
6. Николаев С.Г. Калибровка бесплатформенных инерциальных навигационных систем // Изв. вузов. Приборостроение. – 2009. Т. 52, № 7.- С. 50-54.
7. Ермаков В.С. Автоматизация калибровки бесплатформенных инерциальных систем на волоконно-оптических гироскопах. Автореферат дисс. на соискание ученой степени кандидата технических наук. Пермь, 2007.
8. Измайлов Е.А., Лепе С.Н., Молчанов А.В., Поликовский Е.Ф. Скалярный способ калибровки и балансировки бесплатформенных инерциальных навигационных систем // XV Санкт-Петербургская межд. конф. по интегрированным навигационным системам. - 2008.- С. 145-154.
9. Голован А.А., Парусников Н.А. Математические основы навигационных систем. Часть II.-2-е изд. испр. и доп. – М.: МАКС Пресс, 2012.-172 с.
10. Емельянец Г.И., Драницына Е.В., Блажнов Б.А. О калибровке бескарданного инерциального измерительного модуля на ВОГ в условиях стенда. Гироскопия и навигация. №3 (78) с. 55, 2012.
11. Матвеев В.В., Распопов В.Я. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем.- СПб.: ГЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2009.-280 с.
12. Titterton D.H., Weston J.L. Strapdown Inertial Navigation Technology. Peper Peregrinus Ltd, 1997.
13. Salychev O. S. Applied Inertial Navigation: Problems and Solutions. BMSTU Press. Moscow, 2004.

**Abstract.** Method of calibration SINS proposed. The method takes into account the complete errors equation for arbitrary rotations of the turntable. Application of Kalman filter in navigation mode allows you to obtain an estimate of SINS error calibration of accelerometers and gyroscopes. Accounting errors obtained allows calibration SINS in 3-4 iterative repetition. Source measurement Kalman filter are the speed of the navigation system. The method is not tied to a specific course turns the table, does not require analytical calculations and allows to obtain a quantitative estimate of the plan turns the table, and the error obtained calibration parameters.

**Key words:**

SINS, calibration, inertial mode, Kalman filter

Материал поступил 29.04.14