

Улучшение обусловленности задачи скалярной калибровки тройки акселерометров с помощью визуализации функции эффективности калибровочных измерений

М.Д. Гребенкин^{1,А,В}

^А ФГУП «НПЦАП им. акад. Н.А. Пилюгина»

^В Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

¹ ORCID: 0000-0002-3644-5912, grebenkinmd@gmail.com

Аннотация

Предложен способ оптимизации набора угловых ориентаций блока акселерометров с применением метода визуализации функционала эффективности при проведении стендовой калибровки. Проведен анализ математической модели формирования измерительных ошибок блока из трех акселерометров. Приведенный метод повышает точность оценки параметров рассмотренной модели ошибок, которая в свою очередь, включает в себя параметры угловых погрешностей выставки акселерометров в приборной системе координат, а также отклонения их масштабных коэффициентов и нулей. Функционал эффективности измерений описывает влияние очередного получаемого измерения на обусловленность задачи в целом и зависит от углов ориентирования измерительного блока относительно опорной величины калибровки. Нахождение точек минимума приведенного функционала позволяет определять набор ориентаций для формирования задачи оценки с наилучшей обусловленностью. Нахождение таких точек выполняется с помощью методов оптимизации и требует визуализации функционала для определения начальной точки алгоритма, ввиду его сложного вида. Приведенный способ проверен с помощью компьютерного моделирования, которое показало, что применение набора калибровочных ориентаций, полученных с помощью представленного метода, увеличивает точность оценки параметров рассматриваемой модели ошибок на фоне возмущений в ориентации блока в пространстве в сравнении с неоптимальным набором ориентаций.

Ключевые слова: Акселерометр, скалярная калибровка, визуализация функционала, метод наименьших квадратов, фильтр Калмана.

1. Введение

Одним из ключевых факторов точности работы инерциальных систем навигации является калибровка блоков акселерометров и гироскопов, входящих в эту систему. Калибровка представляет собой уточнение параметров модели, формирующей погрешности чувствительных элементов. Одним из традиционных подходов к калибровке блока акселерометров является калибровка на неподвижном стенде путем измерений вектора тяжести при различных угловых ориентациях блока и получением невязки между ожидаемыми и полученными от акселерометров измерениями [1, 2, 3, 6]. Математически данная задача представима в виде несовместной системы линейных уравнений, которую, однако, можно решить, используя метод наименьших квадратов или Калмановскую фильтрацию. Используемый при этом набор угловых ориентаций блока определяет обусловленность задачи и, следовательно, устойчивость результата по отношению к неучтенным возмущениям. Их основным источником, как правило, является неточность угловых положений самого стенда [1, 4]. На практике обычно угловые

положения выбирают так, чтобы достичь полной наблюдаемости искомых параметров, не оценивая при этом степень обусловленности получаемой системы [3, 5, 6, 7]. Выбор оптимальных угловых ориентаций блока акселерометров на стенде при проведении измерений позволяет получить хорошо обусловленную систему уравнений и повысить точность калибровки. Для выбора нужных угловых ориентаций удобно ввести функции их эффективности и найти их экстремальные точки с помощью алгоритма оптимизации. В работе [8] описан подход, в котором часть угловых положений определяется численно по критерию максимизации определителя матрицы наблюдения для строго ортогональной системы акселерометров в случае векторной калибровки, однако отсутствует результат проверки метода путем моделирования или на реальном оборудовании. В представленной работе описан способ оптимизации угловых положений по критерию наилучшей обусловленности задачи для каждого измерения и для системы с произвольной ориентацией осей чувствительности. На этапе применения численных алгоритмов оптимизации возникает необходимость визуального представления функций эффективности.

В работе представлен способ построения такой функции для каждого из калибровочных измерений. После этого подбираются параметры модели погрешностей, которые наилучшим образом описывают полученную невязку. Приближенным решением этой системы будет являться вектор параметров, формирующий конечные погрешности акселерометров. Особенностью скалярного метода является построение системы уравнений, линейно связывающих вектор отклонений параметров погрешностей от номинальных величин с отклонениями измеренного модуля вектора опорной величины [7]. Представленный метод нахождения оптимальных угловых положений допускает вариативность в выборе этих положений благодаря периодическому характеру функции эффективности, что может быть полезно при калибровке в случае асимметричных масштабных коэффициентов.

2. Математическая модель и метод калибровки

В рассматриваемой модели 3 акселерометра закреплены на ГСП так, что их оси чувствительности E_1 , E_2 и E_3 составляют ортогональную тройку векторов. Номинальное положение оси чувствительности E_2 второго акселерометра сонаправлена с вертикальной осью OY приборной системы координат. В номинальном положении, оси чувствительности E_1 и E_3 первого и третьего акселерометра лежат в плоскости OXZ приборной системы координат.

В модели погрешности акселерометров, которая также описана в работе [9], учитываются следующие параметры, представляющие наибольший интерес [1-3, 5-10]:

1. Ошибки угловых положений акселерометров относительно ГСП (выставка). Для акселерометров 1 и 3, соответствующих осям OX и OZ это углы θ_1 , ϕ_1 и θ_3 , ϕ_3 (см. рис. 1). θ_1 и θ_3 - углы между осями чувствительности E_1 и E_3 и плоскостью OXZ , и ϕ_1 , ϕ_3 - углы между проекциями осей чувствительности E_1 и E_3 на плоскость OXZ и ось OX .

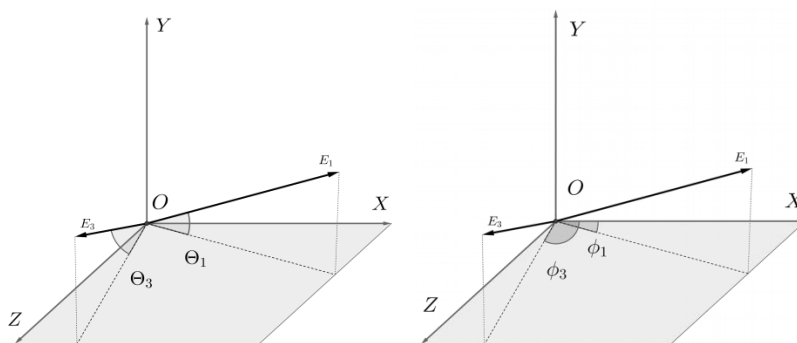


Рисунок 1. Угловые параметры ориентации акселерометров 1 и 3 (X и Z).

Для акселерометра 2, соответствующего оси OY, это углы ν_1 и ν_2 (см. рис. 2). Это углы между осью вертикали OY и проекциями оси чувствительности E_2 на плоскости OXY и OYZ соответственно;

2. Отклонения масштабных коэффициентов акселерометров $K_{1,2,3}$;
3. Постоянное смещение показания акселерометра $B_{1,2,3}$ (смещение нуля);

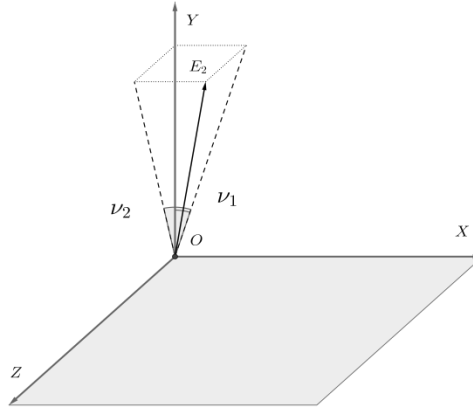


Рисунок 2. Угловые параметры ориентации акселерометра 2 (Y).

Векторы p_1, p_2, p_3 , содержащие параметры модели погрешностей, связаны с величиной на выходе акселерометра в каждый момент времени выражением:

$$\begin{aligned} a_i(p_i, t) &= K_i \cdot E_i(\theta_i, \psi_i) \cdot g(t) + B_i \quad i = 1, 3 \\ a_i(p_i, t) &= K_i \cdot E_i(\nu_1, \nu_2) \cdot g(t) + B_i \quad i = 2. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь:

- $a_i(p_i, t)$ - величина на выходе акселерометра i ;
- $K_i \cdot E_i$ - вектор оси чувствительности акселерометра i , зависящий от угловых параметров выставки и масштабного коэффициента K_i ;
- $g(t)$ - вектор ускорения свободного падения в текущей точке Земли; представленный в приборной системе координат и потому зависящий от времени ввиду вращения Земли и вращения самой платформы.

С учетом параметров выставки вектор ускорения будет линейно связан с показаниями акселерометров «x», «y» и «z» векторами $E_1(\theta_1, \psi_1)$, $E_2(\nu_1, \nu_2)$ и $E_3(\theta_3, \psi_3)$ по формулам (2).

Неточность измерения самих акселерометров в рассматриваемой модели определяется двумя параметрами для каждого: отклонением масштабного коэффициента K_i и смещением нуля B_i , $i = 1, 2, 3$.

Модель предполагает возникновение ошибок из-за отклонения приведенных параметров от их номинальных значений.

$$\begin{aligned} E_1 &= \begin{bmatrix} \sqrt{1 - \sin^2 \psi_1} \sqrt{1 - \sin^2 \theta_1} \\ \sin \theta_1 \\ -\sin \psi_1 \sqrt{1 - \sin^2 \theta_1} \end{bmatrix}; \\ E_2 &= \begin{bmatrix} \sin \nu_1 \\ \sqrt{1 - \sin^2 \nu_1 - \sin^2 \nu_2} \\ -\sin \nu_2 \end{bmatrix}; \\ E_3 &= \begin{bmatrix} \cos \psi_3 \sqrt{1 - \sin^2 \theta_3} \\ \sin \theta_3 \\ \sqrt{1 - \cos^2 \psi_3} \sqrt{1 - \sin^2 \theta_3} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (2)$$

3. Скалярный метод калибровки

Скалярный метод прямых измерений подробно описан в работах [3, 6, 7, 11] и предполагает в каждый момент измерения составлять скалярную функцию $S(\mathbf{p}) = a_1^2 + a_2^2 + a_3^2$, представляющую собой сумму квадратов выходных величин всех трех акселерометров в момент снятия измерений. Вектор \mathbf{p} составлен из векторов \mathbf{p}_1 , \mathbf{p}_2 и \mathbf{p}_3 и содержит параметры погрешностей для всех акселерометров. При этом опорной измеряемой величиной остается вектор ускорения свободного падения \mathbf{g} . При известной взаимной ориентации осей чувствительности приборов и для номинальных значений параметров модели ошибок можно рассчитать ожидаемую величину скалярной функции \hat{S} и эта величина будет постоянной для любой угловой ориентации платформы. Предполагается, что разность между ожидаемой и полученной величинами скалярной функции \hat{S} в каждый момент снятия измерений является с большой точностью совокупностью вкладов отклонений рассматриваемых параметров модели погрешностей от их номинальных значений. Допуская малость этих отклонений, разность $S - \hat{S}$ можно аппроксимировать линейной функцией:

$$S - \hat{S} = \frac{\partial S(\mathbf{p}_0)}{\partial \mathbf{p}} \cdot \delta \mathbf{p}, \quad (3)$$

где вектор \mathbf{p}_0 - номинальные значения параметров погрешностей.

Из уравнения (3) для разных угловых положений платформы можно составить систему линейных уравнений, при этом функция $\frac{\partial S(\mathbf{p}_0)}{\partial \mathbf{p}}$ будет зависеть от угловой ориентации платформы. Важно также отметить, что не все перечисленные выше параметры модели будут наблюдаемы при скалярной калибровке. Фактически, оценить возможно только следующий вектор параметров:

$$\mathbf{p} = \begin{bmatrix} \theta_1 + v_1 \\ \theta_3 - v_2 \\ \psi_3 - \psi_1 \\ K_1 \\ K_2 \\ K_3 \\ B_1 \\ B_2 \\ B_3 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Как и в случае векторного метода прямых измерений, задачу нахождения вектора отклонений параметров модели погрешности $\delta \mathbf{p}$ можно решать путем получения оптимальной оценки этого вектора с помощью метода наименьших квадратов или фильтра Калмана.

Вектора частных производных $\mathbf{D}_i = \frac{\partial S_i(\mathbf{p}_0)}{\partial \mathbf{p}}$ для всех проведенных измерений, представленные строками, образуют единую матрицу D :

$$D = \begin{bmatrix} \mathbf{D}_1 \rightarrow \\ \mathbf{D}_2 \rightarrow \\ \mathbf{D}_3 \rightarrow \\ \dots \\ \mathbf{D}_n \rightarrow \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Разности $S_i - \hat{S}_i$ на каждого момента измерений формируют собой вектор \mathbf{z} . Таким образом задача представляет собой получение оценки в общем случае переопределённой и несовместной системы уравнений

$$\mathbf{z} = D \cdot \delta \mathbf{p}. \quad (6)$$

В случае использования метода наименьших квадратов решение задачи будет выглядеть следующим образом:

$$\delta \mathbf{p} = (D^T D)^{-1} D^T \mathbf{z}. \quad (7)$$

Влияние оцениваемых отклонений параметров погрешностей рассматриваемой модели будет целиком заключено в величине вектора z . Однако, помимо оцениваемых факторов, в z может присутствовать составляющая из неучтенных условий, формирующих сигнал (погрешности углов выставки блока акселерометров на относительно Земли, температурные искажения измерительных шум). При этом отклонения вектора z будут прямым образом влиять на точность оценки вектора δp , и это влияние можно оценить через число обусловленности квадратной матрицы $(D^T D)^{-1}$.

Матрица калибровки D и, как следствие, матрица $(D^T D)^{-1}$, формируются через выбор угловых ориентаций блоков акселерометров, при которых проводятся калибровочные измерения. Использованные ранее наборы угловых ориентаций приводили к формированию матриц с довольно большим числом обусловленности (табл. 1).

Таблица 1. Изначальный набор угловых ориентаций, скалярный метод калибровки

№	Поворот вокруг ОХ, °	Поворот вокруг ОУ, °	Поворот вокруг ОZ, °
1	0	0	0
2	40	10	40
3	80	20	80
4	120	30	120
5	160	40	160
6	200	50	200
7	240	60	240
8	280	70	280
9	320	80	320
$cond(D^T D)^{-1}$	$3.3 \cdot 10^4$		

В случае компьютерного моделирования калибровки с «чистым» вектором z , в который включены только факторы погрешностей, учтенные в математической модели, без добавления измерительного шума и угловых ошибок выставки блока акселерометра, результаты показывали довольно высокую точность оценки. Однако при добавлении шумов в вектор оценки показывали неприемлемую точность.

4. Улучшение обусловленности задачи скалярной калибровки

Даже в условиях калибровки блока акселерометров на неподвижном стенде приборная система координат, привязанная к блоку акселерометров, имеет погрешности в угловой выставке относительно Земли. Эти ошибки, неучтенные в модели, будут привносить значительные изменения в вектор невязок [1, 4]. Таким образом, представляется важной задачей формирование хорошо обусловленной системы линейных уравнений, устойчивых к отклонениям векторов, возникающего ввиду неучтенных факторов.

В случае скалярной калибровке, зависимость i -й строки матрицы калибровки D имеет форму:

$$D_i^T = 2 \cdot \begin{bmatrix} g_{i1}g_{i2} \\ g_{i2}g_{i3} \\ g_{i1}g_{i3} \\ g_{i1}^2 \\ g_{i2}^2 \\ g_{i3}^2 \\ g_{i1} \\ g_{i2} \\ g_{i3} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Подходом к улучшению обусловленности задачи может быть выбор таких угловых ориентаций, при которых каждая строка матрицы калибровки будет иметь минималь-

ную проекцию на остальные строки. Этот подход можно представить в виде задачи на поиск минимума функционала проекции очередной строки \vec{D}_i матрицы D по двум углам α и β , описывающим вектор силы тяжести $\mathbf{g}_{\text{пск}}(\alpha, \beta)$ (9) в сферической системе координат, привязанной к блоку акселерометров и с центром, совпадающим с центром вращения блока (рис. 3):

$$\mathbf{g}_{\text{пск}} = \begin{bmatrix} g_{i1} \\ g_{i2} \\ g_{i3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g \sin(\alpha) \cos(\beta) \\ g \sin(\alpha) \sin(\beta) \\ g \cos(\alpha) \end{bmatrix}. \quad (9)$$

$$\min P_{D_i}(\alpha, \beta) = {}^{\alpha, \beta} \left\| (D_{i-1} \cdot D_{i-1}^T) \cdot (D_{i-1}^T \cdot D_{i-1})^{-1} \cdot \vec{D}_i \right\|. \quad (10)$$

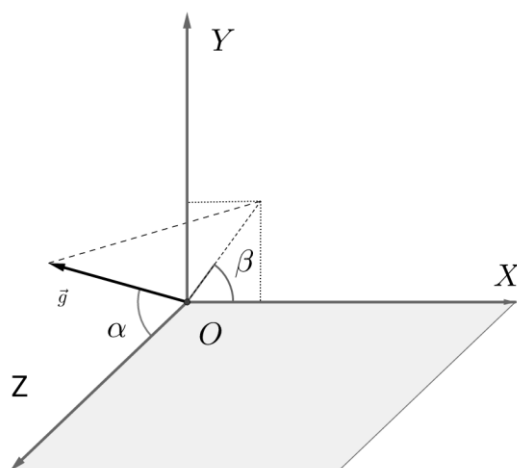


Рисунок 3. Принятая система сферических координат для описание вектора $\mathbf{g}_{\text{пск}}(\alpha, \beta)$.

Здесь D_{i-1} - матрица, состоящая из $i-1$ строк, сформированных ранее по такому же принципу. Составление матрицы калибровки по результатам измерений в положениях, подобранных по критерию минимальности функционала (10), позволит улучшить обусловленность системы уравнений.

Принцип такого построения состоит в следующем: первое измерение кажущегося ускорения производится в начальной позиции, ось OY приборной системы координат направлена по вертикали, что соответствует углам $\alpha = -90^\circ$ и $\beta = 90^\circ$. Второе измерение проводится в такой угловой ориентации, чтобы углы α и β вектора $\mathbf{g}_{\text{пск}}(\alpha, \beta)$ минимизировали функционал (10) по отношению к полученной ранее первой строке D_1 матрицы калибровки. Третье угловое положение должно минимизировать функционал по отношению к матрице, составленной из строк D_1 и D_2 , полученных ранее. На следующих этапах полученные новые строки D_i дополняют матрицу D_{i-1} для пересчета нового функционала. В общей сложности таким образом необходимо сформировать систему из минимум девяти уравнений, чтобы провести оценку девяти параметров модели погрешности.

5. Визуализация функционала и проверка метода путем компьютерного моделирования.

Применение алгоритма оптимизации для функционалов $P_{D_i}(\alpha, \beta)$ от двух переменных требует предварительной визуализации этих функционала для определения вида функции. Трехмерные графики квадрата величины функционала $P_{D_i}(\alpha, \beta)$ в области $[0; 2\pi]$ радиан по параметрам α и β показаны на рисунке 4. Графики построены средствами CAS Maxima, так как функционал вычисляется в символьном виде. Рисунок включает 8 последовательно полученных графиков квадрата величины функционала $P_{D_i}(\alpha, \beta)$ для каждого из этапов нахождения очередной оптимальной пары $(\alpha_{\min}, \beta_{\min})_i$. Видно, что

вид функции усложняется с добавлением в матрицу D новых строк. На каждом из 8 этапов с помощью визуализации в выбранной области одного из минимумов выбирается начальная точка для алгоритма нахождения минимума функции $(\alpha_{min}, \beta_{min})_i$, задающего оптимальную угловую ориентацию блока в пространстве на очередном шаге i .

Визуализация позволяет увидеть, что на каждом из этапов в области от 0 до 2π радиан функционал имеет периодический характер и в каждом случае можно найти несколько альтернативных минимальных точек. Следовательно, возможно несколько наборов оптимальных угловых ориентаций. Выбор начальной точки алгоритма поиска минимума определяет, какая из равнозначных точек минимума будет найдена. Также можно увидеть, что после получения четвертого измерения минимальная величина функционала резко увеличивается, что накладывает ограничение снизу на возможное минимальное число обусловленности формируемой матрицы D . Добавление последующих угловых положений также увеличивают минимальное значение функционала.

В данном случае калибровка не предусматривает несимметричность масштабных коэффициентов акселерометров, поэтому выбор одного из минимумов не имеет значения. Однако, в случае если отдельно оцениваются отклонения масштабных коэффициентов для положительных и отрицательных проекций действующего ускорения, на визуализации можно выбрать начальную точку в области того минимума, который будет отвечать требованию по ориентации блока относительно калибровочного вектора ускорения.

Полученный набор из 9 пар $(\alpha_{min}, \beta_{min})$ был преобразован в соответствующие углы ориентации кардановых подвесов блока акселерометров (табл. 2). Схема подвесов приведена на рис. 5.

Таблица 2. Углы поворота кардановых подвесов для оптимальных ориентаций калибровки.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ось Z, °	0	90.0074	-90.0000	-136.0061	138.6793	50.5226	135.177	-136.9260	-43.8877
Ось X, °	0	-89.9926	0.5947	35.6601	36.9652	33.2264	-34.3200	-34.5039	36.9528
Ось Y, °	0	90.0000	0.5947	77.0549	-83.1103	-16.0279	73.6480	-76.3967	15.3341
Число обусловленности матрицы $(D^T D)^{-1}$ 263.6104									

Для проверки методики проведено компьютерное моделирование калибровки блока акселерометров на неподвижном основании в случае неоптимального (табл. 1) и полученного оптимального (табл. 2) набора угловых положений. Виртуальная тройка акселерометров формировала массив измерений силы тяжести в соответствии с заданными угловыми положениями кардановых подвесов. Компьютерная модель работает таким образом, чтобы выходные измерения имели погрешности, обусловленные отклонениями вектора параметров \mathbf{p} от номинальных величин.

Величины внесенных отклонений приведены в таблице 3. После получения от компьютерной модели измерений кажущегося ускорения вычисляются невязки с ожидаемым вектором в каждой угловой ориентации. По этим невязкам восстанавливались отклонения вектора \mathbf{p} от номинальных величин и оценивалась точность калибровки.

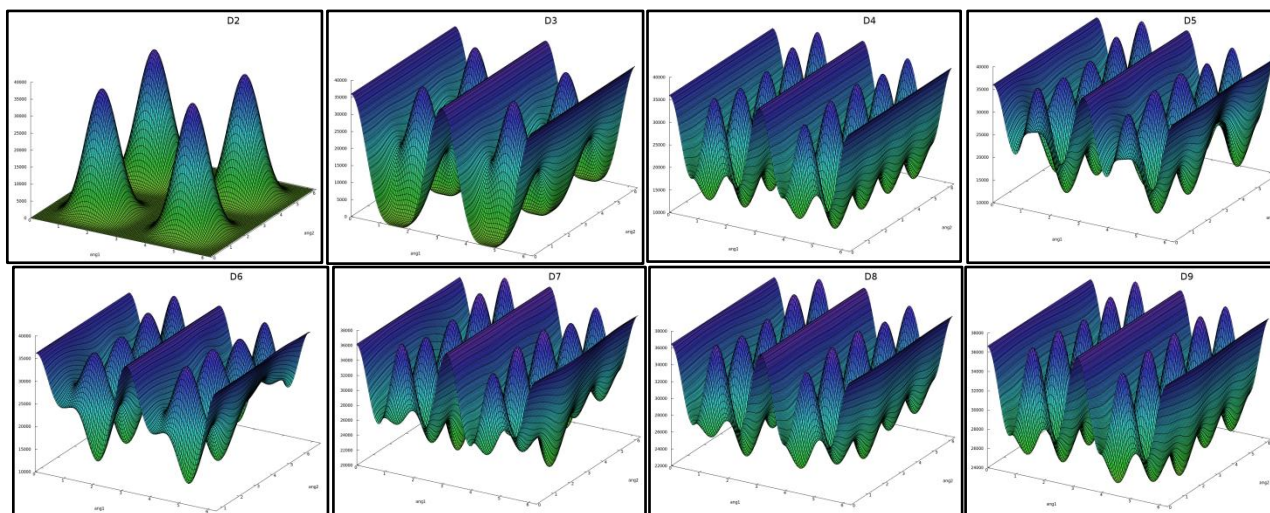


Рисунок 4. Функционал $P_{D_i}(\alpha, \beta)$ для строк D_i , $i = 2..9$ в области $[0; 2\pi]$ радиан по параметрам α и β .

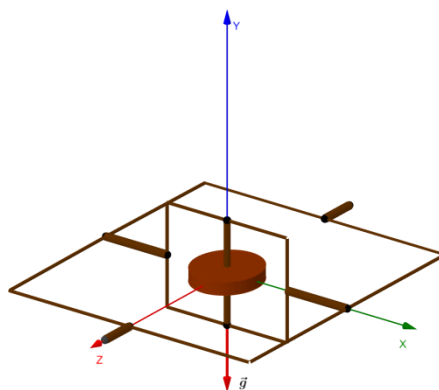


Рисунок 5. Схема кардановых подвесов калибруемого блока в начальном положении.

Таблица 3. Номинальные величины параметров модели погрешностей и внесенные в модель отклонения.

№	Параметр	Значение	Величина отклонения
1	θ_1	0°	$10'$
2	φ_1	0°	$10'$
3	v_1	$30''$	$10'$
4	v_2	$30''$	$-10'$
5	θ_3	0°	$10'$
6	φ_3	-90°	$-10'$
7	K_1	1	0,5%
8	K_2	1	0,5%
9	K_3	1	0,5%
10	B_1	0	10^{-3} м/с^2
11	B_2	0	10^{-3} м/с^2
12	B_3	0	10^{-3} м/с^2

Для сравнения устойчивости оценки в обоих случаях измерения проводились в условиях постоянных ошибок угловой выставки по всем трем осям подвесов. Величины ошибок выбирались по закону нормального распределения с математическим ожиданием в нуле и с среднеквадратичным отклонением от 0° до $10'$ Для усреднения высчи-

тывалась средняя относительная погрешность оценок из 200 повторений для одной величины СКО ошибки выставки.

На графиках (рис.6 а, б, в) приведены изменения величины относительной погрешности оценок отклонений параметров погрешностей с ростом СКО угловых ошибок выставки блока в пространстве.

На графиках видно, что скалярная калибровка с оптимальным набором угловых ориентаций в общем случае имеет большую устойчивость к ошибкам угловой выставки блока акселерометров в пространстве. На рисунке 16 (а) видно, что для параметров $\theta_1 + \nu_1$ и $\theta_3 - \nu_2$ в случае примененного оптимального набора ориентаций ошибки стенда вовсе не оказывают влияния на точность оценки (в диапазоне от 0 до 600 угловых секунд), в то время как при неоптимальном наборе погрешность оценки имеет линейный характер роста в этом же диапазоне. Точность оценки величины $\psi_3 - \psi_1$ в обоих случаях не показывает рост вместе с ошибками ориентации. В общем случае, относительная погрешность оценок угловых параметров $\theta_1 + \nu_1$, $\theta_3 - \nu_2$, $\psi_3 - \psi_1$ при использовании оптимальных ориентаций составляет около 0.86%

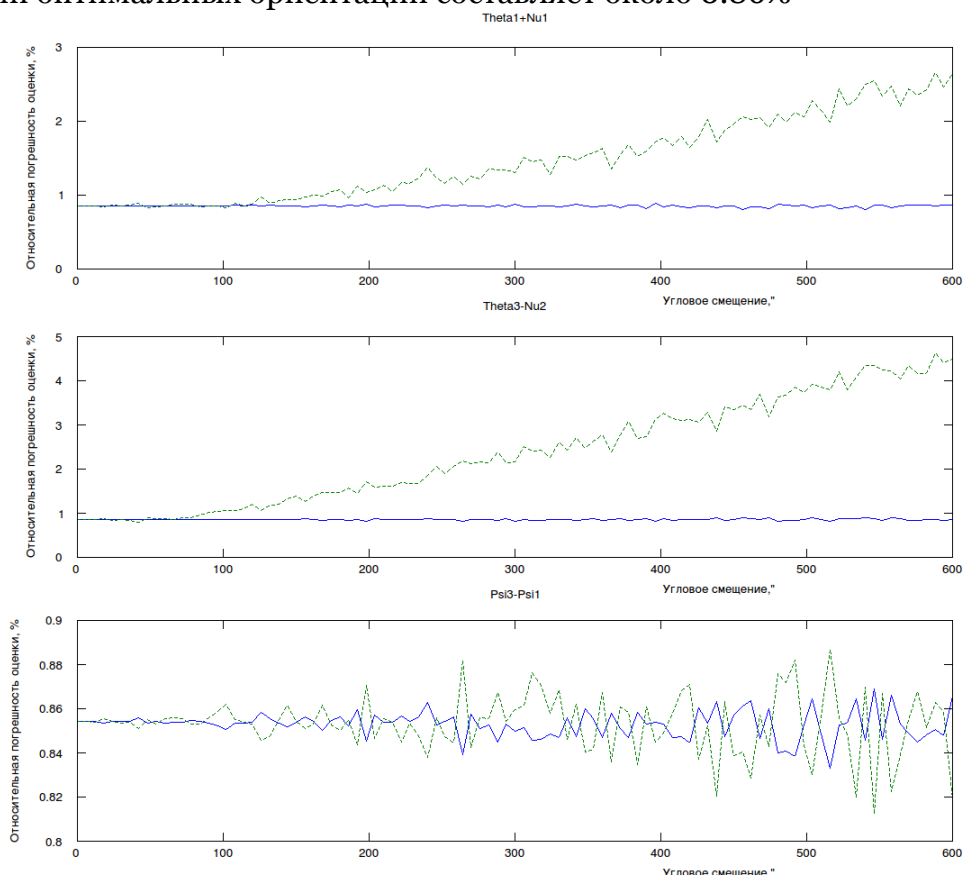


Рисунок 6 (а). Зависимость относительной погрешности оценок угловых параметров от величины ошибок угловой выставки (смещения) по трем осям для неоптимальных (пунктир) и оптимальных (сплошная) угловых ориентаций скалярной калибровки.

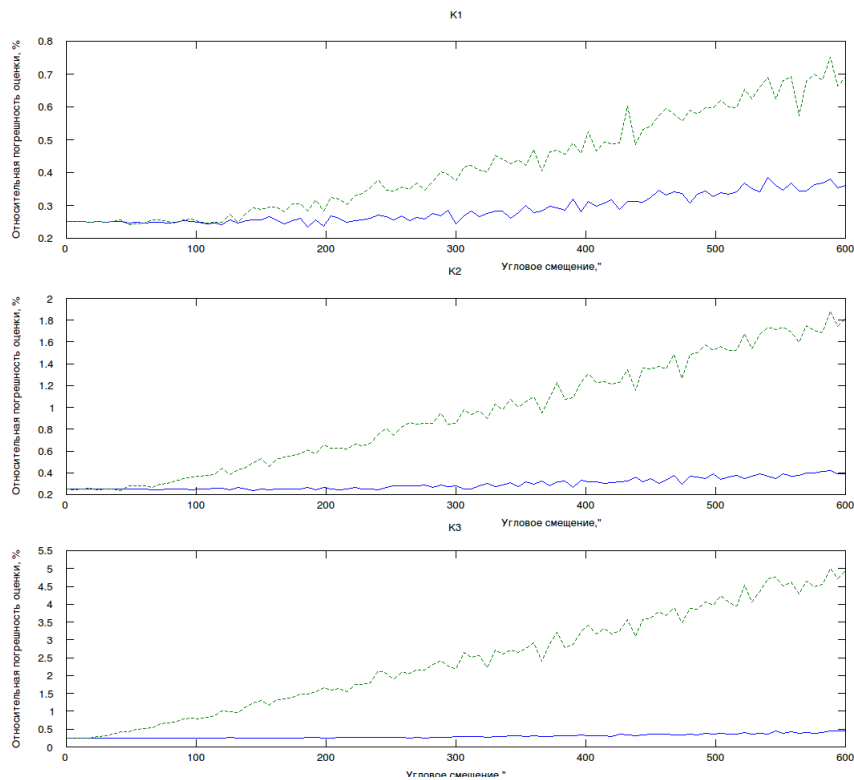


Рисунок 6 (б). Зависимость относительной погрешности оценок отклонений масштабных коэффициентов от величины ошибок угловой выставки (смещения) по трем осям для неоптимальных (пунктир) и оптимальных (сплошная) угловых ориентаций скалярной калибровки.

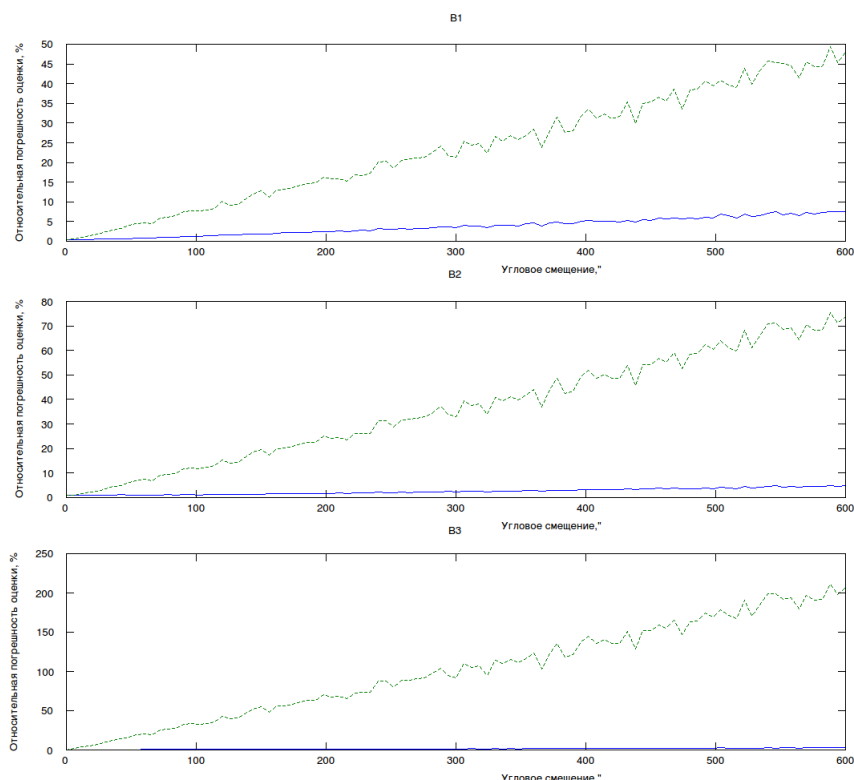


Рисунок 6 (в). Зависимость относительной погрешности оценок смещений нуля от величины ошибок угловой выставки (смещения) по трем осям для неоптимальных (пунктир) и оптимальных (сплошная) угловых ориентаций скалярной калибровки.

На рисунках 6 (б) и 6 (в) можно увидеть, что относительные погрешности оценки отклонений масштабных коэффициентов и смещений нуля более чувствительны к точно-

сти выставки стенда, в обоих случаях эти погрешности имеют линейный тренд роста по мере увеличения средней величины ошибок выставки. При этом видно, что точность оценки параметров разных акселерометров из калибруемой тройки отличается своей чувствительностью к ошибкам выставки. В случае использования оптимального набора ориентаций чувствительность параметров разных датчиков к ошибкам выставки становится одинаковой. При этом она ниже неоптимального случая в примерно в 2-10 раз для параметров отклонения масштабных коэффициентов и в 7-27 раз для параметров смещений нулей. В общем случае при заданной средней величине ошибок выставки стенда в 600 угловых секунд погрешность определения отклонений масштабных коэффициентов составляет около 0.4%, а погрешность определения смещений нуля около 7.5%.

6. Заключение

Под калибровкой блока акселерометров понимается уточнение параметров модели, формирующей погрешности измерений. При калибровке блока акселерометров на неподвижном основании неучитываемые факторы (такие как угловые ошибки ориентации всего блока в пространстве) приводят к ухудшению точности калибровки. Влияние неучтенных факторов на точность зависит от обусловленности задачи, которая в свою очередь определяется набором калибровочных угловых ориентаций блока в пространстве. В работе показан метод для скалярной калибровки, позволяющий выбрать угловые ориентации блока, оптимальные с точки зрения улучшения обусловленности задачи. Метод включает в себя визуальное представление функционала, определяющего эффективность измерения в очередном угловом положении для задачи оценки вектора решения, минимизацию каждого функционала и конвертацию точки минимума в тройку углов Эйлера для кардановых подвесов.

Метод испытан с помощью компьютерного моделирования путем сравнения точности калибровок при оптимальном и неоптимальном наборе угловых калибровочных положений. Сравнение точности проходило при внесенных угловых ошибках ориентации всего блока, изменяющихся от 0° до $10'$. Точность оценок угловых параметров выставки осей чувствительности акселерометров, полученных с использованием оптимальных ориентаций, оказалась невосприимчивой к влиянию ошибок выставки стенда, в отличие от случая с неоптимальным набором угловых положений, где только один угловой параметр оказался невосприимчив. Относительная погрешность оценок отклонений масштабных коэффициентов и смещений нуля имеет линейный тренд роста с увеличением ошибки выставки стенда, однако скорость этого роста для случая использования оптимальных угловых положений в 2-27 раз ниже по сравнению со случаем использования неоптимальных угловых положений.

Список литературы

1. Аврутов В. В., Мазепа Т. Ю. Влияние погрешности поворота стенда на точность калибровки блока гироскопов и акселерометров — Вестник НТУУ «КПИ», серия «ПРИКЛАДОБОРУДОВАНИЕ», 2010, вып. 43, с. 5-10.
2. Särkkä, O., Nieminen, T., Suuriniemi, S., & Kettunen, L. (2017). A Multi-Position Calibration Method for Consumer-Grade Accelerometers, Gyroscopes, and Magnetometers to Field Conditions. *IEEE Sensors Journal*, 17 (11), 3470-3481.
3. Дао Ван Ба, Ле Ван Чанг, Шалымов Р. В. Динамическая калибровка триады акселерометров на двухосном стенде — Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014, № 8, с. 72 — 76.
4. Фомичев А.В., Кухтевич С.Е., Измайлов Е.А. Результаты совершенствования программно-математического обеспечения системы БИНС – СП-2 по материалам летных испытаний — Труды Московского института электромеханики и автоматики. – ОАО "МИЭА", 2013, № 7, с. 19–29.

5. Соловьева Д.Н. Определение параметров погрешностей блока акселерометров для трехосной гиросtabilизированной платформы – Труды ФГУП «НПЦ АП», 2012.
6. Лакоза С.Л., Мелешко В.В. Скалярная калибровка акселерометров низкой и средней точности – Радиостроение, 2015, №1.
7. Аврутов В.В. О скалярной калибровке блока акселерометров и гироскопов – Вестник НТУУ «КПИ», 2010, серия «ПРИКЛАДОБОРУДОВАНИЕ», вып. 40, с. 10–17.
8. Мьинт, Х.Н. Метод калибровки блока акселерометров инерциальной навигационной системы на испытательном стенде – Наука и образование: электронный научно-технический журнал. – научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014, №1, с. 38–54.
9. Гребенкин М.Д. Сравнение методов оценки параметров погрешностей блока акселерометров трехосной гиросtabilизированной платформы – Труды ФГУП "НПЦАП". Системы и приборы управления, 2017, № 4, с. 22-31
10. Коробков Н. В. Подходы к определению параметров акселерометров в составе ГСП – Труды ФГУП "НПЦАП", 2019, № 1.
11. Измайлов Е.А., Лепе С.Н., Молчанов А.В., Поликовский Е.Ф. Скалярный способ калибровки и балансировки бесплатформенных инерциальных навигационных систем. – XV Международная конференция по интегрированным навигационным системам, СПб. 2008, с.145 – 154.
12. Парусников Н.А., Тихомиров В.В., Требников С.А. Определение инструментальных погрешностей инерциальной навигационной системы на неподвижном основании – Фундаментальная и прикладная математика, 2005, том 11, № 7, с. 159-166.

Approach to conditioning improvement in scalar calibration problem for three-axis accelerometer module using visualization of measurement efficiency function

M. Grebenkin^{1,A,B}

^A Scientific Production Association Of Automation And Instrument-Building

^B National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

¹ ORCID: 0000-0002-3644-5912, grebenkinmd@gmail.com

Abstract

The paper proposes a way to optimize a set of calibration angular orientations of accelerometer module using efficiency function visualization for stationary based calibration to increase an accuracy of estimated error model parameters. It includes an analysis of mathematical model of three-axis accelerometer module measurement errors. The method improves an estimation accuracy of analyzed error model parameters. The error model includes following factors: angular errors in sensor alignment in module frame of reference, deviations of sensor scalar coefficients and sensor biases. Measurement efficiency function characterize an impact of each newly made measurement on overall problem conditioning and depends on module angular position relative to calibration reference vector. By determining minima points of shown function, it is possible to form an optimal set of angular positions for calibrated module, which allows to achieve better conditioning of calibration problem. These minimal points are determined via optimization algorithm. Due to function complexity the visualization is necessary to find and set initial points for searching. The approach is verified by computer simulation which shows that optimal set of angular module positions (optimized set), formed by presented method, improves estimation accuracy of considered parameters in error model in presence of errors in angular positioning of module during calibration process, in comparison with non-optimized set.

Keywords: scalar calibration, accelerometer module, function visualization, least-square, Kalman filtering.

References

1. Avrutov V. V., Mazepa T. Y. Vliyanie pogreshnosti povorota stenda na tochnost' kalibrovki bloka gyroskopov i akselerometrov — Vestnik NTUU «KPI», seria «PRIKLADOBORUDOVANIE», 2010, vol. 43, pp. 5-10.
2. Särkkä, O., Nieminen, T., Suuriniemi, S., & Kettunen, L. (2017). A Multi-Position Calibration Method for Consumer-Grade Accelerometers, Gyroscopes, and Magnetometers to Field Conditions. *IEEE Sensors Journal*, 17 (11), 3470-3481.
3. Dao Wan BA, Le Wan Chang, Shalymov R. V. Dinamicheskaya kalibrovka triady akselerometrov na dvukhosnom stende — Izvestia SPbGETU «LETI», 2014, № 8, pp. 72 — 76.
4. Fomichev A.V., Kukhtevich S.E., Izmaylov E.A. Resultati sovershenstvovaniya programmno-matematicheskogo obespecheniya sistemy BINS – SP-2 po materialam letnikh ispitaniy — Trudy Moskovskogo instytuta electromekhaniki i avtomatiki. – OAO "MIEA", 2013, № 7, pp. 19–29.
5. Solovieva D.N. Opreделение parametrov pogreshnostei bloka akselerometrov dlya trekhosnoy gyrostabilizirovannoy platformy – Trudy FGUP "NPCAP", 2012.
6. Lakoza S.L., Meleshko V.V. Skalyarnaya kalibrovka akselerometrov nizkoj i srednej tochnosti – Radiostroenie, 2015, №1.

7. Avrutov V.V. O skalyarnoj kalibrovke bloka akselerometrov i giroskopov — Vestnik NTUU «KPI», 2010, seriya «PRIKLADOBORUDOVANIE», №. 40, pp. 10–17.
8. M'int, H.N. Metod kalibrovki bloka akselerometrov inercial'noj navigacionnoj sistemy na ispytatel'nom stende – Nauka i obrazovanie: elektronnyj nauchno-tekhnicheskij zhurnal. – nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana, 2014, №1, pp. 38–54.
9. Grebenkin M.D. Sravnenie metodov ocenki parametrov pogreshnostej bloka akselerometrov trekhosnoj girostabilizirovannoj platformy — Trudy FGUP "NPCAP". Sistemy i pribory upravleniya, 2017, № 4, pp. 22-31
10. Korobkov N. V. Podhody k opredeleniyu parametrov akselerometrov v sostave GSP — Trudy FGUP "NPCAP", 2019, № 1.
11. Izmaylov E.A., Lepe S.N., Molchanov A.V., Polikovskiy E.F. Skaliarniy sposob kalibrovki i balansirovki besplatformennikh inertsiálnikh navigatsionnikh sistem — Jubilee 15th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, 26-28 May 2008, Saint Petersburg, Russia. pp.145 — 154.
12. Parusnikov, N.A., Tikhomirov, V.V.E. and Trubnikov, S.A. Determination of instrument errors for inertial navigation system on a stationary base — Fundamentalnaya i Prikladnaya Matematika. 2005. 11(7), pp.159-166.