Идентификация параметров модели погрешностей блока ньютонометров на центрифуге

А. В. КОЗЛОВ
Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова
e-mail: a.kozlov@navlab.ru

УДК 51-72/-74::531.768

Ключевые слова: ньютонометр, акселерометр, калибровка, центрифуга.

Аннотация

Рассматривается задача идентификации (калибровки) параметров модели погрешностей блока ньютонометров (акселерометров) в сборе. В случае когда датчики предназначаются для измерения удельных сил, значительно превышающих ускорение силы тяжести на поверхности Земли, и имеют существенную нелинейность своих характеристик, их калибровка проводится на центрифугах, создающих большие центростремительные ускорения за счёт быстрого вращения. При этом соответствующие силы, измеряемые ньютонометрами, зависят от геометрических параметров расположения блока датчиков относительно оси вращения. Поскольку скорость вращения высока, существенными являются вариации координат чувствительных масс ньютонометров, значительно меньшие их собственного размера. Это означает, что они не могут быть измерены непосредственно и должны либо оцениваться наряду с остальными параметрами, либо исключаться из уравнений. Кроме того, при быстрых вращениях возникают дополнительные угловые деформации, которые также не могут быть измерены непосредственно. Настоящая статья посвящена анализу наблюдаемости в соответствующей задаче оценивания.

Abstract

A. V. Kozlov, Calibration of a three-axis accelerometer unit on a centrifuge, Fundamentalnaya i prikladnaya matematika, vol. 22 (2018), no. 2, pp. 171—180.

We focus on the problem of calibrating a three-axis accelerometer unit. If its sensors are intended to measure specific forces much stronger than Earth's surface gravity, and if they also have significantly nonlinear characteristics, the sensors undergo calibration procedure on a centrifuge capable of generating strong centripetal forces due to rapid rotation. The generated force measured by accelerometers then depends on the relative geometry of sensor proof masses and the axis of rotation. Since the rate of rotation is very high, the variations in coordinates of proof masses much smaller than their own size become significant. This implies one cannot measure them directly, and thus have to either estimate them along with all other parameters, or to exclude them from the equations. In addition, extra angular deformities that also cannot be measured directly, arise under rapid rotations. This paper concerns the observability issues in the appropriate estimation problem.

Фундаментальная и прикладная математика, 2018, том 22, № 2, с. 171—180.
© 2018 *Национальный Открытый Университет «ИНТУИТ»*

1. Введение

Ньютонометр (акселерометр)[1] предназначен для измерения удельной (на единицу массы) силы реакции, действующей на датчик со стороны других тел. Такие датчики применяются в различных технических приборах, включая инерциальные навигационные системы и им подобные устройства. Как правило, на практике используются три однокомпонентных ньютонометра с взаимно перпендикулярными (с точностью до погрешностей сборки) осями. Они составляют единый измерительный блок, который мы будем считать твёрдым телом. Блок предназначен для измерения вектора удельной силы реакции в проекциях на некоторую жёстко связанную с датчиками правую ортогональную систему координат, называемую *приборной*.

При этом блок ньютонометров, как и всякий измеритель, имеет систематические погрешности. Традиционно для их компенсации вводится некоторая априорная модель этих погрешностей, параметры которой индивидуальны для каждого блока. Идентификация этих параметров для конкретного блока называется *калибровкой*. При калибровке используется некоторая априорная информация об эталонной измеряемой величине. В случае с ньютонометрами такой величиной обычно является местная сила тяжести g, так как она, как правило, известна с достаточной точностью. Однако если блок ньютонометров предназначен для измерения удельных сил в большом диапазоне, на порядки превышающем величину силы тяжести, и его модель погрешностей является существенно нелинейной, необходимо проводить калибровку при бóльших перегрузках. Такие перегрузки создаются специальными центрифугами [3, 4], развивающими скорость вращения до 10 оборотов в секунду с характерным удалением чувствительных масс от оси вращения в пределах 0,5 метра. Указанные параметры соответствуют перегрузкам до $200g$.

В такого рода калибровке в качестве эталонной величины выступает создаваемое центрифугой центростремительное ускорение. Современные установки позволяют выдерживать стабильную угловую скорость вращения с точностью 0,001 %. При этом значительный вклад в систематические погрешности калибровки могут вносить ошибки определения расстояния от оси вращения до чувствительной массы: ошибка в 0,5 *мм* уже вносит погрешность 0,1 % от измеряемой величины, что на два порядка хуже точности эталонной информации, обеспечиваемой центрифугой.

Вместе с тем сама чувствительная масса ньютонометра обычно имеет размер в несколько миллиметров. Это делает невозможным определение её координат путём прямых измерений или по конструкторской документации. Таким образом, возникает задача калибровки блока ньютонометров на центрифуге в усло-

[1] Термин «акселерометр» более известен и распространён в инженерной среде, однако часто вводит в заблуждение из-за трудностей в трактовке определения измеряемого им *кажущегося ускорения*. В данной работе мы намеренно остановимся на термине «ньютонометр» с приведённым здесь определением, чтобы оставаться в рамках классической механики.

виях недостаточной точности априорных геометрических параметров при указанных выше параметрах движения.

2. Системы координат и обозначения

Терминология, стандартные модели инерциальной навигации и обозначения в данной работе в основном следуют [2]. Пусть имеется тройка однокомпонентных ньютонометров, представляющая собой твёрдое тело, закреплённое на консоли центрифуги с вертикальной осью вращения. Рассмотрим шесть положений блока ньютонометров относительно консоли[1], по два для каждой оси, как это изображено на рис. 1. Введём три системы координат. Первую, неподвижную относительно Земли, опорную систему координат обозначим $Ox_1x_2x_3$ или просто Ox. Её начало располагается в неподвижной точке крепления консоли центрифуги. Третья ось (U) направлена вверх по вертикали (которая считается совпадающей с местной линией отвеса), первая — на восток (E), а вторая — на север (N). Отметим, что вращением Земли со скоростью примерно 1 оборот в сутки (около 15 градусов в час или $7{,}3 \cdot 10^{-5}$ радиан в секунду) в данной задаче можно пренебречь по следующим причинам:

— центростремительное ускорение, создаваемое вращением Земли, учтено в местной силе тяжести;

— разность центростремительных ускорений между тремя чувствительными массами пренебрежимо мала, так как их разнесение не превышает 0,1 м:

$$(7{,}3 \cdot 10^{-5}\ [\text{рад/сек}])^2 \times 0{,}1\ [\text{м}] < 10^{-9}\ \text{м/сек}^2;$$

— кориолисово ускорение является периодической величиной с нулевым средним и амплитудой в пределах

$$7{,}3 \cdot 10^{-5}\ [\text{рад/сек}] \times (10 \cdot 2\pi\ [\text{рад/сек}] \times 0{,}5\ [\text{м}]) < 2{,}5 \cdot 10^{-3}\text{м/сек}^2.$$

Вторая система координат $Oy_1y_2y_3$ или Oy связана с консолью центрифуги и вращается вместе с ней. Первая ось совпадает с продольной осью консоли, третья — с осью вращения, вторая дополняет первую и третью до правой ортогональной тройки. Система координат Oy повёрнута относительно Ox на два малых угла α_1, α_2 вокруг первой и второй оси соответственно, которые представляют собой углы отклонения оси вращения от вертикали, и на угол α_3 вокруг третьей оси, который является углом поворота центрифуги. При нулевых углах $\alpha_{1,2,3}$ трёхгранники Ox и Oy совпадают.

Третью систему координат, приборную, жёстко связанную с осями чувствительности ньютонометров, обозначим $Mz_1z_2z_3$ или Mz. Точное определение её начала и осей будут даны позже. Точку M будем называть *приведённой чувствительной массой* блока ньютонометров.

[1]Приведённые положения соответствуют некоторому технически реализуемому эксперименту, в котором используется технологическая оснастка, позволяющая установить блок ньютонометров на консоль в ограниченное количество относительных положений.

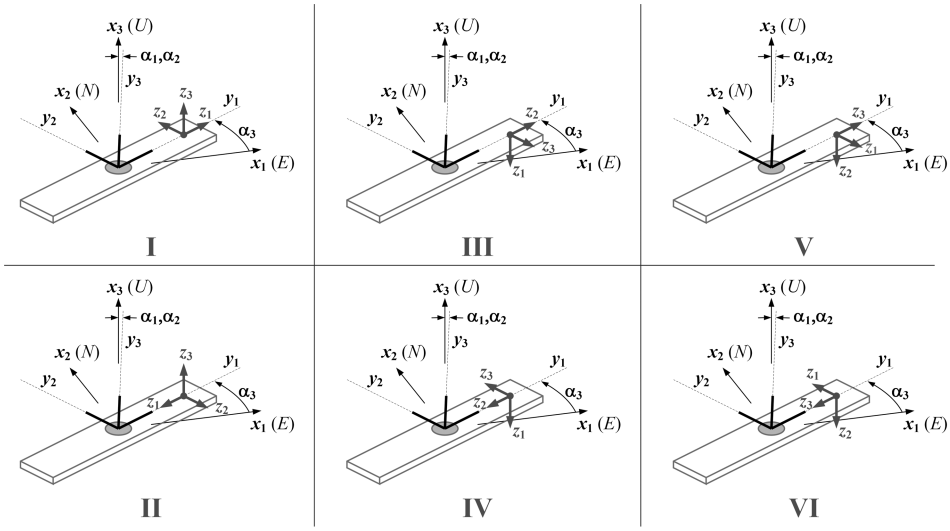

Рис. 1. Шесть положений блока акселерометров на консоли центрифуги

Введём также следующие обозначения:

— Ω_3, $\dot{\Omega}_3$ — угловая скорость вращения центрифуги и её производная, $\Omega_3 = \dot{\alpha}_3$;

— $\delta_{\cdot k} \in \mathbb{R}^3$ — малые углы поворота приборного трёхгранника относительно системы координат вращающейся консоли центрифуги вокруг приборных осей в k-м положении;

— g — величина местной силы тяжести;

— $R^0_{\cdot k} \in \mathbb{R}^3$ — тройка априорных значений координат приведённой чувствительной массы блока ньютонометров в осях вращающейся консоли центрифуги в k-м положении;

— $\Delta R_{\cdot k} \in \mathbb{R}^3$ — тройка погрешностей априорных значений координат приведённой чувствительной массы блока ньютонометров в осях вращающейся консоли центрифуги в k-м положении; отметим, что эти погрешности зависят от ориентации блока, но не зависят от конкретного места крепления;

— $\rho^0 \in \mathbb{R}^{3\times 3}$ — матрица априорных значений координат чувствительных масс ньютонометров относительно приведённой в приборных осях, так что ρ^0_{ij} — i-я координата j-й чувствительной массы; матрица содержит шесть независимых параметров, состав которых зависит от определения приведённой чувствительной массы блока ньютонометров, например

$$\rho^0 = \begin{bmatrix} 0 & \rho^0_{12} & \rho^0_{13} \\ 0 & \rho^0_{22} & \rho^0_{23} \\ 0 & \rho^0_{32} & \rho^0_{33} \end{bmatrix} \quad \text{или} \quad \begin{bmatrix} 0 & \rho^0_{12} & \rho^0_{13} \\ \rho^0_{21} & 0 & \rho^0_{23} \\ \rho^0_{31} & \rho^0_{32} & 0 \end{bmatrix};$$

далее рассматривается первый вариант, который соответствует соглашению, при котором в качестве приведённой чувствительной массы принимается чувствительная масса первого ньютонометра;

— $\Delta\rho \in \mathbb{R}^{3\times 3}$ — матрица соответствующих погрешностей априорных значений координат чувствительных масс ньютонометров относительно приведённой в приборных осях;

— P_k — априорная матрица перехода от системы координат Oy к Oz без учёта малых погрешностей установки для положения номер k:

$$P_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad P_2 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \ldots;$$

— орты системы координат (проективные операторы):

$$e^{(1)} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad e^{(2)} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad e^{(3)} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix};$$

— любой вектор v будем задавать тройкой v_s координат в какой-либо системе координат $Os_1s_2s_3$ (Os); обозначим $\hat{v}$ оператор векторного произведения на этот вектор с соответствующей кососимметрической матрицей

$$\hat{v}_s = \begin{bmatrix} 0 & v_3 & -v_2 \\ -v_3 & 0 & v_1 \\ v_2 & -v_1 & 0 \end{bmatrix}.$$

3. Модель показаний идеального блока ньютонометров

В этом разделе будем предполагать, что блок датчиков состоит из идеальных ньютонометров, оси чувствительности которых строго ортогональны. При вращении центрифуги с угловой скоростью Ω_3 примем $\dot{\Omega}_3 \approx 0$. При установке блока ньютонометров на центрифугу в k-м положении в линейном приближении по малым углам модель показаний идеальных датчиков имеет вид

$$f_z \approx (E + \hat{\delta}_{\cdot\,k})P_k \left(\begin{bmatrix} \alpha_1 \sin\alpha_3 - \alpha_2 \cos\alpha_3 \\ \alpha_1 \cos\alpha_3 + \alpha_2 \sin\alpha_3 \\ 1 \end{bmatrix} g + \right.$$
$$\left. + \begin{bmatrix} -\Omega_3^2 & 0 & 0 \\ 0 & -\Omega_3^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} (R^0_{\cdot\,k} + \Delta R_{\cdot\,k}) \right) + \Delta f_z^\rho,$$

где Δf_z^ρ — компоненты, связанные с разнесением чувствительных масс ньютонометров внутри блока:

$$\Delta f_z^\rho = \sum_{i=1}^{3} e_z^{(i)} e_z^{(i)\,\mathrm{T}} (E + \hat{\delta}_{\cdot\,k}) P_k \begin{bmatrix} -\Omega_3^2 & 0 & 0 \\ 0 & -\Omega_3^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} P_k^{\mathrm{T}} (E - \hat{\delta}_{\cdot\,k})(\rho^0 + \Delta\rho) e_z^{(i)}.$$

4. Модель погрешностей блока ньютонометров

Как сказано выше, при калибровке вводится априорная модель погрешностей блока ньютонометров. Здесь прежде необходимо определить приборную систему координат. В качестве первой оси Mz_1 выбирается ось чувствительности первого ньютонометра. Вторая приборная ось Mz_2 ортогональна первой и лежит в плоскости осей чувствительности первого и второго ньютонометров. Третья приборная ось Mz_3 дополняет систему координат до правой ортогональной. При этом оси чувствительности ньютонометров близки к приборным осям.

Обозначим f_z' тройку показаний ньютонометров. Тогда простейшая модель погрешностей блока имеет вид

$$f_z' - f_z \equiv \Delta f_z = \Delta f_z^0 + \Gamma f_z + \delta f_z, \quad \Gamma = \begin{bmatrix} \Gamma_{11}^{(0)} & 0 & 0 \\ \Gamma_{12}^{(0)} & \Gamma_{22}^{(0)} & 0 \\ \Gamma_{31}^{(0)} & \Gamma_{32}^{(0)} & \Gamma_{33}^{(0)} \end{bmatrix}.$$

На диагонали матрицы Γ находятся погрешности масштабных коэффициентов ньютонометров, вне диагонали — малые углы, коэффициенты при проекции разноимённых компонент из-за несоосности осей чувствительности и приборных осей. Эти малые углы также называются *перекосами* осей чувствительности. Слагаемое δf_z представляет из себя стохастическую компоненту погрешности. Считается, что она имеет нулевое среднее и малое стандартное отклонение $\sigma_{\delta f}/g \ll 1$. Кроме того, могут приниматься различные гипотезы об остальных характеристиках этой случайной величины. Будем считать, что уже проведена некоторая предварительная грубая калибровка датчиков, так что $\|\Delta f_z^0\|/g \ll 1$, $|\Gamma_{ij}| \ll 1$.

Далее могут вводиться различные нелинейные модели погрешностей блока инерциальных датчиков. Для примера рассмотрим вариант нелинейных масштабных коэффициентов, аппроксимируемых полиномом второй степени (такая модель допускает наблюдаемую иногда несимметричность масштабных коэффициентов ньютонометров), и перекосов осей чувствительности, пропорциональных ортогональным им компонентам перегрузок:

$$\Gamma = \Gamma^{(0)} + \Gamma^{(1)} \sum_{i=1}^{3} e_z^{(i)} e_z^{(i)\,\mathrm{T}} f_z e_z^{(i)\,\mathrm{T}} + \Gamma^{(2)} \sum_{i=1}^{3} e_z^{(i)} e_z^{(i)\,\mathrm{T}} f_z f_z^{\mathrm{T}} e_z^{(i)} e_z^{(i)\,\mathrm{T}},$$

где

$$\Gamma^{(1)} = \begin{bmatrix} \Gamma^{(1)}_{11} & \Gamma^{(1)}_{12} & \Gamma^{(1)}_{13} \\ \Gamma^{(1)}_{21} & \Gamma^{(1)}_{22} & \Gamma^{(1)}_{23} \\ \Gamma^{(1)}_{31} & \Gamma^{(1)}_{32} & \Gamma^{(1)}_{33} \end{bmatrix}, \quad \Gamma^{(2)} = \begin{bmatrix} \Gamma^{(2)}_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \Gamma^{(2)}_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \Gamma^{(2)}_{33} \end{bmatrix}.$$

Приведённые выражения намеренно выписаны в матрично-векторной форме, для того чтобы вид формул не менялся при замене системы координат.

С целью дальнейшей компенсации систематической составляющей погрешностей в показаниях датчиков для каждого блока необходимо провести идентификацию (калибровку) параметров введённой модели для неё.

5. Калибровочные эксперименты и задача оценивания

Рассмотрим равномерные вращения с различными заданными угловыми скоростями Ω_3 блока ньютонометров, установленного поочерёдно в шести положениях, изображённых на рис. 1. Будем считать, что погрешности геометрической информации $\Delta R_{\cdot\,k}$, $\Delta\rho$ достаточно малы, чтобы погрешностями второго порядка малости по ним можно было пренебречь. Будем также иметь в виду, что по техническим причинам, как правило, величина угла α_3 известна только при неподвижной центрифуге ($\Omega_3 = 0$). Во время вращения изменяющиеся значения угла α_3 использовать на практике невозможно из-за трудности синхронизации потоков информации от центрифуги и блока ньютонометров. Поэтому при вращении в моделях будем использовать только усреднённые по времени величины. В настоящем разделе будут рассмотрены условия, необходимые для обеспечения возможности оценки параметров модели погрешностей блока ньютонометров.

За модельные значения показаний ньютонометров в k-м положении блока относительно центрифуги примем тройку

$$f^0_z = P_k \left(\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\Omega_3^2 & 0 & 0 \\ 0 & -\Omega_3^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} R^0_{\cdot\,k} \right) + \\ + \sum_{i=1}^{3} e^{(i)}_z e^{(i)\,\mathrm{T}}_z P_k \begin{bmatrix} -\Omega_3^2 & 0 & 0 \\ 0 & -\Omega_3^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} P_k^{\mathrm{T}} \rho^0 e^{(i)}_z.$$

Из доступной информации сформируем измерения «в малом», нормированные к величине местной силы тяжести:

$$z^{(k)} = \frac{\overline{f'_z} - f^0_z}{g},$$

где черта сверху $\overline{\cdot}$ означает осреднение по времени. Эти измерения в линейном приближении известным образом связаны с искомыми величинами. Например,

при неподвижной центрифуге в первом положении и во время вращения в шестом положении имеем

$$z^{(1)}\big|_{\Omega_3=0} = \begin{bmatrix} \alpha_1 \sin\alpha_3 - \alpha_2 \cos\alpha_3 - \delta_{21} \\ \delta_{11} + \alpha_1 \cos\alpha_3 + \alpha_2 \sin\alpha_3 \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{\Delta f_z}{g},$$

$$z^{(6)}\big|_{\Omega_3\neq 0} = \begin{bmatrix} -\dfrac{\Omega_3^2}{g}(R_{26}^0 + R_{16}^0\delta_{26}) - \delta_{36} \\ \dfrac{\Omega_3^2}{g}(R_{16}^0\delta_{16} + R_{26}^0\delta_{36} + \delta_{36}\rho_{12}^0 - \delta_{16}\rho_{32}^0) \\ -\dfrac{\Omega_3^2}{g}(\Delta\rho_{33} - \Delta R_{16} + R_{26}^0\delta_{26} + \delta_{16}\rho_{23}^0) + \delta_{16} \end{bmatrix} + \frac{\Delta f_z}{g}.$$

Предварительный анализ связи измерений и неизвестных величин показывает, что для обеспечения наблюдаемости искомых величин необходимо проводить эксперименты при нескольких различных величинах Ω_3^2 и при различных удалениях R_{1k}^0 блока ньютонометров от оси вращения.

Наблюдаемость в системе не зависит от выбора единиц измерения. Для количественного анализа выберем единицу измерения длин $R_* = |R_{11}^0|$, единицу измерения времени T_* такую, чтобы $R_*\Omega_*^2/g = R_*/g \cdot 4\pi^2/T_*^2 = 10$, и будем проводить эксперименты при угловых скоростях вида $\Omega_3 = \Omega_*\sqrt{m}$ для $m = 0, 1, 2, \ldots$ для двух значений удалений оси вращения, равных R_* и $R_*/2$, а при неподвижной центрифуге ($m = 0$) для $\alpha_3 = 0, \pi$. Заметим, что все расстояния в системе по порядку величины не превышают единицу измерения, а большинство из них значительно меньше её. В указанных условиях коэффициентами в приведённой выше модели измерений будут нули, числа вида ± 1, $\pm 1/2$, $\pm(10m)^{1,2,3}$, $\pm 1/g$, а также малые коэффициенты, не оказывающие существенного влияния на точность оценки.

Введём вектор неизвестных констант, входящих в модель. Учтём, что вертикальные смещения приведённой чувствительной массы не влияют на показания ньютонометров, а ошибки горизонтальных её смещений от оси вращения для случая, приведённого на рис. 1, связаны: $\Delta R_{12} = -\Delta R_{11}$, $\Delta R_{22} = -\Delta R_{21}$ и аналогично для каждой пары положений. При отсутствии такой связи внутренние разнесения чувствительных масс ньютонометров будут оцениваться только в комбинации с некоторыми отнесениями приведённой чувствительной массы, что, однако, не препятствует оценке параметров модели погрешностей Δf_z. Пусть

$$X = \left[\alpha_{1,2}\delta_{11,\ldots,36}\Delta R_{11,21,13,\ldots,25}\Delta\rho_{22,33}\Delta f_{1,2,3}^0\Gamma_{11,\ldots,33}^{(0)}\ldots\Gamma_{11,\ldots,33}^{(2)}\right]^{\mathrm{T}} \in \mathbb{R}^{49}.$$

Тогда полный набор измерений Z будет линейно связан с X с точностью до малых погрешностей r:

$$Z = HX + r, \quad M[r] \approx 0,$$

где матрица H составляется исходя из моделей измерений, приведённых выше. Анализ матрицы показывает, что в указанных выше условиях она является полноранговой, а система — наблюдаемой [1].

6. Заключение

В настоящей работе рассмотрены методологические аспекты математической постановки задачи идентификации параметров модели погрешностей блока ньютонометров на центрифуге при наличии значительных погрешностей априорной геометрической информации. Основные результаты перечислены ниже.

1. Сформулированы основные модели измерений, учитывающие погрешности информации о геометрической конфигурации блока, а также возможные нелинейности, имеющиеся в погрешностях ньютонометров.
2. Сформированы измерения для постановки задачи оценивания.
3. Определены достаточные условия наблюдаемости параметров модели погрешностей блока ньютонометров, реализуемые на практике:
   - наличие статических положений не менее чем при двух различных углах поворота вокруг оси вращения центрифуги и с каждой осью чувствительности вдоль вертикали (с точностью до ошибок установки);
   - наличие двух положений с различным удалением блока от оси вращения с известной разницей между этими удалениями;
   - наличие вращений с постоянной угловой скоростью, принимающей несколько различных значений, обеспечивающих создание центростремительной силы, на порядок и более превосходящей силу тяжести, для шести таких положений блока ньютонометров относительно консоли центрифуги, чтобы каждая ось чувствительности была направлена вдоль консоли в обоих направлениях относительно оси вращения.
4. Поскольку количество оцениваемых параметров велико, то для достижения значительной избыточности на практике количество измерений также может быть достаточно большим. С учётом этого представляется целесообразным производить оценивание с помощью рекуррентного алгоритма, например фильтра Калмана. При этом при соответствующем упорядочении экспериментов размерность оцениваемого вектора состояния может быть значительно уменьшена: в рассмотренном случае на 19 компонент, т. е. почти вдвое. Параметры, изменяющиеся только при смене положения блока ньютонометров на центрифуге, могут в процессе оценивания реинициализироваться без выделения отдельных компонент под новые значения оценок.

Литература

[1] Александров В. В., Лемак С. С., Парусников Н. А. Лекции по механике управляемых систем. — М.: МАКС Пресс, 2012.

[2] Голован А. А., Парусников Н. А. Математические основы навигационных систем. Ч. I. Математические модели инерциальной навигации. — М.: МАКС Пресс, 2011.

[3] Acuitas Centrifuge Series: GLC-6_13_15000 datasheet rev. D1, September 2013, CA // Acuitas products overview. — acuitas.ch/files/4013/8018/3773/Data_sheet_GLC-6_13_15000.pdf.

[4] Acutronic Medium Precision Centrifuges Series AC66 data sheet version F // Acutronic products. — acutronic.com/fileadmin/cms_files/ACH_DS/Laboratory-MediumPrecision-Centrifuges-Flyer-AC66.pdf.