

УДК 656.2

НАЧАЛЬНАЯ ВЫСТАВКА И КАЛИБРОВКА БЕСКАРДАННОГО ГИРОГОРИЗОНТКОМПАСА НА ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ГИРОСКОПЕ И МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ДАТЧИКАХ

Г.И. Емельянцев, А.В. Лочехин

Рассматривается режим начальной выставки и калибровки бескарданного гироскопа на электростатическом гироскопе и микромеханических датчиках с привлечением данных приемной аппаратуры спутниковых навигационных систем с разнесенными антеннами. Особенностью рассматриваемого решения начальной выставки и калибровки системы в пуске в интересах сокращения времени готовности является оценивание суммарных дрейфов электростатического гироскопа в квазинерциальной системе координат. При этом формируется виртуальный («идеальный») электростатический гироскоп, используемый в качестве опорного. Алгоритмы строятся на базе обобщенного фильтра Калмана с обратной связью по всему вектору состояния.

Ключевые слова: гироскоп, электростатический гироскоп, микромеханические инерциальные датчики, спутниковая навигационная система, калибровка.

Введение

В настоящее время для проведения глубоководных работ и океанографических исследований находят широкое применение автономные необитаемые подводные аппараты. В состав их навигационного оборудования включаются различные типы курсоуказателей, лагов, приемной аппаратуры (ПА) спутниковых (СНС) и гидроакустических навигационных систем.

Известно, например [1, 3], что при использовании в составе измерительного модуля микромеханических датчиков современного уровня точности (гироскопов $0,01^\circ/\text{с}$ и акселерометров $0,1-0,01 \text{ м/с}^2$) можно обеспечить выработку углов качки с приемлемой точностью, привлекая для демпфирования шулеровских колебаний в погрешностях гироскопов данные о скорости от СНС или лага. Однако остается проблема с выработкой курса, так как современные микромеханические гироскопы «не чувствуют» вращение Земли. Поэтому в измерительном модуле на микромеханических датчиках погрешность по курсу постоянно растет во времени. Проблему обеспечения требований по курсу в интегрированных системах ориентации и навигации с измерительным модулем низкого уровня точности пытаются решить, в частности, за счет использования для подвижных объектов ПА СНС с разнесенными антеннами. Известна [2] интегрированная система Seapath 200 норвежской фирмы Seatex AS для морских судов, которая использует мультиантенную ПА СНС с фазовыми измерениями на несущей частоте. Из отечественных разработок следует выделить аналогичную мультиантенную ПА СНС МРК-11, использующую фазовые измерения (разработка Красноярского государственного технического университета и Научно-исследовательского института радиотехники). Однако в системах навигации подводных аппаратов данное решение можно использовать только в надводном положении.

Рассмотрим схему построения и алгоритмы работы бескарданного гироскопа, включающего инерциальный измерительный модуль на микромеханических датчиках (гироскопах и акселерометрах) и один бескарданный электростатический гироскоп (БЭСГ). Для ограничения погрешности измерительного блока на микромеханических датчиках по курсу (для ее непрерывной коррекции) в условиях эксплуатации подводного аппарата предлагается привлекать данные от БЭСГ разработки Центрального научно-исследовательского института «Электроприбор», установленного в одном корпусе с измерительным модулем. При этом вектор кинетического момента БЭСГ при запуске может быть ориентирован либо по оси Мира (полярная ориентация при использовании бескарданного гироскопа в низких и средних широтах), либо в

плоскости экватора Земли (экваториальная ориентация для высоких широт). К достоинствам такой схемы построения бескарданного гироскопкомпа следует отнести его малые массогабаритные характеристики и возможность функционирования в высоких широтах. При этом ожидается сохранение точности выработки параметров ориентации объекта на уровне современных зарубежных бескарданных гироскопкомпов на волоконно-оптических гироскопах.

Задача начальной выставки и калибровки бескарданного гироскопкомпа, построенного по предложенной схеме, сводится к двум задачам: выставка и калибровка измерительного модуля на микромеханических датчиках и точная выставка в инерциальной системе координат орта кинетического момента БЭСГ. Решение первой задачи получается путем привлечения данных от мультиантенной ПА СНС, формирования скоростных, позиционных и курсовых измерений и обработки данных с помощью известных алгоритмов [3]. Настоящая статья посвящена решению второй задачи.

Постановка задачи

Рассмотрим режим точной начальной выставки и калибровки БЭСГ при запуске бескарданного гироскопкомпа в условиях надводного положения необитаемого подводного аппарата, т.е. алгоритм решения задачи точной начальной выставки в инерциальной системе координат (ИСК) орта кинетического момента БЭСГ и калибровки его дрейфов с опорой на данные мультиантенной ПА СНС и данные об углах качки, поступающие от измерительного модуля на микромеханических датчиках.

Введем четыре системы координат: $Ox_k y_k z_k$ – система координат, связанная с корпусом гироскопа; $Ox_c y_c z_c$ – система координат, связанная с объектом; $O_* \xi_* \eta_* \zeta_*$ – инерциальная система координат (связанная с неподвижными звездами); $O \xi_{int} \eta_{int} \zeta_{int}$ – квазиинерциальная система координат, совпадающая в момент коррекции с осями гироскопического трехгранника $q_1 q_2 q_3$, построенного на ортах кинетических моментов опорного и калибруемого БЭСГ. Графическое изображение описанных систем координат представлено на рис. 1, где φ, λ_* – широта и инерциальная долгота.

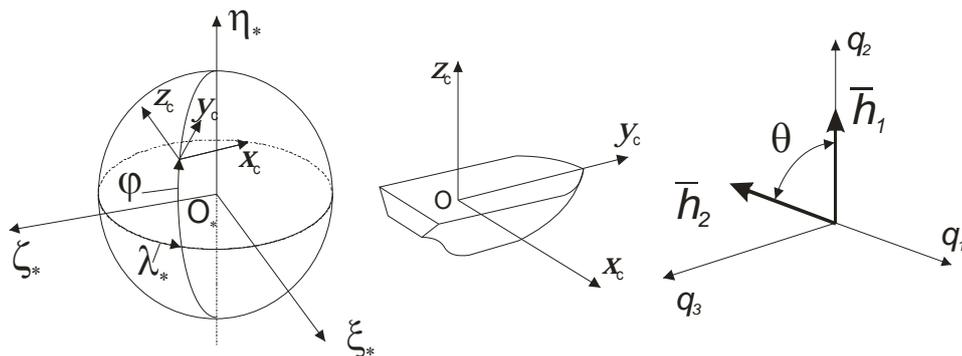


Рис. 1. Системы координат: $O_* \xi_* \eta_* \zeta_*$ – инерциальная; $Ox_c y_c z_c$ – связанная с объектом

В настоящее время в качестве базовой принята детерминированная модель ухода БЭСГ, которая представляется в виде аналитических функций, связывающих геометрические параметры несферичного и несбалансированного ротора с параметрами физических полей – источников уводящих моментов. При этом зависимости строятся с учетом произвольной ориентации ротора, а проекции ускорений характеризуются управляющими напряжениями на электродах, которые являются реакциями подвеса на силовые воздействия.

Так, скорость дрейфа в проекции на одну из осей x_k корпуса гироскопа имеет вид [4]:

$$\begin{aligned} \omega_{xk} = & k0h_1 \left[-\left(1-h_1^2\right)h_1^2 + h_2^4 + h_3^4 \right] + k1 \left[-\left(1-h_1^2\right)u_1 + h_1h_2u_2 + h_1h_3u_3 \right] + \\ & + k2h_1 \left[-\left(1-h_1^2\right)u_1^2 + h_2^2u_2^2 + h_3^2u_3^2 \right] + k3h_1 \left[-\left(1-h_1^2\right)h_1u_1 + h_2^3u_2 + h_3^3u_3 \right] + \\ & + k4h_1 \left[-\left(1-h_1^2\right)h_1^2u_1^2 + h_2^4u_2^2 + h_3^4u_3^2 \right] + h_1 \left(\mu_{12}h_2^2 - \mu_{31}h_3^2 \right) + h_2h_3v_{23} + \quad (1) \\ & + \left(H_1h_1 + H_2h_2 + H_3h_3 \right) \left\{ \alpha'' \left(H_3h_2 - H_2h_3 \right) + \right. \\ & \left. + \alpha' \left[H_1 - h_1 \left(H_1h_1 + H_2h_2 + H_3h_3 \right) \right] \right\}, \end{aligned}$$

где h_i ($i = 1, 2, 3$ – направляющие косинусы орта кинетического момента ротора в корпусной $x_k y_k z_k$ системе координат; $k0, k1, k2, k3, k4$ – коэффициенты модели ухода БЭСГ; $u_i = \frac{U_i}{U_0}$ – относительные напряжения на электродах подвеса. Здесь U_i – управляющие напряжения на электродах подвеса; U_0 – опорное напряжение на электродах подвеса (постоянная величина); H_i – проекции напряженности магнитного поля на оси корпуса; α', α'' – действительная и мнимая части определяемого экспериментально коэффициента поляризуемости ротора, отнесенные к величине кинетического момента гироскопа; μ_{ij} – коэффициенты, характеризующие консервативную часть момента от взаимодействия неравножесткого подвеса с радиально несбалансированным ротором, а коэффициенты v_{ij} – диссипативную часть данного момента.

Оценка коэффициентов модели ухода БЭСГ осуществляется вначале в условиях стенда. В условиях эксплуатации при каждом запуске системы в интересах точности также целесообразно осуществлять оценивание значений этих коэффициентов. Однако, как показывают результаты проведенных исследований, в этом случае время готовности бескарданного гироскопа будет лежать в пределах 16–18 часов, что не всегда допустимо.

Таким образом, постановка задачи точной начальной выставки и калибровки БЭСГ заключается в выработке оценок для вектора состояния системы (описание которого приводится ниже) с последующим учетом их в обратной связи для корректировки оцениваемых параметров. Следует выделить ряд особенностей поставленной задачи:

- используются два БЭСГ с ортогональными векторами кинетических моментов, на основе выходных данных которых (\vec{h}_{k-i}^S – векторов измеренных значений направляющих косинусов ортов кинетических моментов $ЭСГ_i$ в их корпусных осях $x_k y_k z_k$, где $i = 1, 2$) моделируется в пространстве соответствующий ортогональный гироскопический трехгранник $q_1 q_2 q_3$. При этом по данным от ПА СНС и измерительного блока на микромеханических датчиках формируется эталонный («идеальный») БЭСГ, используемый в качестве опорного. Погрешности определения положения вектора его кинетического момента относительно ИСК и коэффициенты модели ухода равны нулю с точностью до погрешностей определения углового положения, определяемого матрицей ориентации $C_{c,*}^{et}$, вычисленной по данным от мультиантенной ПА СНС и микромеханических датчиков;
- применяется дискретный алгоритм обработки данных. Использование квази-ИСК позволяет осуществить линеаризацию матрицы динамики погрешностей БЭСГ (также описанных в квази-ИСК) и измерений в точках пространства (в момент коррек-

- ции положения БЭСГ), дискретно движущихся вместе с вектором кинетического момента гироскопа [4]. Прогнозирование ухода калибруемого БЭСГ осуществляется в ИСК;
- в интересах сокращения времени готовности системы дрейфы БЭСГ могут описываться одним винеровским процессом (далее «суммарный дрейф») в осях квази-ИСК. В этом случае решается только задача точной начальной выставки БЭСГ;
 - для обработки измерений используется алгоритм обобщенного фильтра Калмана с обратной связью по всему вектору состояния системы.

Разностные измерения

При решении задачи используются два скалярных измерения:

$$\begin{aligned} z_1 &= (\vec{h}_{*_{-1}}^R \cdot \vec{h}_{*_{-2}}^R) - (\vec{h}_{c_{-1}}^{et} \cdot \vec{h}_{c_{-2}}^{et}) = \cos \theta_R - \cos \theta, \\ z_2 &= h_{int_{-2}}^R - h_{int_{-2}}^{et}. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь z_1 – первое измерение, представляющее собой разность косинусов расчетного θ_R и измеренного θ углов между ортами векторов кинетических моментов опорного ($i = 1$) и калибруемого ($i = 2$) гироскопов; $\vec{h}_{c_{-1}}^{et}, \vec{h}_{c_{-2}}^{et}$ – векторы эталонных и измеренных значений направляющих косинусов ортов кинетических моментов БЭСГ_{*i*} в осях $Ox_c y_c z_c$ соответственно.

Второе скалярное измерение z_2 представляет собой первый элемент вектора

$$\vec{z}_2 = \vec{h}_{int_{-2}}^R - \vec{h}_{int_{-2}}^{et} = (C_{int_{-2}^{int_{-2}^{et}}} - E) \vec{h}_{int_{-2}}^{et},$$

в котором $\vec{h}_{*_{-1}}^R, \vec{h}_{*_{-2}}^R, \vec{h}_{int_{-2}}^R, \vec{h}_{int_{-2}}^{et}$ – расчетные \vec{h}^R (прогнозируемые) и эталонные \vec{h}^{et} значения ортов БЭСГ в проекциях на оси соответственно ИСК и квази-ИСК; $C_{int_{-2}^{int_{-2}^{et}}}$ – матрица перехода от истинных осей квази-ИСК к их приборной реализации, характеризующая прецессию БЭСГ; E – единичная матрица размерности 3×3 .

Положение ортов $\vec{h}_{*_{-i}}^R$ кинетических моментов гироскопов в ИСК и корпусных осях вычисляется на рабочей частоте следующим образом:

$$\begin{aligned} \vec{h}_{*_{-1}}^R(t) &= \vec{h}_{*_{-1}}^{et}(t_0) = const; \quad h_{k_{-1}}^{et} = (C_{c,in}^{et})^T \vec{h}_{*_{-1}}^{et}(t_0); \\ d\vec{h}_{*_{-2}}^R / dt &= \vec{\omega}_{*_{-2}} \times \vec{h}_{*_{-2}}^R; \quad \vec{h}_{*_{-2}}^R(t_0) = C_{c,*}^{et}(t_0) C_{k,c} h_{k_{-2}}(t_0). \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь $\vec{h}_{k_{-1}}^{et}, \vec{h}_{k_{-2}}^{et}$ – векторы соответственно эталонных и измеренных значений направляющих косинусов ортов кинетических моментов ЭСГ_{*i*} в его корпусных осях. $C_{k,c}$ – матрица ориентации измерительных осей ЭСГ₂ относительно осей, связанных с подводным аппаратом, которая определяется при калибровке БЭСГ в условиях стенда.

Положение (построение) ИСК относительно трехгранника $q_1 q_2 q_3$ характеризуется матрицей $C_{q,*}$, орты-столбцы которой, согласно принятому условию ортогонализации, определяются как

$$\vec{q}_1 = \frac{1}{\sin \theta} (\vec{h}_{*_{-1}} \times \vec{h}_{*_{-2}}), \quad \vec{q}_2 = \vec{h}_{*_{-1}}, \quad \vec{q}_3 = \vec{q}_1 \times \vec{q}_2.$$

Согласно алгоритму (3), расчетные значения систематических дрейфов $\vec{\omega}_{*_{-2}}$ ЭСГ₂ в ИСК пересчитываются из осей корпуса БЭСГ в соответствии с соотношением

$$\vec{\omega}_{*_{-2}} = C_{c,*}^{pr} C_{k,c} \cdot \vec{\omega}_{k_{-2}}, \quad (4)$$

где $C_{c,*}^{pr}$ – расчетные (приборные) значения матрицы ориентации, формируемые без использования данных ПА СНС, $\vec{\omega}_{k_{-2}}$ – систематические дрейфы ЭСГ₂ в корпусных осях, коэффициенты модели ухода которых, согласно (1), вычисляются при стендовых испытаниях. Положение квази-ИСК относительно ИСК определяется матрицей $C_{*,int}$, равной значению матрицы $(C_{q,*})^T$ в моменты коррекции положения БЭСГ. Необходимые для формирования измерений (2) расчетные значения ортов ЭСГ_i равны

$$\vec{h}_{int_i}^R = C_{*,int} \cdot \vec{h}_{*_{-i}}^R. \quad (5)$$

Эталонные значения орта $\vec{h}_{int_{-2}}^{et}$ для ЭСГ₂ формируются следующим образом:

$$\vec{h}_{int_{-2}}^{et} = C_{*,int} C_{c,*}^{et} C_{k,c} \vec{h}_{k_{-2}}. \quad (6)$$

Модель погрешностей

Модель погрешностей $\Delta \vec{h}_{int_{-2}}^R$ прогнозирования текущих значений орта $\vec{h}_{int_{-2}}^R$ ЭСГ₂ в проекциях на оси квази-ИСК, требуемая для обработки в фильтре Калмана измерений (2), была получена варьированием уравнений (3) с учетом соотношений (4), (6). Линеаризация матрицы динамики системы осуществлялась относительно следующих значений ортов БЭСГ_i:

$$\vec{h}_{int_{1o}}^R = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \vec{h}_{int_{2o}}^R = \begin{bmatrix} 0 \\ \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Учитывая, что калибровка коэффициентов модели ухода БЭСГ и привязка его измерительных осей к корпусу гироскопа была произведена в условиях стенда, получена следующая упрощенная модель погрешностей уходов реального БЭСГ:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{h}_{int1_{-2}}^R &= -(\omega_{int3_{-2}} + \omega_{int2_{-2}} \cos \theta / \sin \theta) \cdot \Delta h_{int2_{-2}}^R + \Delta \omega_{intS_{-2}}, \\ \Delta \dot{h}_{int2_{-2}}^R &= \omega_{int3_{-2}} \cdot \Delta h_{int1_{-2}}^R + (\omega_{int1_{-2}} \cos \theta / \sin \theta) \cdot \Delta h_{int2_{-2}}^R - \sin \theta \cdot \Delta \omega_{int1_{-2}}, \\ \Delta \dot{\omega}_{int1_{-2}} &= w_3, \\ \Delta \dot{\omega}_{intS_{-2}} &= w_4, \\ \Delta \dot{h}_{k1_{-2}} &= w_5, \\ \Delta \dot{h}_{k2_{-2}} &= w_6, \\ \Delta \dot{h}_{k3_{-2}} &= w_7, \end{aligned} \quad (8)$$

где $\Delta \omega_{int1_{-2}}$, $\Delta \omega_{intS_{-2}} = \sin \theta \cdot \Delta \omega_{int2_{-2}} - \cos \theta \cdot \Delta \omega_{int3_{-2}}$ – суммарные дрейфы БЭСГ₂ в осях квази-ИСК, описываемые винеровскими процессами с заданными параметрами и характеризующие погрешности калибровки коэффициентов модели ухода БЭСГ на стенде и изменчивость их при каждом запуске; $\Delta \vec{h}_{ki_{-2}}$ ($i=1, 2, 3$) – погрешности списывающих устройств БЭСГ₂ в корпусных осях, скачкообразно меняющиеся при переходе с одного датчика угла на другой (при изменении угла более 45°) и описываемые случайными постоянными.

Погрешности моделирования квази-ИСК могут быть представлены вектором малого поворота $\vec{\Lambda}_{\text{int}} = [\Lambda_{\text{int}1} \quad \Lambda_{\text{int}2} \quad \Lambda_{\text{int}3}]^T$, характеризующим текущие погрешности построения ИСК в проекциях на оси квази-ИСК. Анализируя матрицу

$$C_{\text{int}_{pr}}^{\text{int}_{et}} = E - \delta C_{\text{int}_{et}}^{\text{int}_{pr}}, \text{ где } \delta C_{\text{int}_{et}}^{\text{int}_{pr}} = \begin{bmatrix} 0 & -\Lambda_{\text{int}3} & \Lambda_{\text{int}2} \\ \Lambda_{\text{int}3} & 0 & -\Lambda_{\text{int}1} \\ -\Lambda_{\text{int}2} & \Lambda_{\text{int}1} & 0 \end{bmatrix},$$

можно показать, что в окрестности точки линеаризации имеют место следующие приближенные соотношения [4]:

$$\begin{aligned} \Lambda_{\text{int}1} &= -\Delta h_{\text{int}3_1}^R, \\ \Lambda_{\text{int}2} &= -\frac{1}{\sin \theta} \Delta h_{\text{int}1_2}^R + \text{ctg} \theta \cdot \Delta h_{\text{int}1_1}^R, \\ \Lambda_{\text{int}3} &= \Delta h_{\text{int}1_1}^R, \end{aligned} \quad (9)$$

где $\Delta h_{\text{int}j_i}^R$ – составляющие ($j=1, 2, 3$) векторов погрешностей прогнозирования уходов БЭСГ_i ($i=1, 2$) в проекциях на оси квази-ИСК.

Очевидно, что в рассматриваемой задаче при формировании «идеального» БЭСГ₁ справедливы соотношения: $\Delta h_{\text{int}1_1}^R \cong 0$, $\Delta h_{\text{int}3_1}^R \cong 0$. Учитывая (8) и соотношения (9), измерения (2) в окрестности точки линеаризации могут быть представлены следующими приближенными выражениями:

$$\begin{aligned} z1 &\cong \Delta h_{\text{int}2_2}^R + v_1, \\ z2_1 &\cong \Delta h_{\text{int}1_2}^R + v_2, \end{aligned}$$

где $v_1 = -\Delta h_{\text{int}2_2}$, $v_2 = -\Delta h_{\text{int}1_2}^{\text{et}}$ – шумы измерений. Здесь $\Delta h_{\text{int}2_2}$ – второй элемент орта вектора погрешности списывающих устройств БЭСГ₂ в проекциях на оси квази-ИСК; $\Delta h_{\text{int}1_2}^{\text{et}}$ – погрешности формирования эталонных значений первого элемента орта $\vec{h}_{\text{int}2}^{\text{et}}$ БЭСГ₂ по данным мультиантенной ПА СНС и измерительного модуля на микромеханических датчиках, включающие погрешности списывающих устройств БЭСГ₂ в проекциях на оси квази-ИСК, а также погрешности измерительного блока по углам качки и ПА СНС по курсу.

Отметим, что в окрестности точки линеаризации также справедливы следующие соотношения для оценок:

$$\begin{aligned} \hat{\Delta h}_{\text{int}3_2}^R &= -(\cos \theta / \sin \theta) \cdot \hat{\Delta h}_{\text{int}2_2}^R; \\ \hat{\Delta h}_{*_2}^R &= (C_{*,\text{int}})^T [\hat{\Delta h}_{\text{int}1_2}^R; \hat{\Delta h}_{\text{int}2_2}^R; \hat{\Delta h}_{\text{int}3_2}^R]; \\ \Delta \hat{\omega}_{\text{int}2_2} &= \Delta \hat{\omega}_{\text{int}S_2} \cdot \sin \theta; \quad \Delta \hat{\omega}_{\text{int}3_2} = -\Delta \hat{\omega}_{\text{int}S_2} \cdot \cos \theta. \end{aligned}$$

Таким образом, вектор оцениваемых параметров для упрощенной и полной модели дрейфов будут соответственно равны:

$$x_{\text{упр}}^T = [\Delta h_{\text{int}1_2}^R \quad \Delta h_{\text{int}2_2}^R \quad \Delta \omega_{\text{int}1_2} \quad \Delta \omega_{\text{int}S_2} \quad \Delta \bar{h}_{k1_2} \quad \Delta \bar{h}_{k2_2} \quad \Delta \bar{h}_{k3_2}], \quad (10)$$

$$x_{\text{полн}}^T = [\Delta k_0 \quad \Delta k_1 \quad \Delta k_2 \quad \Delta k_3 \quad \Delta k_4 \quad \Delta \mu_1 \quad \Delta \mu_2 \quad \Delta \mu_3 \quad \Delta v_1 \quad \Delta v_2 \quad \Delta v_3, \quad (11)$$

$$\Delta \bar{h}_{k1_2} \quad \Delta \bar{h}_{k2_2} \quad \Delta \bar{h}_{k3_2}].$$

Результаты моделирования

Для сравнения времени готовности системы при калибровке коэффициентов модели увода БЭСГ и в режиме точной начальной выставки (упрощенная модель погрешностей) осуществлялось численное моделирование задачи оценивания в среде MATLAB с использованием пакета SIMULINK. При этом для достижения потенциальной точности бескарданного гироскопического компаса решалась задача оценивания вектора состояния (11) при измерениях (2). При тех же измерениях, но уже с вектором оцениваемых параметров (10), решалась задача точной начальной выставки вектора кинетического момента БЭСГ.

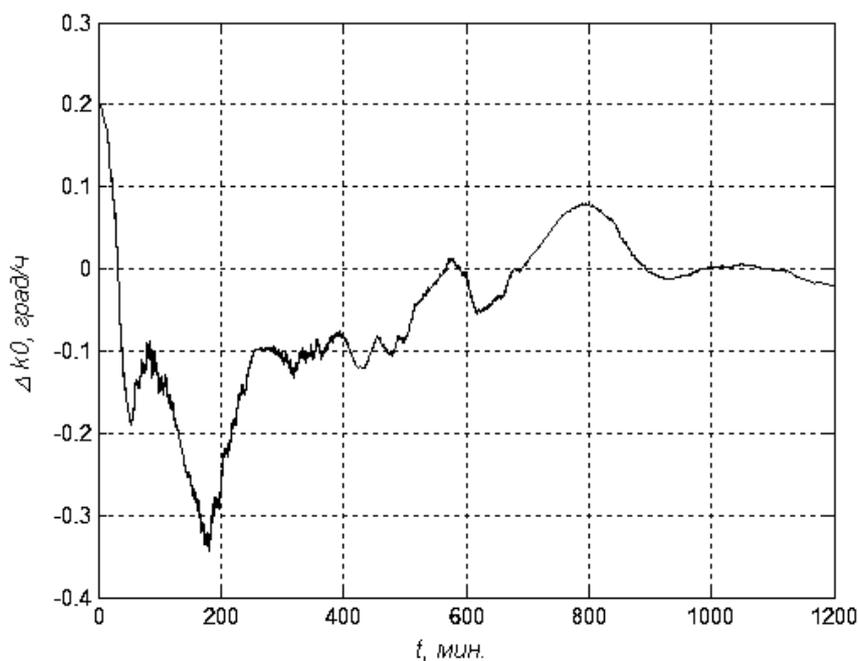


Рис. 2. Погрешность калибровки коэффициента k_0 модели увода БЭСГ

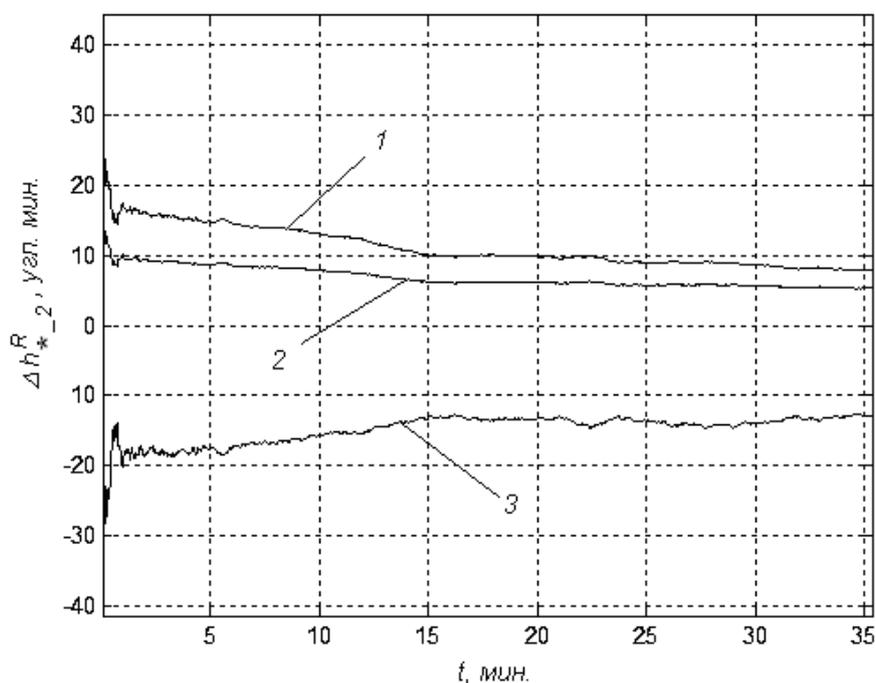


Рис. 3. Погрешности выставки БЭСГ: 1 – Δh_{in1}^R , 2 – Δh_{in2}^R , 3 – Δh_{in3}^R

Принимались следующие исходные значения:

- неопределенность знания коэффициентов модели ухода БЭСГ $0,2-0,5$ $^{\circ}/ч$;
- погрешности измерительного модуля на микромеханических датчиках по углам качки: $0,1^{\circ}$ – систематическая составляющая, $0,3^{\circ}$ – флуктуационная составляющая;
- погрешность мультиантенной ПА СНС по курсу: $0,3^{\circ}$ – систематическая составляющая, $0,5^{\circ}$ – флуктуационная составляющая;
- погрешности грубой начальной выставки БЭСГ – около 1° ; начальная ориентация вектора кинетического момента БЭСГ – в плоскости земного экватора.

На рис. 2 приведен график погрешности одного из калибруемых коэффициентов модели ухода (k_0) БЭСГ при использовании полной расчетной модели уходов БЭСГ, когда отсутствует ограничение по времени готовности бескарданного гироскопа. Видно, что время переходного процесса находится в районе 1000 мин.

На рис. 3 представлены погрешности режима точной начальной выставки БЭСГ при использовании упрощенной расчетной модели его ухода. В этом случае получаем существенное сокращение времени готовности при точности выставки вектора кинетического момента БЭСГ в ИСК в пределах 15 угловых минут.

Выводы

Рассмотрен режим начальной выставки и калибровки бескарданного гироскопа на электростатическом гироскопе и микромеханических датчиках. Показано, что при калибровке коэффициентов модели ухода БЭСГ при запуске системы (для достижения потенциальной точности бескарданного гироскопа) время готовности будет лежать в пределах 18–20 часов. Предложена упрощенная расчетная модель погрешностей БЭСГ, обеспечивающая решение задачи его точной начальной выставки в течение 30–40 мин.

Литература

1. Рапопорт Л.Б., Ткаченко М.Я., Могильницкий В.Г. и др. Интегрированная система спутниковой и инерциальной навигации: экспериментальные результаты и применение к управлению мобильными роботами // Гироскопия и навигация. – 2007. – Т. №1(56). – С. 16–28.
2. Интегрированная система Seapath 200. Product Manuals - Seapath 200. Precise Heading, Attitude and Position. – Seatex AS, Trondheim, Norway, 1998-05-04.
3. Блажнов Б.А., Волинский Д.В., Емельянцеv Г.И., Несенюк Л.П., Степанов А.П. Интегрированная инерциально-спутниковая система ориентации и навигации с микромеханическим инерциальным модулем. Результаты испытаний на автомобиле // Рефераты докладов XXVI конф. памяти Н.Н. Острякова. СПб, 2008, с. 21–22 // Гироскопия и навигация. – 2008. – №4(63). – С. 77.
4. Емельянцеv Г.И., Ландау Б.Е., Левин С.Л., Романенко С.Г. Об уточнении модели дрейфов электростатических гироскопов бескарданной инерциальной системы ориентации и о методике их калибровки на стенде и в условиях орбитального космического аппарата // Гироскопия и навигация. – 2008. – №1(60). – С. 43–54.

- Емельянцеv Геннадий Иванович* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, Emel@mail.ifmo.ru
- Лочехин Алексей Владимирович* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, alex@infom.su