

На правах рукописи

Одинцов Борис Владимирович

КАЛИБРОВКА СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ НА
ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ГИРОСКОПАХ В УСЛОВИЯХ
ОРБИТАЛЬНОГО ПОЛЕТА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Специальность 05.11.03 «Приборы навигации»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2011

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. В настоящее время одной из приоритетных задач современной космонавтики является мониторинг поверхности Земли в интересах картографии, геодезии, поиска полезных ископаемых, экологии, природных наблюдений, сельского хозяйства, военной разведки. Для качественного выполнения целевой задачи космическим аппаратам (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) требуется точное определение пространственной ориентации, необходимое для наведения оптической оси целевой аппаратуры наблюдения КА на заданные объекты.

К числу наиболее значимых факторов, которые определяют особенность и сложность управления низкоорбитальными высокоинформативными КА наблюдения, относятся:

- необходимость решения на борту КА задачи высокоточного наведения оси целевой аппаратуры на любой объект (маршрут) наблюдения;

- необходимость многократного быстрого и прецизионного перенацеливания КА в одном сеансе наблюдения с одного наблюдаемого объекта (маршрута) на другой, произвольно расположенный относительно трассы полёта;

- необходимость плавного управления КА с целью исключения «смаза» изображения.

Требуемые для системы управления движением параметры угловой ориентации КА определяются гироскопической системой ориентации, от характеристик которой, в значительной степени, зависит качество результатов ДЗЗ.

Использование высокоточных гироскопических датчиков позволяет увеличить автономность системы ориентации (в частности, увеличить интервалы между коррекциями от астродатчиков) и, за счет этого, снизить ограничения на режимы функционирования КА. Отмеченные обстоятельства определили интерес к созданию автономных прецизионных систем ориентации КА ДЗЗ.

Традиционно системы управления движением КА базируются на гироскопических ориентаторах, построенных на инерциальных датчиках угловой скорости (поплавковые, лазерные, волоконно-оптические и др. гироскопы). Использование таких систем, в связи с их более низкой точностью, требует непрерывной работы астровизира и интегрирования уравнений Пуассона, что накладывает ряд ограничений на угловое движение КА, на плавность поворотов КА, на быстроту перенацеливания аппаратуры наблюдения. В свою очередь, астродатчики имеют существенные ограничения по ресурсу работы, по запомненному каталогу

звезд, по невозможности работы при солнечной засветке. Все это приводит к ограниченным возможностям такой системы ориентации.

Большинство указанных проблем решаются путем использования в системе управления движением не гироскопического измерителя угловой скорости, а гироскопических приборов непосредственного измерения угловой ориентации КА. При этом высокие требования по надежности при больших ресурсах работы на орбите и ограничения на вес, габариты и энергопотребление определили бескарданный принцип построения инерциальных систем ориентации. Основной узел такой системы – гироскопический модуль, состоящий из нескольких гироскопов, связанных между собой жесткой высокостабильной базой.

Новой по своему космическому применению является задача определения ориентации КА системой на базе электростатических гироскопов (ЭСГ). В основе алгоритма определения угловой ориентации лежит построение автономного инерциального трехгранника по наблюдениям за векторами кинетических моментов как минимум двух гироскопов.

Использование ЭСГ в системах ориентации позволяет:

- уменьшить каталог звезд, используемых при астронавигации, и, соответственно, вычислительные ресурсы;
- повысить устойчивость работы системы управления КА при сбоях в каналах управления за счет «пространственной памяти»;
- существенно повысить точность и разрешающую способность устройств, используемых для мониторинга поверхности Земли;
- обеспечить достаточно большую угловую динамику КА, позволяющую реализовать специальные режимы съемки: съемка площадки, стереосъемка, съемка с произвольным азимутом;
- обеспечить плавность управления КА, т.е. отсутствие «смазов» полученного изображения;
- существенно повысить скорость «перенацеливания» аппаратуры наблюдения КА.

В ЦНИИ «Электроприбор» на протяжении последних десятилетий разработаны электростатические гироскопы разных классов, сначала нашедшие применения в высокоточных карданных навигационных системах морского базирования. В последнее время в ЦНИИ «Электроприбор» создана инерциальная система на бескарданных электростатических гироскопах (БИС-ЭГ) для систем управления движением космических аппаратов дистанционного зондирования Земли типа «Ресурс ДК». Проведены ее летно-конструкторские испытания на различных космических аппаратах, которые показали возможность достижения высоких точностей определения угловой ориентации КА.

Для использования ЭСГ в прецизионных системах ориентации принципиально важно определить точную привязку их измерительных

осей к базовым осям объекта или измерительным осям корректирующих устройств, и производить калибровку гироскопов в каждом новом запуске.

В карданных инерциальных системах на ЭСГ решаются аналогичные задачи привязки баз и калибровки коэффициентов модели ухода (КМУ) в условиях морских объектов. Однако, ввиду специфики космического применения эти решения не могут быть непосредственно перенесены, что и определяет актуальность темы диссертации.

Целью настоящей диссертации является разработка алгоритмов и методик калибровки системы ориентации на ЭСГ для использования на высокодинамичных КА ДЗЗ.

Основные задачи исследования

1. Разработка алгоритмов калибровки и коррекции системы ориентации на ЭСГ при неизвестном взаимном положении баз ЭСГ и астровизира.

2. Исследование наблюдаемости коэффициентов модели ухода ЭСГ и углов рассогласования между измерительными осями ЭСГ и астровизира на основе анализа аналитических решений уравнений движения ротора ЭСГ в условиях орбитального полета с учетом динамики КА.

3. Оценка эффективности алгоритмов калибровки системы ориентации на ЭСГ по результатам моделирования и летных испытаний.

На защиту выносятся следующие **научные положения**:

1. Аналитические решения уравнений движения ротора ЭСГ в условиях орбитального КА с учетом дрейфа орбиты и угловых колебаний КА.

2. Методика обеспечения наблюдаемости коэффициентов модели ухода и углов рассогласования между измерительными осями ЭСГ и астровизира.

3. Алгоритмы калибровки и коррекции системы ориентации на ЭСГ при неизвестном взаимном положении баз ЭСГ и астровизира.

Методы исследования. При решении поставленных задач использовались методы системного анализа и обработки информации, методы математического моделирования, теории гироскопов и инерциальных навигационных систем, основы теории статистического оценивания и дифференциальных уравнений. Адекватность полученных результатов подтверждена как компьютерным моделированием алгоритмов, так и результатами натурных испытаний бескарданной инерциальной системы ориентации на ЭСГ.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

1. Разработан алгоритм калибровки системы ориентации на ЭСГ в условиях космической эксплуатации для одновременного определения коэффициентов модели ухода и углов рассогласования между измерительными осями ЭСГ и измерительными осями астровизира.

2. Определены условия полной наблюдаемости коэффициентов модели ухода и углов рассогласования между измерительными осями ЭСГ и астровизира.

3. Разработан алгоритм коррекции системы ориентации на ЭСГ с уточнением коэффициентов модели ухода по данным астровизира, поступающих в произвольные моменты времени.

Практическая ценность заключается в следующем:

1. Разработанные алгоритмы позволили расширить возможности применения систем ориентации на позиционных электростатических гироскопах в системах управления движением КА дистанционного зондирования Земли.

2. Разработано программное обеспечение, в котором реализованы алгоритмы калибровки и коррекции системы ориентации на ЭСГ при штатной эксплуатации на КА.

3. Предлагаемые методики и алгоритмы коррекции погрешностей позволили существенно повысить точность определения ориентации и качество решения целевой задачи КА.

Достоверность научных и практических результатов подтверждается:

1. Результатами лётных испытаний на 7 КА различных типов.

2. Имитационным и полунатурным моделированием системы ориентации на ЭСГ.

3. Положительной оценкой работы при критическом обсуждении результатов работы на научно-технических конференциях.

Апробация работы. Основные результаты работы обсуждались и докладывались на: XIII, XV Санкт-Петербургских международных конференциях по интегрированным навигационным системам; XXV, XXVI, XXVII конференциях памяти Н.Н. Острякова; VI, X, XIII конференциях молодых ученых «Навигация и управление движением» (ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 2004-2010г).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ, из них 2 статьи в рецензируемых журналах из списка рекомендованного ВАК.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка публикаций автора, списка использованной литературы из 83 источников. Общий объем диссертации составляет 129 страниц, в тексте имеется 102 рисунка и 14 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются цель и задачи исследования, а также основные положения, выносимые на защиту. Дается краткий обзор содержания диссертации. Основной материал диссертации распределен по четырем главам.

В первой главе выполнен обзор и приведено описание существующих систем определения ориентации для комплексов управления движением космических аппаратов. Приведено описание бескарданной системы ориентации на электростатических гироскопах, разрабатываемой в ЦНИИ «Электроприбор».

Описан известный алгоритм определения угловой ориентации КА по наблюдениям за векторами кинетических моментов двух ЭСГ (TRIAD). На основе известных значений направляющих косинусов ортов кинетических моментов гироскопов в соответствии с правилом, представленным на рисунке 1, моделируется в пространстве гироскопический трехгранник $q_1q_2q_3$.

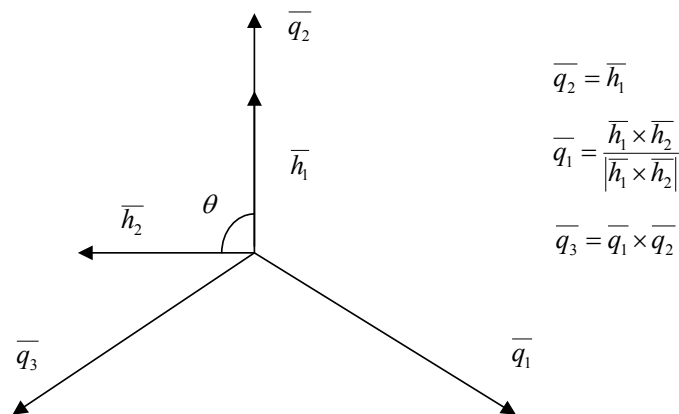


Рисунок 1 - Правило построения гироскопического трехгранника

где \bar{h}_i ($i = 1, 2$) - направляющие косинусы ортов кинетических моментов гироскопов. При этом гироскоп, на котором строится орт \bar{q}_2 считается опорным.

В соответствии с правилом построения гироскопического трехгранника рассчитываются матрица $C_{c,q}$, характеризующая положение приборной системы координат относительно гироскопической системы координат и матрица $C_{q,in}$, характеризующая положение гироскопической системы координат относительно инерциальной. Искомая матрица положения приборной относительно инерциальной системы координат вычисляется как $C_{c,in} = C_{q,in} \cdot C_{c,q}$.

Для компенсации ухода ЭСГ в работе применяется модель дрейфа для условий невесомости в проекциях на корпусные оси.

$$\begin{aligned}\omega_{xk} &= k_0 h_1 \left(- (1 - h_1^2) h_1^2 + h_2^4 + h_3^4 \right) + h_1 (\mu_{12} h_2^2 - \mu_{31} h_3^2) + h_2 h_3 v_{23} \\ \omega_{yk} &= k_0 h_2 \left(- (1 - h_2^2) h_2^2 + h_3^4 + h_1^4 \right) + h_2 (\mu_{23} h_3^2 - \mu_{12} h_1^2) + h_3 h_1 v_{31} \\ \omega_{zk} &= k_0 h_3 \left(- (1 - h_3^2) h_3^2 + h_1^4 + h_2^4 \right) + h_3 (\mu_{31} h_1^2 - \mu_{23} h_2^2) + h_1 h_2 v_{12}\end{aligned}\quad (1)$$

В выражении (1):

- h_1, h_2, h_3 – направляющие косинусы, характеризующие положение оси вращения ротора относительно корпуса;
- коэффициент k_0 характеризует взаимодействие четвертой гармоники формы ротора с полем подвеса;
- коэффициенты μ_{ij}, v_{ij} обусловлены консервативными и диссипативными составляющими момента от взаимодействия радиально несбалансированного ротора и неравножесткого подвеса.

Коэффициенты k_0, μ_{ij}, v_i подлежат определению.

В алгоритме определения угловой ориентации необходимо учитывать рассогласование измерительных осей $X_k Y_k Z_k$ ЭСГ относительно измерительных осей корректирующего устройства $X_c Y_c Z_c$, которое представляется в виде кососимметрической матрицы:

$$\delta C_{bc}^i = \begin{vmatrix} 0 & -\Delta\Lambda_3^{(i)} & \Delta\Lambda_2^{(i)} \\ \Delta\Lambda_3^{(i)} & 0 & -\Delta\Lambda_1^{(i)} \\ -\Delta\Lambda_2^{(i)} & \Delta\Lambda_1^{(i)} & 0 \end{vmatrix}\quad (2)$$

где:

$\Delta\Lambda_1^{(i)}, \Delta\Lambda_2^{(i)}, \Delta\Lambda_3^{(i)}$ ($i=1,2$) - погрешности углового положения измерительных осей каждого ЭСГ относительно соответствующих измерительных осей астровизира.

В условиях КА для определения ориентации используются опорный полярный, вектор кинетического момента которого ортогонален плоскости орбиты, и экваториальный ЭСГ, вектор кинетического момента которого лежит в плоскости орбиты.

Перед началом первых летных испытаний системы ориентации на ЭСГ предполагалось, что в связи со стабильностью и прогнозируемостью КМУ электростатического гироскопа, имеется возможность достаточно эффективно использовать значения КМУ, полученные при калибровке на Земле и последующего пересчетом на условия космической невесомости. Оставшуюся угловую погрешность предполагалось устранить с помощью относительно редких астрокоррекций. Однако лётные испытания показали

необходимость в использовании астрокоррекций не только для внесения угловых поправок, но и для решения задач уточнения КМУ гироскопов и определения привязок измерительных осей ЭСГ и астровизира.

Поставлена задача одновременной калибровки ЭСГ и определения привязок измерительных осей ЭСГ к измерительным осям астровизира. Использование такого алгоритма позволит существенно снизить требования к изготовлению КА с обеспечением взаимной точности привязки баз основных приборов определения углового положения КА на орбите.

Вторая глава посвящена разработке алгоритма калибровки коэффициентов модели увода ЭСГ и определения привязок измерительных осей ЭСГ к измерительным осям астровизира. Алгоритм построен на основе фильтра Калмана с использованием данных от астровизирующего устройства.

Особенность алгоритма калибровки заключается в следующем:

- для эталонирования углового положения используется кватернион углового положения от астровизирующего устройства;
- прогнозирование уводов ЭСГ осуществляется в инерциальной системе координат, однако расчетная модель погрешностей описана в квазиинерциальной системе координат int_1, int_2, int_3 , дискретно (в моменты астрокоррекции) учитывающей прецессию гироскопического трехгранника;
- измерения формируются с дискретностью T_z и с использованием текущих значений кватерниона положения от системы ориентации на ЭСГ и эталонного кватерниона положения от астровизирующего устройства;
- в качестве измерений используются внешние измерения, получаемые на основе сравнений показаний системы ориентации на ЭСГ и показаний астровизира, и автономные измерения, формируемые по наблюдениям за углом между векторами кинетических моментов ЭСГ.

$$z_k = \begin{pmatrix} z_{avt} \\ (z_1)_1 \\ (z_1)_3 \\ (z_2)_1 \\ (z_2)_2 \end{pmatrix} \quad \begin{aligned} z_{avt} &= (\bar{h}_R^{int_1} \cdot \bar{h}_R^{int_2}) - (\bar{h}^{b1} \cdot \bar{h}^{b2}) = \cos \theta_R - \cos \theta_S \\ \bar{z}_1 &= \bar{h}_R^{int_1} - \bar{h}_{et}^{int_1} = C_{in,int} \cdot (h_R^{in-1} - C_{c,in}^{et} \cdot dC_{b,c}^1 \cdot \bar{h}^1) \\ \bar{z}_2 &= \bar{h}_R^{int_2} - \bar{h}_{et}^{int_2} = C_{in,int} \cdot (h_R^{in-2} - C_{c,in}^{et} \cdot C_{b,c}^2 \cdot \bar{h}^2) \end{aligned}$$

z_{avt} – скалярное измерение, представляющее собой разность косинусов расчетного θ_R и измеренного θ_S углов между гироскопами;

z_i – ($i=1,2$) разностные измерения для полярного и экваториального гироскопов;

h^{b-i} – измеренные значения направляющих косинусов гироскопов;

$h_R^{in-i}, h_{et}^{in-i}$ – расчетные и эталонные значения направляющих косинусов гироскопов в проекциях на оси инерциальной системы координат;

$h_R^{int-i}, h_{et}^{int-i}$ – расчетные и эталонные значения направляющих косинусов гироскопов в проекциях на оси квазиинерциальной системы координат;

- в вектор состояния системы включены погрешности положения ЭСГ, погрешности априорных значений коэффициентов модели ухода и погрешности выставки измерительных осей ЭСГ относительно измерительных осей астровизира.

$$\bar{x} = \begin{bmatrix} \Delta h_1^{(1)} & \Delta h_3^{(1)} & \Delta h_1^{(2)} & \Delta h_2^{(2)} & \Delta k_0^{(1)} & \Delta \mu_{12}^{(1)} & \Delta \mu_{23}^{(1)} & \Delta \mu_{31}^{(1)} & \Delta v_{12}^{(1)} & \Delta v_{23}^{(1)} & \Delta v_{31}^{(1)} & \Delta \Lambda_1^{(1)} \\ \Delta \Lambda_2^{(1)} & \Delta \Lambda_3^{(1)} & \Delta k_0^{(2)} & \Delta \mu_{12}^{(2)} & \Delta \mu_{23}^{(2)} & \Delta \mu_{31}^{(2)} & \Delta v_{12}^{(2)} & \Delta v_{23}^{(2)} & \Delta v_{31}^{(2)} & \Delta \Lambda_1^{(2)} & \Delta \Lambda_2^{(2)} & \Delta \Lambda_3^{(2)} \end{bmatrix}^T$$

Построенная на уходящих гироскопах гироскопическая система координат фиксируется на промежутке времени между двумя астрокоррекциями. В этой системе координат начальное положение векторов кинетических моментов гироскопов на момент астрокоррекции имеет вид:

$$\bar{h}^{int-1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \bar{h}^{int-2} = \begin{bmatrix} 0 \\ \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix}$$

При работе алгоритма вычисляются поправки к положению калибруемых ЭСГ, поправки к коэффициентам модели и привязки измерительных осей. Далее поправки к положению гироскопов проектируются на оси инерциальной системы координат и вместе с уточненными значениями КМУ и привязками поступают в задачу программного движения гироскопов с учетом модели дрейфа.

В главе получены уравнения прецизионных движений гироскопов, вектор кинетического момента одного из которых при запуске лежит в плоскости орбиты («экваториальный» ЭСГ), а вектор кинетического момента второго гироскопа ортогонален плоскости орбиты («полярный» ЭСГ). Уравнения движений выведены для условий орбитального КА с учетом дрейфа орбиты и угловых колебаний КА. На основе анализа решений проведен анализ движения гироскопов при орбитальном вращении КА для исследования наблюдаемости коэффициентов модели ухода и привязок измерительных осей гироскопов.

Показано, что для полярного гироскопа характерны биения, возникающие при колебаниях КА по углу рысканья с частотой

орбитального обращения, и, следовательно, обусловленные наличием двух близких частот: частоты орбитального обращения и частоты прецессии гироскопа.

Для экваториального гироскопа характерны низкочастотные колебания, обусловленные дрейфом орбиты и дрейфом гироскопа.

Частота прецессионного движения полярного (ω_p) и экваториального (ω_y) гироскопов связана с КМУ соответствующих гироскопов следующими соотношениями:

$$\omega_p \approx \omega_0 + k_0 + \frac{\mu_{12}}{2} - \frac{\mu_{23}}{2} \quad - \text{ полярного ЭСГ} \quad (3)$$

$$\omega_y \approx \omega_0 - \frac{3k_0^2}{64\omega_0} - \frac{3\mu_{31}^2}{16\omega_0} \quad - \text{ экваториального ЭСГ} \quad (4)$$

где ω_0 - частота орбитального обращения КА.

С учетом движения гироскопов получена зависимость косинуса угла между векторами кинетических моментов гироскопов, которая запишется в виде:

$$\cos(\overline{h_1}, \overline{h_2}) \approx \frac{k_0}{16\omega_y} (\cos 4\omega_y t - 1) + \frac{\mu_{31}}{4\omega_y} (\cos 2\omega_y t - 1) \quad (5)$$

Частота биений определяется из разности частот прецессионного движения полярного гироскопа и орбитального движения КА, т.е. частота биений полярного гироскопа содержит линейную комбинацию k_0, μ_{12}, μ_{23} . Следовательно, в условиях эксплуатации на КА получить из аналитических выражений оценки отдельных КМУ полярного гироскопа не представляется возможным.

Формула (3) объясняет плохую наблюдаемость КМУ полярного гироскопа.

Таким образом, отсутствие полной наблюдаемости КМУ приводит к недостаточной компенсации дрейфа при отклонении векторов кинетических моментов гироскопов от начальных положений.

В главе выведена зависимость погрешности ориентации при орбитальном движении КА от погрешностей привязки полярного и экваториального гироскопов.

$$\delta_c = \begin{vmatrix} \alpha_p \cdot \cos \omega_0 t + \gamma_p \cdot \sin \omega_0 t \\ \alpha_p \cdot \sin \omega_0 t - \gamma_p \cdot \cos \omega_0 t \\ \beta_e \end{vmatrix} \quad (7)$$

То есть, при орбитальном движении ошибки ориентации по рысканью и крену КА определяются ошибками привязки полярного гироскопа по углам крена и рысканья α_p, γ_p . Ошибка по тангажу КА является постоянной величиной и зависит только от ошибки привязки экваториального гироскопа по оси тангажа β_e .

Показано, что для обеспечения полной наблюдаемости привязок измерительных осей одновременно полярного и экваториального гироскопов необходимо проводить вращение КА относительно двух осей.

В третьей главе рассматривается задача коррекции системы ориентации на ЭСГ по редким данным астровизира в процессе штатной эксплуатации КА.

Используемый в настоящее время алгоритм основан на определении квазипостоянных дрейфовых поправок по данным от астровизира в одной и той же точке орбиты, один раз на одном или нескольких витках орбитального обращения КА.

Основной недостаток алгоритма - необходимо планировать астрокоррекции в одной точке орбиты для исключения влияния рассогласования измерительных осей ЭСГ и астровизира на периоде орбитального обращения.

В работе предложен алгоритм коррекции системы ориентации на основе представленного во 2 главе алгоритма фильтра Калмана и предназначен для уточнения коэффициентов модели ухода по астрокоррекциям в произвольные моменты времени.

На основе анализа наблюдаемости коэффициентов модели ухода и привязок измерительных осей ЭСГ предложена методика проведения калибровки системы ориентации.

Выработаны рекомендации по оценке оптимального использования данных от астровизирующего устройства. Целесообразно использовать информацию от астровизирующего устройства так, чтобы шумы измерений были соизмеримы с накопленной угловой погрешностью системы ориентации на ЭСГ на интервалах между коррекциями углового положения. Описан алгоритм обработки эталонных данных от астровизирующего устройства с целью отбраковки грубых измерений и защиты от сбоев.

В четвертой главе представлены результаты имитационного моделирования, экспериментальных исследований и отладки разработанных алгоритмов калибровки и коррекции на системах ориентации БИС-ЭГ, в том числе при летно-конструкторских испытаниях в составе КА типа «Ресурс-ДК».

Критерием эффективности работы алгоритма уточнения КМУ электростатических гироскопов и определения привязок измерительных осей гироскопов к измерительным осям астровизира является повышение точности определения ориентации после проведения калибровки.

Имитационное моделирование

По заданным значениям коэффициентов модели ухода и невязкам измерительных осей ЭСГ и астровизира с учетом начальных значений при орбитальном движении КА и ошибок формирования моделируются направляющие косинусы ЭСГ. Эталонный кватернион астровизира формируется по данным начального положения осей КА и частоты орбитального обращения КА с учетом ошибок формирования. На интервале 3-5 витков орбитального движения по смоделированным направляющим косинусам гироскопов и кватерниону астровизира по разработанным алгоритмам калибровки определяются коэффициенты модели ухода и привязки между измерительными осями ЭСГ и астровизира.

На рисунках 2,3 приведены оценки коэффициента k_0 для ЭСГ1(полярного) и ЭСГ2 (экваториального), пунктирной линией отмечены истинные значения коэффициента k_0 . На рисунках 4,5 - оценки элементов матриц, характеризующих привязки измерительных осей ЭСГ1 и ЭСГ2 к измерительным осям астровизира, пунктирными линиями отмечены истинные значения привязок. На рисунках 2,3 по оси абсцисс - оценки k_0 в $^{\circ}/ч.$, по оси ординат – время в минутах. На рисунках 4,5 по оси абсцисс - оценки привязок в угловых минутах, по оси ординат – время в минутах.

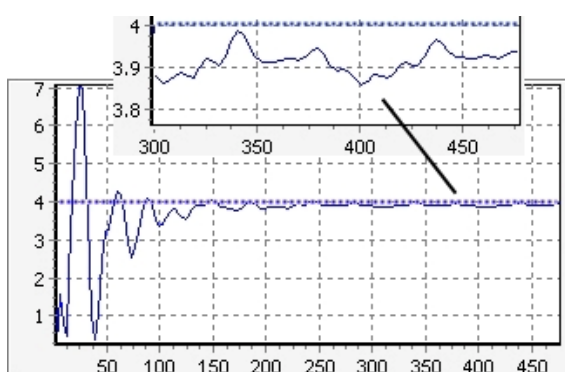


Рис.2 Оценка k_0 ЭСГ1

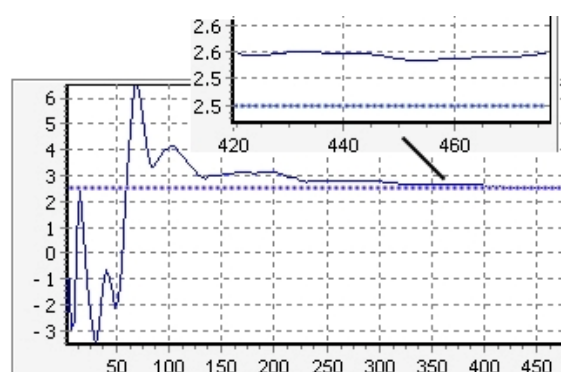


Рис.3 Оценка k_0 ЭСГ2

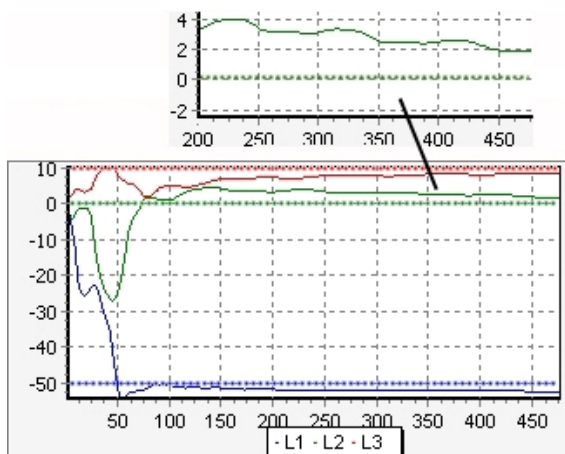


Рис.4 Оценка привязок ЭСГ1

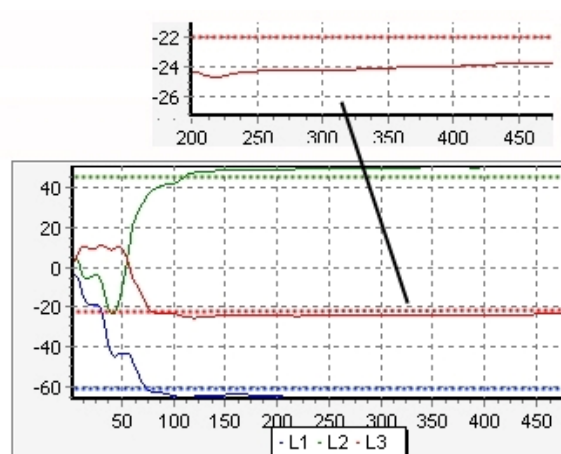


Рис.5 Оценка привязок ЭСГ2

Таким образом, моделирование алгоритма при орбитальном движении КА с отклонением от плоскости орбиты на постоянный угол, показало, что привязки гироскопов оцениваются в течение 1 витка орбитального обращения, а КМУ оцениваются в течение 2-3 витков. При этом погрешность оценки коэффициентов модели ухода составляет не более $0.2^\circ/\text{ч}$., погрешности оценки привязок по всем углам составляют не более $5'$. Погрешность определения ориентации с использованием оцененных значений коэффициентов модели ухода и привязок гироскопов находится на уровне ошибок формирования модельных данных.

Калибровка при первом запуске

Начальными условиями являются единичные матрицы привязок измерительных осей ЭСГ к измерительным осям астровизира и нулевые значения КМУ. Калибровка проводится при совместной обработке данных ЭСГ и астровизира, при которой кватернион углового положения от астровизира поступает с дискретностью 1 мин на интервале 3-5 витков орбитального обращения. Основная задача при калибровке системы ориентации при первом запуске – определить КМУ гироскопов и привязки измерительных осей ЭСГ к измерительным осям астровизира.

На рисунках 6,7 приведены оценки коэффициента k_0 для ЭСГ1(полярного) и ЭСГ2 (экваториального), а на рисунках 8,9 - оценки элементов матриц, характеризующих привязки измерительных осей ЭСГ1 и ЭСГ2 к измерительным осям астровизира соответственно. На рисунках 6,7 по оси абсцисс - оценки k_0 в $^\circ/\text{ч}$., по оси ординат – время в минутах. На рисунках 8,9 по оси абсцисс - оценки привязок в угловых минутах, по оси ординат – время в минутах.

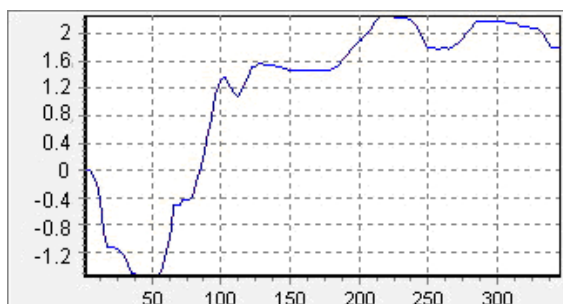


Рис.6 Оценка k_0 ЭСГ1

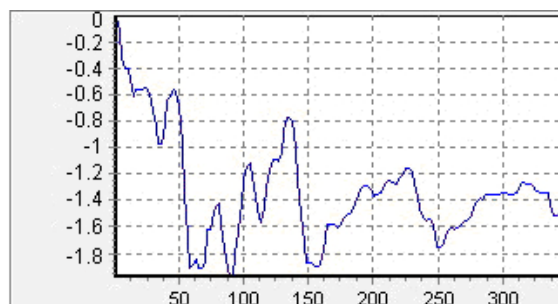


Рис.7 Оценка k_0 ЭСГ2

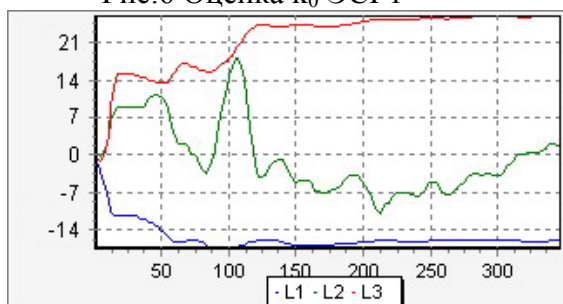


Рис.8 Оценка привязок ЭСГ1

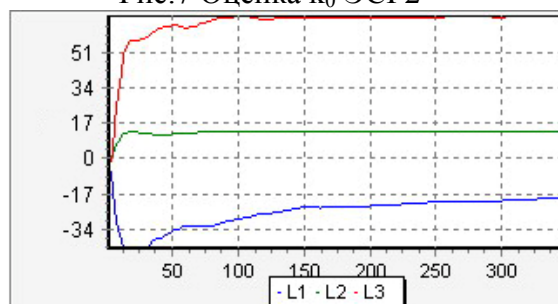


Рис.9 Оценка привязок ЭСГ2

Из приведенных рисунков видно, что переходной процесс оценки k_0 для ЭСГ1, ЭСГ2 на интервале наблюдения (350 минут) не заканчивается. Привязки измерительных осей ЭСГ к измерительным осям астровизира оцениваются в течение одного витка орбитального обращения.

Имеет место колебательность при стремлении оценок к установившимся значениям. Поэтому в ряде случаев требуется увеличивать интервал наблюдения.

При орбитальном движении КА привязка по углу тангажа L2 не проявляется и, следовательно, не может быть определена достоверно при калибровке при орбитальном движении КА.

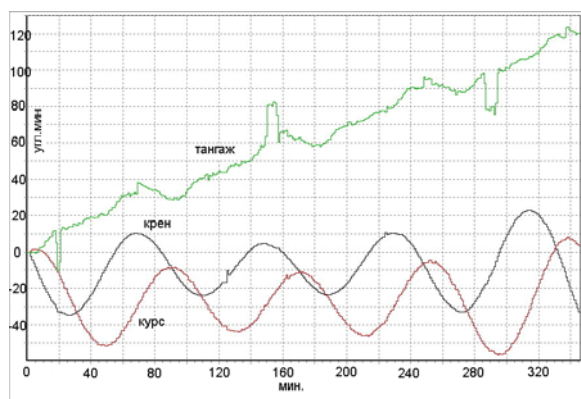


Рис.10а Погрешности ориентации до калибровки с начальными значениями КМУ и привязках.

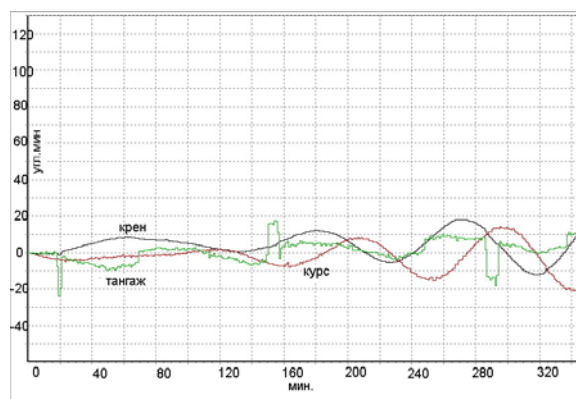


Рис.10б Погрешности ориентации после калибровки с вычисленными значениями КМУ и привязках.

На рисунках 10а, 10б приведены погрешности определения ориентации по углам крена, рысканья и тангажа до и после уточнения КМУ и привязок гироскопов.

Из рисунка 10а видно, что имеет место колебательность в ошибках по углам крена и рысканья, обусловленная неточностью начальных значений КМУ и привязок опорного (полярного) гироскопа. Ошибка по углу тангажа носит трендовый характер и обусловлена неточностью начальных значений КМУ экваториального гироскопа.

После уточнения КМУ и привязок колебательная составляющая погрешности снизилась с 50' до 10' (рисунок 10б). Трендовая составляющая снизилась с 0.3 °/час до уровня 0.02 °/час.

Повторная калибровка

Калибровка при повторных запусках. В данном случае известны априорные значения КМУ гироскопов и элементы матриц привязок измерительных осей ЭСГ к измерительным осям астровизира, полученные при калибровке в предыдущем запуске системы ориентации на ЭСГ. Кватернион углового положения от астровизира также поступает с дискретностью 1мин на интервале 3-5 витков орбитального обращения.

Особенность режима заключается в том, что уточняются только КМУ пары ЭСГ. Матрицы привязок при повторных запусках не оцениваются, т.к. погрешности их оценок от запуска к запуску составляют 1-1.5' и находятся на уровне точности определения ориентации.

На рисунках 11,12 приведены оценки коэффициента k_0 для ЭСГ1 и ЭСГ2 соответственно. Оценки привязок измерительных осей ЭСГ1 и ЭСГ2 к измерительным осям астровизира не приводятся, поскольку погрешности оценок находятся на 1', что соответствует уровню точности оценок.

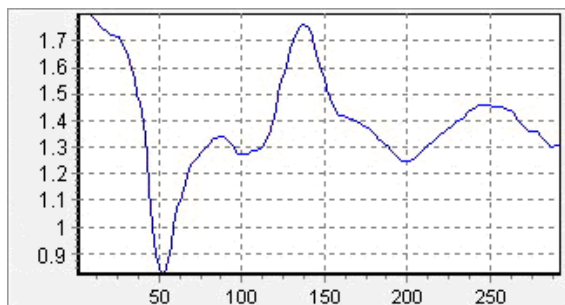


Рис.11 Оценка k_0 ЭСГ1

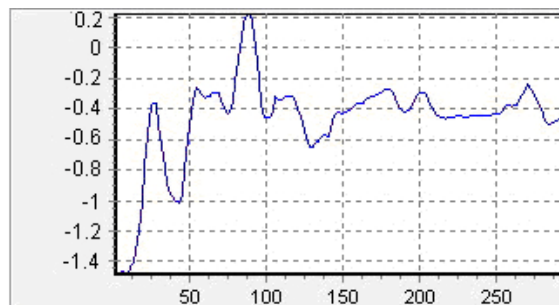


Рис.12 Оценка k_0 ЭСГ2

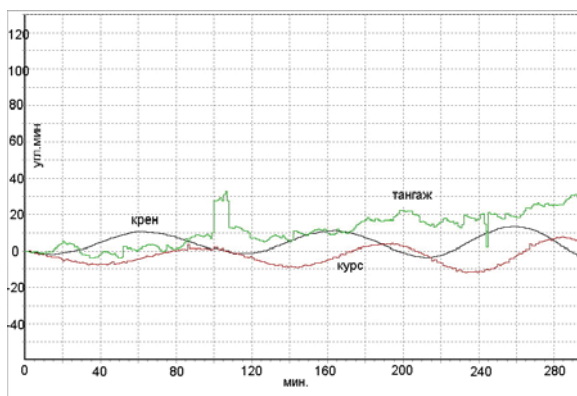


Рис.13а Погрешности ориентации до калибровки с априорными значениями КМУ и привязках.

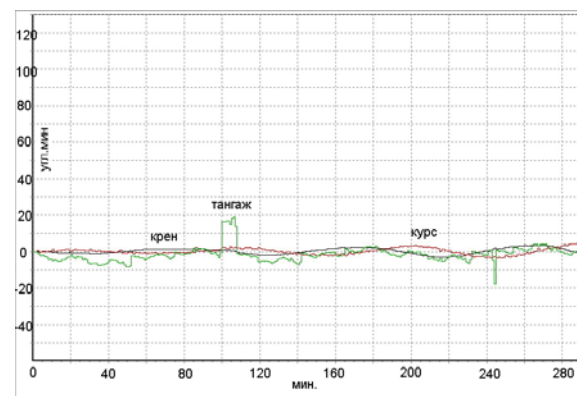


Рис.13б Погрешности ориентации после повторной калибровки с уточненными значениями КМУ

Из рисунка 13а видно, что колебательность по углам крена и рысканья по сравнению с начальной погрешностью (рисунок 10а) уменьшилась до 10'. Наличие трендовых составляющих обусловлено нестабильностью КМУ от запуска к запуску.

При повторной калибровке (рисунок 13б) уровень погрешности определения ориентации по углам крена, курса и тангажа снизился примерно до 3'.

Коррекция при штатной эксплуатации КА

Известны априорные значения КМУ гироскопов и определены матрицы привязок измерительных осей гироскопов к измерительным осям астровизира.

Используется алгоритм фильтра Калмана, с целью уточнения КМУ исходной модели дрейфа в процессе работы системы ориентации на ЭСГ при штатной эксплуатации КА. Особенность заключается в том, что в этом режиме данные от астровизира поступают периодически (например, один раз на нескольких витках) в течение короткого интервала времени, равного примерно 5-10 минут, с дискретностью 1 минута. В остальное время фильтр не работает и уточнение КМУ и привязок измерительных осей не производится. Т.е. алгоритм уточнения КМУ гироскопов работает только при наличии на входе системы эталонного кватерниона от астровизира.

На рисунках 14,15 приведены оценки коэффициента k_0 для ЭСГ1 и ЭСГ2 соответственно.

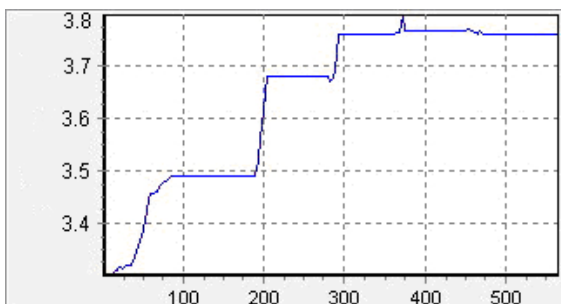


Рис.14 Оценка k_0 ЭСГ1

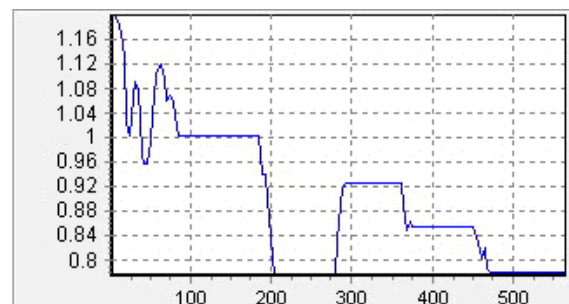


Рис.15 Оценка k_0 ЭСГ2

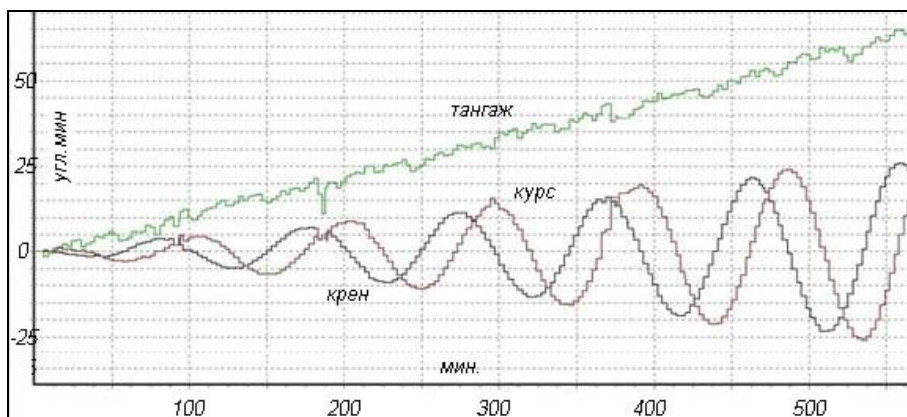


Рис.13а Погрешности ориентации до калибровки с априорными значениями КМУ и привязках.

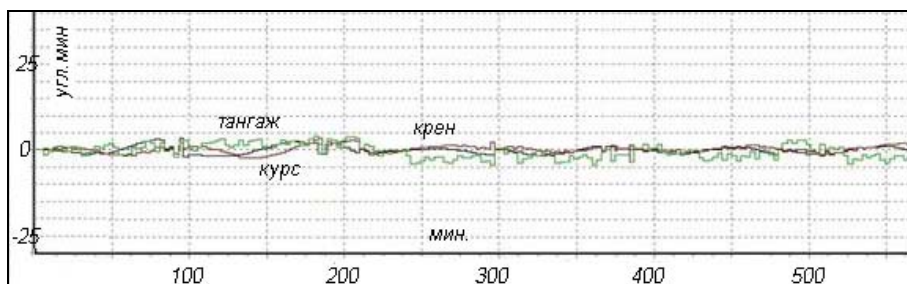


Рис.13б Погрешности ориентации при штатной работе алгоритма ФК.

Из рисунка 13б видно, что использование алгоритма коррекции на основе фильтра Калмана при использовании серии разовых АК в произвольные моменты времени позволяет значительно повысить точность определения угловой ориентации. Такой режим позволяет уточнять КМУ гироскопов в режиме штатной эксплуатации КА и удерживать погрешность определения ориентации на уровне 3-4' с накоплением ошибки не более $0.01^\circ/\text{ч}$, что соизмеримо с уровнем погрешности оптической системы съема угловой информации с гироскопов.

Заключение

В работе получены следующие основные результаты:

1. Разработан алгоритм совместной калибровки коэффициентов модели ухода бескарданных электростатических гироскопов и углов рассогласования между измерительными осями ЭСГ и астровизира в условиях орбитального полета КА.
2. Разработан алгоритм коррекции системы ориентации на ЭСГ с уточнением коэффициентов модели ухода по данным астровизира, поступающих в произвольные моменты времени.
3. Получены аналитические решения уравнений движения ротора ЭСГ в условиях орбитального движения КА с учетом дрейфа орбиты и угловых колебаний КА.
4. На основе анализа аналитических решений проведены исследования наблюдаемости КМУ и привязок измерительных осей ЭСГ и выработаны требования к специальным движениям КА на этапе калибровки системы ориентации на ЭСГ, позволяющие обеспечить наблюдаемость калибруемых параметров.
5. По результатам имитационного моделирования и обработки летных данных показано, что использование разработанного алгоритма калибровки системы ориентации на ЭСГ позволяет повысить на порядок и более точность определения ориентации КА. Использование разработанного алгоритма коррекции позволяет обеспечить точность определения угловой ориентации на уровне точности оптической системы съема информации.
6. Разработано и проверено программное обеспечение для определения коэффициентов модели ухода и привязок измерительных осей ЭСГ, позволяющее автоматизировать процедуру калибровки и повысить точность ориентации КА.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Одинцов Б.В., Белаш А.А., Егоров Е.А. "Аппаратно-программный комплекс для испытаний бескарданной инерциальной системы определения ориентации" / Навигация и управление движением. Материалы V конференции молодых ученых, ГНЦ-ЦНИИ «Электроприбор». – СПб, 2004, с.192-195.

2. Ландау Б.Е., Емельянцеv Г.И., Левин С.Л., Романенко С.Г., Гуревич С.С., Одинцов Б.В. "Основные результаты разработки и испытаний системы определения ориентации на электростатических гироскопах для низкоорбитальных космических аппаратов", Гироскопия и навигация №2, 2007, с.3-12.

3. Одинцов Б.В. "Особенности программно-математического обеспечения для определения угловой ориентации объекта по данным электростатических гироскопов" / Навигация и управление движением. Материалы X конференции молодых ученых, ГНЦ-ЦНИИ «Электроприбор». – СПб, 2007, с.47-54.

4. Ландау Б.Е., Гуревич С.С., Емельянцеv Г.И., Левин С.Л., Одинцов Б.В., Романенко С.Г. "Результаты калибровки электростатических гироскопов в бескарданной инерциальной системе ориентации" / Юбилейная XV Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам – СПб, 2008, с.122-129.

5. Емельянцеv Г.И., Ландау Б.Е., Левин С.Л., Одинцов Б.В., Романенко С.Г. "Повышение точности БИСО на ЭСГ с применением автоматического уточнения коэффициентов модели ухода в процессе космической эксплуатации" / Рефераты докладов XXVI конференции памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н. Острякова – СПб, 2008, с.74-75.

6. Завгородний В.И., Одинцов Б.В. "Влияние электромагнитных полей на параметры бескарданного ЭСГ со сплошным ротором" / Рефераты докладов XXVI конференции памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н. Острякова – СПб, 2008, с.75.

7. Ландау Б.Е., Емельянцеv Г.И., Одинцов Б.В. "Калибровка ЭСГ системы ориентации в условиях орбитального полета" / XIII Международная конференции «Системный анализ, управление и навигация», Евпатория 2008, с.22-25.

8. Одинцов Б.В., Белаш А.А. "Наземные испытания алгоритма уточнения коэффициентов модели ухода электростатического гироскопа для космического применения" / Научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов, РКК «Энергия» им. С.П. Королева, г.Королев, 2010, с. 79-82.

9. Одинцов Б.В. "К задаче повышения точности определения ориентации космического аппарата дистанционного зондирования Земли" / Гироскопия и навигация №2, 2010, с.5-15.

10. V.Ye.Landau, G.I.Yemelyantsev, B.V.Odintsov "Electrostatic Gyroscopes in Attitude Reference Systems for Orbital Spacecrafts" / China International Conference on Inertial Technology and Navigation, Nanjing, China, 2010.

11. Ландау Б.Е., Буравлев А.П., Гуревич С.С., Емельянцев Г.И., Романенко С.Г., Левин С.Л., Одинцов Б.В. "О модели дрейфов и калибровке БИСО на ЭСГ в условиях орбитального космического аппарата" / Рефераты докладов XXVII конференции памяти Н.Н. Острякова, СПб, 2010, с.82-83.

ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛАХ ИЗ ПЕРЕЧНЯ ВАК

1. Ландау Б.Е., Емельянцев Г.И., Левин С.Л., Романенко С.Г., Гуревич С.С., Одинцов Б.В. "Основные результаты разработки и испытаний системы определения ориентации на электростатических гироскопах для низкоорбитальных космических аппаратов", Гироскопия и навигация №2, 2007, с.3-12.

2. Одинцов Б.В. "К задаче повышения точности определения ориентации космического аппарата дистанционного зондирования Земли" / Гироскопия и навигация №2, 2010, с.5-15.