

---

---

# ГИРОСКОПИЧЕСКИЕ И НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

---

---

УДК 531.383-1:537.2

Б. Е. ЛАНДАУ, А. А. БЕЛАШ, С. С. ГУРЕВИЧ, Г. И. ЕМЕЛЬЯНЦЕВ,  
С. Л. ЛЕВИН, С. Г. РОМАНЕНКО

## БЕСКАРДАННАЯ ИНЕРЦИАЛЬНАЯ СИСТЕМА ОРИЕНТАЦИИ НА ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ГИРОСКОПАХ ДЛЯ ОРБИТАЛЬНОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Представлен обзор результатов разработки бескарданной инерциальной системы на электростатических гироскопах для орбитальных космических аппаратов. Приведены результаты разработки электростатического гироскопа со сплошным ротором и построенной на его базе инерциальной системы для решения задачи ориентации космических аппаратов дистанционного зондирования Земли. Рассмотрены вопросы обеспечения точности системы, изложены особенности разработанного математического обеспечения системы и приведены некоторые результаты летных испытаний.

*Ключевые слова:* электростатический гироскоп, инерциальная система, орбитальный космический аппарат.

**Введение.** Выполнение современных требований по точности и надежности систем ориентации и навигации подвижных объектов посредством использования бескарданных инерциальных измерительных модулей (БИИМ), работающих в автономном режиме в течение длительного интервала времени, является сложной проблемой. Решение этой проблемы требует значительных финансовых и временных затрат.

Особенность решения задачи ориентации подвижного объекта гироскопической системой на пассивном участке полета орбитального космического аппарата (КА) заключается в практическом отсутствии значений кажущегося ускорения (сила тяготения Земли скомпенсирована центробежной силой из-за орбитального вращения КА). Это приводит к неэффективности использования акселерометров БИИМ при решении задачи ориентации в этих условиях и, как следствие, к отсутствию собственных (шулеровских) колебаний погрешностей системы. Погрешности БИИМ носят нарастающий во времени характер, что обусловлено дрейфами гироскопов. Кроме того, в условиях полета орбитального КА в отличие от наземных условий неэффективно использование данных стандартной приемной аппаратуры (ПА) GPS/ГЛОНАСС для интеграции с БИИМ.

В этой связи в составе интегрированных систем для КА для коррекции погрешностей БИИМ необходимо применение либо классической астросистемы определения углового положения, построенной на астродатчиках, либо мультиантенной ПА GPS/ГЛОНАСС, использующей фазовые измерения на несущей частоте.

К настоящему времени пока не создана мультиантенная ПА GPS/ГЛОНАСС, обеспечивающая измерение углов ориентации КА с требуемой точностью. Поэтому на современных

орбитальных КА используются астродатчики (АД) разработки Института космических исследований РАН (Москва) [1].

БИИМ на бескарданных электростатических гироскопах (БЭСГ) со сплошным ротором для орбитальных КА — точнее, бескарданная инерциальная система ориентации — БИСО (так как в ее составе отсутствуют акселерометры и не решается задача навигации) разработана в ЦНИИ „Электроприбор“ (Санкт-Петербург, гл. конструктор Б. Е. Ландау). В ее создании принимали участие выпускники и преподаватели кафедры информационно-навигационных систем Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики (СПбГУ ИТМО). В настоящее время БИСО успешно эксплуатируется на ряде КА дистанционного зондирования Земли. Ее разработка была обусловлена необходимостью обеспечения высокой точности определения параметров ориентации КА при повышенной динамике их движения.

**Состав и структура построения БИСО на ЭСГ.** В состав структуры БИСО входят [2]:

- блок чувствительных элементов (БЧЭ);
- блок электроники (БЭ).

**Блок чувствительных элементов** (на рис. 1 показан со снятым кожухом) содержит три БЭСГ (резервирование для обеспечения требований по надежности), блоки электроники систем подвеса гироскопов, электропитания и спецвычислители измерительных каналов (СВ-ИК).

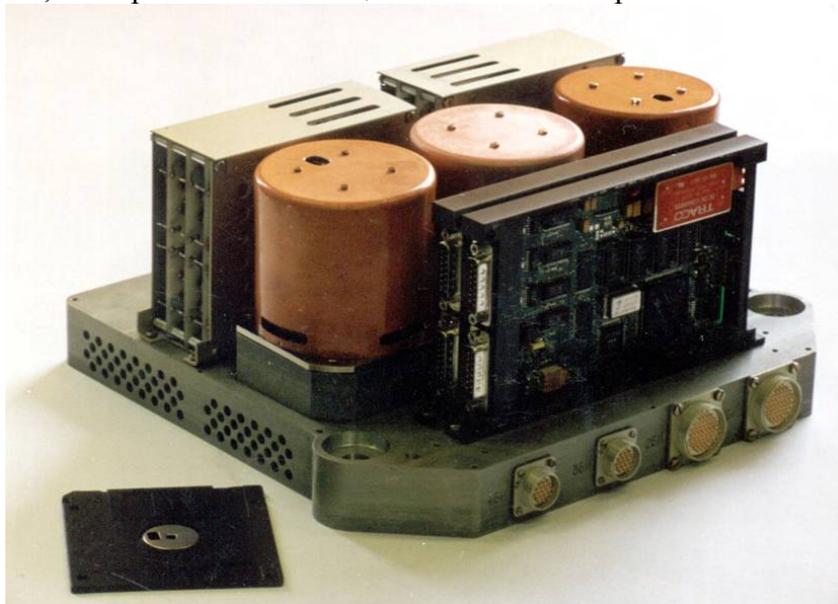


Рис. 1

Два БЭСГ с ортогонально расположенными векторами кинетических моментов (что осуществляется при разгоне роторов гироскопов) обеспечивают построение автономного гироскопического трехгранника, начальная ориентация которого относительно заданной инерциальной системы координат (ИКС) вычисляется по данным АД, а дрейф в инерциальном пространстве прогнозируется по априорным значениям коэффициентов модели уходов (КМУ) каждого из ЭСГ.

В БЭСГ (на рис. 2 показан со снятым кожухом) сплошной 10-миллиметровый бериллиевый сферический ротор взвешен в электрическом поле, создаваемом тремя парами ортогонально расположенных электродов электростатического подвеса. Опорное напряжение на электродах при испытаниях в наземных условиях составляет около 450 В (что обеспечивает перегрузочную способность электростатического подвеса до 10...15g), для повышения точности в условиях невесомости это напряжение снижается до 140 В. Вращение ротора с частотой около 3000 Гц (180 000 об/мин) и демпфирование его нутационных колебаний в любой из трех ортогональных ориентаций обеспечивается с помощью шести симметрично

расположенных катушек с дальнейшей стабилизацией скорости вращения электрическими силами подвеса. Для обеспечения и поддержания вакуума предусмотрен магниторазрядный насос, который создает в рабочем зазоре вакуум  $10^{-6} \dots 10^{-7}$  мм рт. ст. В целях исключения влияния уводящих моментов магнитной природы как сам насос, так и чувствительный элемент гироскопа помещены в системы магнитных экранов.

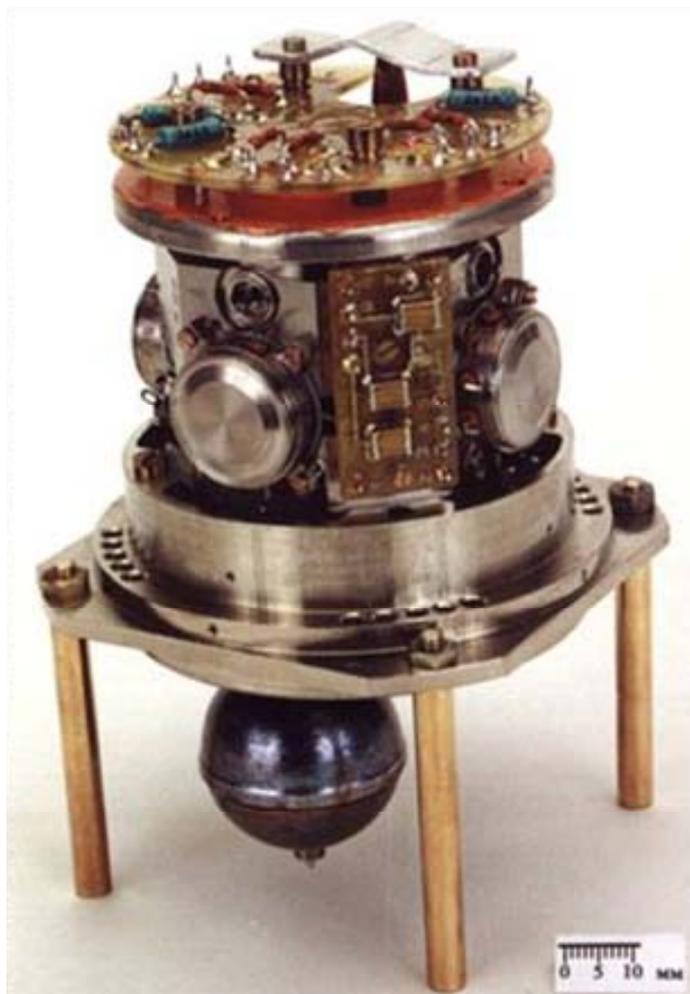


Рис. 2

Считывание информации об угловом положении ротора в неограниченном диапазоне углов осуществляется с помощью шести ортогонально расположенных оптических датчиков по нанесенному на роторе растровому рисунку.

В непосредственной близости от ЭСГ находятся блоки электроники подвеса, служащие для обеспечения левитации ротора и стабилизации его скорости вращения.

Информация с датчиков угла, блоков подвеса и от магниторазрядного насоса поступает в спецвычислитель, предназначенный для:

— точного вычисления угловой ориентации ротора в осях корпуса ЭСГ с использованием модели погрешностей системы съема данных;

— формирования цифровой информации об управляющих напряжениях электростатического подвеса ротора, тока насоса и скорости вращения ротора, эта информация необходима для диагностики состояния, управления режимами работы гироскопов и обеспечения алгоритмической компенсации их дрейфов.

Дальнейшая обработка информации осуществляется в центральном вычислителе инерциальной системы, входящем в блок электроники системы.

**Блок электроники** содержит дублированный центральный спецвычислитель системы (СВ-БИС) и блок автоматики пуска и отключения. БЭ осуществляет следующие основные функции:

— считывание информации ( $\mathbf{h}_i$ -векторов измеренных значений направляющих косинусов ортов кинетических моментов ЭСГ<sub>*i*</sub> в их корпусных осях) с измерительных каналов БИСО и вычисление углового положения корпуса БЧЭ и связанного с ним корпуса КА относительно инерциальной системы координат, начальное положение которой формируется по данным АД, т.е. вычисление элементов приборного кватерниона  $L_{пр}$ ;

— обеспечение информационного обмена между БИСО и бортовым комплексом управления (БКУ) КА;

— формирование и выдачу телеметрической информации;

— управление работой БИСО (запуск, отключение, переключение режимов).

В состав *блока автоматики* входят два блока разгона и демпфирования нутационных колебаний ротора, вторичные блоки электропитания, дублированный блок приема команд управления от БКУ и блоки реле, осуществляющие коммутацию цепей питания и привода приборов БЭСГ и электронных блоков.

*Центральный вычислитель* СВ-БИС реализует решение следующих задач:

— прием и выполнение команд БКУ;

— обеспечение информационной связи с тремя СВ-ИК блока БЧЭ по CAN-интерфейсу;

— прием команд, данных и меток времени (для синхронизации работы БИСО и АД) от БКУ;

— выдача телеметрической информации;

— включение и отключение резервных устройств.

Основной задачей СВ-БИС является определение угловой ориентации КА относительно ИСК.

Для решения перечисленных задач в СВ-БИС применена быстродействующая одноплатная ЭВМ, выполненная в стандарте PC/104+ и построенная на базе процессора Pentium-75.

**БЭСГ. Современный уровень погрешностей и пути повышения точности.** Точность решения задачи ориентации КА зависит как от параметров БЭСГ — точности оптико-электронной системы считывания (ОСС) информации об угловом положении ротора гироскопа и его дрейфа, так и от характеристик других устройств — точности астродатчика, стабильности и точности знания углов рассогласования между измерительными базами каждого БЭСГ и астродатчика.

Нескомпенсированная погрешность ОСС при прямом измерении углового положения ротора относительно корпуса гироскопа по разности фаз сигналов противоположных датчиков угла в БЭСГ составляет порядка 40...60'. Для повышения точности ОСС в специализированном вычислителе реализована математическая модель, параметры которой калибруются при изготовлении и испытаниях гироскопов на стенде. Калибруемые параметры зависят от неидеальности растрового рисунка ротора, неортогональности измерительных оптических каналов, смещения ротора в подвесе, электрической и геометрической взаимосвязи каналов и т.д. В настоящее время итоговая погрешность ОСС (с учетом математической компенсации) достигает 40 — 60". (Задача обеспечения точности ОСС многогранна и сложна и в данной работе подробно не рассматривается.)

Уровень систематического дрейфа гироскопов при наземных испытаниях составляет 1...3 %/ч, а в космических условиях — 0,1...0,2 %/ч. Различие обусловлено отсутствием силы тяжести на орбите КА и „автокомпенсационным“ воздействием относительно высокой скорости его орбитального вращения. Для снижения дрейфов ЭСГ могут использоваться как аппаратные, так и алгоритмические методы.

К аппаратным методам можно отнести следующие:

— создание „идеального“ ротора: в настоящее время значения осевого дисбаланса составляют менее 0,05 мкм, отклонения от сферичности — менее 0,002 мкм, точность нанесения растрового рисунка — не хуже 1...2 мкм;

— обеспечение геометрической точности сборки сферы электродов ортогонального подвеса; интенсивность работ в этом направлении в последние годы существенно усилена, что позволило выйти на уровень 2...3 мкм;

— обеспечение высокой стабильности положения ротора в электростатическом подвесе (на уровне долей микрометра).

Алгоритмические методы связаны с разработкой расчетных математических моделей дрейфа БЭСГ и погрешностей БИСО, а также с использованием алгоритмов фильтрации, позволяющих оценить и скомпенсировать дрейф БЭСГ за счет уточнения коэффициентов модели уходов по информации от астродатчика и измерениям углового положения роторов двух гироскопов.

Основная часть полного дрейфа гироскопа компенсируется с помощью модели ухода, коэффициенты которой подлежат калибровке. В настоящее время в качестве базовой принята детерминированная модель ухода ЭСГ, 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, которые являются реакциями подвеса на силовые воздействия.

Так, скорость дрейфа в проекции на одну из осей  $x_k$  корпуса гироскопа определяется следующим образом [3]:

$$\begin{aligned} \omega_{x_k} = & k_0 h_1 \left[ -\left(1 - h_1^2\right) h_1^2 + h_2^4 + h_3^4 \right] + k_1 \left[ -\left(1 - h_1^2\right) u_1 + h_1 h_2 u_2 + h_1 h_3 u_3 \right] + \\ & + k_2 h_1 \left[ -\left(1 - h_1^2\right) u_1^2 + h_2^2 u_2^2 + h_3^2 u_3^2 \right] + k_3 h_1 \left[ -\left(1 - h_1^2\right) h_1 u_1 + h_2^3 u_2 + h_3^3 u_3 \right] + \\ & + k_4 h_1 \left[ -\left(1 - h_1^2\right) h_1^2 u_1^2 + h_2^4 u_2^2 + h_3^4 u_3^2 \right] + h_1 \left( \mu_{12} h_2^2 - \mu_{31} h_3^2 \right) + h_2 h_3 v_{23} + \\ & + \left( H_1 h_1 + H_2 h_2 + H_3 h_3 \right) \left\{ \alpha'' \left( H_3 h_2 - H_2 h_3 \right) + \right. \\ & \left. + \alpha' \left[ H_1 - h_1 \left( H_1 h_1 + H_2 h_2 + H_3 h_3 \right) \right] \right\}, \end{aligned}$$

где  $h_i, i = 1, 2, 3$ , — направляющие косинусы орта кинетического момента ротора в корпусной системе координат  $x_k y_k z_k$ ;  $k_0, k_1, k_2, k_3, k_4$  — коэффициенты модели ухода ЭСГ;  $u_i = U_i / U_0$  — относительные напряжения на электродах подвеса (здесь  $U_i$  — управляющие напряжения на электродах подвеса;  $U_0 = \text{const}$  — опорное напряжение на электродах подвеса);  $H_i$  — проекции напряженности магнитного поля на оси корпуса;  $\alpha', \alpha''$  — действительная и мнимая части определяемого экспериментально коэффициента поляризуемости ротора;  $\mu_{ij}$  — коэффициенты, характеризующие консервативную часть момента гироскопа, обусловленную взаимодействием неравножесткого подвеса с радиально несбалансированным ротором, а  $v_{ij}$  — коэффициенты, характеризующие диссипативную часть данного момента.

При эксплуатации в условиях полета (в условиях невесомости) преобладающими становятся составляющие ухода, не зависящие от ускорения, а именно: от четных гармоник, начиная с четвертой; формы ротора; от остаточных магнитных полей и от взаимодействия радиально несбалансированного ротора с неравножестким подвесом. Поэтому за основу была принята следующая модель (например, по оси  $x_k$ ):

$$\omega_{x_k} = k_0 h_1 \left[ -\left(1 - h_1^2\right) h_1^2 + h_2^4 + h_3^4 \right] + h_1 \left( \mu_{12} h_2^2 - \mu_{31} h_3^2 \right) + h_2 h_3 v_{23} + \\ + \left( H_1 h_1 + H_2 h_2 + H_3 h_3 \right) \left\{ \alpha'' \left( H_3 h_2 - H_2 h_3 \right) + \alpha' \left[ H_1 - h_1 \left( H_1 h_1 + H_2 h_2 + H_3 h_3 \right) \right] \right\}.$$

При этом влияние остаточных магнитных полей (вследствие их малости) не учитывалось.

**Проблемы и особенности математического обеспечения системы.** Проведенные исследования и результаты летных испытаний БИСО на ЭСГ на борту орбитального КА показали следующее:

— известная к настоящему времени модель дрейфов ЭСГ со сплошным ротором для бескарданного применения не в полной мере соответствует реальным уходам гироскопа, выявлена необходимость ее уточнения;

— наблюдаются существенные изменения значений КМУ ЭСГ при каждом новом запуске системы, что обусловлено неравножесткостью каналов подвеса, изменением наведенного потенциала и потенциала, обусловленного зарядом ротора;

— значения КМУ ЭСГ, определенные при стендовых испытаниях системы, требуют новой калибровки при запуске в условиях полета орбитального КА;

— после запуска БИСО в условиях полета вследствие погрешностей привязки баз ЭСГ и АД и деформаций КА необходимо уточнение ориентации измерительных осей каждого ЭСГ относительно опорных осей астродатчика;

— имеют место изменения некоторых значений КМУ ЭСГ при изменении ориентации корпуса гироскопа относительно плоскости орбиты или ухода вектора кинетического момента ЭСГ от плоскости орбиты;

— отсутствует полная наблюдаемость (и, как следствие, возможность разделения оценок) значений КМУ для ЭСГ с ориентацией вектора кинетического момента, ортогонального плоскости орбиты КА;

— необходимо дальнейшее повышение точности системы съема информации об угловом положении ротора в связанной с корпусом гироскопа системе координат (ССК).

Вследствие непрогнозируемых дрейфов ЭСГ погрешности определения параметров ориентации КА будут, как известно, расти во времени. Для определения начального и текущего положения ортов кинетических моментов ЭСГ в ИСК, оценки их КМУ и погрешностей привязки измерительных осей каждого ЭСГ к осям КА используется выходная (эталонная для БИСО) информация от астродатчика, представляемая в виде текущих значений кватерниона  $L_{эг} = [L_0 \ L_1 \ L_2 \ L_3]^T$ , характеризующего положение связанных осей КА относительно инерциальных осей (измерительные оси АД приводятся к осям КА).

Точная начальная выставка ЭСГ (определение начального положения ортов их кинетических моментов в ИСК), калибровка дрейфов ЭСГ (уточнение их стендовых значений) и оценка погрешностей привязки измерительных осей каждого ЭСГ к осям АД осуществляется после запуска БИСО на орбите при реализации специального режима работы системы (режима калибровки). Это требует практически непрерывного (дискретность порядка 1 мин) поступления данных от АД. При этом для обеспечения полной наблюдаемости искомых оценок необходимо осуществлять изменение углового положения КА относительно орбитальной системы координат (ОСК), например, по углу крена.

В БИСО на ЭСГ исходной информацией для задачи ориентации являются направляющие косинусы ортов  $\mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2$  векторов кинетических моментов ЭСГ относительно правых ортогональных систем координат, связанных с корпусами гироскопов. Алгоритмы решения задачи ориентации, т.е. вычисления кватерниона  $L_{пр}$ , определяющего взаимную ориентацию связанной с КА системы координат и ИСК, приведены в работе [4].

Особенности режима калибровки БИСО заключаются в следующем [5]:

— прогнозирование уходов калибруемых ЭСГ осуществляется в ИСК, однако расчетная модель их погрешностей описана в квазиинерциальной системе координат, дискретно (в моменты коррекции положения ЭСГ) учитывающей прецессию гироскопического трехгранника; применение квази-ИСК позволяет осуществить линейризацию матрицы динамики системы и измерений в точках пространства состояния, дискретно движущихся вместе с векторами кинетических моментов ЭСГ;

— разностные измерения формируются с использованием текущих значений приборного  $L_{\text{пр}}$  (от БИСО) и эталонного  $L_{\text{эт}}$  (от АД) кватернионов положения;

— для обработки измерений используется алгоритм обобщенного фильтра Калмана с обратной связью по всему вектору состояния системы.

**Результаты летных испытаний** [6, 7]. На рисунках рис. 3, 4 приведены графики, характеризующие результаты режима начальной калибровки БИСО на ЭСГ, полученные после запуска системы на одном из КА: на рис. 3 показаны начальные погрешности определения параметров ориентации КА относительно ОСК ( $\Delta\psi$ ,  $\Delta\theta$ ,  $\Delta\gamma$  — по углам рысканья, тангажа и крена соответственно); на рис. 4 — эти же погрешности относительно ОСК после введения оценок КМУ и погрешностей привязки измерительных осей БЭСГ к осям АД (выбросы вызваны сбоями в исходных данных).

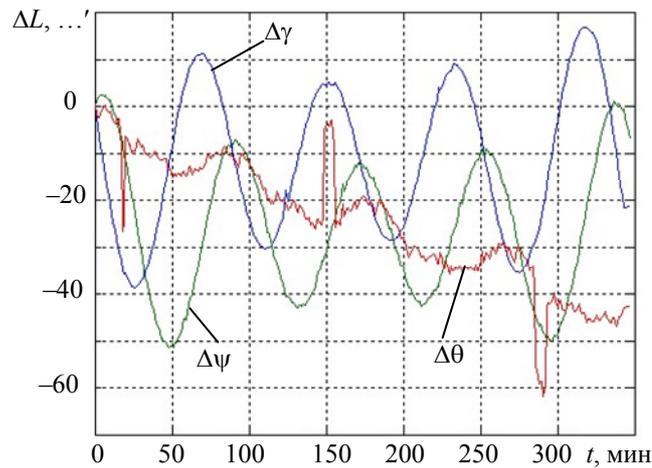


Рис. 3

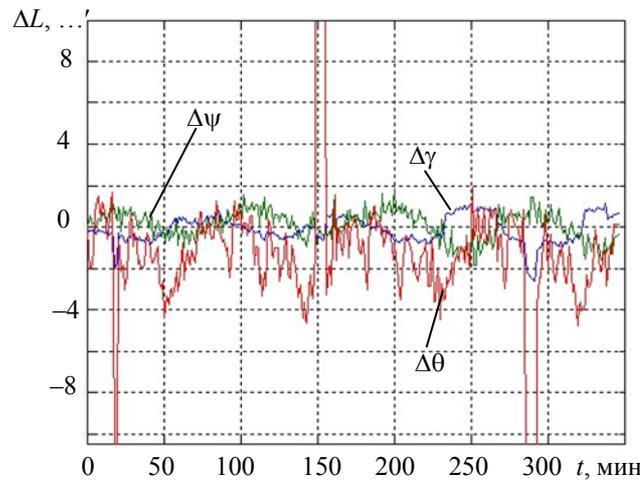


Рис. 4

Дискретность формирования кватерниона  $L_{\text{эт}}$  от астродатчика составляет 1 мин, длительность калибровки около 350 мин.

На рис. 5 показаны погрешности БИСО при определении параметров ориентации относительно ОСК на одном из КА „Кобальт“ в рабочем режиме при проведении разовых коррекций по данным АД через 1 виток (около 90 мин) полета КА и через 2 витка.

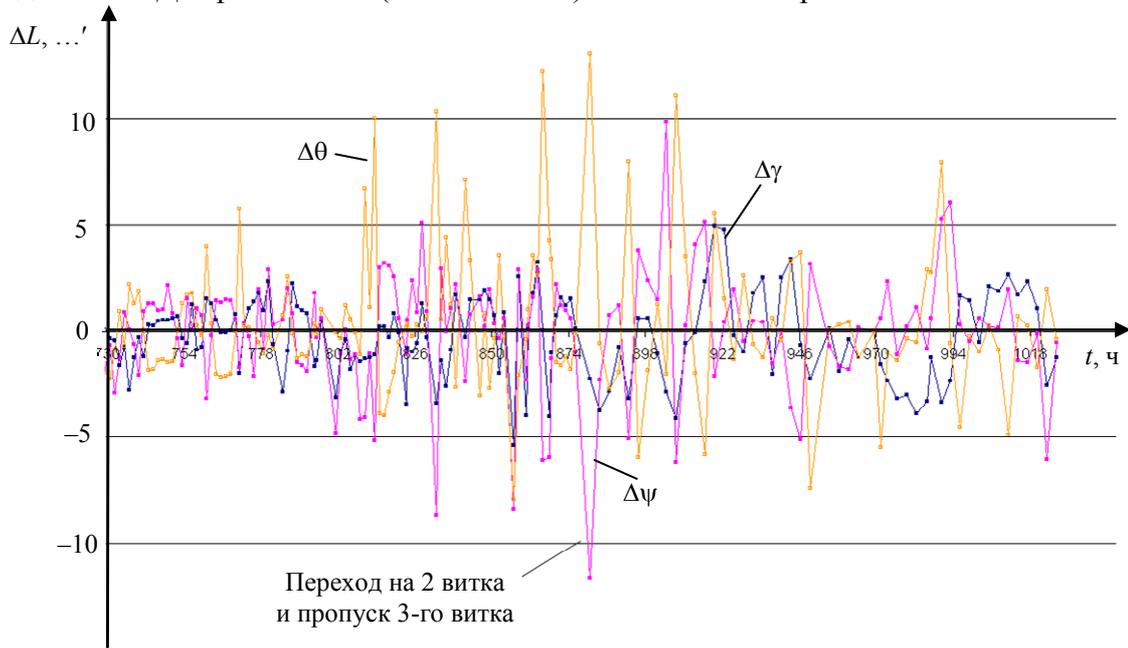


Рис. 5

### Выводы.

Создана и эксплуатируется на ряде объектов не имеющая аналогов в мировой практике автономная инерциальная система определения ориентации для орбитальных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли.

Разработаны и внедрены методы обработки результатов для взаимной привязки баз гироскопов и астрокорректоров и оценки параметров модели дрейфа гироскопов в условиях орбитального полета КА; разработано программное обеспечение системы.

Совместное использование режима начальной калибровки системы в условиях полета КА и процедуры введения дополнительных поправок к дрейфам БЭСГ, вычисляемых по данным астрокоррекции, привело в 2008—2009 гг. к достижению точности решения БИСО на ЭСГ задачи ориентации КА на уровне 2...3' при дискретности астрокоррекции через 1—2 витка.

Дальнейшее повышение точности БИСО на ЭСГ связано со следующими направлениями работ:

- повышением точности системы считывания информации об угловом положении БЭСГ;
- уточнением модели дрейфа БЭСГ;
- повышением точности астрокоррекции;
- реализацией режима калибровки БИСО на ЭСГ в масштабе реального времени на борту КА при использовании в процессе калибровки дополнительных поворотов КА, например, по углу крена: это позволит с большей точностью оценивать плохо наблюдаемые составляющие погрешностей привязки измерительных осей БЭСГ к осям астродатчика и КМУ гироскопов;
- внедрением разработанного гироскопа с 12-электродным равножестким подвесом [8], что позволит обеспечить повышение стабильности значений КМУ от запуска к запуску и адекватность модели реальному движению при различных взаимных ориентациях корпуса и ротора гироскопа.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, код проекта 10-08-00-904а.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аванесов Г. А., Форш А. А., Бессонов Р. В.* и др. Звездный координатор БОКЗ-М и перспективы его развития // Материалы XIV Санкт-Петербург. междунар. конф. по интегрированным навигационным системам, 28—30 мая 2007 г. СПб: ЦНИИ „Электроприбор“, 2007. С. 199—205.
2. *Ландау Б. Е., Емельянец Г. И., Левин С. Л.* и др. Основные результаты разработки и испытаний системы определения ориентации на электростатических гироскопах для низкоорбитальных космических аппаратов // Гироскопия и навигация. 2007. № 2(57). С. 3—12.
3. *Гуревич С. С., Гусинский В. З., Ландау Б. Е.* и др. Система ориентации орбитального КА на базе бескарданных электростатических гироскопов со сплошным ротором // Материалы VIII Санкт-Петербург. междунар. конф. по интегрированным системам. СПб: ЦНИИ „Электроприбор“, 2001. С. 52—59.
4. *Анучин О. Н., Емельянец Г. И.* Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов. СПб: ЦНИИ „Электроприбор“, 2003. 390 с.
5. *Емельянец Г. И., Ландау Б. Е., Левин С. Л., Романенко С. Г.* Калибровка дрейфов инерциальной системы ориентации на электростатических гироскопах по данным астровизирующего устройства в условиях космического аппарата // Гироскопия и навигация. 2005. № 2(49). С. 69—78.
6. *Ландау Б. Е., Гуревич С. С., Емельянец Г. И.* и др. Результаты калибровки электростатических гироскопов в бескарданной инерциальной системе ориентации // Материалы XV Санкт-Петербург. междунар. конф. по интегрированным навигационным системам, 26—28 мая 2008 г. СПб: ЦНИИ „Электроприбор“, 2008. С. 122—129.
7. *Ландау Б. Е., Гуревич С. С., Емельянец Г. И.* и др. Калибровка погрешностей бескарданной инерциальной системы на электростатических гироскопах в условиях орбитального полета // Гироскопия и навигация. 2010. № 1(68). С. 36—46.
8. *Бурявлев А. П., Кузин В. М., Ландау Б. Е., Сумароков В. В.* Бескарданный электростатический гироскоп с подвесом на двойных электродах // Сб. рефератов XXVI конф. памяти Н. Н. Острякова. СПб: ЦНИИ „Электроприбор“, 2008. С. 17—18.

*Сведения об авторах*

- Борис Ефимович Ландау** — д-р техн. наук; ОАО Концерн «ЦНИИ „Электроприбор“», Санкт-Петербург, главный конструктор; E-mail: blandau@eprib.ru
- Андрей Анатольевич Белаи** — аспирант; ОАО Концерн «ЦНИИ „Электроприбор“», Санкт-Петербург, начальник сектора; E-mail: belash@gtu.ru
- Станислав Соломонович Гуревич** — ОАО Концерн «ЦНИИ „Электроприбор“», Санкт-Петербург, начальник сектора; E-mail: biseq2@mail.ru
- Геннадий Иванович Емельянец** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра информационно-навигационных систем; E-mail: emel@mail.ifmo.ru
- Сергей Львович Левин** — канд. техн. наук; ОАО Концерн «ЦНИИ „Электроприбор“», Санкт-Петербург, начальник отдела; E-mail: biseq2@mail.ru
- Светлана Георгиевна Романенко** — канд. техн. наук; ОАО Концерн «ЦНИИ „Электроприбор“», Санкт-Петербург, научный сотрудник; E-mail: biseq2@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
информационно-навигационных  
систем СПбГУ ИТМО

Поступила в редакцию  
18.01.11 г.