

К ЗАДАЧЕ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОРИЕНТАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Рассматривается задача повышения точности ориентации космического аппарата за счет идентификации коэффициентов модели ухода и определения привязок измерительных осей бескарданных электростатических гироскопов (БЭСГ) к осям астровизирующего устройства в условиях штатной эксплуатации. Разработано программное обеспечение реального времени автоматической калибровки коэффициентов модели ухода (КМУ) пары БЭСГ и определения угловой ориентации космического аппарата). Представлены результаты камеральной обработки данных электростатических гироскопов.

Введение

Для использования прецизионных гироскопов в системах ориентации принципиально важно определить точную привязку их измерительных осей к связанным осям объекта, и производить калибровку гироскопов в каждом новом запуске.

В ЦНИИ «Электроприбор» разработана система ориентации БИС-ЭГ, построенная на бескарданных электростатических гироскопах со сплошным ротором [1], и входящая в систему управления движением космических аппаратов дистанционного зондирования поверхности Земли [8].

Качество выполнения целевой задачи космическим аппаратом (КА) зависит от точности определения ориентации. Определение ориентации объекта базируется на построении инерциального трехгранника по информации с пары гироскопов, угловые отклонения от которого дают информацию об ориентации. Для точного определения ориентации необходимо решить две задачи:

1) Провести калибровку КМУ пары гироскопов, участвующих в построении инерциального трехгранника, в т.ч. с учетом алгоритмической компенсации систематического дрейфа каждого гироскопа на основе модели ухода.

Одинцов Борис Владимирович. Младший научный сотрудник ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (С.-Петербург).

2) Связать измерительные оси каждого БЭСГ с измерительными осями астросвизирующего устройства (АВУ) КА, считающегося идеально связанным с целевой аппаратурой КА.

Для устранения геометрических невязок необходимо связать корпусную систему координат с базовыми осями КА или осями корректирующего устройства [7]. Без учета невязок использование эталонной информации от АВУ для оценки точности приведет к коническим погрешностям в определении ориентации при орбитальном вращении КА. Задачу определения невязок можно решить двумя методами. Первый заключается в определении привязок измерительных осей каждого БЭСГ к корпусной системе координат прибора при наземных испытаниях. Привязка корпусной системы координат к базовым осям корректирующего устройства производится также при сборке и наземных испытаниях КА (рис. 1). При этом будем считать, что при установке блоков ортогональность систем координат не нарушается.

Второй метод заключается в определении геометрических привязок измерительных осей каждого БЭСГ к измерительным осям АВУ при калибровочных работах в условиях штатной эксплуатации КА на орбите.

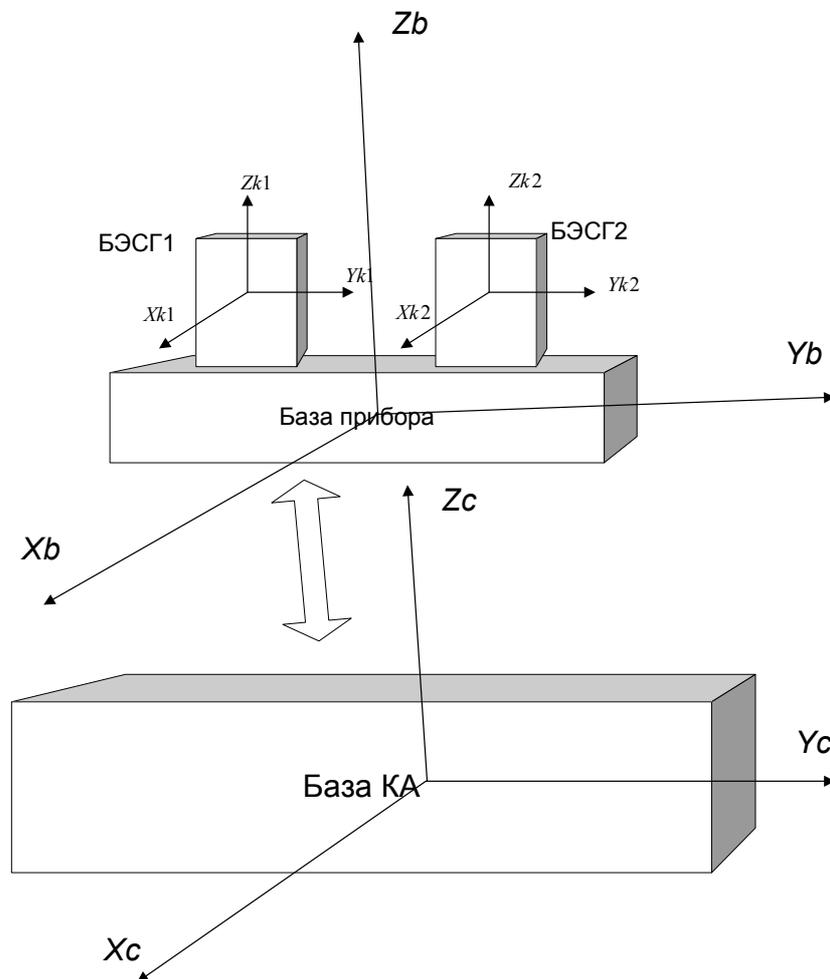


Рис. 1 Схема установки блоков

Задачу определения привязок измерительных осей БЭСГ к осям АВУ и задаче калибровки можно решить совместно на основе процедуры калмановской фильтрации. Алгоритм основан на сравнении эталонного кватерниона углового положения КА, измеренного АВУ, и кватерниона, построенного по информации с электростатических гироскопов. Следует отметить, что в алгоритме будем оперировать с матрицами углового положения, которые однозначно связаны с кватернионом углового положения.

Ниже приведены основы такого алгоритма и разработанного соответствующего программного обеспечения, а также результаты обработки полетных данных.

Модель ухода БЭСГ

Для компенсации систематического дрейфа БЭСГ используется физическая модель угловой скорости ухода БЭСГ [2,3] в виде проекции угловой скорости ухода на оси корпусной системы координат прибора. В приведенной ниже модели отсутствуют параметры, зависящие от ускорения силы тяжести:

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

где h_i ($i = 1, 2, 3$) – направляющие косинусы орта кинетического момента ротора; k_0 – коэффициент модели ухода от взаимодействия четных гармоник формы ротора, начиная с четвертой, с полем подвеса; μ_{ij} , v_{ij} – коэффициенты, характеризующие консервативную и диссипативную части момента от взаимодействия неравножесткого подвеса с радиально несбалансированным ротором, соответственно.

Для точного определения ориентации необходимо также учитывать рассогласование измерительных осей $XkYkZk$ БЭСГ относительно измерительных осей корректирующего устройства $XcYcZc$ (рис. 2).

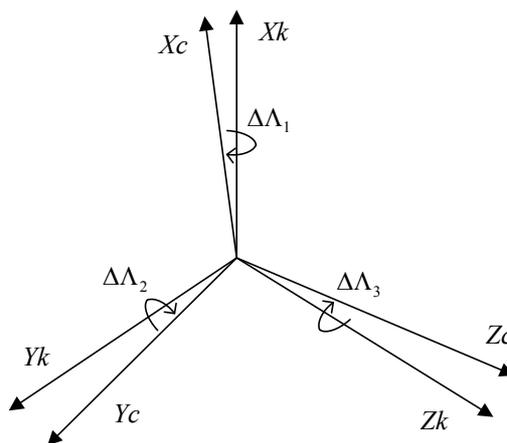


Рис. 2. Измерительные системы координат БЭСГ и АВУ

Рассогласование между измерительными осями каждого БЭСГ и измерительными осями АВУ представляется в виде матриц геометрической невязки

$$C_{bc}^i = \begin{vmatrix} 1 & \Delta\Lambda_3^{(i)} & -\Delta\Lambda_2^{(i)} \\ -\Delta\Lambda_3^{(i)} & 1 & \Delta\Lambda_1^{(i)} \\ \Delta\Lambda_2^{(i)} & -\Delta\Lambda_1^{(i)} & 1 \end{vmatrix} \quad (2)$$

где $\Delta\Lambda_1^{(i)}$, $\Delta\Lambda_2^{(i)}$, $\Delta\Lambda_3^{(i)}$ ($i = 1, 2$) характеризуют погрешности углового положения по каждой из измерительных осей каждого БЭСГ относительно измерительных осей АВУ.

Практика показывает, что при использовании системы ориентации на электростатических гироскопах в условиях КА температурная нестабильность баз приборов не сильно влияет на точности определения геометрической невязки.

Взаимосвязь систем координат

На рис. 3 представлены основные системы координат, используемые для построения ориентации.

ПСК – приборная система координат;

ГСК – гироскопическая система координат, построенная на уходящих гироскопах;

БИСК – базовая инерциальная система координат.

АИСК – абсолютная инерциальная система координат, считается эталонной на момент астрокоррекции от АВУ.

В БИСК производится алгоритмическая компенсация дрейфа ЭСГ с учетом модели ухода и значениями КМУ.

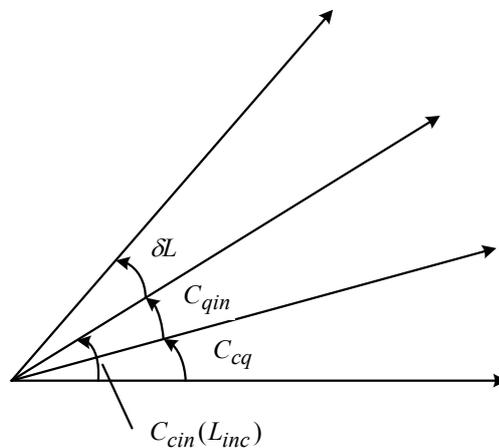


Рис. 3. Кинематическая схема углового движения КА

Краткое описание алгоритма

Алгоритм ориентации базируется на построении автономного инерциального трехгранника по информации от пары БЭСГ [3]. Задачей ориентации является определение положения связанной системы координат КА относительно инерциальной системы координат.

В основе алгоритма определения угловой ориентации системы координат, связанной с КА, относительно АИСК лежит построение автономного инерциального трехгранника по наблюдениям за векторами кинетических моментов двух гироскопов \vec{h}_1 и \vec{h}_2 [3]. Используется правило построения базового инерциального трехгранника, при котором первая ось ориентируется вдоль одного из наблюдаемых векторов. Третья ось ориентируется ортогонально плоскости, содержащей векторы \vec{h}_1 и \vec{h}_2 , а вторая ось ориентируется так, чтобы образовать правую ортогональную СК с первой и третьей осями (рис. 4). Ориентация векторов кинетических моментов \vec{h}_1 и \vec{h}_2 относительно осей, связанных с КА, измеряется с помощью системы углового списывания БЭСГ, а относительно АИСК рассчитывается путем интегрирования прецессионных уравнений движения роторов гироскопов при известных начальных условиях ориентации с учетом математической модели дрейфа и коэффициентах модели ухода. Точность определения ориентации зависит от адекватности математической модели ухода реальному движению ротора гироскопа. Точность зависит также от угла между векторами кинетических моментов рабочей пары БЭСГ.

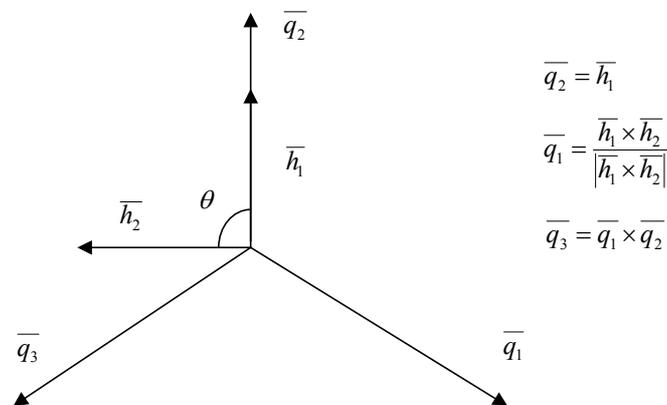


Рис. 4. Правило построения гироскопического трехгранника

Задача определения угловой ориентации заключается в вычислении кватерниона углового положения $L_{in,c}$, характеризующего взаимное положение связанной с КА системы координат относительно абсолютной инерциальной системы координат.

На основе \vec{h}_i ($i = 1, 2$) измеренных значений направляющих косинусов ортов кинетических моментов гироскопов в корпусных осях моделируется в пространстве соответствующий гироскопический трехгранник $q_1 q_2 q_3$. Для построения этого трехгранника необходимо решение задачи ортогонализации:

При этом гироскоп, на котором строится орт \vec{q}_2 , считается опорным. θ – угол между векторами кинетических моментов, измеренный системой углового списывания электростатического гироскопа.

Определение рассогласования измерительных осей БЭСГ относительно измерительных осей АБУ и уточнение КМУ происходит с использованием направляющих косинусов кинетических моментов пары гироскопов, информации

об угле между гироскопами и данных эталонного кватерниона углового положения от АБУ

$$\bar{z} = \begin{pmatrix} \cos \theta_r - \cos \theta_s \\ h_{R,1}^{\text{int } 1} - h_{et,1}^{\text{int } 1} \\ h_{R,3}^{\text{int } 1} - h_{et,3}^{\text{int } 1} \\ h_{R,1}^{\text{int } 2} - h_{et,1}^{\text{int } 2} \\ h_{R,2}^{\text{int } 2} - h_{et,2}^{\text{int } 2} \end{pmatrix} \quad (3)$$

где z_1 – скалярное измерение, представляющее собой разность косинусов расчетного θ_r и измеренного θ_s угла между ортами кинетических моментов двух БЭСГ; $\bar{h}_R^{\text{int } i}$, $\bar{h}_{et}^{\text{int } i}$ – прогнозные и эталонные значения направляющих косинусов опорного ($i = 1$) и второго ($i = 2$) в паре БЭСГ в проекциях на квазиинерциальную систему координат, которая совпадает с гироскопической на момент прихода коррекции от АБУ.

Эталонные и прогнозные значения ортов кинетических моментов БЭСГ рассчитываются следующим образом:

$$\begin{aligned} \bar{h}_{et}^{\text{int } 1} &= C^{\text{in,int}} \cdot \bar{h}_{et}^{\text{in } 1} = C^{\text{in,int}} \cdot C_{et}^{\text{c,in}} \cdot \bar{h}^{\text{b1}} & \bar{h}_R^{\text{int } 1} &= C^{\text{in,int}} \cdot \bar{h}_R^{\text{in } 1}; \\ \bar{h}_{et}^{\text{int } 2} &= C^{\text{in,int}} \cdot \bar{h}_{et}^{\text{in } 2} = C^{\text{in,int}} \cdot C_{et}^{\text{c,in}} \cdot \bar{h}^{\text{b2}} & \bar{h}_R^{\text{int } 2} &= C^{\text{in,int}} \cdot \bar{h}_R^{\text{in } 2}. \end{aligned}$$

Положение ортов $\bar{h}_R^{\text{in } i}$ ($i = 1, 2$) кинетических моментов гироскопов в ИСК вычисляется из решения векторного уравнения Эйлера при приведенной модели ухода:

$$\begin{aligned} d\bar{h}_R^{\text{in } 1} / dt &= \bar{\omega}^{\text{in } 1} \times \bar{h}_R^{\text{in } 1}; & \bar{h}_R^{\text{in } 1}(t_0); \\ d\bar{h}_R^{\text{in } 2} / dt &= \bar{\omega}^{\text{in } 2} \times \bar{h}_R^{\text{in } 2}; & \bar{h}_R^{\text{in } 2}(t_0). \end{aligned}$$

$C^{\text{in,int}}$ – матрица, характеризующая погрешности построения квазиинерциальной системы координат и обусловленная погрешностями прогнозирования уходов в ИСК; $C_{et}^{\text{c,in}}$ – эталонная матрица углового положения (рассчитывается из эталонного кватерниона углового положения); \bar{h}^{b1} , \bar{h}^{b2} – направляющие косинусы в осях измерительного блока.

Алгоритм вычисления прогнозируемых направляющих косинусов гироскопов и последующего определения ориентации КА в инерциальной системе координат, а также алгоритм оценки дрейфов гироскопов достаточно подробно описаны в [4].

Линеаризованная расчетная модель погрешностей системы определения ориентации и измерения могут быть записаны на основе известных рекуррентных уравнений фильтра Калмана:

$$x_{k+1} = \Phi_{k/k+1} \cdot x_k + \Gamma_{k+1} \cdot w_k ; \quad (4)$$

$$z_{k+1} = H_{k+1} \cdot x_{k+1} + v_{k+1},$$

где

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

– вектор состояния системы; $\bar{\Lambda} = |\Delta \Lambda_1 \quad \Delta \Lambda_2 \quad \Delta \Lambda_3|^T$ – вектор погрешности ориентации измерительных осей БЭСГ относительно осей АВУ; Δk_0 , $\Delta \mu_{ij}$, Δv_{ij} – погрешности расчетных значений КМУ БЭСГ.

Задача определения невязок между измерительными осями БЭСГ и измерительными осями АВУ на фоне уточнения КМУ уходящих гироскопов связана с невозможностью их разделения из-за недостаточной длительности интервала наблюдения. А в случае неучета дрейфов гироскопов привязки измерительных осей определяются с существенной погрешностью.

Невязки измерительных осей в достаточной степени определяются в течение 1 витка орбитального обращения, а для определения КМУ необходим интервал не менее 2-3 витков.

На первом этапе алгоритм определяет параметры вектора состояния, минимизирующие ошибку определения углового положения. После этого решается обратная задача (путем моделирования) оценки точности определения ориентации и накопления ошибки определения углового положения КА при уточненных КМУ и невязках баз на конец интервала наблюдения.

Результаты

Моделирование работы алгоритма производилось при камеральной обработке данных летных испытаний электростатических гироскопов и данных астровизирующего устройства, работающих в составе системы управления движением космического аппарата «Ресурс-ДК» №1 [9]. При обработке телеметрии с КА длительностью около 9 ч использовалась непрерывная информация о направляющих косинусах пары электростатических гироскопов с периодом 0,125 с и эталонном кватернионе от астровизирующего устройства с периодом 3 с.

Особенность совместной обработки данных АВУ и БЭСГ, а также оценка эффективности алгоритма автоматической калибровкой БЭСГ заключается в следующем. Изначально неизвестны КМУ рабочей пары БЭСГ и привязки к измерительным осям АВУ. В ходе работы алгоритма уточняются КМУ БЭСГ и определяются привязки к измерительным осям АВУ, а также производится оценка точности определения ориентации на всем 9-часовом интервале по рабочей паре БЭСГ. При этом через каждые 90 мин проводится безынерционная коррекция по эталонному кватерниону от астровизирующего устройства и обновляются значения КМУ и привязок измерительных баз для программного движения гироскопов, полученных в ходе работы алгоритма.

На рис. 5–8 приведены переходные процессы оценки некоторых КМУ и геометрических привязок измерительными осями рабочей пары БЭСГ к измерительным осям АВУ. По оси абсцисс – время в минутах, по оси ординат – значения в радианах для привязок и радианов в секунду для КМУ.

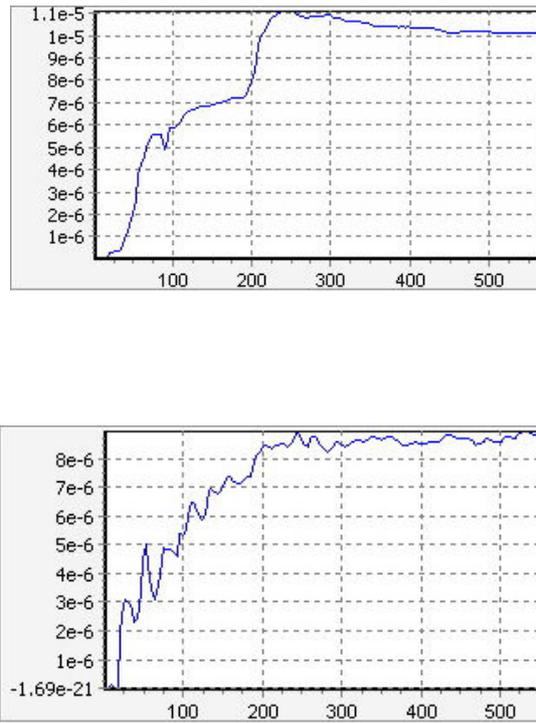


Рис. 5. Переходный процесс определения коэффициента k_0 для БЭСГ1 и БЭСГ2

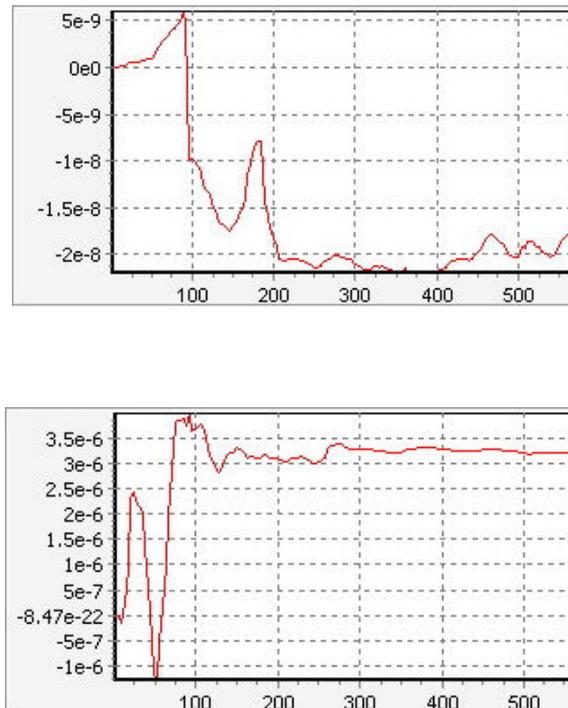


Рис. 6. Переходный процесс определения коэффициента m_{31} для БЭСГ1 и БЭСГ2

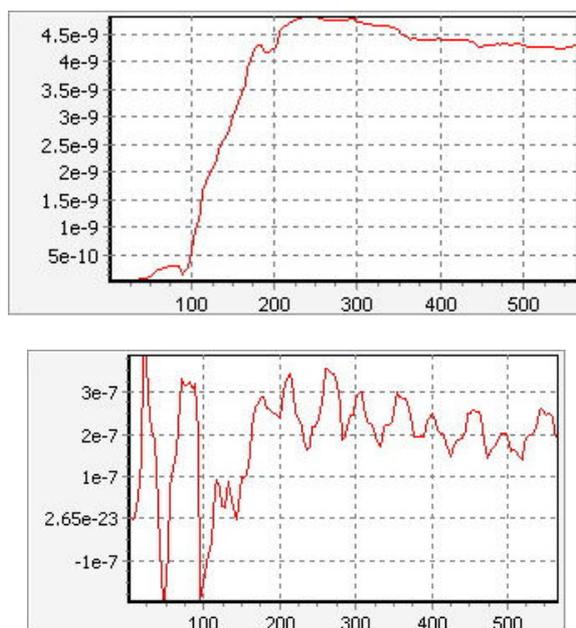


Рис. 7. Переходный процесс определения коэффициента n_{31} для БЭСГ1 и БЭСГ2.

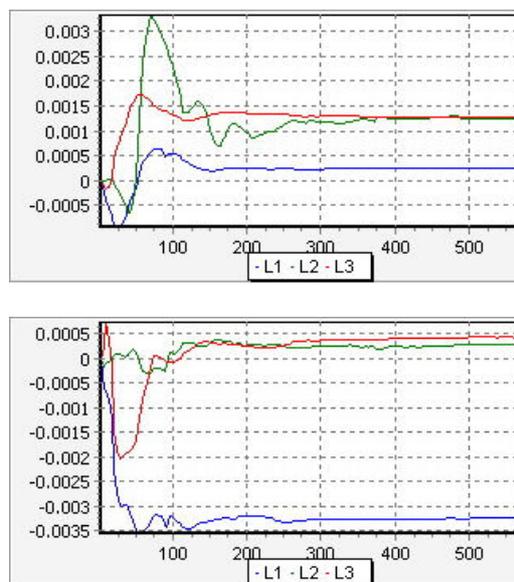


Рис. 8. Переходный процесс определения привязок к АВУ для БЭСГ1 и БЭСГ2

Как видно из приведенных рисунков, невязки измерительных осей составляют порядка 30 угл. мин. Невязки измерительных осей БЭСГ относительно измерительных осей АВУ определились примерно за 90 мин, что соответствует одному витку орбитального обращения КА. Также видно, что для окончания переходного процесса в определении КМУ БЭСГ требуется больше времени – примерно 200-300 мин.

В действительности невязки измерительных осей могут составлять и более 1° . Невязки измерительных осей БЭСГ относительно приборных осей АВУ

включают погрешности измерительных осей БЭСГ относительно приборных осей БИС-ЭГ и погрешности установки приборных осей БИС-ЭГ относительно приборных осей АБУ. Эта погрешность связана с точностью установки приборов на борту КА. Обеспечение требуемой точности привязки как при изготовлении прибора БИС-ЭГ, так и при сборке КА требует разработки и изготовления сложного метрологического оборудования и соответственно ресурсов. Предлагаемая здесь методика позволит существенно упростить эти операции. Кроме того, это еще раз доказывает необходимость проведения калибровок при первом запуске системы ориентации на борту КА.

На рис. 9 показаны погрешности определения угловой ориентации КА по углам крена, курса и тангажа. Погрешности приведены с учетом значений КМУ и привязок измерительных осей БЭСГ к измерительным осям АБУ, полученных в процессе калибровки. По оси абсцисс – время в минутах, по оси ординат – значения в угловых минутах.

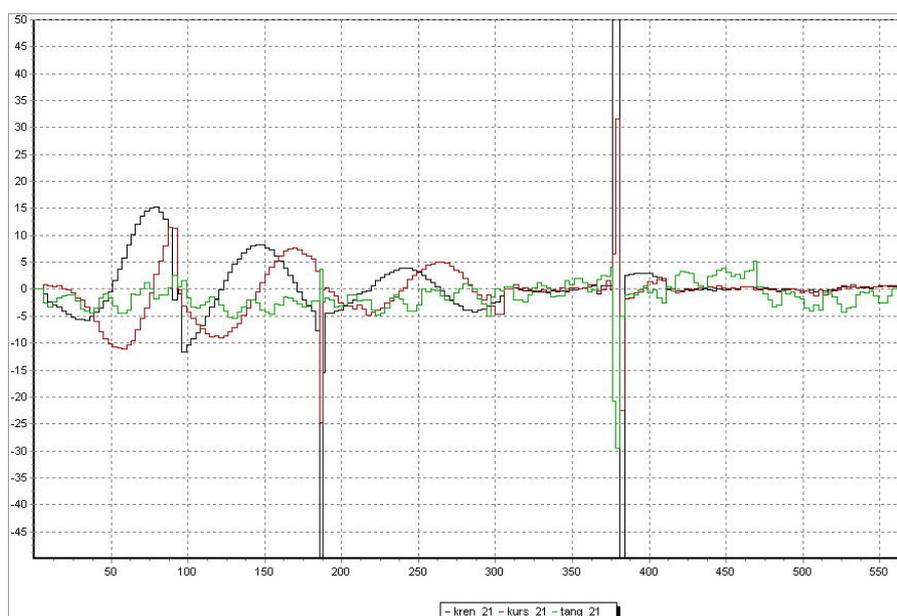


Рис. 9. Ошибки по углам крена, курса, тангажа

Здесь видно, что амплитуда колебательной составляющей на первых 90 мин составляла до 15 угл. мин по углам курса и крена. После введения в алгоритм определения ориентации наработанных значений КМУ БЭСГ и невязок измерительных осей через каждые 90 мин погрешность начинает снижаться. Наличие остаточной погрешности обусловлено недостаточным соответствием определенных значений КМУ реальным значениям, а также их изменчивостью на рассматриваемом интервале, связанной с неполнотой модели дрейфа гироскопов.

После проведения калибровочных работ полученная в итоге точность определения углового положения КА позволит увеличить интервал между коррекциями углового положения от АБУ в 3-5 раз для разовой коррекции прибора БИС-ЭГ. Это в свою очередь повысит эффективность работы КА по целевому назначению.

Разработанные методы и проведенное моделирование подготовили базу для создания алгоритмов автоматической калибровки ЭСГ на борту КА в условиях штатной эксплуатации. Реализация алгоритмов автоматической калибровки

электростатических гироскопов на борту КА позволит упростить обслуживание КА и сократить время ввода БИСО в точностную готовность.

Выводы

1. Проверен и уточнен алгоритм определения коэффициентов модели ухода и невязок баз между измерительными осями БЭСГ и АВУ.
2. Разработанный алгоритм может быть использован в штатном программном обеспечении системы ориентации с целью автоматического уточнения КМУ во время штатной эксплуатации.
3. Полученные результаты позволят увеличить интервал между астрокоррекциями в 3-5 раз, повысят эффективность работы КА и существенно упростят его эксплуатацию.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 10-08-00904а)

ЛИТЕРАТУРА

1. **Электростатический** гироскоп со сплошным ротором / Б.Е.Ландау [и др.] // Гироскопия и навигация. – 1993. – № 1. – С.6-12.
2. **Модель** дрейфа бескарданного ЭСГ и идентификация ее параметров / А.П. Буравлев [и др.] // Актуальные проблемы авиационных и аэрокосмических систем: процессы, модели, эксперимент. – 2002. – №1(13).
3. **Система** ориентации космических аппаратов на базе бескарданных электростатических гироскопов со сплошным ротором / С.С.Гуревич [и др.] // VIII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. – СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2001. – С. 57-65.
4. **Основные** результаты разработки и испытаний системы определения ориентации на электростатических гироскопах для низкоорбитальных космических аппаратов / Б.Е.Ландау [и др.] // Гироскопия и навигация. – 2007. – № 2. – С. 3-12.
5. **Результаты** калибровки электростатических гироскопов в бескарданной инерциальной системе ориентации / Б.Е.Ландау [и др.] // Юбилейная XV Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. – СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2008. – С. 122-129.
6. **Сомов, Е.И.** Полетная геометрическая калибровка космического телескопа и системы звездных датчиков / Е.И.Сомов, С.А.Бутырин, В.К.Скирмунт // Юбилейная XV Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. – СПб.: ЦНИИ «Электроприбор». -2008. – С. 130-136.
7. **Звездный** координатор БОКЗ-М и перспективы его развития» / Г.А.Аванесов [и др.] // XIV Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. – СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2007.
8. **Управление** угловым движением космических аппаратов дистанционного зондирования / Г.П.Аншаков [и др.] // Полет. - 2006. - №6. – С. 12-18.
9. **Космический** комплекс дистанционного зондирования Земли высокого линейного разрешения на местности «Ресурс-ДК» / Г.П.Аншаков [и др.] // Труды 4-й международной конференции «Авиация и космонавтика-2005». М., 2005. – С. 94-95.

Abstract. The paper considers the improvement of accuracy of spacecraft attitude determination. The task is performed using the identification of drift model coefficients and referencing the measurement axes of gimballess ESG to the axes of celestial sighting device under normal operation. The real-time software for the automatic calibration of drift model coefficients of ESG couple and spacecraft attitude determination is developed. Results of office studies of ESG data are presented.

Материал поступил 20.05.09