

КАЛИБРОВКА ПОГРЕШНОСТЕЙ БЕСКАРДАННОЙ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НА ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ГИРОСКОПАХ В УСЛОВИЯХ ОРБИТАЛЬНОГО ПОЛЕТА

Рассматриваются вопросы обеспечения точности решения задачи ориентации космических аппаратов дистанционного зондирования Земли с помощью бескарданной инерциальной системы на электростатических гироскопах. Приведены используемые методики, модели и алгоритмы, а также некоторые результаты летных испытаний. Указаны пути дальнейшего повышения точности инерциальной системы

Введение

В настоящее время задача определения ориентации большинства отечественных и зарубежных орбитальных космических аппаратов (КА) решается с помощью гироскопических систем ориентации, использующих, как правило, датчики угловой скорости: поплавковые гироскопы, волоконно-оптические и даже микромеханические. При этом для коррекции погрешностей таких систем ориентации необходимы частые дискретные измерения углового положения КА астродатчиками (АД) [1, 2, 3].

Однако существует целый ряд задач, которые требуют обеспечения более высокой точности в определении ориентации КА при повышенной динамике и длительных интервалах между астрокоррекциями (АК).

Именно такие задачи, стоящие перед создателями космических аппаратов дистанционного зондирования земной поверхности, привели к необходимости разработки бескарданной инерциальной системы ориентации БИС-ЭГ на базе электростатических гироскопов со сплошным шаровым ротором (БЭСГ). Разработка такой системы началась в ЦНИИ «Электроприбор» в 1997 г. Система включает в себя три БЭСГ с электростатическим подвесом (ЭСП) и оптико-электронной системой списывания угловой информации (ОСС), блоки разгона/демпфирования ротора, автоматики, электропитания и вычислительные устройства [4].

Начиная с 2004 г. БИС-ЭГ прошла летные испытания и штатную эксплуатацию на 6 КА разных типов. К 2006–2007 гг. главной задачей, требующей при-

Ландау Борис Ефимович. Доктор технических наук, главный конструктор ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (С.-Петербург). Действительный член Академии навигации и управления движением.

Гуревич Станислав Соломонович. И.о. начальника сектора ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

Емельянец Геннаий Иванович. Доктор технических наук, профессор С.-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. Действительный член Академии навигации и управления движением.

Левин Сергей Львович. Кандидат технических наук, начальник отдела ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

Романенко Светлана Георгиевна. Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

ложения основных усилий разработчиков БИС-ЭГ, стала задача обеспечения требуемой точности определения ориентации КА.

В данной статье показан современный уровень погрешностей БЭСГ и пути повышения его точности, описывается режим начальной калибровки БИС-ЭГ по данным астродатчика, приведены уточненные алгоритмы по оценке и компенсации остаточных дрейфов гироскопов БИС-ЭГ в условиях орбитального полета КА и основные результаты летных испытаний системы.

БЭСГ. Современный уровень погрешностей и пути повышения точности

Точность решения задачи ориентации КА зависит как от параметров БЭСГ (точности ОСС и дрейфа ротора гироскопа), 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 противоположных датчиков угла (ДУ) в БЭСГ составляет 40–60 угл. мин. Для повышения точности системы списывания в специализированном вычислителе введена математическая модель, параметры которой калибруются при изготовлении и испытаниях 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 угл.с. 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:

1) **Создание «идеального» ротора.** В настоящее время достигнуты значения осевого дисбаланса менее 0,05 мкм, отклонения от сферичности менее 0,002 мкм, точность нанесения растрового рисунка не хуже 1-2 мкм.

2) **Обеспечение точности сборки сферы электродов ортогонального ЭСП.** Работы в этом направлении в последние годы существенно продвинулись, что позволило выйти на уровень 2-3 мкм.

3) **Обеспечение высокой стабильности положения ротора в электростатическом подвесе.** Кроме высокой стабильности схемой ЭСП предусмотрено два уровня опорных напряжений: для кратковременной работы при действии повышенных ускорений (более 0,5 g) и для штатной работы. Такое решение позволяет снизить уровень многих уведящих моментов при длительных периодах штатной работы, обеспечив высокую перегрузочную способность подвеса при действии плановых ускорений.

Алгоритмические методы связаны, во-первых, с разработкой адекватных математических моделей и их корректным применением в различных режимах и

алгоритмах работы БИС-ЭГ и, во-вторых, с использованием алгоритмов фильтрации, которые позволяют оценить и скомпенсировать дрейф БЭСГ за счет уточнения коэффициентов модели (КМУ) по информации от астродатчика и измерения взаимного положения роторов двух гироскопов.

Основная часть полного дрейфа гироскопа компенсируется с помощью модели ухода, коэффициенты которой подлежат калибровке. Для космических условий используется модель в виде (проекция на ось X корпуса) [5]:

$$\omega_{xkn} = k_0 h_1 \left[-\left(1 - h_1^2\right) h_1^2 + h_2^4 + h_3^4 \right] + h_1 \left(\mu_{12} h_2^2 - \mu_{31} h_3^2 \right) + h_2 h_3 v_{23} \quad . \quad (1)$$

В выражении (1) h_1, h_2, h_3 – направляющие косинусы, характеризующие положение оси вращения ротора относительно корпуса; коэффициент k_0 представляет собой уход под действием момента от взаимодействия 4-й гармоники формы ротора с полем подвеса, коэффициенты μ_{ij} определяют консервативную часть момента от взаимодействия неравножесткого подвеса с радиально несбалансированным ротором, а коэффициенты v_{ij} – диссипативную часть. При этом h_i являются измеряемыми величинами, а коэффициенты k_0, μ_{ij}, v_{ij} подлежат определению/

Начальная калибровка БИС-ЭГ

Перед началом первых летных испытаний системы БИС-ЭГ предполагалось, что в связи со стабильностью и прогнозируемостью КМУ электростатического гироскопа имеется возможность достаточно эффективно использовать значения КМУ, полученные при калибровке на Земле с «пересчетом» на условия космической невесомости. Оставшуюся угловую погрешность предполагалось устранить с помощью относительно редких астрокоррекций.

Однако летные испытания показали необходимость в использовании АК не только для внесения угловых поправок в информацию БИС-ЭГ, но и для решения задач уточнения КМУ гироскопов и определения базовых привязок БИС-ЭГ и АД. В результате работ в этом направлении в 2006–2007 гг. сформировалась методика, реализующая режим калибровки БИС-ЭГ. В данном режиме практически непрерывно используется как информация от астродатчиков, так и измеренные значения взаимного положения роторов двух гироскопов для определения КМУ и углов рассогласования измерительных осей БЭСГ и АД.

Режим калибровки БИС-ЭГ в настоящее время осуществляется при наземной обработке данных телеметрии в основном на начальном этапе летных испытаний. Однако он также повторяется при последующих отключениях/включениях БИС-ЭГ.

В качестве исходных данных используется телеметрическая информация (ТМИ) с данными о направляющих косинусах с дискретностью 30 – 120 с и об «эталонном» кватернионе углового положения связанной с КА системы координат относительно инерциальной (ИСК), построенной на АД, с дискретностью 1-3 мин в течение трех-четырех калибровочных витков. Подробно алгоритм уточнения КМУ и определения матриц привязок с использованием процедуры фильтра Калмана изложен в [5].

Особенности данного алгоритма заключаются в следующем:

- калибруются одновременно два рабочих БЭСГ, на которых осуществляется (в период калибровки) построение ИСК в БИС-ЭГ;
- прогнозирование уходов калибруемых БЭСГ осуществляется в ИСК, однако расчетная модель погрешностей описана в квазиинерциальной системе координат $int_1 int_2 int_3$ (КИСК), дискретно (в моменты коррекции положения БЭСГ) учитывающей прецессию гироскопического трехгранника;
- разностные измерения на уровне направляющих косинусов ортов кинетических моментов ЭСГ с дискретностью T_z формируются в КИСК. При этом используются текущие значения измеренных (в корпусных осях) и расчетных (в ИСК) значений направляющих косинусов ЭСГ_i, а также значения эталонного кватерниона положения КА (от АД);
- для обработки измерений используется алгоритм обобщенного фильтра Калмана (ФК) с обратной связью по всему вектору состояния системы.

На рис. 1–6, в качестве примера приведены результаты наземной обработки калибровочных витков, полученных на КА «Ресурс-ДК», при интервале дискретности «эталонного» кватерниона с АД 3 мин и времени реализации 600 мин. Рабочая пара – «экваториальные» гироскопы БЭСГ1 и БЭСГ3, при этом в качестве опорного принят гироскоп БЭСГ1. Приведены оценки погрешностей привязок ($L_2 = (L_{2_1}, L_{2_2}, L_{2_3})$) измерительных осей гироскопов к осям АД, а также отдельных КМУ БЭСГ как дополнение к их значениям, вычисленным ранее при идентификации методом гармонического анализа по результатам испытаний в предыдущем пуске.

Из рис. 1 видно, что в данном пуске при неуточненных КМУ и отсутствии привязок осей БЭСГ к осям АД погрешности ориентации достигает 80 угл. мин по углам крена и рысканья и 20 мин – по углу тангажа.

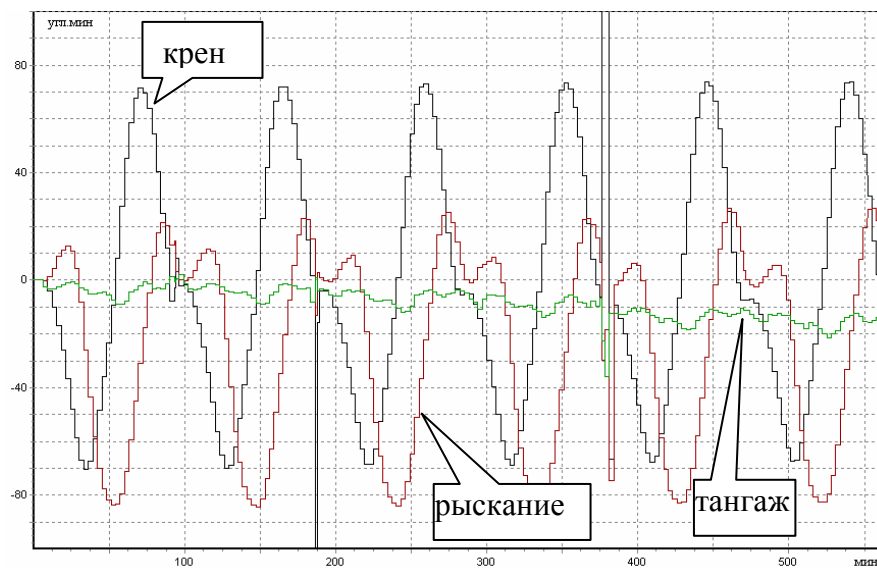


Рис. 1. Начальные погрешности определения параметров ориентации КА относительно орбитальной системы координат

L_2 , угл. мин

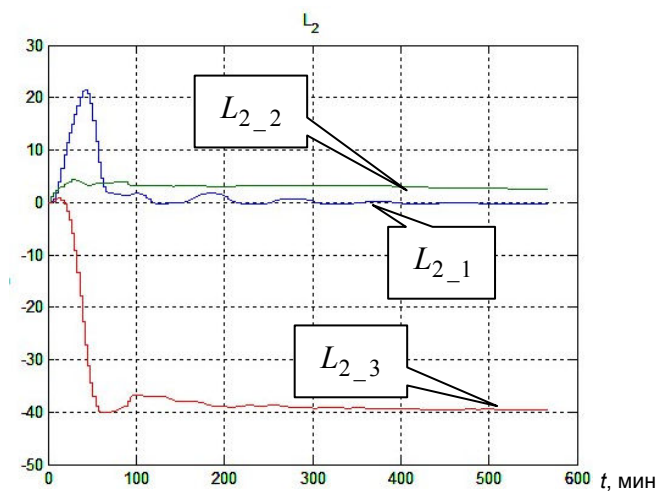


Рис. 2. Оценки погрешностей привязки измерительных осей гироскопа БЭСГЗ к осям АД

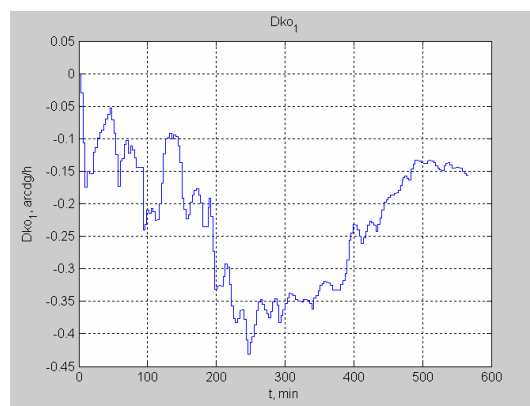


Рис 3 . Оценка погрешности коэффициента k_0 опорного гироскопа БЭСГ1(°/ч)

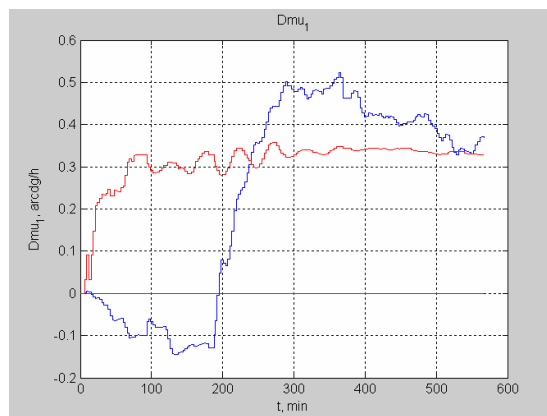


Рис. 4 . Оценки погрешностей коэффициентов m_{12} и m_{31} опорного гироскопа БЭСГ1(°/ч)

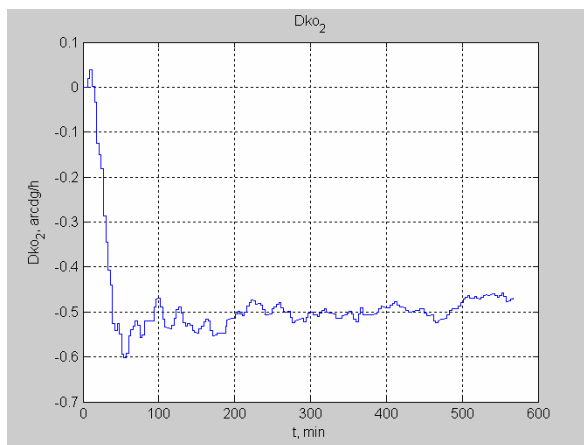


Рис 5. . Оценка погрешности ($^{\circ}/ч$) коэффициента k_0 гироскопа БЭСГЗ

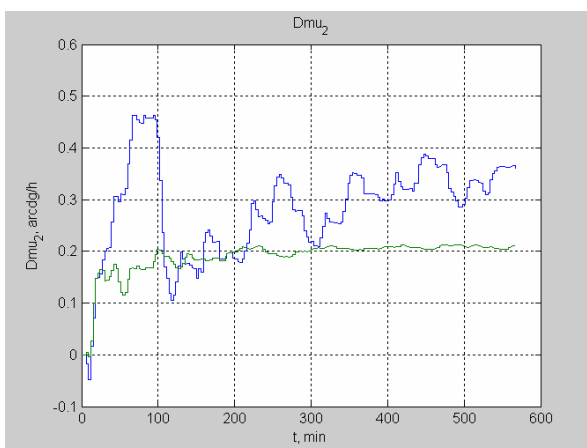


Рис. 6. . Оценки погрешностей ($^{\circ}/ч$) коэффициентов m_{12} и m_{31} гироскопа БЭСГЗ

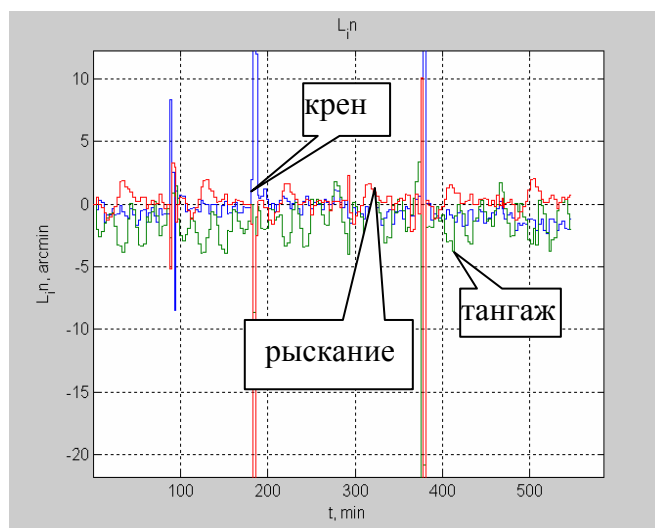


Рис. 7. Погрешности (в угл.мин.) определения параметров ориентации КА относительно ОСК после введения оценок КМУ и погрешностей привязки измерительных осей БЭСГ к осям АД (выбросы вызваны сбоями в ТМИ)

При реализации режима калибровки оценки погрешностей КМУ стремятся к установившимся значениям. Однако имеет место различие в характере переходных процессов. Так, например, достаточно быстро (примерно за 100 мин) оцениваются погрешности привязки измерительных осей БЭСГ к осям АД, время переходных процессов для оценок КМУ гироскопов составляет не менее 400-500 мин (рис. 2–6). Это позволяет сделать вывод о необходимой длительности процесса калибровки на интервале не менее 4-5 витков (по 90-100 мин каждый). Следует заметить, что при наличии только орбитального вращения КА отсутствует полная наблюдаемость КМУ базовых привязок каждого БЭСГ относительно осей АД, а также наблюдаемость КМУ полярного гироскопа. Анализ показывает, что для обеспечения наблюдаемости КМУ и привязок баз необходимо ввести при калибровке дополнительное вращение КА по второй оси (например, по крену).

После ввода оценок КМУ и погрешностей измерительных осей БЭСГ к осям АД погрешности ориентации КА (рис. 7) не превосходит 2-3-х угл. мин и практически не содержит нарастающей (дрейфовой) составляющей.

Необходимо отметить, что использование процедуры наземной калибровки БИС-ЭГ по ТМИ, полученной с борта КА, имеет ряд существенных недостатков:

- сбор информации и использование внешних каналов связи для передачи ТМИ;
- необходимость привлечения к обработке данных высококвалифицированного персонала;
- длительность этих операций (несколько дней) приводит к непродуктивным потерям времени в целевом использовании КА;
- возможность ошибок операторов при подготовке и передаче данных.

Алгоритм вычисления оценок остаточных дрейфов БЭСГ

Летные испытания показали также, что модель (1) не позволяет достигнуть желаемого уровня точности. Поэтому в настоящее время в штатной программе центрального вычислителя БИС-ЭГ работает дополнительный алгоритм, в котором остаточный дрейф ИСК, не скомпенсированный с помощью модели (1), оценивается при текущих астрокоррекциях и компенсируется путем вычисления оценок остаточных дрейфов каждого гироскопа, участвующего в построении ИСК.

Эти оценки $\Delta\varpi_{\text{int}_i_j}$ дрейфов вычисляются в осях квазиинерциальной системы координат $(\text{int}_1 \text{ int}_2 \text{ int}_3)$ [5] при наличии АК, интервал между которыми кратен периоду орбитального обращения КА. Формулы для их вычисления выводятся из линеаризованных уравнений движения гироскопов. Линеаризация осуществлялась относительно следующих значений ортов опорного («полярного» или «экваториального») и «экваториального» БЭСГ [4]:

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

С учетом (2) уходы опорного и «экваториального» гироскопов в осях

$\text{int}_1 \text{int}_2 \text{int}_3$, описываются соответственно следующими приближенными уравнениями

$$\begin{aligned}\frac{\Delta h_{\text{int}1_1}}{\Delta t} &= -\Delta \varpi_{\text{int}3_1} \\ \frac{\Delta h_{\text{int}3_1}}{\Delta t} &= \Delta \varpi_{\text{int}1_1},\end{aligned}\quad (3)$$

и

$$\begin{aligned}\frac{\Delta h_{\text{int}1_2}}{\Delta t} &= \Delta \varpi_{\text{int}2_2} \sin \theta - \Delta \varpi_{\text{int}3_2} \cos \theta \\ \frac{\Delta h_{\text{int}2_2}}{\Delta t} &= -\Delta \varpi_{\text{int}1_2} \sin \theta, \\ \frac{\Delta h_{\text{int}3_2}}{\Delta t} &= \Delta \varpi_{\text{int}1_2} \cos \theta.\end{aligned}\quad (4)$$

Вектор $\Delta \vec{h}_{\text{int}_i} = (\Delta h_{\text{int}1_i}, \Delta h_{\text{int}2_i}, \Delta h_{\text{int}3_i})$ ($i=1,2$) характеризует изменение погрешностей прогнозирования положения орта кинетического момента i -го гироскопа в осях $\text{int}_1 \text{int}_2 \text{int}_3$ за время Δt между АК. Здесь учитывается, что при каждой АК корректируются положения всех гироскопов.

При каждой АК формируются следующие измерения: для опорного гироскопа

$$z1 = \Delta h_{\text{int}_1} = h_{\text{int}_1}^R - h_{\text{int}_1}^{et}, \quad (5)$$

для «экваториального» гироскопа:

$$\begin{aligned}z_{\text{avt}} &= \cos \theta_R - \cos \theta_S \approx \Delta h_{\text{int}2_2}, \\ z2 &= \Delta h_{\text{int}_2} = \bar{h}_{\text{int}_2}^R - \bar{h}_{\text{int}_2}^{et},\end{aligned}\quad (6)$$

Примечание: измерение z_{avt} формируется после коррекции опорного гироскопа по данным АД.

В приведенных выражениях: z_{avt} – скалярное измерение, представляющее собой разность косинусов расчетного θ_R и измеренного θ_S углов между ортами $\vec{h}_i$ векторов $\vec{H}_i$ кинетических моментов опорного ($i=1$) и «экваториального» ($i=2$) гироскопов (разность скалярных произведений соответствующих ортов $\vec{h}_i$); $\bar{h}_{\text{int}_i}^R, \bar{h}_{\text{int}_i}^{et}$ ($i=1, 2$) – расчетные $\bar{h}^R$ (прогнозируемые) и эталонные $\bar{h}^{et}$ значения ортов $\vec{h}_i$ БЭСГ в проекциях на оси $\text{int}_1 \text{int}_2 \text{int}_3$.

Для вычисления $\bar{h}_{\text{int}_i}^R$ и $\bar{h}_{\text{int}_i}^{et}$ используются: прогнозируемые значения $\bar{h}_{\text{in}_i}^R$ ортов $\vec{h}_i$ БЭСГ в осях ИСК; осредненный на интервале 5 мин поправочный кватернион от АД $\delta L_{\text{in}_pr}^{\text{in-et}}$, содержащий погрешности построения ИСК БИС-ЭГ, матрица $C_{\text{in,int}}$ углового положения квазиинерциальной системы координат относительно ИСК, вычисляемая в моменты коррекции положения БЭСГ:

$$\begin{aligned}\vec{h}_{\text{int}_i}^R &= C_{\text{in},\text{int}} \cdot \vec{h}_{\text{in}_i}^R, \\ \vec{h}_{\text{int}_i}^{et} &= C_{\text{in},\text{int}} \cdot \vec{h}_{\text{in}_i}^{et} \\ \vec{h}_{\text{in}_i}^{et} &= C_{\text{in}_et}^{in-pr} \vec{h}_{\text{in}_i}^R,\end{aligned}\tag{7}$$

где $C_{\text{in}_et}^{in-pr}$ – матрица, построенная по поправочному кватерниону $\delta L_{\text{in}_et}^{in-pr}$.

С учетом (3) – (6) выражения для вычисления оценок квазисистематических составляющих дрейфов БЭСГ в осях $\text{int}_1 \text{int}_2 \text{int}_3$ принимают вид:

- для опорного гироскопа:

$$\Delta \varpi_{\text{int}_1_1} = \frac{z_{1_3}}{T_z},$$

$$\Delta \varpi_{\text{int}_2_1} = 0;$$

$$\Delta \varpi_{\text{int}_3_1} = -\frac{z_{1_1}}{T_z},$$

- для «экваториального» гироскопа:

$$\Delta \varpi_{\text{int}_1_2} = -\frac{z_{avr}}{T_z \sin \theta_s},$$

$$\Delta \varpi_{\text{int}_2_2} = \frac{z_{2_1}}{T_z} \sin \theta_s,$$

$$\Delta \varpi_{\text{int}_3_2} = -\frac{z_{2_1}}{T_z} \cos \theta_s.$$

Как видно из приведенных выражений, величины оценок составляющих некомпенсированного дрейфа «экваториального» гироскопа зависят от положения вектора кинетического момента «экваториального» гироскопа относительно опорного гироскопа (от угла θ).

Затем формируются векторы:

$$\Delta \varpi_{\text{int}_1} = \begin{bmatrix} \Delta \varpi_{\text{int}_1_1} \\ 0 \\ \Delta \varpi_{\text{int}_3_1} \end{bmatrix}, \quad \Delta \varpi_{\text{int}_2} = \begin{bmatrix} \Delta \varpi_{\text{int}_1_2} \\ \Delta \varpi_{\text{int}_2_2} \\ \Delta \varpi_{\text{int}_3_2} \end{bmatrix}$$

и проектируются на оси ИСК $\Delta \varpi_{\text{in}_i} = (C_{\text{in},\text{int}})^T \Delta \varpi_{\text{int}_i}$.

Оценки дрейфов вычисляются по серии (обычно по двум или четырем) АК, кратным периоду орбитального обращения КА, как средние значения. Средние значения оценок дрейфов суммируются и как поправки учитываются в уравнениях прогноза: $d\vec{h}_{\text{in}}^R / dt = (\vec{\omega}_{\text{in}} - \sum \Delta \varpi_{\text{in}}) \times \vec{h}_{\text{in}}^R$.

Процедура вычисления оценок некомпенсированных дрейфов БЭСГ проводится автоматически на борту КА.

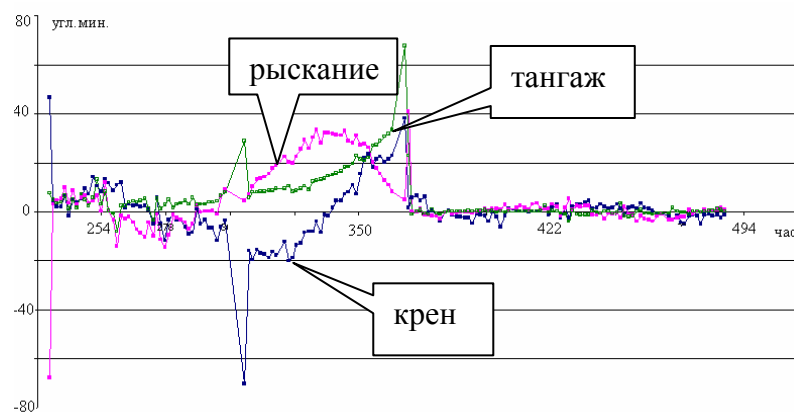


Рис. 8. Результаты АК и погрешности определения параметров ориентации КА относительно ОСК

Эффективность введения дополнительных поправок к дрейфам БЭСГ показана на рис. 8, где приведены результаты АК для одного из КА. Работа БИС-ЭГ в запуске начинается с нулевых КМУ. Через 16 ч после запуска начинают вычисляться поправки к дрейфам. Видно, что на начальном этапе при использовании поправок погрешность уменьшилась в несколько раз (с 70 угл. мин до 5-6 угл. мин.). При прекращении вычисления $\Delta\varpi_{in}$ из-за существенного изменения периода орбитального движения КА (с момента времени 280 ч) погрешность стала возрастать. На интервале времени 301-307 чс проводились контрольные витки (КВ), затем при наземной обработке КВ вычислялись КМУ, которые были введены в БИС-ЭГ в момент времени 382 ч. После ввода КМУ автоматически (на борту КА) вычислялись поправки $\Delta\varpi_{in}$, которые были введены в момент времени 386 ч. Далее погрешности ориентации находились в пределах нескольких угловых минут.

Выводы

1. Отработана методика наземной калибровки КМУ гироскопов и оценки погрешностей привязки измерительных осей БЭСГ к осям астродатчика по полученной в процессе полета телеметрической информации.

2. Совместное использование режима начальной калибровки, определения угловых привязок и процедуры введения дополнительных поправок к дрейфам БЭСГ, вычисляемых по данным астрокоррекций, привело в 2008-2009 гг. к достижению точности решения БИС-ЭГ задачи ориентации КА на уровне 2-3 угл. мин при дискретности ввода поправок через 2-4 витка.

3. Дальнейшее повышение точности БИС-ЭГ связано со следующими направлениями работ:

- повышение точности системы списывания угла в БЭСГ;
- уточнение модели дрейфа БЭСГ;
- повышение точности астрокоррекции;
- реализация режима калибровки БИС-ЭГ 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 из-

- мерительных осей БЭСГ к осям астродатчика и КМУ гироскопов;
- внедрение в БИС-ЭГ вновь разработанного гироскопа с 12-электродным равножестким подвесом [6], что обеспечит повышение стабильности КМУ от запуска к запуску (так, по коэффициенту k_0 в наземных условиях нестabilityность от запуска к запуску составляет $0,1^\circ/\text{ч}$), большую адекватность модели реальному движению при различных взаимных ориентациях корпуса и ротора гироскопа.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №....)

ЛИТЕРАТУРА

1. **Трехосный** волоконно-оптический гироскоп для ракетно-космической техники / Ю.Н. Коркишко [и др.]. // XIII С-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. - СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2006 г. - С. 21-28.
2. **Возможность** построения миниатюрных блоков измерителей угловых скоростей повышенной надежности для космических объектов на базе поплавковых ДУС с использованием современной элементной базы / Л.Я.Калихман [и др.] // XIV С-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. - СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2007. - С. 29-37.
3. **Звездный** координатор БОКЗ-М и перспективы его развития / Г.А. Аванесов [и др.] // XIV С-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. - СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2007. - С.199-205.
4. **Антонов, Ю.Г.** Система определения ориентации космических аппаратов на электростатических гироскопах / Ю.Г. Антонов, Б.Е. Ландау, С.Л. Левин // Материалы III международной конференции-выставки. Малые спутники: новые технологии, миниатюризация, области эффективного применения в XXI веке. 27-31 мая 2002 года, Россия, г. Королев, Московской области – ЦНИИ «Машиностроение». - С. 209-216.
5. **Результаты** калибровки электростатических гироскопов в бескарданной инерциальной системе ориентации / Б.Е. Ландау // XV С-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. - СПб.: ЦНИИ «Электроприбор». - С.122-129.
6. **Бескарданный** электростатический гироскоп с подвесом на двойных электродах / А.П.Буравлев // Гироскопия и навигация. - 2008. - № 4. -С. 17-18.

Статья поступила 22.09.09