УДК 531.383-1:537.2; DOI 10.17285/0869-7035.2019.27.2.136-149

#### С.Г. РОМАНЕНКО, Г.И. ЕМЕЛЬЯНЦЕВ, Б.Е. ЛАНДАУ, С.Л. ЛЕВИН, А.А. МЕДВЕДКОВ

## УТОЧНЕНИЕ МОДЕЛИ ДРЕЙФА БЕСКАРДАННЫХ ЭСГ ДЛЯ УСЛОВИЙ ОРБИТАЛЬНОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Рассматриваются уточнения модели дрейфа бескарданного электростатического гироскопа (ЭСГ) при работе в условиях маневренного орбитального космического аппарата (КА) дистанционного зондирования Земли. Некоторые из них имеют отношение и к наземному использованию ЭСГ. В статье также анализируется режим квазинепрерывной коррекции бескарданной инерциальной системы ориентации (БИСО) на ЭСГ по «сырым» (несглаженным) данным от астродатчика (АД) с использованием алгоритма обобщенного фильтра Калмана. К особенностям решения задач коррекции выходных данных БИСО и калибровки в этом режиме следует отнести отбраковку недостоверных измерений. Описывается алгоритм решения этой задачи.

Модель дрейфа ЭСГ приводится как для режима калибровки системы с целью обеспечения адекватного прогноза уходов ЭСГ на длительном интервале времени, так и для режима квазинепрерывной коррекции в условиях маневрирования КА.

Приводятся результаты обработки данных летных испытаний БИСО и АД на одном из КА.

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

#### Введение

К настоящему времени БИСО на ЭСГ нашла применение на ряде орбитальных КА дистанционного зондирования Земли [1–3], находящихся в орбитальной, инерциальной и произвольной ориентациях.

В состав действующей БИСО входят четыре гироскопа: один находится в «холодном» резерве, три других – в рабочем состоянии. По информации трех рабочих гироскопов строятся три кватерниона угловой ориентации связанной системы координат КА относительно инерциальной системы координат (ИСК), один из которых передается в управляющую вычислительную систему КА и используется в контуре его управления. Гироскопы, на которых строится выходной кватернион, образуют рабочую пару. Две другие пары гироскопов являются резервными.

136

**Емельянцев** Геннадий Иванович. Доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО (С.-Петербург).

**Ландау** Борис Ефимович. Доктор технических наук, главный конструктор, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

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

**Медведков** Андрей Александрович. Научный сотрудник, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО.

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

БИСО на ЭСГ использовалась в разных режимах работы: автономном (без коррекции) в течение длительного промежутка времени (несколько витков), с периодической коррекцией по сглаженным в течение 5 мин сигналам с АД, когда через определённый промежуток времени (один раз на одном или нескольких витках) корректируется выходной кватернион и вырабатываются поправки к дрейфам гироскопов, а также в режиме квазинепрерывной коррекции по данным АД [4]. Режим квазинепрерывной коррекции представляет собой безынерционную процедуру частой коррекции выходных данных БИСО, при этом используются «сырые» значения АД о кватернионе углового положения КА, которые принимаются за эталонные [5].

Для космического применения была разработана детерминированная модель дрейфа бескарданного ЭСГ [6], которая использовалась на одиннадцати КА, работающих в орбитальной ориентации, и на двух КА, работающих в произвольных ориентациях [3]. Вместе с тем результаты летных испытаний БИСО на разных КА показали, что эта модель не вполне адекватна реальным данным [7, 8] и необходимо её совершенствование. Построение адекватной модели дрейфа ЭСГ и процедуры точной калибровки параметров модели становится наиболее актуальной проблемой при решении задач, которые требуют обеспечения высокой точности определения ориентации КА в условиях его повышенной динамики и длительных интервалов между астрокоррекциями. Аналогичная задача решалась и при проведении миссии Probe B [9].

В данной статье уточняется модель дрейфа бескарданных ЭСГ для обеспечения адекватного прогноза их уходов на длительном интервале времени при произвольной ориентации КА и приводятся результаты калибровки предложенной модели дрейфа с использованием данных лётных испытаний БИСО на одном из орбитальных КА.

Предлагается также упрощенное описание дрейфов для ограниченного интервала времени для случаев квазинепрерывной коррекции БИСО на ЭСГ по «сырым» данным от АД в условиях маневренного орбитального КА. Кроме того, в этом режиме с использованием алгоритма обобщенного фильтра Калмана (ОФК) осуществляется отбраковка недостоверных измерений АД, для чего формируются дополнительные измерения и соответствующие критерии с использованием данных как АД, так и резервной пары ЭСГ.

#### 1. Уточнение модели дрейфа бескарданного ЭСГ

#### 1.1. Влияние смещения ротора

Используемая в настоящее время модель дрейфа бескарданного ЭСГ для космического применения записывается в осях  $x_k y_k z_k$  корпуса гироскопа. В частности, проекция дрейфа  $\Delta \omega$  на ось  $x_k$  имеет вид [7]:

$$\Delta \omega_{xk} = h_1 \left[ -\left(1 - h_1^2\right) h_1^2 + h_2^4 + h_3^4 \right] \cdot k_0 + h_1 \left(\mu_{12} h_2^2 - \mu_{31} h_3^2\right) + h_2 h_3 v_{23}, \tag{1}$$

где  $h_i$  (*i* = 1,2,3) – направляющие косинусы орта кинетического момента ротора в корпусной  $x_k y_k z_k$  системе координат;  $k_0$  – коэффициент модели ухода (КМУ), который характеризует моментное воздействие сил подвеса на ротор гироскопа от четвертой (и последующих чётных) гармоник его формы;  $\mu_{ij}$  – коэффициенты, характеризующие консервативную часть момента от взаимодействия нерав-*Гироскопия и навигация. Том 27, № 2 (105), 2019* 137 ножесткого подвеса с радиально несбалансированным ротором, а коэффициенты  $v_{ii}$  – диссипативную часть данного момента.

В выражении (1)  $h_i$  является измеряемой величиной, а коэффициенты  $k_0$ ,  $\mu_{ij}$ ,  $\nu_{ij}$  должны быть получены при стендовой калибровке и при необходимости могут быть уточнены при новом запуске БИСО в процессе эксплуатации.

Первоначально модель дрейфов бескарданных ЭСГ (1) была отработана и использовалась в программном обеспечении БИСО на КА, находящихся в орбитальной ориентации. Тем не менее и в этом случае, как показали результаты летных испытаний, она не в полной мере соответствовала реальному движению КА. Посредством модели (1) компенсировалась основная часть полного дрейфа гироскопа. Остаточный дрейф, не скомпенсированный с помощью модели (1), оценивался при текущих астрокоррекциях, кратных периоду орбитального обращения КА, и компенсировался путём определения оценок остаточных дрейфов гироскопов (коэффициенты  $\Delta \omega_{int}$ ), которые вычислялись в осях квазиинерциальной системы координат (int) [10]. На интервале между астрокоррекциями коэффициенты  $\Delta \omega_{int}$  считались постоянными.

Результаты обработки данных наземных стендовых испытаний гироскопа также показали, что дрейф имеет дополнительные составляющие, не учитываемые моделью (1). Это привело к необходимости поиска причин таких дрейфов. Одной из возможных причин дополнительных дрейфов является смещение ротора в зазоре между ним и электродами, поскольку при регулировке гироскопа ротор устанавливается электроникой подвеса в «электрический центр», который в общем случае может не совпадать с геометрическим центром камеры, что приводит к появлению напряжения смещения вдоль одной из осей симметрии электродов подвеса.

Исходя из того, что напряженности поля между противоположными электродами и ротором должны быть равны

$$E_1 = E_2 \Longrightarrow \frac{U_0 + k \cdot \Delta U_{CM}}{d_0 + \Delta} = \frac{U_0 - k \cdot \Delta U_{CM}}{d_0 - \Delta},\tag{2}$$

получим формулу для смещения ротора в зависимости от напряжения смещения:

$$\Delta = \frac{k \cdot \Delta U_{cM} \cdot d_0}{U_0} \,. \tag{3}$$

В выражениях (2), (3):

 $E_{i(i=1,2)}$  – напряженность поля между противоположными электродами (1, 2) и ротором;

 $U_0$  – опорное напряжение (В);

d<sub>0</sub> – номинальный зазор между ротором и электродами (мкм);

 $\Delta U_{cm}$  – напряжение смещения по осям подвеса (В);

*k* – коэффициент усиления высоковольтного усилителя (в исследуемом случае равен 200);

Δ – смещение ротора в зазоре по каждой из осей (мкм).

Например, для значений  $U_0 = 200$  В и  $d_0 = 30$  мкм смещение будет равно  $\Delta = 3 \cdot 10^{-2} \cdot \Delta U_{cM}$ . При напряжении смещения вдоль оси подвеса, равном 30-40 мВ, смещение ротора вдоль этой оси составляет примерно 1 мкм.

Влияние смещения ротора на моменты, обусловленные несферичностью ротора, рассмотрены в [11]. Показано, что наличие смещения ротора вдоль осей симметрии электродов приводит к возрастанию модуля момента от взаимодействия эллиптичного ротора (вторая гармоника формы ротора) с полем подвеса.

Выведем выражения для дополнительных составляющих уводящих моментов, учитывающие взаимодействие ротора, имеющего нечетные гармоники формы, с полем подвеса в случае наличия смещения ротора в камере. Для этого воспользуемся методом силовых функций для потенциальных и соленоидальных полей [11].

Полагая, что ротор гироскопа есть осесимметричное тело относительно динамической оси вращения, силовую функцию консервативных моментов можно записать в виде [6]:

$$U_{n} = a_{n}r_{0} \left\{ S_{1n} \sum_{j=1}^{3} [f_{2j-1} + (-1)^{n} f_{2j}] P_{n}(h_{j}) + 2\rho_{0} S_{2n} \sum_{j=1}^{3} [f_{2j-1} + (-1)^{n-1} f_{2j}] \lambda_{j} P_{n}(h_{j}) + 2\rho_{0} \frac{(n-1)!}{(n+1)!} S_{3n} \sum_{j=1}^{3} [f_{2j-1} + (-1)^{n-1} f_{2j}] \cdot [(\bar{\lambda}, \bar{h}) - \lambda_{j} h_{j}] \cdot \frac{\partial P_{n}(h_{j})}{\partial h_{j}} \right\},$$

$$(4)$$

где  $a_n$  – амплитудное значение n-ой сферической гармоники в разложении формы ротора по полиномам Лежандра  $P_n(h_j)$ ;  $r_0$  – средний радиус ротора;  $h_j, \lambda_j$  – направляющие косинусы соответственно оси вращения ротора (орт  $\bar{h}$ ) и вектора смещения  $\bar{\rho}$  центра ротора (орт  $\bar{\lambda}$ ) в системе осей, связанных с корпусом ЭСГ и с осями симметрии электродов;  $\rho_0$  – относительное смещение ротора в подвесе;  $f_{2j-1}, f_{2j}$  – плотности пондеромоторных сил на поверхности ротора под противоположными электродами, расположенными на оси j (j=1,2,3);  $S_{in}$  – коэффициенты, определяемые геометрией электродов, в частности

$$S_{2n} = 2\pi r_0^2 \int_{\mu_2}^{\mu_1} \mu P_n(\mu) d\mu , \ S_{3n} = 2\pi r_0^2 \int_{\mu_2}^{\mu_1} (1-\mu^2)^{\frac{1}{2}} P_n^1(\mu) d\mu ,$$
 (5)

где  $P_n^1(\mu) = (1-\mu^2)^{\frac{1}{2}} \frac{d}{d\mu} P_n(\mu)$ ,  $\mu_1 = \cos \nu_1$ ,  $\mu_2 = \cos \nu_2$ ;  $\nu_1, \nu_2$  – угловые размеры электродов;

$$f_{2j-1,2j} = \frac{1}{2} \varepsilon_0 E_{2j-1,2j}^2, \ E_{2j-1,2j} = E_0 \pm \Delta E_j,$$
(6)

где  $\varepsilon_0$ ,  $E_0$  – электрическая постоянная и начальное значение напряженности электрического поля соответственно,  $\Delta E_j$  – приращение напряженности электрического поля, создаваемого электродами *j*-ой оси подвеса.

Силовая функция и возмущающий момент, прикладываемый к ротору, связаны известными соотношениями вида [3]

$$M_{1n} = h_2 \frac{\partial U_n}{\partial h_3} - h_3 \frac{\partial U_n}{\partial h_2},\tag{7}$$

139

Гироскопия и навигация. Том 27, № 2 (105), 2019

при этом составляющие моментов по другим осям определяются круговой перестановкой индексов.

Для гармоники с номером *n* = 1 выражения для дополнительных угловых скоростей дрейфа имеют вид:

$$dop\Delta\omega_{xk}^{1} = \left[ -\left(1 - h_{1}^{2}\right)\lambda_{1} + h_{1}h_{2}\lambda_{2} + h_{1}h_{3}\lambda_{3} \right] \cdot C_{10},$$
  

$$dop\Delta\omega_{yk}^{1} = \left[ -\left(1 - h_{2}^{2}\right)\lambda_{2} + h_{2}h_{3}\lambda_{3} + h_{2}h_{1}\lambda_{1} \right] \cdot C_{10},$$
  

$$dop\Delta\omega_{zk}^{1} = \left[ -\left(1 - h_{3}^{2}\right)\lambda_{3} + h_{3}h_{1}\lambda_{1} + h_{3}h_{2}\lambda_{2} \right] \cdot C_{10},$$
  
(8)

где  $C_{10} = a_1 r_0 2 \rho_0 \varepsilon_0 \frac{U_0^2}{d_0^2} (\Lambda_{21} + \Lambda_{31}) H^{-1}$ ,  $\Lambda_{21} + \Lambda_{31} = 2\pi r_0^2 (\cos v_1 - \cos v_2)$ , H – кинети-

ческий момент гироскопа.

Для гармоники с номером n = 3 получаем:

$$dop\Delta\omega_{xk}^{3} = \left[ -(1-h_{1}^{2})\left(1-5h_{1}^{2}\right)\lambda_{1} + (1-5h_{2}^{2})h_{1}h_{2}\lambda_{2} + (1-5h_{3}^{2})h_{1}h_{3}\lambda_{3} \right] \cdot C_{20} ,$$
  

$$dop\Delta\omega_{yk}^{3} = \left[ -(1-h_{2}^{2})\left(1-5h_{2}^{2}\right)\lambda_{2} + (1-5h_{3}^{2})h_{2}h_{3}\lambda_{3} + (1-5h_{1}^{2})h_{2}h_{1}\lambda_{1} \right] \cdot C_{20} ,$$
  

$$dop\Delta\omega_{zk}^{3} = \left[ -(1-h_{3}^{2})\left(1-5h_{3}^{2}\right)\lambda_{3} + (1-5h_{1}^{2})h_{3}h_{1}\lambda_{1} + (1-5h_{2}^{2})h_{3}h_{2}\lambda_{2} \right] \cdot C_{20} ,$$
  

$$(9)$$

где  $C_{20} = a_3 r_0 2\rho_0 \varepsilon_0 \frac{U_0^2}{d_0^2} 3(\Lambda_{23} - \frac{1}{8}\Lambda_{33}) H^{-1},$  $\Lambda_{23} - \frac{1}{8}\Lambda_{33} = \pi r_0^2 \frac{1}{8} [11(\cos^5 v_1 - \cos^5 v_2) - 14(\cos^3 v_1 - \cos^3 v_2) + 3(\cos v_1 - \cos v_2)].$ 

Выражение для дополнительных дрейфов – это сумма соотношений (8) и (9). Дополнительные коэффициенты модели дрейфа –  $C_{1i} = (C_{10} + C_{20}) \cdot \lambda_i$  и  $C_{2i} = 5C_{20} \cdot \lambda_i (i = 1, 2, 3)$ .

Аналитическая оценка полученных дополнительных коэффициентов дает значения  $C_{ji} = 0.2^{\circ}/4$  (j=1,2), которые были получены для гироскопа со следующими параметрами: величина рабочего зазора  $d_0=30$  мкм; опорное напряжение  $U_0=200$  B; масса ротора  $m = 10^{-3}$  кг; частота вращения ротора  $\omega = 1.8 \cdot 10^5$  об./мин; дисбаланс  $a_1=0.05$  мкм; амплитуда 3-й гармоники  $a_3=0.02$  мкм, относительное смещение ротора в подвесе  $\rho_0=0.1$  (соответствует смещению ротора в камере 3 мкм).

### 1.2. Неравножесткость подвеса

Следует также отметить, что современная модификация бескарданного ЭСГ (гироскоп БЭСГ-М [12]) содержит ортогональную симметричную 12-электродную схему электростатического подвеса, в котором потенциал ротора близок к нулю, что обеспечивает равножесткость каналов подвеса. В связи с этим влияние коэффициентов  $\mu_{ij}$ ,  $v_{ij}$  в выражении (1) на уровень дрейфов современных БЭСГ-М не столь существенно и им можно пренебречь.

Таким образом, для равножесткого подвеса с учетом смещения ротора от центра подвеса детерминированую модель дрейфа ЭСГ для космического применения можно представить в виде:

$$\Delta \omega_{xk} = h_1 \left[ -\left(1 - h_1^2\right) h_1^2 + h_2^4 + h_3^4 \right] \cdot k_0 + \\ + \left[ -\left(1 - h_1^2\right) \cdot C_{11} + h_1 \cdot h_2 \cdot C_{12} + h_1 \cdot h_3 \cdot C_{13} \right] + \\ + \left[ -\left(1 - h_1^2\right) \cdot h_1^2 C_{21} + h_1 h_2^3 C_{22} + h_1 h_3^3 C_{23} \right]$$
(10)

Дополнительные коэффициенты  $C_{ji}$  (как и коэффициент  $k_0$ ) должны быть определены при стендовой калибровке при наземных испытаниях и при полетной калибровке в условиях космической эксплуатации.

Модель (10) дрейфов БЭСГ с учетом погрешностей привязки измерительных осей гироскопов к осям АД (приведенных к осям КА) [4, 5] целесообразно использовать после проведения режима калибровки БИСО для последующего прогнозирования уходов гироскопов на длительном интервале времени (при редких астрокоррекциях).

## 1.3. Упрощенная модель в условиях астрокоррекции

Для реализации режима квазинепрерывной коррекции БИСО по данным АД, с учетом необходимости прогноза уходов БЭСГ на ограниченном интервале времени, может быть использована упрощенная модель в виде суммарных дрейфов  $\Delta \vec{\omega}_{int_i}$  для каждого ЭСГ, описываемых винеровскими процессами [13] в осях так называемой квазиинерциальной системы координат int<sub>1</sub> int<sub>2</sub> int<sub>3</sub>(int) [1]:

$$\Delta \dot{\omega}_{\text{int } j \ i} = w_j, \ \Delta \omega_{\text{int } j \ i}(t_o) = \Delta \overline{\omega}_{\text{int } j \ o} \ (j = 1, 2, 3), \tag{11}$$

где  $w_j$  – входные шумы с известными ковариациями,  $\Delta \overline{\omega}_{int j_o}$  – случайные величины с известными дисперсиями.

Модель (11) может быть использована в качестве самостоятельной, если по каким-то причинам на КА не был реализован режим калибровки коэффициентов модели (10). Кроме того, эти дрейфы  $\Delta \omega_{int j_i}$  могут дополнять основную модель (10).

# 2. Особенности математического описания задачи совместной обработки данных БИСО на ЭСГ и АД

При работе БИСО на КА информация от астродатчиков используется для решения задачи калибровки БИСО (определения КМУ и базовых привязок БИСО и АД), а также для внесения угловых поправок в выходную информацию БИСО как по осредненным данным один раз на одном или нескольких витках, так и по «сырым» данным в течение небольшого промежутка времени (несколько минут). Последний вариант коррекции выходных данных БИСО называется режимом квазинепрерывной астрокоррекции.

Совместной обработке данных БИСО на ЭСГ и АД посвящены работы [4, 5, 10]. Тем не менее во всех этих работах не рассматривался режим квазинепрерывной астрокоррекции БИСО. Рассмотрим особенности совместной обработки данных БИСО на ЭСГ и АД в этом режиме.

Реализацию режима квазинепрерывной астрокоррекции будем рассматривать как решение задачи фильтрации с использованием алгоритма ОФК, подобно тому как реализован режим начальной калибровки БИСО при ее запуске на борту КА [8].

Гироскопия и навигация. Том 27, № 2 (105), 2019

Рассмотрим задачу одновременной отбраковки недостоверных измерений в гироскопах и астродатчиках. При обработке данных БИСО на ЭСГ и АД используется информация со следующих трех подсистем: рабочая пара ЭСГ БИСО с кватернионом  $L_{in,c}^{pr1}$ , резервная пара ЭСГ с кватернионом  $L_{in,c}^{pr2}$ , АД с кватернионом  $L_{in,c}^{et}$ .

Для определения сбоя в одной из подсистем на каждом шаге поступления выходных данных формируются следующие измерения:

$$\delta L_{1_2} = L_{in,c}^{pr1} \circ (L_{in,c}^{pr2}), \delta L_{1_3} = L_{in,c}^{pr1} \circ (L_{in,c}^{et}), \delta L_{2_3} = L_{in,c}^{pr2} \circ (L_{in,c}^{et}),$$
(12)

где  $(L_{in,c})$  – кватернион, сопряженный  $L_{in,c}$ .

Определить подсистему, в выходных данных которой произошел сбой, позволяет условие  $\delta L_{i_j} \ge \delta L_{dop}$  для двух измерений, где  $\delta L_{dop}$  – допустимое значение кватерниона погрешностей. Если это  $L_{in,c}^{pr1}$ , то на выход БИСО поступает кватернион от резервной пары. Если это  $L_{in,c}^{et}$ , то наряду с автономными измерениями ( $z_{avt}$ ,  $z_1$ ) дополнительно анализируются измерения ( $z_2...z_5$ ), построенные с использованием информации с АД [8, 15]:

$$z_{avt} = (\vec{h}_{in_{-1}}^{R} \bullet \vec{h}_{in_{-2}}^{R}) - (\vec{h}_{b_{-1}}^{S} \bullet \vec{h}_{b_{-2}}^{S}) = \cos \theta_{R} - \cos \theta_{S};$$

$$z_{1} = \sin \theta_{R} \cdot \Delta h_{int_{3-1}}^{R} + \Delta h_{int_{2-2}}^{R} + v_{avt};$$

$$z_{11} = z_{2} = \Delta h_{int_{1-1}}^{R} - \Delta h_{int_{1-1}}^{et};$$

$$z_{31} = z_{3} = \Delta h_{int_{3-1}}^{R} - \Delta h_{int_{3-1}}^{et};$$

$$z_{12} = z_{4} = \Delta h_{int_{1-2}}^{R} - \Delta h_{int_{1-2}}^{et};$$

$$z_{22} = z_{5} = -\sin \theta_{R} \cdot \Delta h_{int_{3-1}}^{R} - \Delta h_{int_{2-2}}^{et};$$
(13)

где  $v_{avt} = -\sin \theta_R \cdot \Delta h_{int_3_1}^{et} - \Delta h_{int_2_2}^{et}$ ;

 $\theta_R, \theta_s$  — расчетное и измеренное значения углов между векторами кинетических моментов гироскопов опорного (*i* = 1) и второго в паре (*i* = 2);

 $\Delta h_{\text{int}\,j_{-}i}^{et}$  (j = 1, 2, 3), (i = 1, 2) – погрешности формирования с использованием данных АД  $L_{in,c}^{et}$  ( $C_{c,in}^{et}$ ) эталонных значений ортов  $\vec{h}_{\text{int}_{-}i}^{et}$  ЭСГ<sub>i</sub>;

 $\Delta h_{\text{int}_i}^R$  – погрешности прогнозирования текущих значений ортов  $\bar{h}_{\text{int}_i}^R$  ЭСГ<sub>i</sub> в проекциях на оси квази-ИСК int<sub>1</sub> int<sub>2</sub> int<sub>3</sub>;

 $\vec{h}_{in_{in_{in_{in}}}}^{R}$  – расчетные значения направляющих косинусов в осях инерциальной системы координат (*in*);

h<sup>s</sup><sub>b</sub> – значения направляющих косинусов по списыванию.

Измерения (13) дополнительно анализируются в соответствии с критерием, сформированным с использованием ковариационного канала ОФК:

$$\sigma_{z(k+1)} = sqrt(diag(H_{k+1}P_{k/k+1}H_{k+1}^{T} + R_{k+1})),$$
  
$$abs(z_{k+1}) \le k_d \sigma_{z(k+1)},$$
 (14)

где  $\sigma_{z(k+1)}$  – расчетные значения среднеквадратических погрешностей измерений  $z_{k+1}$  (13);  $P_{k/k+1}$  – прогнозируемое на шаге  $T_z$  измерений значение ковариационной матрицы ОФК; квантиль  $k_d = 4...6$ .

При  $abs(z_{k+1}) \ge k_d \sigma_{z(k+1)}$  данные от АД бракуются, измерения (13) обнуляются и в систему управления КА поступают данные от пары ЭСГ БИСО, работающей в автономном режиме.

#### 3. Результаты летных испытаний

Для подтверждения эффективности предложенной модели дрейфа использовались данные летных испытаний БИСО (прибора БИС-ЭГ) на одном из орбитальных КА, полученные по телеметрии. КА в ходе работ по калибровке коэффициентов модели БИСО, находясь в солнечной ориентации, вращался последовательно вокруг одной из корпусных осей с периодом 60 мин и изменением ориентации (на 3 ч). Передача данных о движении ортов кинетических моментов ЭСГ в корпусных осях (направляющих косинусов), напряжениях по осям подвеса роторов гироскопов и эталонном кватернионе от АД осуществлялась с дискретностью 60 с. На борту КА калибровка проводилась в автоматическом режиме с использованием модели (1).

По этим данным на Земле проведена камеральная обработка массивов, интерполированных на рабочую частоту 8 Гц, в пакете MATLAB (Simulink) с использованием приведенного выше алгоритмического обеспечения. Разностные измерения формировались с дискретностью 1 мин.

Результаты калибровки БИСО на контрольных витках при описании дрейфов каждого ЭСГ из рабочей пары моделями вида (1) и (10) с учетом матрицы привязок измерительных осей гироскопов к осям КА приведены на рис. 1–5. При этом коэффициенты  $\mu_{ij}$ ,  $v_{ij}$  в (1) были приняты нулевыми, а для отбраковки недостоверных измерений использовались критерии (12), (14).



Рис. 1. Исходные разностные измерения (угл. мин) вида (13)

Исходные разностные измерения  $z_{2i}$  вида (13) с учетом замыкания оценок ОФК в обратной связи на каждом шаге формирования измерений приведены на рис. 1. В них присутствуют существенные сбои и скачки. Измерения (13), от-

Гироскопия и навигация. Том 27, № 2 (105), 2019

корректированные в соответствии с критерием (14) и реально поступающие в обработку ОФК, приведены на рис. 2 ( $Z_r$ ). Видно, что алгоритм отбраковки не-корректных измерений выполняет свою задачу.



Рис. 2. Измерения (угл. мин) (13), корректируемые в соответствии с критерием (14) и поступающие в обработку ОФК

Оценки КМУ ЭСГ из уточненной модели (10) приведены на рис. 3, *а*–*в*. За время калибровки значения относительных СКП ( $\sqrt{P/P_o}$ ) погрешностей оценок коэффициентов падают до уровня 0,3-0,6 для  $\Delta \tilde{C}_{j_i}$  при их начальном значении 0,1 °/ч (рис. 4) и 0,03-0,05 для  $\Delta \tilde{k}0_i$  при начальном значении 0,3 °/ч. При этом время переходного процесса составляет около 6-8 ч. Погрешности прогнозирования в осях квазиинерциальной системы координат уходов опорного ЭСГ-1 в автономном режиме с учетом результатов его калибровки приведены на рис. 5 (не превосходит 0,005°/ч), что свидетельствует о соответствии предложенной модели (10) дрейфов гироскопа реальным данным.

Погрешности решения задачи ориентации в режиме квазинепрерывной астрокоррекции с моделью (11) для суммарных дрейфов  $\Delta \vec{\omega}_{int}$  *і* приведены на рис. 6.



Рис. 3, *а*. Оценки (°/ч) погрешностей  $\Delta k_0$  априорных значений коэффициента  $k_0$  (*синяя кривая* – для опорного ЭСГ-1, *зеленая кривая* – для ЭСГ-2 и рабочей пары YZ)



Рис. 3, б. Оценки (°/ч) погрешностей  $\Delta \overline{C}_j$  априорных значений дополнительных коэффициентов  $\overline{C}_j$  ( $j = x_k - Cuh., y_k - 3en., z_k - \kappa p.$ ) для опорного ЭСГ



Рис. 3, *в*. Оценки (°/ч) погрешностей  $\Delta \overline{C}_j$  априорных значений дополнительных коэффициентов  $\overline{C}_j$  ( $j = x_k - cuh., y_k - 3en., z_k - \kappa p$ .) для ЭСГ-2 из рабочей пары



Рис. 4. Значения относительных СКП (  $\sqrt{P/P_o}$  ) погрешностей оценок  $\Delta \tilde{\vec{C}_j}$  (  $j = x_k - cuh., y_k - 3en., z_k - \kappa p$ .) для ЭСГ-2

Гироскопия и навигация. Том 27, № 2 (105), 2019



Рис. 5. Погрешности (угл. мин) прогнозирования в осях квази-ИСК уходов опорного ЭСГ-1 в автономном режиме (синяя кривая –  $\Delta \vec{h}_{int1-1}^R$ , зеленая кривая –  $\Delta \vec{h}_{int3-1}^R$ )



Рис. 6. Погрешности (угл. мин) ориентации КА по рысканью (*синяя кривая*), тангажу (*зеленая кривая*) и крену (*красная кривая*) в режиме квазинепрерывной коррекции

Таким образом, показано, что уточненная модель хорошо калибруется и позволяет повысить точность определения ориентации КА. Следует отметить, что приведенное выше моделирование выполнено для участка, в котором КА находился в орбитальной ориентации.

На рис. 7 приведены графики погрешности определения углов ориентации в осях инерциальной системы координат без учета дополнительных уводящих моментов при использовании модели (1) (без учета коэффициентов  $\mu_{ij}$ ,  $\nu_{ij}$ ) и при нахождении КА в различных ориентациях. Привязки и КМУ были определены при калибровке гироскопов, приведенной в предыдущем разделе, и учтены при алгоритмической компенсации дрейфа.

На рис. 8 приведены графики погрешности определения углов ориентации в осях инерциальной системы координат с учетом дополнительных уводящих моментов при использовании модели (10).



Рис. 7. Погрешность углов определения ориентации в осях инерциальной системы координат без учета дополнительных уводящих моментов. По горизонтальной оси – время, час; по вертикальной – погрешность, угл. мин



Рис. 8. Погрешность определения углов ориентации в осях инерциальной системы координат с учетом дополнительных уводящих моментов. По горизонтальной оси – время, час; по вертикальной – погрешность, угл. мин

Из приведенных рисунков видно, что без учета дополнительных моментов дрейфовая составляющая погрешности ориентации на анализируемом участке полета КА в различных ориентациях составляла примерно 0,026°/ч, при учете – 0,005°/ч, т.е. может быть уменьшена примерно в 5 раз.

#### Выводы

1. Предложена уточненная модель дрейфа бескарданного ЭСГ, обеспечивающая прогнозирование его уходов с повышенной точностью на длительном интервале времени в условиях маневренного КА. Положительный эффект подтвержден апостериорной обработкой полетных данных.

2. При квазинепрерывном использовании информации от АД для коррекции БИСО на ЭСГ обеспечиваются условия для эффективной отбраковки недостоверных измерений в соответствии с предложенными критериями. При этом допустимо упрощенное описание нестабильности дрейфов ЭСГ на ограниченном интервале времени винеровскими процессами в осях квазиинерциальной системы координат.

Гироскопия и навигация. Том 27, № 2 (105), 2019

#### ЛИТЕРАТУРА

- Аншаков Г.П., Кирилин А.Н., Лапутин Ю.А. и др. Космический комплекс дистанционного зондирования Земли высокого линейного разрешения на местности «Ресурс-ДК» // Труды 4-й Международной конференции «Авиация и космонавтика–2005». М., 2005. С. 94–95.
- Аншаков Г.П., Мантуров А.И., Усталов Ю.М., Горелов Ю.Н. Управление угловым движением космических аппаратов дистанционного зондирования // Полет. 2006. №6. С. 12–18.
- Аншаков Г.П., Макаров В.П., Мантуров А.И., Мостовой Я.А. Методы и средства управления в высокоинформативном наблюдении Земли из космоса // XIV Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. Санкт-Петербург, 2007. С. 165–173.
- Аншаков Г.П., Залялова Р.Г. Мостовой Я.А., Типухов В.А. Квазинепрерывная астрокоррекция инерциальных датчиков памяти ДЗЗ // Сборник трудов XV Юбилейной международной конференции по интегрированным навигационным системам. Санкт-Петербург, 2008. С. 304–311.
- Аванесов Г.А., Форш А.А., Бессонов Р.В., Зиман Я.Л., Куделин М.И., Залялова Р.Г. Звездный координатор БОКЗ-М и перспективы его развития // XIV Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. Санкт-Петербург, 2007. С. 199–205.
- Буравлев А.П., Ландау Б.Е., Левин С.Л. Романенко С.Г. Модель дрейфа бескарданного электростатического гироскопа и идентификация ее параметров // Актуальные проблемы авиационных и аэрокосмических систем: процессы, модели, эксперимент. 2002. №1 (13).
- Ландау Б.Е., Гуревич С.С., Емельянцев Г.И., Левин С.Л., Романенко С.Г., Одинцов Б.В. Результаты калибровки электростатических гироскопов в бескарданной инерциальной системе ориентации // XV Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. Санкт-Петербург, 2008. С. 122–129.
- Ландау Б.Е., Левин С.Л, Гуревич С.Г., Емельянцев Г.И., Завгородний В.И., Романенко С.Г., Одинцов Б.В. Наземная отработка методики полетной калибровки БИСО на ЭСГ для орбитальных космических аппаратов с произвольной ориентацией // 19<sup>th</sup> Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, S.-Petersburg, 2012, pp. 127–135.
- 9. Buchman, S., Lipa, J.A., Keiser, G.M., Muhlfelder, B., and Turneaure, J.P., The Gravity Probe guroscope, Classical and Quantum Gravity, 2015, 32.
- 10. Ландау Б.Е., Гуревич С.С., Емельянцев Г.И., Левин С.Л., Романенко С.Г. Калибровка погрешностей бескарданной инерциальной системы на ЭСГ в условиях орбитального полета // Гироскопия и навигация. 2010. №1 (68). С. 36–46.
- 11. **Мартыненко Ю.Г.** Движение твёрдого тела в электрических и магнитных полях. М.: «Наука», 1988.
- 12. Буравлев А.П., Кузин В.М., Ландау Б.Е., Сумароков В.В. Бескарданный электростатический гироскоп с подвесом на двойных электродах // XXVI конференция памяти Н.Н. Острякова. СПб, 2008. С. 17–18.
- Крамер Г.К., Лидбеттер М. Стационарные случайные процессы (свойства выборочных функций и их приложения). М.: Издательство «Мир», 1969.
- 14. **Емельянцев Г.И., Степанов А.П.** Интегрированные инерциально-спутниковые системы ориентации и навигации. СПб., 2016. 393 с.
- Gusinsky, V.Z., Lesyuchevsky, V.M., Litmanovich, Yu.A., Calibration and Alignment of Inertial Navigation Systems with Multivariate Error State Vector, 4<sup>th</sup> Saint-Petersburg International Conference on Integrated Systems, 26-28 May 1987, pp. 371–378.

Romanenko, S.G., Emel'yantsev, G.I., Landau, B.E., Levin, S.L., and A. A. Medvedkov (Concern CSRI Elektropribor, JSC, ITMO University, St. Petersburg, Russia)

Refinining the Drift Model of a Strapdown ESG for Orbital Spacecraft, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2019, vol. 27, no. 2 (105), pp. 136–149.

*Abstract.* Refinement of the electrostatic gyroscope (ESG) drift model aboard an orbital maneuverable satellite for remote sensing of the Earth's surface is considered. Some changes of the drift model also hold for the ESG ground-based applications. The paper also analyzes the quasi-continuous correction mode of the ESG-based strapdown inertial attitude reference system (SIARS) using raw (unsmoothed) data from the star tracker and the extended Kalman filter (EKF) algorithm. A special

feature of solving the problem of SIARS output data correction and the calibration problem in this mode is rejection of incorrect measurements. The algorithm for this problem solution is described. The ESG drift model is given both for the SIARS calibration mode in order to ensure an adequate prediction of ESG drifts over a long time interval and for the quasi-continuous correction mode under spacecraft maneuvering conditions. The results of data processing of the flight tests of the SIARS and the star tracker aboard one of the spacecraft are discussed.

Key words: electrostatic gyroscope, inertial attitude reference system, star tracker, orbital spacecraft.

#### REFERENCES

- Anshakov, G.P., Kirilin, A.N., Laputin, Yu.A. et al., Space complex Resurs-DK for remote sensing of the Earth with high linear resolution, *Trudy 4 mezhdunarodnoi konferentsii aviatsiya i kosmonavti*ka–2005 (Proc. 4th Int. Conf. Aviation and Cosmonautics–2005), Moscow: 2005, pp. 94–95.
- Anshakov, G.P., Manturov, A.I, Ustalov, Yu.M., and Gorelov, Yu.N., Control of the angular motion of the remote sensing satellites, *Polet*, 2006, no. 6, pp. 12–18.
- Anshakov, G.P., Makarov, V.P., Manturov, A.I., and Mostovoi, Ya.A., Techniques and facilities to control high-resolution imaging of the Earth from space, *XIV St. Petersburg Int. Conf. on Integrated Navigation Systems*, St. Petersburg: Elektropribor, May 28-30, 2007, pp.178–185.
- Anshakov, G.P, Zalyalova, R.G., Mostovoi, Ya.A., and Tipukhov, V.A., Quasi-continuous star monitoring of inertial sensors on Earth remote sensing satellites. XV St. Petersburg Int. Conf. on Integrated Navigation Systems, St. Petersburg: Elektropribor, May 26-28, 2008, pp. 311–318.
- Avanesov, G.A., Forsh, A.A., Bessonov, R.V., Ziman, Ya.L., Kudelin, M.I., and Zalyalova, R.G., BOKZ-M star tracker and its evolution, *XIV St. Petersburg Int. Conf. on Integrated Navigation Systems*, St. Petersburg: Elektropribor, May 28-30, 2007, pp. 219–224.
- 6. Buravlev, A.P., Landau, B.E., Levin, S.L. and Romanenko S.G., A drift model of a strapdown electrostatic gyroscope and identification of its parameters, *Aktual'nye problemy aviatsionnykh i aerokosmicheskikh sistem: protsessy, modeli, eksperiment* (Present-day problems of aviation and aerospace systems: processes, models, and experiment), no. 1 (13), 2002.
- Landau, B.E., Gurevich, S.S., Emel'yantsev, G.I., Levin, S.L., Romanenko, S.G., and Odintsov, B.V., The results of calibration of electrostatic gyroscopes in a strapdown attitude reference system, XV St. Petersburg Int. Conf. on Integrated Navigation Systems, St. Petersburg: Elektropribor, May 26–28, 2008, pp. 132–138.
- Landau, B.E., Levin, S.L., Gurevich, S.G., Emel'yantsev, G.I., Zavgorodnii, V.I., Romanenko, S.G., and Odintsov, B.V., Strapdown inertial attitude reference system for arbitrary oriented orbital spacecraft: Optimizing the calibration method in ground conditions. *19th St. Petersburg Int. Conf. on Integrated Navigation Systems*, St. Petersburg: Elektropribor, May 29-30, 2012, pp. 127–135.
- 9. Buchman, S., Lipa, J.A., Keiser, G.M., Muhlfelder, B., and Turneaure, J.P., The Gravity Probe Gyroscope, *Classical and Quantum Gravity*, 32 (2015), no. 22, 224004.
- 10. Landau, B.E., Gurevich, S.S., Emel'yantsev, G.I., Levin, S.L., and Romanenko, S.G., Error calibration of an ESG-based strapdown inertial system under orbital flight conditions, *Giroskopi-ya i Navigatsiya*, 2011, no. 1 (68), 2010, pp. 36–46.
- 11. **Martynenko**, **Yu.G.**, *Dvizhenie tverdogo tela v elektricheskikh i magnitnykh polyakh* (Solid Body Motion in Electric and Magnetic Fields), Moscow: Nauka, 1988.
- 16. **Buravley, A.P., Kuzin, V.M., Landau, B.E., and Sumarokov, V.V.**, A strapdown electrostatic gyroscope with a suspension on double electrodes, *Materialy 26 konferentsii pamyati N.N. Ostryakova* (Proc. 26th Conf. in Memory of N.N. Ostryakov), St. Petersburg: Elektropribor, 2008, pp. 17–18.
- 17. **Kramer, G.K. and Lidbetter, M.,** *Statsionarnye sluchainye protsessy (svoistva vyborochnykh funktsii i ikh prilozheniya* (Stationary Random Processes (Properties of Sample Functions and Their Applications). Moscow: Mir, 1969.
- 18. **Emel'yantsev, G.I. and Stepanov, A.P.**, *Integrirovannye inertsial'nye sputnikovye sistemy orientatsii i navigatsii* (Integrated INS/satellite orientation and navigation systems), St.Petersburg: Elektropribor, 2016.
- Gusinsky, V.Z., Lesyuchevsky, V.M., and Litmanovich, Yu.A., Calibration and *alignment* of inertial navigation systems with multivariate error state vector, 4<sup>th</sup> St. Petersburg Int. Conf. on Integrated Navigation Systems, St. Petersburg: Elektropribor, May 26–28, 1987, pp. 371–378.

Материал поступил 08.04.2019

Гироскопия и навигация. Том 27, № 2 (105), 2019