

УДК 531.36 + 629.78

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОРИЕНТАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ МОНИТОРИНГА ЗЕМЛИ В ПОЛЁТЕ

© 2012 Р. Н. Ахметов, А. В. Соллогуб, В. П. Макаров, А. А. Головченко, А. В. Филатов

Государственный научно-производственный ракетно-космический  
центр «ЦСКБ-Прогресс», г. Самара

Рассмотрены вопросы реализации полётной калибровки бесплатформенной инерциальной системы ориентации в части оценки взаимного положения осей измерителя угловой скорости и астроизмерительного базиса системы управления ориентацией, а также вопросы определения и учёта погрешностей измерителя угловой скорости. Предложен алгоритм полётной геометрической и параметрической калибровки этого измерителя.

*Измеритель угловой скорости, геометрическая и параметрическая полётная калибровка, взаимное положение осей, астроизмерительный базис, бортовая аппаратура, система управления ориентацией.*

### Введение

При управлении автоматическими космическими аппаратами мониторинга Земли (КА МЗ) одной из центральных является задача определения углового положения в пространстве (ориентации) осей КА МЗ в обеспечение требуемой высокой точности наведения целевой аппаратуры (ЦА) на наблюдаемые наземные объекты. На многих современных КА эта задача решается бесплатформенной инерциальной системой ориентации (БИСО). Принцип работы БИСО заключается в формировании данных об угловом положении КА по информации измерителя угловой скорости (ИУС) об абсолютной угловой скорости КА и периодической её коррекции по информации от астродатчиков (АД). Погрешности измерений, которые даёт бортовая аппаратура (БА), составляют единицы угловых секунд, а погрешности ориентации КА МЗ – на порядок хуже вследствие рассогласования осей БА в полёте и её систематических составляющих погрешностей. Это обусловлено как погрешностями изготовления конструкции КА и взаимной установки БА (угловые минуты), так и эксплуатационными условиями на участке выведения КА (удары и вибрагрузки от раке-

ты) и периодическими (витковыми) изменениями температурных градиентов в полёте. Поэтому повышение точности ориентации КА связывается не только с созданием более совершенных его конструкций, но и с разработкой способов (прямых и алгоритмических) определения в полёте текущего взаимного положения осей БА, систематических составляющих погрешностей и их учёта в процессе управления.

Наиболее известные подходы к решению задачи калибровки базируются на проведении серии плоских калибровочных разворотов КА по каждому каналу на углы от  $180^\circ$  до  $360^\circ$ , получении измерений угловой скорости по информации ИУС и АД, оценивании их невязок с последующим вычислением погрешностей [1]. Их общим недостатком является большая длительность процесса, что не только снижает производительность КА, но и обуславливает зависимость результатов калибровки от температурной нестабильности конструкции КА.

В настоящей работе предлагается алгоритм полётной геометрической и параметрической калибровки центрального элемента современных БИСО - измерителя угловой скорости, отличающийся малой длительностью процесса калибровки, достигаемой вследствие уменьшения не-

обходимых углов поворотов (до ±20 градусов), что, в свою очередь, также позво-

ляет совмещать калибровку с целевой работой КА.



Рис. 1. Структурная схема БИСО

### Общая схема бесплатформенной системы ориентации

Вариант структурной схемы БИСО КА типа «Ресурс-ДК» представлен на рис. 1.

АД обеспечивает прецизионное определение положения осей *OXYZ* своей приборной системы координат ( $ПСК_{АД}$ ) в инерциальной системе координат (ИСК), которая физически реализуется бортовым каталогом звёзд (прямое восхождение и склонение звёзд) на эпоху  $T_0$ . Внутренняя система координат АД ( $ВнСК_{АД}$ ) определяется положением плоскости фотоприёмника изображений звёзд. Угловые расстояния между направлениями на центры зафиксированных изображений звёзд сравниваются с углами между направлениями на звёзды по бортовому каталогу, что приводит к их опознаванию (с погрешностью около 1 угл. с). В результате становится известным кватернион ориентации осей  $ВнСК_{АД}$  относительно ИСК. Приборная система координат АД фиксируется посадочной площадкой прибора.

ИУС предназначен для измерения абсолютной угловой скорости КА при его угловых движениях. Конструктивно ИУС представляет собой моноблок, жёстко закреплённый на корпусе КА и включающий в себя три и более чувствительных элемента (ЧЭ) - одноосных измерителей

угловой скорости. Наиболее простым является ИУС с тремя ЧЭ, оси чувствительности которых ортогональны и совпадают с осями приборной системы координат (ПСК) ИУС.

Алгоритм съёма информации с АД обеспечивает получение данных от АД в соответствии с протоколом информационного обмена.

Алгоритм съёма информации с ИУС обеспечивает получение данных (угловой скорости) от ИУС в соответствии с протоколом информационного обмена и проецирование её на оси связанной системы координат (ССК) КА.

Алгоритм определения ориентации астроизмерительного базиса (АИБ) - ортогональной системы координат, построенной по информации «виртуального» АД [2], обеспечивает формирование информации об его угловом положении в ИСК ( $Λ_{ИСК}^{АИБ}$ ) по информации об угловом положении ПСК АД в ИСК ( $Λ_{ИСК}^{ПСК_{АД}}$ ).

Алгоритм определения ориентации КА обеспечивает формирование информации об угловом положении КА в ИСК с частотой работы системы определения ориентации. Текущее угловое положение КА ( $Λ_t$ ) определяется выражением:

$$Λ_t = Λ_{t-Δt} + ΔΛ^n, \tag{1}$$

где  $\Lambda_t$  и  $\Lambda_{t-\Delta t}$  - кватернионы углового положения КА на момент окончания текущего и предыдущего периода работы системы;

$\Delta\Lambda^n$  - приращение кватерниона, определяющее изменение углового положения КА за текущий период работы системы  $\Delta t$ , по измерениям ИУС.

Приращение кватерниона ( $\Delta\Lambda^n$ ) определяется по информации о проекциях средней за период работы системы абсолютной угловой скорости вращения:

$$\begin{aligned} \Delta I_0 &= \cos \frac{|w| \cdot \Delta t}{2}, \\ \Delta I_1 &= \frac{w_x}{|w|} \sin \frac{|w| \cdot \Delta t}{2}, \\ \Delta I_2 &= \frac{w_y}{|w|} \sin \frac{|w| \cdot \Delta t}{2}, \\ \Delta I_3 &= \frac{w_z}{|w|} \sin \frac{|w| \cdot \Delta t}{2}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\Delta I_0, \Delta I_1, \Delta I_2, \Delta I_3$  - элементы кватерниона  $\Delta\Lambda$ ;

$w_x, w_y, w_z$  - проекции вектора средней за период работы системы угловой скорости на оси ПСК ИУС.

Для расчёта кватерниона (1), определяющего текущее угловое положение КА, необходимо знание его начального значения.

Начальному значению кватерниона  $\Lambda_{t-\Delta t}$  присваивается значение кватерниона ориентации ( $\Lambda_{\text{ИСК}}^{\text{АИБ}}$ ), полученное алгоритмом построения астроизмерительного базиса по информации с астродатчиков.

Следует отметить, что АД определяют ориентацию своих приборных осей относительно ИСК непосредственно, а ИУС – косвенно, путём интегрирования измеряемых значений угловых скоростей. При астрокоррекции в качестве эталонных значений углового положения КА используются данные с АИБ.

Наибольшие точности определения положения КА могут достигаться при использовании информации, получаемой с двух синхронно работающих АД, установленных на КА под разными углами. Но временной диапазон, при котором возможна синхронная работа двух АД,

ограничен из-за засветки их небесными телами – Солнцем, Луной, Землёй. Причём в процессе полёта КА число участков, на которых возможна синхронная работа с двумя АД, значительно меньше числа участков, на которых возможна работа с одним из АД. В этой связи возникла идея построения и использования «виртуального» АД (его математической модели), с помощью которого обеспечивается получение точности ориентации КА, близкой к точности, достигаемой при двух синхронно работающих АД, по аналогии с [2]. В этом случае, определив невязки между показаниями реальных и «виртуального» АД, можно осуществлять управление КА по измерениям одного АД, корректируя их с учётом невязок.

### Повышение точности ориентации КА на основе полётной калибровки БА

Приращение ( $\Delta\Lambda^n$ ) кватерниона, определяющего ориентацию КА по выражениям (2), вычисляется с использованием данных измерений угловой скорости КА прибором ИУС. Поскольку эти данные включают в себя инструментальные ошибки ИУС и погрешности его установки, то погрешность определения кватерниона  $\Lambda_t$  возрастает со временем. Для устранения ошибок определения углового положения КА проводится коррекция кватерниона  $\Lambda_t$  с использованием информации, формируемой алгоритмом построения астроизмерительного базиса по измерениям астродатчиков.

Коррекция кватерниона  $\Lambda_t$  проводится каждый раз при наличии информации с астродатчиков (режим «коррекция»). При этом информация с АД поступает в систему управления с максимальной частотой 4 Гц, если в их полях «зрения» отсутствуют Солнце, Луна или Земля. При нахождении в полях «зрения» АД Солнца, Луны или Земли информация об астроизмерениях не поступает и кватернион ( $\Lambda_t$ ), определяющий ориентацию КА, не корректируется, а система управления работает в режиме «память», то

есть кватернион, определяющий ориентацию КА, формируется только по информации с измерителя угловой скорости.

Коррекция кватерниона  $\Lambda_t$  производится в соответствии с выражением:

$$\Lambda_t' = \Lambda_t \Delta \Lambda^{кор}, \tag{3}$$

где

$$\Delta \Lambda^{кор} (I_0^{кор}, I_i^{кор}),$$

$$\Delta I_0^{кор} = \sqrt{1 - \sum_i (\Delta I_i^{кор})^2},$$

$$\Delta I_i^{кор} = m \cdot \Delta I_i, i = 1, 3,$$

$m$  - коэффициент фильтрации ( $m < 1$ ),

$$\Delta \Lambda = \bar{\Lambda}_t, \circ \Lambda_t^A,$$

$$\Lambda_t^A = \Lambda_{ИСК}^{АИБ},$$

$\Lambda_t'$  - кватернион откорректированного текущего углового положения КА.

В настоящее время разработаны алгоритмы калибровки, совмещающие в себе геометрическую и параметрическую калибровку. Под геометрической калибровкой ИУС понимается определение погрешности углового положения осей чувствительности ИУС относительно астроизмерительного базиса.

Под параметрической калибровкой ИУС понимается определение компонентов погрешности измерений ИУС, а именно:

- погрешностей масштабных коэффициентов;
- погрешностей постоянных составляющих ошибки измерения угловой скорости.

Схема взаимного положения систем координат (и соответствующие кватернионы), используемых в БИСО, отражающих связь КА (ССК), целевой аппаратуры (ВСК – визирная система координат), АИБ, ИУС и их компонентов (ВОГ – волоконно-оптический гироскоп) с ИСК, приведена на рис. 2.

Погрешность взаимного положения АИБ и ССК ( $\delta \Lambda_{ССК}^{АИБ}$ ) обусловлена погрешностями:

- установки АД ( $\delta \Lambda_{АД}^{уст}$ );
- установки фотоприёмника АД ( $\delta \Lambda_{Фп}^{уст}$ );
- измерений АД ( $\delta \Lambda_{АД}^{изм}$ );

- установки ИУС ( $\delta \Lambda_{ИУС}^{уст}$ );
- установки ВОГ ИУС ( $\delta \Lambda_{ВОГ}^{уст}$ );
- измерений ИУС ( $\delta \omega_{ИУС}^{изм}$ ).

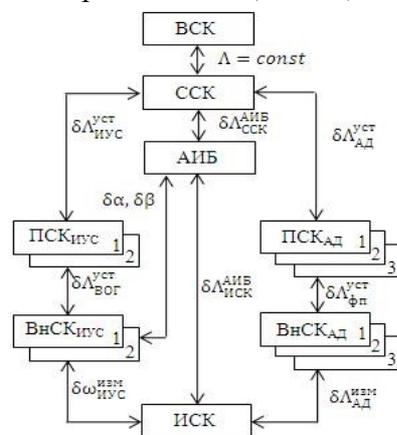


Рис. 2. Взаимное положение систем координат, используемых в БИСО

### Описание алгоритма калибровки ИУС

Задачей процесса калибровки ИУС является определение (рис. 3):

- погрешностей углового положения одноосных измерителей ИУС относительно астроизмерительного базиса ( $\delta \alpha_i, \delta \beta_i, i=1,2,3$ );
- погрешностей масштабных коэффициентов одноосных измерителей ИУС ( $\delta k_i, i=1,2,3$ );
- погрешностей постоянных составляющих ошибок измерения одноосных измерителей ИУС ( $\delta \omega_{ух}^{оч}, i=1,2,3$ ).

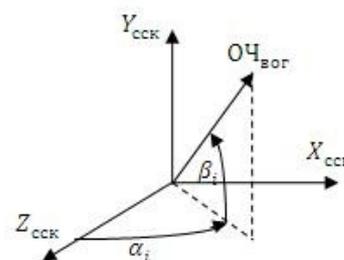


Рис. 3. Положение осей чувствительности (ОЧ) ИУС в ССК

На рис. 3  $\beta_i$  - углы между измерительными осями одноосных измерителей и их проекциями на плоскость  $Z_{ССК} X_{ССК}$ , которые отсчитываются от проекций в сторону  $+Y_{ССК}$ ;

$\alpha_i$  - углы между проекциями измерительных осей одноосных измерителей на

плоскость  $Z_{\text{ССК}} X_{\text{ССК}}$  и осью  $Z_{\text{ССК}}$ , которые отсчитываются от оси  $+Z_{\text{ССК}}$  в сторону  $+X_{\text{ССК}}$ .

Для выполнения калибровки ИУС КА выбираются четыре участка ( $l=1,2,3,4$ ) длительностью  $T$  каждый, где производятся вращения КА со скоростями:  $\omega_{X,Y,Z}=0$ ;  $\omega_X \neq 0$ ,  $\omega_{Y,Z}=0$ ;  $\omega_Y \neq 0$ ,  $\omega_{X,Z}=0$ ;  $\omega_Z \neq 0$ ,  $\omega_{X,Y}=0$ .

На момент начала и окончания каждого участка запоминается информация с ИУС и АД:

-  $t^{\text{НН}}$  ( $t^{\text{КЛ}}$ ) - время привязки информации на момент начала (окончания) участка;

-  $\Lambda_{\text{АИБ}}^{\text{НН}}$  ( $\Lambda_{\text{АИБ}}^{\text{КЛ}}$ ) - кватернион ориентации АИБ в ИСК ( $\Lambda_{\text{ИСК}}^{\text{АИБ}}$ ) на момент начала (окончания) участка;

-  $Iw_{\text{ИУС}}^{\text{ОЧ-НН}}$  ( $Iw_{\text{ИУС}}^{\text{ОЧ-КЛ}}$ ) - интегралы проекций абсолютной угловой скорости вращения КА на оси чувствительности ИУС на момент начала (окончания) участка.

По завершении работы КА на всех четырёх участках ( $l = 1,2,3,4$ ) с учётом трёх осей чувствительности (ОЧ) ИУС ( $i = 1,2,3$ ) формируется система 12 алгебраических уравнений с 12 неизвестными для определения погрешностей масштабных коэффициентов ( $\delta k_i$ ), уходов ( $\delta \omega_{\text{УХ}}^{\text{ОЧ}} i$ ) и углового положения осей ИУС относительно базовых осей АД ( $\delta \alpha_i$ ,  $\delta \beta_i$ ):

$$\delta k_i \omega_{il}^{\text{АД}} + \delta \omega_{\text{УХ}}^{\text{ОЧ}} i + \omega_{(i+1)l}^{\text{АД}} \sin(\delta \alpha_i) - \omega_{(i+2)l}^{\text{АД}} \sin(\delta \beta_i) = \omega_{il}^{\text{АД}} - \omega_{il}^{\text{ИУС}},$$

где  $\delta \omega_{\text{УХ}}^{\text{ОЧ}} i$  - «уход» ИУС по оси  $i$ ;  $\omega_{il}^{\text{АД}}$ ,  $\omega_{(i+1)l}^{\text{АД}}$ ,  $\omega_{(i+2)l}^{\text{АД}}$  - проекции вектора угловой скорости КА на  $l$ -м участке, определённого по измерениям АД ( $\Lambda_{\text{АИБ}}^{\text{НН}}$ ,  $\Lambda_{\text{АИБ}}^{\text{КЛ}}$ );  $\omega_{il}^{\text{ИУС}}$  - проекции того же вектора, определённого по измерениям ИУС ( $Iw_{\text{ИУС}}^{\text{ОЧ-НН}}$ ,  $Iw_{\text{ИУС}}^{\text{ОЧ-КЛ}}$ ).

Решение системы не представляет больших трудностей, так как матрица системы является разреженной. Например, параметр  $\delta \omega_{\text{УХ}}^{\text{ОЧ}} i$  может быть вычислен по

окончании самого первого участка, для которого  $\omega_{X,Y,Z} = 0$ , так как в данном случае разность показаний по АД и ИУС обусловлена только уходами ИУС по осям. В связи с этим приходим к системе из 9 уравнений с 9 неизвестными.

После завершения расчётов полученные результаты калибровки передаются в ИУС для использования при формировании выходной информации.

Алгоритм проведения калибровки ИУС представлен на рис. 4.

В первом блоке осуществляется съём с ИУС измеренной информации об угловой скорости вращения КА ( $w_{\text{ПСК}}^{\text{ИЗМ}}$ ) и её проецирование на оси ССК ( $w^{\text{И}}$ ) с использованием матрицы направляющих косинусов номинального положения осей ПСК ИУС в ССК ( $M_{\text{ССК}}^{\text{ПСК ИУС}}$ ). В случае использования в приборе результатов калибровки ( $\alpha^{\text{КЛБ}} = 1$ ), проецирования его выходной информации на оси ССК не проводится.

Во втором блоке осуществляется вычисление за период работы алгоритма  $\Delta t$  приращения кватерниона ориентации КА ( $\Delta \Lambda^{\text{И}}$ ) и расчёт текущего неоткорректированного значения кватерниона ориентации КА ( $\Lambda_t$ ).

В третьем блоке при наличии информации с АД ( $\Lambda_{\text{ИСК}}^{\text{АИБ}}$ ) определяется погрешность ( $\Delta \Lambda^{\text{КОР}}$ ) кватерниона  $\Lambda_t$  на текущем интервале  $\Delta t$  и выполняется его коррекция.

Четвёртый блок является подготовительным для калибровки ИУС. Здесь запоминаются исходные данные для расчёта результатов калибровки на момент начала каждого участка ( $\Lambda_{\text{АИБ}}^{\text{НН}}$ ,  $Iw_{\text{ИУС}}^{\text{ОЧ-НН}}$ ,  $t^{\text{НН}}$ ,  $l = \overline{1,4}$ ).

В пятом блоке запоминаются исходные данные для расчёта результатов калибровки на момент окончания каждого участка калибровки ( $\Lambda_{\text{АИБ}}^{\text{КЛ}}$ ,  $Iw_{\text{ИУС}}^{\text{ОЧ-КЛ}}$ ,  $t^{\text{КЛ}}$ ,  $l = \overline{1,4}$ ).

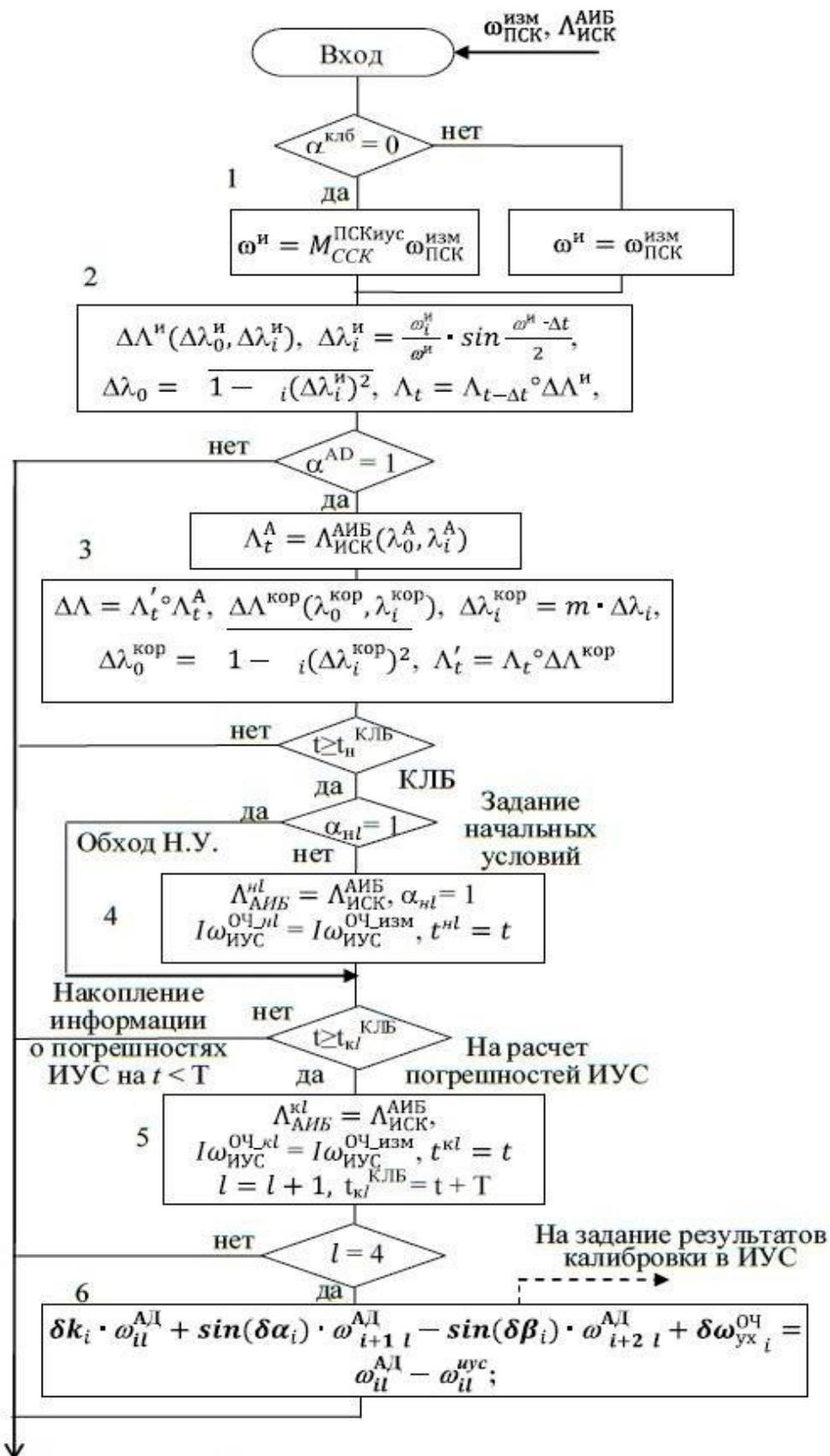


Рис. 4. Алгоритм калибровки ИУС, совмещённый с острокоррекцией

Собственно калибровка осуществляется в шестом блоке, где по накопленным данным на всех участках ( $l=1,\dots,4$ ) для каждой оси чувствительности ( $i = 1,2,3$ ) формируется и решается система 12 алгебраических уравнений с 12 неизвестными.

Решения полученных уравнений ( $da_i, db_i, dk_i, dw_{yx}^{оч}$ ,  $i=1,2,3$ ) передаются в ИУС для их использования при формировании его выходной информации.

### Результаты моделирования процесса калибровки ИУС

Точность результатов калибровки зависит от длительности измерительных участков и от погрешностей выходной информации ИУС и АД.

Длительности участков измерения выбраны равными 240 с. Погрешности измерений АД и ИУС, а также значения оцениваемых в процессе калибровки параметров приведены в таблицах 1, 2, 3, 4. Влияние инструментальных погрешностей БА выражается в увеличении погрешности результатов калибровки, но точность калибровки остаётся достаточной для определения оцениваемых величин.

Таблица 1. Случайная ( $S$ ) и предельная суммарная погрешности измерения углового положения осей приборной системы координат АД в ИСК

Параметр	Угловая скорость, °/с	Предельная погрешность, угл. с	Случайная составляющая ( $S$ ), угл. с
Направление оси Z ПСК	0,0	7	0,5
	0,067	9	1,0
	1,2	25	5
Направление осей X, Y ПСК	0,0	41	2
	0,067	50	5
	1,2	95	20

Таблица 2. Погрешности измерения интегралов проекций абсолютной угловой скорости прибором ИУС

Параметры	Значение, угл. с
Погрешность приращения интегралов проекций угловой скорости за любые:	
5 с	0,6
10 мин.	7,5
20 мин.	15
40 мин.	30
24 часа	300
Цена младшего разряда выдаваемой информации по приращению интегралов	$1 \cdot 10^{-3}$

Таблица 3. Предельные значения оцениваемых параметров

$dw_{yx}^{оч}$ , %/с	$da$ , угл.мин.	$db$ , угл.мин.	$dk$ , безразмерная
$2,8 \cdot 10^{-5}$	1,5	1,5	$0,5 \cdot 10^{-4}$

Таблица 4. Погрешность результатов калибровки

Оцениваемый параметр	$dw_{yx}^{оч}$ , %/с	$da$ , угл.мин.	$db$ , угл.мин.	$dk$ , безразмерная
Значение параметра	$2,8 \cdot 10^{-5}$	1,5	1,5	$1 \cdot 10^{-4}$
Ошибка оценки с учётом погрешностей БА	$3,96 \cdot 10^{-6}$	0,184	0,09	$1,85 \cdot 10^{-5}$

В процессе штатной эксплуатации КА МЗ типа «Ресурс-ДК1» успешно отработан первый участок калибровки, оценивающий погрешности постоянных составляющих ошибок измерения ИУС ( $dw_{yx}^{0Ч}$ ). Результаты оценки постоянных составляющих ошибок измерения ИУС ( $dw_{yx}^{0Ч}$ ) представлены на рис. 5.

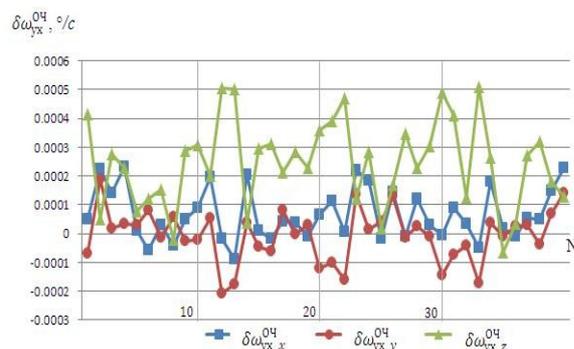


Рис. 5. Результаты оценки  $dw_{yx}^{0Ч}$  изд. «Ресурс-ДК1». N - порядковый номер участка оценки ухода

### Заключение

Предложенный алгоритм проведения геометрической и параметрической калибровки центрального звена бескарданной инерциальной системы ориента-

ции - измерителя угловой скорости - позволяет не только достичь необходимые для работы КА МЗ точности ориентации, но и уменьшить время проведения калибровки за счёт совмещения процесса калибровки со штатной работой КА.

### Библиографический список

1. Кирилин, А. Н. Методы обеспечения живучести низкоорбитальных автоматических КА зондирования Земли: математические модели, компьютерные технологии [Текст] / А. Н. Кирилин, Р. Н. Ахметов, А. В. Соллогуб, В. П. Макаров. – М.: Машиностроение, 2010. – 384 с.
2. Аншаков, Г. П. Квазинепрерывная астрокоррекция инерциальных датчиков памяти спутников дистанционного зондирования Земли [Текст] / Г. П. Аншаков, Р. Г. Залялова, Я. А. Мостовой, В. А. Тихухов // XV Международная конференция по интегрированным навигационным системам. - СПб.: Изд. ЦНИИ «Электроприбор», 2008. - С. 304-311.

## IMPROVEMENT OF THE FLIGHT ATTITUDE CONTROL ACCURACY OF THE EARTH OBSERVATION SPACECRAFT

© 2012 R. N. Akhmetov, A. V. Sologub, V. P. Makarov, A. A. Golovchenko, A. V. Filatov

State Research and Production Space Centre “TsSKB-Progress”, Samara

The paper presents the problems of assessing the relative position of angular accelerometer sensitivity axes and astromasuring basis of the attitude control system as part of flight calibration of a platform-independent inertial system. The inaccuracy of the angular accelerometer is defined and taken into account. An algorithm of in-flight geometrical and parametric calibration of the meter is suggested.

*Angular accelerometer, geometrical and parametric calibration, relative position of axes, astromasuring basis, onboard equipment, attitude control system.*

### Информация об авторах

**Ахметов Равиль Нургалиевич**, доктор технических наук, генеральный конструктор, ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ - Прогресс». E-mail: [csdb@samspace.ru](mailto:csdb@samspace.ru). Область научных интересов: проектирование и испытания ракетно-космической техники.

**Соллогуб Анатолий Владимирович**, доктор технических наук, главный научный сотрудник, ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ - Прогресс». E-mail: [csdb@samspace.ru](mailto:csdb@samspace.ru). Область научных интересов: моделирование ракетно-космических систем.

**Макаров Валентин Павлович**, доктор технических наук, научный советник, ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ - Прогресс». E-mail: [csdb@samspace.ru](mailto:csdb@samspace.ru). Область научных интересов: системы управления движением космических аппаратов.

**Головченко Анатолий Алексеевич**, ведущий инженер-конструктор, ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ – Прогресс». E-mail: [csdb@samspace.ru](mailto:csdb@samspace.ru). Область научных интересов: измерительные средства и системы управления ориентацией космических аппаратов.

**Филатов Артём Викторович**, ведущий инженер-конструктор, ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ – Прогресс». E-mail: [csdb@samspace.ru](mailto:csdb@samspace.ru). Область научных интересов: измерительные средства и системы управления ориентацией космических аппаратов.

**Akhmetov Ravil Nurgalievich**, doctor of engineering science, General Designer, Space Rocket Center “TsSKB-Progress”. E-mail: [csdb@samspace.ru](mailto:csdb@samspace.ru). Area of research: designing and testing of space rocket systems.

**Makarov Valentin Pavlovich**, doctor of engineering science, scientific adviser, Space Rocket Center “TsSKB-Progress”. E-mail: [csdb@samspace.ru](mailto:csdb@samspace.ru). Area of research: spacecraft motion control systems.

**Sollogub Anatoliy Vladimirovich**, doctor of engineering science, Chief scientific adviser, Space Rocket Center “TsSKB-Progress”. E-mail: [csdb@samspace.ru](mailto:csdb@samspace.ru). Area of research: modeling of space rocket systems.

**Golovchenko Anatoly Alexeevich**, leading design engineer, Space Rocket Center “TsSKB-Progress”. E-mail: [csdb@samspace.ru](mailto:csdb@samspace.ru). Area of research: measuring instruments and spacecraft attitude control systems.

**Filatov Artyom Victorovich**, leading design engineer, Space Rocket Center “TsSKB-Progress”. E-mail: [csdb@samspace.ru](mailto:csdb@samspace.ru). Area of research: measuring instruments and spacecraft attitude control systems.