

Методики наземной взаимной привязки систем координат звездных датчиков

Н.А. Строилов, А.В. Никитин, А.Н. Куркина, Р.В. Бессонов, Е.В. Белинская, С.В. Воронков

*Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: stroilov@iki.rssi.ru*

В работе описаны методики взаимной привязки систем координат приборов комплекса ориентации космического аппарата между собой, с осями полезной нагрузки и со связанными осями космического аппарата. Процесс калибровки разбит на два последовательных этапа: автономная калибровка каждого прибора на предприятии-изготовителе и комплексная калибровка приборов, установленных на космическом аппарате (КА). Автономная калибровка проводится на стендовом оборудовании и связывает внутренние (измерительные) системы координат с внешними системами, которые реализуются посадочными местами прибора либо дополнительными юстировочными элементами. Комплексная калибровка проводится на КА и позволяет связать системы координат приборов и полезной нагрузки. Также рассмотрен вариант проведения калибровки в процессе летных испытаний КА. Результатами калибровок на каждом этапе являются матрицы перехода между системами координат. Матрицы впоследствии учитываются при работе комплекса ориентации КА и позволяют повысить точность и время наведения. Рассмотрены две возможности проведения наземной калибровки: измерением посадочных мест приборов и с помощью автоколлимационных теодолитных измерений зеркальных кубов, дополнительно установленных на приборах. Проведенный анализ итоговых ошибок показывает преимущество метода калибровки с использованием зеркальных оптических кубов перед методом калибровки через посадочные места.

Ключевые слова: приборы, ориентация космического аппарата, наземная, взаимная калибровка, привязка систем координат, методики, автоколлимационные измерения, зеркальный куб, оценка погрешностей

*Одобрена к печати: 25.05.2017
DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-4-52-63*

Введение

Решение задачи ориентации космического аппарата (КА) подразумевает определение параметров ориентации измерительными приборами и дальнейшую оценку по их показаниям направлений связанных осей КА и других бортовых систем, таких как исполнительные органы КА и целевая аппаратура. Приборными, измеряющими параметры ориентации на борту, выступают гироскопические датчики угловой скорости и оптические инструменты: солнечные датчики, звездные датчики, датчики горизонта (т.е. астроприборы). К исполнительным органам, обладающим системой координат, ориентация которых должна быть измерена и оценена, относятся двигатели-маховики, реактивные двигательные установки и т.д. К целевой аппаратуре, требующей наведения и измерения параметров ориентации в абсолютном пространстве, относятся съемочные системы дистанционного зондирования Земли и других тел Солнечной системы, космические телескопы, антенны радиолокаторов и систем связи.

Различные задачи предъявляют различные требования к точности измерения параметров относительной ориентации приборных систем координат: от угловых минут до тысячных долей угловой секунды. Однако во всех случаях решение задачи ориентации требует привязки систем координат приборов между собой, т.е. калибровки относительной ориентации систем координат приборов, установленных на борту КА.

Конечная цель такой калибровки — обеспечить привязку каждого прибора ориентации (каждой системы координат, в которой непосредственно выполняются угловые измерения) к единой общей системе координат, в качестве которой может выступать либо связанная система координат КА (ССК), либо система координат полезной нагрузки или другого прибора.

Для звездных датчиков, разрабатываемых в ИКИ РАН, измерительными являются внутренние системы координат (ВСК), положение которых определяется в инерциальном пространстве (ИСК). ВСК реализуется взаимным расположением объектива и плоскости фотоприемного устройства — ПЗС- или КМОП-матрицей (рис. 1). Две оси системы координат лежат в плоскости фотоприемника, третья дополняет систему до правой и проходит через заднюю узловую точку объектива. Основными параметрами внутреннего ориентирования звездного датчика являются: эквивалентное фокусное расстояние объектива, определяющее масштаб изображения, координаты главной точки и коэффициенты полинома, описывающие дисторсию объектива. Все указанные параметры вычисляются по снимкам реального звездного неба в ходе натурных испытаний, проводимых до взаимной привязки (Сметанин и др., 2017). Аналогичные методики калибровки могут быть распространены на другие оптические приборы, а также на приборы других типов, например, на гироскопы.

Следующие системы координат относятся к внешним и реализованы физически. Приборная система координат (ПСК) исполнена с помощью посадочных отверстий высоких классов точности и посадочной плоскости с низкой шероховатостью.

Система координат оптического зеркального куба (СКОК) также является внешней. Куб жестко монтируется на корпус прибора при изготовлении и не снимается на протяжении всех испытаний вплоть до завершения комплексной отработки КА. Зеркальные грани куба позволяют проводить оптические измерения методом автоколлимации, что, как будет показано ниже, значительно увеличивает точность наземной калибровки.

Переход между системами координат приборов, установленных на КА, может быть выражен ортогональной матрицей поворота размерностью 3×3 , содержащей направляющие косинусы осей одной системы координат в другой. Матрицу перехода от системы координат i к системе координат j или, другими словами, матрицу ориентации осей системы координат j в системе координат i будем обозначать как $M_{СК_j}^{СК_i}$:

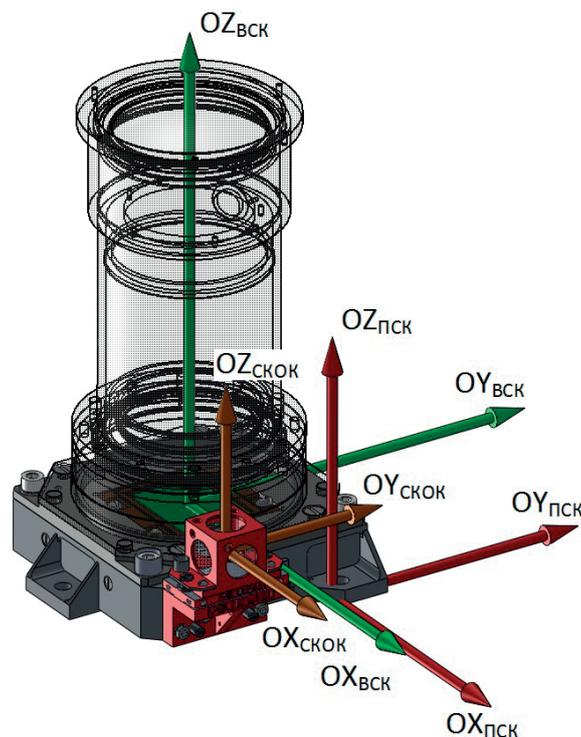


Рис. 1. Системы координат звездного датчика

$$M_{\text{СК}_j}^{\text{СК}_i} = \begin{matrix} x_{\text{СК}_j} \\ y_{\text{СК}_j} \\ z_{\text{СК}_j} \end{matrix} \begin{pmatrix} X_{\text{СК}_i} & Y_{\text{СК}_i} & Z_{\text{СК}_i} \\ a_{1,1} & a_{1,2} & a_{1,3} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & a_{2,3} \\ a_{3,1} & a_{3,2} & a_{3,3} \end{pmatrix},$$

где $a_{m,n}$ — косинус угла между осью m системы координат j и осью n системы координат i .

В результате проведения взаимной привязки измерения ориентации, полученные разными приборами, должны быть тождественны (с точностью до ошибок измерения) при учете матриц перехода между ними, т.е. должно выполняться следующее равенство:

$$M_{\text{ССК}}^{\text{ВСК}_1} M_{\text{ВСК}_1}^{\text{ИСК}} = M_{\text{ССК}}^{\text{ВСК}_2} M_{\text{ВСК}_2}^{\text{ИСК}} = \dots = M_{\text{ССК}}^{\text{ИСК}}. \quad (1)$$

Связь ВСК двух произвольных приборов может быть записана следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} M_{\text{ВСК}_1}^{\text{ИСК}} &= \left(M_{\text{ССК}}^{\text{ВСК}_1} \right)^T M_{\text{ССК}}^{\text{ВСК}_2} M_{\text{ВСК}_2}^{\text{ИСК}} = M_{\text{ВСК}_1}^{\text{ВСК}_2} M_{\text{ВСК}_2}^{\text{ИСК}}, \\ M_{\text{ВСК}_2}^{\text{ВСК}_1} &= \left(M_{\text{ССК}}^{\text{ВСК}_2} \right)^T M_{\text{ССК}}^{\text{ВСК}_1}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Целью взаимной калибровки должен быть поиск матриц перехода от ВСК различных приборов к единой системе координат $M_{\text{ССК}}^{\text{ВСК}}$, либо матриц между ВСК приборов $M_{\text{ВСК}_1}^{\text{ВСК}_2}$. Поиск таких матриц возможен во время летных испытаний КА. Летная калибровка основана на одномоментном измерении несколькими приборами одной физической величины, в случае оптических приборов — это матрицы $M_{\text{ВСК}}^{\text{ИСК}}$. Для связи оптических приборов с гироскопами могут использоваться одновременные измерения проекции вектора угловой скорости на оси ВСК приборов. При этом в результате обработки измерений удастся вычислить матрицы перехода непосредственно между ВСК приборов. Однако проведение таких измерений на Земле в цехе, где производится сборка аппарата, практически невозможна.

При невозможности проведения летной калибровки необходимо использовать наземные измерения, для которых целесообразно применить ПСК или СКОК приборов в качестве промежуточных систем координат, т.е. представить (1) и (2) следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} M_{\text{ССК}}^{\text{ПСК}_1} M_{\text{ПСК}_1}^{\text{ВСК}_1} M_{\text{ВСК}_1}^{\text{ИСК}} &= M_{\text{ССК}}^{\text{ПСК}_2} M_{\text{ПСК}_2}^{\text{ВСК}_2} M_{\text{ВСК}_2}^{\text{ИСК}} = \dots = M_{\text{ССК}}^{\text{ИСК}}, \\ M_{\text{ССК}}^{\text{СКОК}_1} M_{\text{СКОК}_1}^{\text{ВСК}_1} M_{\text{ВСК}_1}^{\text{ИСК}} &= M_{\text{ССК}}^{\text{СКОК}_2} M_{\text{СКОК}_2}^{\text{ВСК}_2} M_{\text{ВСК}_2}^{\text{ИСК}} = \dots = M_{\text{ССК}}^{\text{ИСК}}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} M_{\text{ВСК}_1}^{\text{ИСК}} &= \left(M_{\text{ПСК}_1}^{\text{ВСК}_1} \right)^T \left(M_{\text{ПСК}_2}^{\text{ПСК}_1} \right)^T M_{\text{ПСК}_2}^{\text{ВСК}_2} M_{\text{ВСК}_2}^{\text{ИСК}}, \\ M_{\text{ВСК}_2}^{\text{ВСК}_1} &= \left(M_{\text{ПСК}_2}^{\text{ВСК}_2} \right)^T M_{\text{ПСК}_2}^{\text{ПСК}_1} M_{\text{ПСК}_1}^{\text{ВСК}_1}, \\ M_{\text{ВСК}_1}^{\text{ИСК}} &= \left(M_{\text{СКОК}_1}^{\text{ВСК}_1} \right)^T \left(M_{\text{СКОК}_2}^{\text{СКОК}_1} \right)^T M_{\text{СКОК}_2}^{\text{ВСК}_2} M_{\text{ВСК}_2}^{\text{ИСК}}, \\ M_{\text{ВСК}_2}^{\text{ВСК}_1} &= \left(M_{\text{СКОК}_2}^{\text{ВСК}_2} \right)^T M_{\text{СКОК}_2}^{\text{СКОК}_1} M_{\text{СКОК}_1}^{\text{ВСК}_1}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Наземную калибровку можно разделить на комплексную и автономную. Автономная калибровка проводится для каждого прибора, в результате определяются матрицы перехода от измерительных систем (ВСК) к внешним (ПСК и СКОК). Комплексная калибровка проводится на борту КА, ее результатом являются матрицы перехода между внешними системами координат приборов к общей системе координат КА (ССК).

Из вышесказанного следует, что взаимную привязку приборов можно разбить на три последовательных этапа: автономная калибровка, комплексная калибровка и летная калибровка. Описание этапов приведено в *табл. 1*.

Таблица 1. Этапы калибровки

Этап	Наименование	Цель	Определяемые матрицы
I	Автономная калибровка прибора на предприятии-изготовителе	Определение перехода между ВСК и ПСК, а также между ВСК и СКОК для каждого прибора	$M_{ПСК}^{ВСК}$, $M_{СКОК}^{ВСК}$
II	Взаимная калибровка приборов до, либо после монтажа на КА	Определение положения ПСК или СКОК установленных приборов и их связь с осями КА	$M_{ПСК_2}^{ПСК_1}$, $M_{СКОК_2}^{СКОК_1}$, $M_{ССК}^{ПСК}$, $M_{ССК}^{СКОК}$
III	Полетная калибровка при испытаниях и целевом функционировании КА	Определение положения ВСК приборов	$M_{ВСК_2}^{ВСК_1}$

Ввиду отсутствия дополнительных переходов к посадочным местам или оптическим элементам, а также из-за ряда других факторов, летная калибровка оказывается гораздо точнее наземных измерений. В конечном итоге именно она определяет погрешности измерения параметров ориентации всего КА. Проведение летной калибровки является отдельной задачей и описана в работах (Аванесов и др., 2008, 2013; Кондратьева и др., 2013; Никитин и др., 2011а, б). В тех случаях, когда летная калибровка невозможна, погрешности определения параметров ориентации КА в основном вызываются ошибками наземных измерений матриц перехода между системами координат приборов.

Рассмотрим подробно методики проведения наземных калибровок звездных датчиков на этапах I и II и оценим вносимые ошибки.

Этап I. Автономная калибровка прибора на предприятии-изготовителе

Калибровка на предприятии-изготовителе заключается в определении матриц перехода между тремя системами координат каждого звездного датчика: ВСК, ПСК и СКОК. На данном этапе должны быть получены матрицы $M_{ПСК}^{ВСК}$ и $M_{СКОК}^{ВСК}$.

При изготовлении звездных датчиков типа БОКЗ указанные измерения проводятся на стенде определения матриц взаимной ориентации. Расположение оборудования на оптическом столе стенда показано на *рис. 2*.

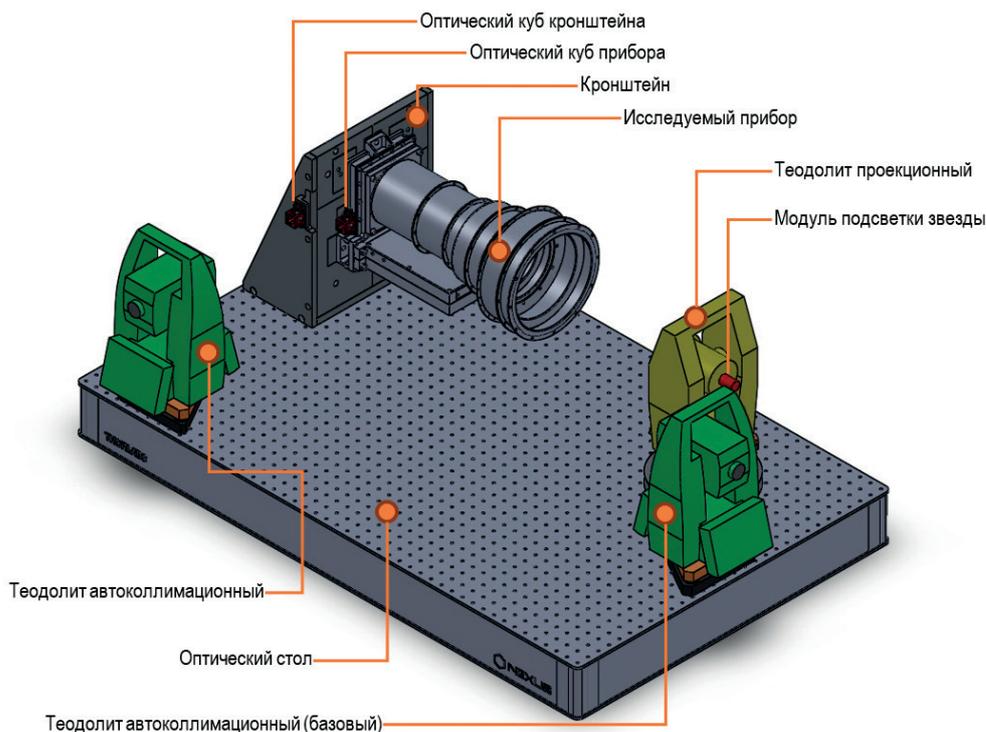


Рис. 2. Расположение оборудования на оптическом столе стенда

Методики определения матриц перехода для звездных датчиков основаны на измерениях тремя теодолитами с допустимой инструментальной среднеквадратической погрешностью измерения горизонтальных и вертикальных углов не более $2''$. Два теодолита стенда используются для реализации системы СКОК и фиксируют путем автоколлимации положение двух граней зеркального куба прибора или куба, установленного на кронштейне стенда. Третий теодолит — проекционный — используется для реализации ВСК проецированием одиночной звезды в поле зрения прибора. Поворотами третьего теодолита осуществляется сканирование поля зрения и измерения направлений на звезду как средствами прибора, так и теодолита. Для построения ВСК используется от 14 до 26 точек, расположенных в виде креста с шагом между узлами 1° . Взаимные измерения угловых положений всех теодолитов позволяют связать направления, измеренные прибором, с СКОК. После множественных измерений выполняется программно-математическая процедура уравнивания ошибок методом наименьших квадратов и определения трех углов перехода от осей ВСК к СКОК.

Угловые положения линии классный паз – классное отверстие и посадочной плоскости переносятся на грани зеркального куба, установленного на кронштейне стенда (СКОК-К). Переход от СКОК-К к ПСК осуществляется через калибровочную матрицу. Измерение калибровочной матрицы проводится за две операции. Сначала лекальная линейка с оптическим кубом прикладывается к классным шпилькам, тем самым реализуется линия классный паз – классное отверстие. Нормаль грани зеркального куба измеряется автоколлимационными теодолитами. Затем посадочная плоскость реализуется прикладыванием плоскопараллельного зеркала с известной клиновидностью к посадочной

плоскости кронштейна и также промеряется нормаль от зеркала к граням зеркального куба кронштейна. В результате математической обработки показаний всех теодолитов вычисляется $M_{\text{СКОК-К}}^{\text{ПСК}}$.

Этап II. Комплексная калибровка

В ходе комплексной калибровки на борту КА (рис. 3) необходимо определить матрицы $M_{\text{ПСК}_2}^{\text{ПСК}_1}$, $M_{\text{СКОК}_2}^{\text{СКОК}_1}$ между внешними системами координат (ПСК и СКОК) различных приборов, а также определить их положения относительно общей системы координат аппарата: $M_{\text{ССК}}^{\text{ПСК}}$, $M_{\text{ССК}}^{\text{СКОК}}$. Это возможно реализовать двумя способами: 1) после монтажа приборов путем измерения взаимного положения их оптических кубов, 2) до монтажа приборов путем измерения их посадочных мест на КА.

В первом случае выполняются теодолитные автоколлимационные измерения, аналогичные измерениям первого этапа (операция 2б, табл. 2). СКОК приборов привязываются между собой и к СКОК космического аппарата, имитирующего ССК, т.е. измеряются матрицы $M_{\text{ССК}}^{\text{СКОК}}$, $M_{\text{СКОК}_2}^{\text{СКОК}_1}$.

Таблица 2. Порядок работы на стенде с приборами с установленным оптическим кубом

№ операции	Определяемая матрица	Описание
1	$M_{\text{СКОК-К}}^{\text{ПСК}}$	Определение матрицы перехода от посадочных мест кронштейна к СКОК кронштейна. Ось Z ПСК реализуется прикладыванием плоскопараллельного зеркала к посадочной плоскости. Линия классный паз – классное отверстие реализуется прикладыванием лекальной линейки с установленным зеркалом к классным шпилькам кронштейна. Операция выполняется для каждого типа прибора
2а	$M_{\text{СКОК}}^{\text{ВСК}}$	Проецирование изображения звезды через оптическую систему прибора и одновременное фиксирование положения СКОК прибора при помощи автоколлимационных теодолитов
2б	$M_{\text{СКОК-К}}^{\text{ВСК}}$ $M_{\text{СКОК-К}}^{\text{СКОК}}$	Определение взаимного положения двух СКОК: куба прибора и куба кронштейна, а также их положения относительно ВСК
3	$M_{\text{ПСК}}^{\text{ВСК}}$	Произведение $M_{\text{СКОК-К}}^{\text{ВСК}}$ и $\left(M_{\text{СКОК-К}}^{\text{ПСК}}\right)^T$
4	$M_{\text{ПСК}}^{\text{ВСК}}$	Произведение $M_{\text{СКОК}}^{\text{ВСК}}$, $M_{\text{СКОК-К}}^{\text{СКОК}}$ и $\left(M_{\text{СКОК-К}}^{\text{ПСК}}\right)^T$

Во втором случае калибровка прибора подразумевает измерение матриц $M_{\text{ПСК}_2}^{\text{ПСК}_1}$, и $M_{\text{ССК}}^{\text{ПСК}}$. В этом случае для проведения теодолитных оптических измерений дополнительно изготавливаются имитаторы посадочных мест приборов, на которых располагаются зеркальные кубы. Имитаторы посадочной плоскости прибора так же калибруются, а в процессе калибровки измеряются матрицы перехода от СКОК имитатора к ПСК имитатора.



Рис. 3. Автоколлимационные измерения приборов КА в НПО им. С.А. Лавочкина, кадр из фильма «НПО им. С.А. Лавочкина: от самолетов — до межпланетных станций», телестудия Роскосмоса, 2016 г.

Оценка точности калибровки

Под итоговой случайной погрешностью привязки приборов к общей системе координат будем понимать среднеквадратическое отклонение (СКО) углов поворота, выраженных в матрице $M_{ССК}^{ИСК}$. Оценку итоговой погрешности необходимо разделить в зависимости от типа калибровки: при летной калибровке через ВСК, при наземной калибровке через СКОК или через ПСК. Итоговая погрешность измерений складывается из составляющих и вычисляется по формуле: $\sigma_{итог} = \sqrt{\sum n_i \sigma_i^2}$, где $\sigma_{итог}$ — итоговое СКО; σ_i — i -я составляющая (СКО); n_i — число повторений i -й составляющей. Для оценки итоговой погрешности необходимо оценить СКО углов поворота в матрицах, участвующих в расчете $M_{ССК}^{ИСК}$ по (1), (3) и (4).

Предположим, что в качестве ССК используется ВСК полезной нагрузки или другого прибора, а переход к ССК будет реализован либо через ПСК, либо через СКОК. Ошибками определения ориентации ВСК в ИСК в настоящем расчете пренебрежем. Эта ошибка определяется типом прибора и, безусловно, внесет дополнительный вклад в общую погрешность.

Итоговые значения погрешностей представлены в табл. 3. Декомпозиция входящих ошибок представлена в табл. 4, 5 и 6. В таблицах значения погрешностей округлены в большую сторону. В столбцах « $\sigma_{итог}$ » указаны значения погрешностей по трем осям, при наличии символа «/» указаны погрешность определения направления оси визирования и погрешность определения вращения вокруг оси визирования.

Таблица 3. Итоговые значения погрешностей калибровки

Погрешность (1xСКО)	Составляющие погрешности (1xСКО)			$\sigma_{\text{итог}}$
	наименование	σ	n	
$M_{\text{ССК}}^{\text{ИСК}}$ через ПСК	• определение $M_{\text{ПСК}}^{\text{ВСК}}$	от 15" / 42" до 16" / 55"	1	25" / 70"
	• определение $M_{\text{ССК}}^{\text{ПСК}}$	17" / 43"	1	
$M_{\text{ССК}}^{\text{ИСК}}$ через СКОК	• определение $M_{\text{СКОК}}^{\text{ВСК}}$	от 8" / 10" до 9" / 36"	1	от 14" / 15" до 14" / 38"
	• определение $M_{\text{ССК}}^{\text{СКОК}}$	11"	1	
$M_{\text{ССК}}^{\text{ИСК}}$ через ВСК	• определение $M_{\text{ССК}}^{\text{ВСК}}$ *	от 0,3" / 1,5" до 2,5" / 33"	2	от 0,5" / 3" до 3,5" / 47"

* Приведены значения при реализации ССК звездным датчиком. Привязка ВСК к ССК при летных испытаниях характеризуется точностью определения ориентации в ИСК для данного прибора. Оценка погрешности измерения параметров ориентации ВСК в ИСК звездного датчика можно принять равными $\sigma_{xy} \approx \Delta/40$, $\sigma_z \approx \sigma_{xy}(2/\varphi)$, где σ_{xy} — СКО определения углов разворота вокруг осей X и Y ВСК; σ_z — СКО определения угла разворота вокруг оси Z ВСК; Δ — угловое разрешение прибора (для большинства приборов звездной ориентации угловое разрешение находится в диапазоне от 10 до 100"); φ — поле зрения прибора, выраженное в радианах (для большинства приборов звездной ориентации поле зрения варьируется в диапазоне от 10–20°, т.е. 0,15–0,35 рад). Оценка, приведенная в табл. 3, характеризует погрешность единичного измерения матрицы перехода между ВСК двух приборов. При возможности набора n измерений данная оценка может быть уточнена в \sqrt{n} раз.

Таблица 4. Составляющие погрешностей табл. 3

Погрешность (1xСКО)	Составляющие погрешности (1xСКО)			$\sigma_{\text{итог}}$
	наименование	σ	n	
Определение $M_{\text{ПСК}}^{\text{ВСК}}$	• реализация ВСК 14-ю точками	от 1" / 5" до 3" / 35"	1	от 15" / 42" до 16" / 55"
	• реализация ПСК (кронштейн стенда и прибор)	7" / 28"	2	
	• определение перехода шестью измерениями (для ПСК–СКОК-К и ВСК–СКОК-К)	8"	2	
Определение $M_{\text{ССК}}^{\text{ПСК}}$	• реализация ПСК (имитатор посадочного места и прибор);	7" / 28"	2	17" / 43"
	• реализация ССК (СКОК);	–		
	• определение перехода 12-ю измерениями (куб имитатора – ССК);	11"	1	
	• определение перехода шестью измерениями (куб – ПСК имитатора)	8"	1	
Определение $M_{\text{СКОК}}^{\text{ВСК}}$	• реализация ВСК	от 1" / 5" до 3" / 35"	1	от 8" / 10" до 9" / 36"
	• реализация СКОК	–		
	• определения перехода 6-ю измерениями	8"	1	
Определение $M_{\text{ССК}}^{\text{СКОК}}$	• реализация СКОК;	–		11"
	• реализация ССК (СКОК)	–		
	• определение перехода 12-ю измерениями	11"	1	

Таблица 5. Составляющие погрешностей *табл. 4*

Погрешность (1xСКО)	Составляющие погрешности (1xСКО)			$\sigma_{итог}$
	наименование	σ	n	
Реализация ВСК (14 точек)	• вычисление направления на звезду	от 1" до 10"	14	от 1" / 5" до 3"/35"***
	• одиночное измерение теодолитом	3"	14	
Реализация ПСК	• неплоскостность посадочной поверхности на расстоянии 100 мм	max 5 мкм	1	7" / 28"
	• допуски двух классных отверстий на расстояние 75 мм.	max 15 мкм	1	
Реализация СКОК	• неперпендикулярность граней зеркального куба	–	–	–
• определение перехода шестью измерениями	• СКО одиночного измерения теодолитом	3"	6	8"
• определение перехода 12-ю измерениями	• СКО одиночного измерения теодолитом	3"	12	11"

** Итоговая погрешность реализации ВСК включает погрешность определения направление на одну звезду (Белинская и др., 2015) и погрешность одиночного наведения теодолитом вычисляется по формулам:

$$\sigma_{XY} = \frac{\sqrt{\sigma_{напр.зв.}^2 + \sigma_{теод.}^2}}{\sqrt{n}}, \sigma_Z \approx \sigma_{XY}(2/\varphi), \text{ где } \sigma_{XY} \text{ — СКО определения углов разворота вокруг осей } X \text{ и } Y \text{ ВСК};$$

σ_Z — СКО определения углов разворота вокруг осей Z ВСК; $\sigma_{напр.зв.}$ — СКО определения направления на звезду; $\sigma_{теод.}$ — СКО одиночного измерения теодолитом; n — число точек, используемых при построении ВСК.

Таблица 6. Составляющие погрешностей *табл. 5*

Погрешность (1xСКО)	Составляющие погрешности (1xСКО)			$\sigma_{итог}$
	наименование	σ	n	
Одиночное измерение теодолитом	• измерение горизонтального и вертикального кругов (согласно поверке теодолита)	2"	1	3"
	• наведение при автоколлимации (по ГОСТ Р ИСО 17123-3-2011)	1"	1	
	• колебания вертикальной оси, измеренные при помощи электронного уровня теодолита	2"	1	
Вычисление направления на одну звезду	определяется ошибками калибровки ВСК и измерения координат звезды на матрице и принимается равной 1/10 углового элемента разрешения прибора	от 1" до 10"	1	от 1" до 10"***
Неперпендикулярность граней зеркального куба	неперпендикулярность граней зеркального куба измеряется на отражательном гониометре с погрешностью 1"; погрешность учитывается или компенсируется при измерениях	–	–	–

*** Указанные величины ошибок реализуется для приборов с угловым разрешением от 10 до 100".

Выводы

Взаимная привязка необходима для уменьшения систематических погрешностей как внутри прибора ориентации, так и между приборами при их комплексной работе на КА. Привязку можно разделить на три этапа: автономную, комплексную и летную.

Наилучший результат дает летная калибровка приборов, точность которой сопоставима с точностью определения ориентации калибруемыми датчиками, в случае звездных приборов — единицы и доли угловых секунд. Данная калибровка проводится в невесомости на выведенном аппарате после его полной дегазации, следовательно, летная калибровка учитывает все деформации конструкций. Нет необходимости в использовании дополнительных внешних систем координат (ПСК или СКОК), привязка между приборами может производиться в системах координат, в которых выполняются непосредственные измерения (ВСК).

Наземная калибровка актуальна при невозможности летных измерений. В этом случае необходимо использовать дополнительные промежуточные системы координат, которыми могут выступать посадочные места либо зеркальные кубы. Привязка между внутренними и внешними системами координат каждого прибора выполняется автономно на предприятии-изготовителе прибора. Затем следуют комплексные измерения внешних систем координат после монтажа приборов на КА.

Привязка через классные отверстия и посадочные плоскости дает СКО определения направления оптической оси звездного датчика порядка 30 угл. с и СКО угла вращения вокруг оптической оси более 1 угл. мин.

Использование зеркальных кубов и проведение автоколлимационных измерений сначала на предприятиях-изготовителях датчиков, а затем на КА позволяют уменьшить итоговые погрешности привязки в два раза, а именно до 15 угл. с по трем осям для высокоточных звездных датчиков и не более 15 угл. с (определение направления) и 38 угл. с (вращение вокруг оптической оси) для других приборов.

Литература

1. *Аванесов Г.А., Полянский И.В., Жуков Б.С., Никитин А.В., Фори А.А.* Комплекс многозональной спутниковой съемки на борту КА «Метеор-М» № 1: три года на орбите // Исследование Земли из космоса. 2013. № 2. С. 74–83.
2. *Аванесов Г.А., Красиков В.А., Никитин А.В.* Оценка точности звездного прибора БОКЗ-М по результатам наземных и летных испытаний // Сб. тр. 1-й Всерос. научно-техн. конф «Современные проблемы ориентации и навигации космич. аппаратов». М.: ИКИ РАН, 2008. С. 387–408.
3. *Белинская Е.В., Воронков С.В., Никитин А.В., Строилов Н.А., Яскович А.Л.* Влияние формы одиночной звезды на точностные характеристики системы датчиков гида телескопа Т-170М // Сб. тр. 4-й Всерос. научно-техн. конф «Современные проблемы ориентации и навигации космич. аппаратов». М.: ИКИ РАН, 2015. С. 38–54.
4. *Кондратьева Т.В., Никитин А.В., Полянский И.В.* Оценка точности автоматической географической привязки пространственных данных комплекса многозональной спутниковой съемки в ходе летной эксплуатации // Сб. тр. 3-й Всерос. научно-техн. конф «Современные проблемы ориентации и навигации космич. аппаратов», М.: ИКИ РАН. 2013. С. 310–326.
5. *Никитин А.В., Дунаев Б.С., Кондратьева Т.В., Полянский И.В.* (2011a) Определение геометрических параметров многозональных сканирующих устройств МСУ-100, МСУ-50 на лабораторном стенде

- и в условиях полета космического аппарата «Метеор-М» // Сб. тр. 2-й Всерос. научно-техн. конф «Современные проблемы ориентации и навигации космич. аппаратов». М.: ИКИ РАН, 2011. С. 289–307.
6. Никитин А.В., Дунаев Б.С., Красиков В.А. (2011б) Наземный эксперимент по синхронному определению параметров угловой инерциальной ориентации тремя приборами звездной ориентации БОКЗ-М // Сб. тр. 2-й Всерос. научно-техн. конф. «Современные проблемы ориентации и навигации космич. аппаратов», М.: ИКИ РАН. 2011. С. 62–69.
 7. Сметанин П.С., Аванесов Г.А., Бессонов Р.В., Куркина А.Н., Никитин А.В. Геометрическая калибровка звездного датчика высокой точности по звездному небу // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 2. С. 9–23.

Ground intercalibration methods of star sensor coordinate frames

N.A. Stroilov, A.V. Nikitin, A.N. Kurkina, R.V. Bessonov, E.V. Belinskaya, S.V. Voronkov

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: stroilov@iki.rssi.ru

The paper describes intercalibration between coordinate frames of spacecraft, attitude measuring instruments and payload. Calibration techniques and error evaluation are described. The ground calibration process is divided into two successive stages: 1) independent autonomous calibration of each instrument by the manufacturer; 2) joint calibration of instruments mounted on the spacecraft. Autonomous calibration is carried out on the bench equipment and relates the internal (measuring) coordinate frames with external frames such as mount seats or mirror cube. Complex calibration is carried out on the spacecraft and relates the coordinate frames of instruments and payloads. The results of each calibration stage are rotation matrices between coordinate frames. These matrices are subsequently use in the attitude complex and allow increasing accuracy and guidance time. Two calibration methods are considered: the first using mount seats, precision holes and plates, and the second using autocollimation measurements of mirror cube faces, which should be installed of instruments enclosures. Conducted errors analysis shows advantage of calibration though optical mirror cubes prior calibration through the seats.

Keywords: spacecraft orientation, attitude measuring instruments, ground, calibration, intercalibration, coordinate systems, frames, principal axes, techniques, methods, mirror cube, autocollimation measurements

Accepted: 25.05.2017

DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-4-52-63

References

1. Avanesov G.A., Polyanskiy I.V., Zhukov B.S., Nikitin A.V., Forsh A.A., Kompleks mnogozonol'noi sputnikovoi s'emki na bortu KA «Meteor-M» No. 1: tri goda na orbite // Issledovanie Zemli iz kosmosa (Multispectral Satellite Imaging System Aboard the Meteor-M No. 1 Spacecraft: Three Years in Orbit), *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*, 2013, No. 2, pp. 74–83.
2. Avanesov G.A., Krasikov V.A., Nikitin A.V., Otsenka tochnosti zvezdnogo pribora BOKZ-M po rezul'tatam nazemnykh i letnykh ispytaniy (Estimation of BOKZ-M star tracker accuracy by the ground and flight testing), *Proceedings of 1st All-Russian Scientific and Technological Conference "Contemporary Problems of Spacecraft Attitude Determination and Control"*, Moscow: IKI RAN, 2008, pp. 387–408.
3. Belinskaya E.V., Voronkov S.V., Nikitin A.V., Stroilov N.A., Yaskovich A.L., Vliyanie formy odinochnoi zvezdy na tochnostnye kharakteristiki sistemy datchikov gida teleskopa T-170M (Influence of a Single Star shape on the Accuracy of the Guidance Sensor of the T-170M telescope), *Proceedings of 4th All-Russian Scientific and Technological Conference "Contemporary Problems of Spacecraft Attitude Determination and Control"*, Moscow: IKI RAN, 2015, pp. 38–54.
4. Kondratieva T.V., Nikitin A.V., Polyanskiy I.V., Otsenka tochnosti avtomaticheskii geograficheskoi privyazki prostranstvennykh dannykh kompleksa mnogozonol'noi sputnikovoi s'emki v khode letnoi ekspluatatsii (Accuracy Estimation of Spatial Data Automatic Gridding of Satellite Multiband Imaging System through the Flight Operation), *Proc. 3rd All-Russian Scientific and Technological Conference "Contemporary Problems of Spacecraft Attitude Determination and Control"*, Moscow: IKI RAN, 2013, pp. 310–326.
5. Nikitin A.V., Dunaev B.S., Kondratieva T.V., Polyanskiy I.V. (2011a) Opredelenie geometricheskikh parametrov mnogozonal'nykh skaniruyushchikh ustroystv MSU-100, MSU-50 na laboratornom stende i v usloviyakh poleta

- kosmicheskogo apparata «Meteor-M» (Determination of Geometrical Parameters Multispectral Scanners MSU-100, MSU-50 on a Laboratory Bench and in Blight Conditions "Meteor-M"), *Proc. 2nd All-Russian Scientific and Technological Conference "Contemporary Problems of Spacecraft Attitude Determination and Control"*, Moscow: IKI RAN, 2011, pp. 289–307.
6. Nikitin A.V., Dunaev B.S., Krasikov V.A. (2011b) Nazemnyi eksperiment po sinkhronnomu opredeleniya parametrov uglovoi inertsiyal'noi orientatsii tremya priborami zvezdnoi orientatsii BOKZ-M (Ground experiment of the Simulation Determination of Parameters of the Internal Angular Orientation of the Three Devices BOKZ-M), *Proc. 2nd All-Russian Scientific and Technological Conference "Contemporary Problems of Spacecraft Attitude Determination and Control"*, Moscow: IKI RAN, 2011, pp. 62–69.
 7. Smetanin P.S., Avanesov G.A., Bessonov R.V., Kurkina A.N., Geometricheskaya kalibrovka zvezdnogo datchika vysokoi tochnosti po zvezdnomu nebu (Star Tracker Board Side Reference Frame Calibration By The Sky Research), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 2, pp. 9–23.