Математическая модель стенда определения элементов внутреннего ориентирования

Е.А. Базина, Р.В. Бессонов, Н.Н. Брысин, А.В. Никитин, С.А. Прохорова, Н.А. Сливко, Н.А. Строилов, Б.А. Юматов

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

Стенд определения элементов внутреннего ориентирования предназначен для фотограмметрической калибровки оптических звёздных датчиков, разрабатываемых в ИКИ РАН. На стенде определяются основные параметры оптической системы: фокусное расстояние, координаты главной точки и коэффициенты полинома, описывающего дисторсию объектива. При серийном и мелкосерийном производстве приборов стенд позволяет сократить или полностью отказаться от проведения натурных испытаний и калибровок по реальному звёздному небу. В работе предложена математическая модель стенда. Определены системы координат, матрицы и углы поворота. Выделены и оценены погрешности стенда: отклонения деталей и осей вращения от идеальных положений. Предложены формулы для имитации работы прибора с учётом всех погрешностей. Проведено моделирование работы стенда. Разработанное на базе модели программное обеспечение позволяет генерировать выходные данные, получаемые со стенда, аналогичные реальным измерениям. Предложены методы измерения погрешностей стенда при помощи теодолитных измерений.

Ключевые слова: математическая модель, стендовое оборудование, наземная фотограмметрическая калибровка, элементы внутреннего ориентирования, фокусное расстояние, главная точка, обобщённая дисторсия объектива, звёздный датчик, оптическая система, оптические измерительные приборы

Одобрена к печати: 19.11.2018 DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-131-144

Введение

Стенд определения элементов внутреннего ориентирования (СОЭВО) предназначен для фотограмметрической калибровки звёздных датчиков, разрабатываемых в ИКИ РАН. На стенде определяются элементы внутреннего ориентирования (ЭВО) оптической системы прибора: фокусное расстояние и дисторсия объектива. Элементы внутреннего ориентирования формируют внутреннюю систему координат прибора, в которой проводятся все измерения (Сметанин и др., 2017). Подробно процедура сквозной стендовой калибровки с участием СОЭВО описана в работе (Бессонов и др., 2017).

Функциональная схема стенда изображена на *рис. 1* (см. с. 132). На *рис. 2* (см. с. 132) показан общий вид стенда без светозащитной конструкции. На *рис. 3* (см. с. 132) приведена фотография стенда в работе. Исследуемый прибор устанавливается на поворотный стол, состоящий из двух поворотных платформ: основной (высокоточной) и вспомогательной. Оси вращения платформ перпендикулярны друг другу. Основная платформа обеспечивает вращение вокруг входного зрачка объектива на известный с малой погрешностью угол α. Вспомогательная платформа обеспечивает вращение вокруг оптической оси прибора на угол φ . Коллиматор, осветитель и точечная диафрагма формируют бесконечно удалённое изображение одиночного точечного объекта. Сменные оптические фильтры позволяют проводить измерения в нужном спектральном диапазоне. В *табл. 1* приведены основные характеристики точности используемых поворотных платформ.



Рис. 1. Функциональная схема стенда для определения элементов внутреннего ориентирования звёздных датчиков



Рис. 2. Стенд определения элементов внутреннего ориентирования



Рис. 3. Работа на стенде определения элементов внутреннего ориентирования

Характеристика	Основная (высокоточная) платформа	Вспомогательная платформа
Тип	Цифровой поворотный стол СПЦ-383	Поворотная платформа PI PRS-200 6449921111
Диапазон перемещения, град	более 360	более 360
Встроенные сенсоры	Оптический угловой энкодер Renishaw	Оптический инкрементный угловой энкодер PI
Минимальный шаг перемещения, угл. с	0,01	0,1
Погрешность измерения углов, угл. с, не более	$\pm 0,1$	$\pm 10,8$
Погрешность позиционирова- ния, угл. с, не более	$\pm 0,03$	±1
Биение оси вращения, угл. с	±2	±4
Максимальная скорость, град/с	2,5	35

Для определения элементов внутреннего ориентирования необходимо множество измерений одиночного объекта с известными угловыми положениями. Прибор пошагово вращается по углу α в пределах поля зрения. После каждого прохода прибор поворачивается вокруг оптической оси с шагом по углу ϕ . Шаги двух углов вращения подбираются таким образом, чтобы обеспечить полное, равномерное и достаточное для обработки заполнение всего поля зрения.

Очевидно, что детали и механизмы стенда, а также исследуемый прибор не являются идеальными геометрическими фигурами и имеют погрешности изготовления. Далее приведена классификация погрешностей, предложена математическая модель стенда, процедура обработки данных и оценён вклад каждой погрешности в итоговые результаты калибровки.

Системы координат и погрешности стенда

Стенд состоит из двух поворотных платформ и коллиматора. Вспомогательная поворотная платформа установлена на основной и поворачивается вместе с ней. На вспомогательной поворотной платформе установлен оптический прибор. Определения систем координат приведены в *табл. 2.*

Наименование	Обозначение	Определение	
Стендовая систе- ма координат	$\begin{array}{c} \text{CCK,} \\ OX_{\text{cT}}Y_{\text{cT}}Z_{\text{cT}} \end{array}$	ССК фиксируется на начальное положение платформ и не ме- няется за время измерений. Ось Z_{cr} совпадает с осью вращения первой платформы. Ось X_{cr} перпендикулярна оси Z_{cr} , направле- на в сторону коллиматора в нулевом положении высокоточной платформы. Ось Y_{cr} дополняет систему до правой	
Система коор- динат основной платформы	$\begin{array}{c} \text{CK1,} \\ OX_1Y_1Z_1 \end{array}$	В начальный момент времени совпадает со стендовой системой координат. В ходе эксперимента СК1 итеративно поворачивается на угол α вокруг оси OZ_{cr} . Ось OZ_1 является осью вращения первой платформы и всегда совпадает с осью OZ_{cr}	
Система коорди- нат вспомогатель- ной платформы	$\begin{array}{c} \text{CK2,} \\ OX_2Y_2Z_2 \end{array}$	В начальный момент времени плоскость OX_2Z_2 располагается в плоскости одноимённых осей стендовой системы координат. СК2 итеративно вращается вместе с СК1 на углы α и ϕ вокруг оси OZ_2 . Ось OZ_2 является осью вращения второй платформы	

Таблица	2.	Системы коорлинат	соэво
Inomina	<i>~</i> .	спотолы координи	COODO

Окончание табл. 2

Наименование	Обозначение	Определение
Внутренняя си- стема координат прибора	$\begin{array}{c} \text{BCK,}\\ OX_{\text{BCK}}Y_{\text{BCK}}Z_{\text{BCK}}\end{array}$	Прибор монтируется на вторую платформу и вращается вместе с СК2. В начальный момент времени оси <i>ОХ</i> _{ВСК} и <i>ОZ</i> _{ВСК} располагаются в плоскости одноимённых осей стендовой системы координат. Ось <i>ОZ</i> _{ВСК} является оптической осью прибора
Ось коллиматора	r _{зв0}	Положение оси коллиматора в идеальной системе. Ось коллинеарна и противонаправлена оси $OX_{\rm cr}$
	۲ _{3В}	Аналогично $r_{_{380}}$, но образует с осью $X_{_{\rm CT}}$ дополнительный угол в плоскости $OX_{_{\rm CT}}Z_{_{\rm CT}}$

В идеальном случае стенд не имеет ошибок (*puc. 4*). Все оси строго параллельны или перпендикулярны друг другу. Оси вращения двух платформ перпендикулярны, оптическая ось прибора совпадает с осью вращения вспомогательной платформы и коллинеарна оптической оси коллиматора.

В реальности положения осей отличаются от идеальных (*puc. 5*). Детали стенда и платформ имеют погрешности изготовления. Присутствуют дополнительные углы отклонения от идеальных положений. В *maбл. 3* приведены обозначения и определения всех погрешностей. Углы погрешностей стенда, лежащие в плоскостях *OXZ*, обозначены как θ . Углы в перпендикулярных плоскостях — ψ . Оценки погрешностей приведены согласно проделанным измерениям на стенде и паспортным данным используемых поворотных платформ.



Рис. 4. Положение систем координат стенда в идеальном случае



Рис. 5. Положение систем координат стенда в реальном случае (показаны углы θ)

Наименование	Обозна- чение	Определение	Оценка	Использование в расчётах
Наклон оси коллиматора	$ \theta_{\text{кол}} $ Отклонения оптической оси коллиматора от коллинеарности оси $OX_{\text{ст}}$. Угол $ \theta_{\text{кол}} $ Положительный, если вектор звезды лежит в плоскости $OX_{\text{ст}}Z_{\text{ст}}$, т.е. при наклоне коллиматора вниз		менее 0,5°	2°
	$\psi_{\rm кол}$	Отклонение оптической оси коллиматора от плоскости <i>ОZ</i> _{ст} <i>X</i> _{ст}	менее 1°	2°
Неперпен- дикулярность осей вращения платформ	θ _{пл}	Отклонения оси вращения второй платформы от перпендикуляра к оси вращения первой в плоскости OX_1Z_1 . Угол $\theta_{\pi\pi} > 0$, если ось OX_2 лежит в плоскости $OZ_{cT}X_{cT}$, т.е. ось вращения второй платформы OZ_2 направлена вверх	менее 1°	2°
	ψ _{пл}	Отклонение оси вращения второй платформы от перпендикуляра к оси вращения первой в плоскости <i>OX</i> ₁ <i>Y</i> ₁	менее 3°	3°
Непараллельность	θ _{приб}	Угол отклонения оптической оси прибора	менее 1°	2°
оптической оси прибора и оси вращения вспо- могательной платформы	ψ _{приб}	$OZ_{\rm BCK}$ от оси вращения второй платформы OZ_2 в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Имеет две составляющие: наклон посадочного места прибора относительно оптической оси (переход от BCK к посадочному месту) и кли- новидность установочной плиты, на которую монтируется прибор	менее 1°	2°
Конусность вра- щения высокоточ- ной платформы	_	Люфт оси вращения высокоточной поворотной платформы (Бессонов и др., 2018). В расчётах значение включено в СКО угла ф	менее 3 угл. с	_
Конусность вращения вспо- могательной платформы	_	Люфт оси вращения вспомогательной поворот- ной платформы. В расчётах значение включено в СКО угла ф	4 угл. с	_
СКО угла α	σ_{α}	Отклонение показаний высокоточной по- воротной платформы от истинных значений поворота	0,3 угл. с	1 угл. с
СКО угла ф	σ_{ϕ}	Отклонение показаний вспомогательной по- воротной платформы от истинных значений поворота	10 угл. с	30 угл. с
СКО локализации звезды прибором и неучтённые ошибки	σ _{приб.}	Методические ошибки определения взвешен- ного центра и другие неучтённые ошибки	0,2 пик- селя	0,5 пикселя

Таблица 3. Погрешности стенда

Математическая модель, моделирование работы и обработка данных

Математическая модель разработана:

- 1) для моделирования работы стенда и получения набора точек с фотоприёмного устройства любого прибора;
- 2) обработки полученных координат и вычисления искомых ЭВО.

Схема моделирования и реальной калибровки на стенде, а также участие программного обеспечения (ПО) и математической модели показаны на *puc. 6* (см. с. 136).



Рис. 6. Структурная схема моделирования, работы и обработки измерений СОЭВО (входные данные показаны зелёным цветом, выходные данные — оранжевым, ПО — синим и фиолетовым)

В задаче моделирования требуется определить линейные координаты *x*, *y* звезды в ВСК на фотоприёмном устройстве при поворотах СК1 и СК2 на углы α и φ соответственно с учётом и без учёта погрешностей.

Входными данными для моделирования являются: параметры прибора (размер ФПУ, размер элемента), ЭВО прибора (фокусное расстояние, параметры дисторсии), значения погрешностей стенда, параметры работы стенда (шаги углов и СКО в положении двух поворотных платформ). Выходными данными — координаты *x*, *y* точек на ФПУ и углы α и φ для каждой точки. Моделирование выполняется по приведённым ниже формулам.

Вектор направления на звезду в ССК определяется по формуле:

$$r_{_{3B}} = \begin{pmatrix} l \\ m \\ n \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} \cos(\psi_{_{KO\Pi}}) \cdot \cos(\theta_{_{KO\Pi}}) \\ \sin(\psi_{_{KO\Pi}}) \cdot \cos(\theta_{_{KO\Pi}}) \\ \sin(\theta_{_{KO\Pi}}) \end{pmatrix}.$$
(1)

Вектор *г* на звезду в ВСК вычисляется по формулам:

$$r = M_{BCK}^{CCK} \cdot r_{3B},$$

$$M_{BCK}^{CCK} = M_{BCK}^{CK2} \cdot M_{CK2}^{CK1} \cdot M_{CK1}^{CCK},$$

$$M_{CK1}^{CCK} = El(0,0,\alpha),$$

$$M_{CK2}^{CK1} = El(0,0,\varphi) \cdot \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot El(\psi_{nn}, \theta_{nn}, 0),$$

$$M_{BCK}^{CK2} = M_{nep} \cdot El(\psi_{npu\delta}, \theta_{npu\delta}, 0),$$

$$El(ax, ay, az) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(ax) & -\sin(ax) \\ 0 & \sin(ax) & \cos(ax) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(ay) & 0 & \sin(ay) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(ay) & 0 & \cos(ay) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(az) & -\sin(az) & 0 \\ \sin(az) & \cos(az) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$
(2)

где α — угол вращения высокоточной поворотной платформы; ϕ — угол вращения вспомогательной поворотной платформы; M_{CK1}^{CCK} , M_{BCK}^{CCK} , M_{BCK}^{CK2} , M_{BCK}^{CK2} — ортогональные матрицы перехода, содержащие направляющие косинусы осей одной системы координат в другой; $M_{\text{пер}}$ — матрица исходной установки прибора (матрица перестановки осей); El(ax, ay, az) — матрица поворота, представленная тремя последовательными поворотами на углы Эйлера ax, ay, az.

Координаты звезды на ФПУ вычисляются из выражений (1) и (2) по формулам:

$$x = -f\frac{l}{n} + dx(x, y), \quad y = -f\frac{m}{n} + dy(x, y),$$

где dx(x, y) и dy(x, y) — коэффициенты полинома дисторсии объектива.

Результатом моделирования, как и результатом работы самого стенда, является распределение точек, показанное на *рис.* 7.



Рис. 7. Распределение точек одиночного объекта в поле зрения прибора

Обработка результатов съёмки проводится по аналогичным формулам и заключается в уравнивании методом наименьших квадратов измеренных и вычисленных положений.

Входными данными для обработки служат выходные данные моделирования: координаты x, y точек на ФПУ, углы α и ϕ для каждой точки, априорные значения погрешностей. Результатом обработки являются искомые элементы внутреннего ориентирования: величина обобщённого фокусного расстояния f' и значения коэффициентов полинома, описывающего дисторсию, а также погрешности стенда.

Результаты моделирования и обработки

Результаты моделирования с разными значениями погрешностей показаны на *рис. 8* (см. с. 138). Значения ошибок намеренно завышены для наглядности рисунка распределения. На иллюстрациях видно, что разные погрешности по-разному влияют на результат. Непараллельность оптической оси пробора и оси вращения ($\theta_{\text{приб}}$ и $\psi_{\text{приб}}$) равномерно смещает точки в поле зрения. При этом рисунок распределения не меняется. Угол $\psi_{\text{кол}}$ смещает точки при разных углах вспомогательной платформы. Наклон коллиматора ($\theta_{\text{кол}}$) и неперпендикулярность осей платформ ($\theta_{\text{пл}}$ и $\psi_{\text{пл}}$) дают схожие искажения: появляется незаполненная область в центре распределения. Однако, как видно из расчётов, наклон коллиматора и неперпендикулярность по-разному влияют на итоговые значения ЭВО.

Обработка данных моделирования показывает, что углы наклона прибора всегда определяются безошибочно и не влияют на качество калибровки. В то же время углы неперпендикулярности и наклона коллиматора частично коррелированы друг с другом и вносят вклад в определение дисторсии.

На *рис. 9* (см. с. 138) и *10* (см. с. 139) показано влияние углов наклона и неперпендикулярности на точность калибровки. Продемонстрирован вклад в калибровку неточности определения этих углов. Цветом показаны кривые при различных истинных значениях ошибок. По осям абсцисс отложено отклонение от истинных значений, используемое в расчёте. Из графиков видно:

- 1) с увеличением ошибки увеличивается её вклад в итоговую калибровку;
- при отсутствии ошибок (синие кривые) вклад в калибровку минимален, а с увеличением самой ошибки увеличивается вклад от отклонений;
- 3) без уточнения других параметров отклонение углов более 10 угл. мин от их истинных значений искажает результаты калибровки на десятки микрометров;
- при уточнении других параметров отклонения углов неперпендикулярности и коллиматора частично компенсируются друг другом: отклонение углов ±10 угл. мин искажает калибровку менее чем на 0,5 мкм.



Рис. 8. Результаты моделирования работы СОЭВО с различными значениями ошибок: $\alpha = -12^{\circ}$, $-10...12^{\circ}$; $\phi = 0, 5, ..., 180^{\circ}$; f = 32 мм; дисторсия объектива отсутствует; $\Phi \Pi Y 2048 \times 2048$ элементов, 0,055 мм/элемент



Рис. 9. Влияние отклонения угла наклона коллиматора на точность калибровки с уточнением остальных параметров и без него. Цветом показаны значения угла $\theta_{_{\rm KOЛ}}$



Рис. 10. Влияние отклонения угла неперпендикулярности платформ на точность калибровки с уточнением остальных параметров и без него

Таким образом, модель адекватна при знании углов неперпендикулярности и наклона коллиматора с точностью до 10 угл. мин. С такой же точностью необходима калибровка стенда и выставка его осей.

Измерение погрешностей стенда

Измерение погрешностей выставки стенда может быть проведено теодолитными автоколлимационными измерениями от плоского зеркала, установленного на посадочную плоскость поворотного стола. Нормаль зеркала реализует оптическую ось прибора и имеет собственные углы $\theta_{приб}$ и $\psi_{приб}$. Теодолит позволяет измерить вектора осей вращения поворотных платформ и направление света коллиматора в единой системе координат. По результатам измерений может быть выполнена юстировка стенда с уменьшением величин погрешностей выставки. Также измеренные углы могут использоваться при обработке данных при вычислении ЭВО.

Схемы измерений показаны на *рис. 11* (см. с. 140). Два теодолита (базовый ТБ и измерительный ТИ) устанавливаются на штативы рядом со стендом. Базовый теодолит ставится напротив коллиматора. Измерительный устанавливается под углом 90° к оптической оси коллиматора так, чтобы визировать зеркало и базовый теодолит.

Угол наклона коллиматора относительно местной вертикали измеряется базовым теодолитом путём визирования точечного объекта. Далее проводится серия измерений базовым и измерительным теодолитами на зеркало при различных углах α и ϕ . Ось вращения вспомогательной платформы определяется четырьмя измерениями одним теодолитом при двух противоположных положениях зеркала: $\phi = 0$, 180° и $\phi = 90^\circ$, 270°. Осью вращения является нормированная сумма двух противоположных векторов. Ось вращения высокоточной платформы определятся путём решения системы уравнений методом наименьших квадратов. Система составляется из уравнений для каждого автоколлимационного измерения.

Для каждого положения высокоточной платформы составляется уравнение:

$$a \cdot \cos(r \mathbf{1}_{\alpha} \cdot r \mathbf{2}_{\alpha}) = \gamma,$$

где $r1_{\alpha}$ — вектор вращения вспомогательной платформы при угле α ; $r2_{\alpha}$ — неизвестный вектор вращения высокоточной платформы; γ — неизвестный угол между двумя осями вращения ($\gamma \rightarrow 90^{\circ}$).



Рис. 11. Схемы измерения оси коллиматора и оси вращения первой платформы (вид сверху). ТБ — теодолит базовый, ТИ — теодолит измерительный

Ось вращения вспомогательной платформы (*r*1_α) определяется для каждого положения высокоточной платформы (для каждого угла α) по формуле:

$$r1_{\alpha} = r_{\alpha,0} + r_{\alpha,180} + r_{\alpha,90} + r_{\alpha,270},$$

где $r_{\alpha,0}$, $r_{\alpha,90}$, $r_{\alpha,180}$, $r_{\alpha,270}$ — векторы нормали к зеркалу, полученные при четырёх положениях вспомогательной платформы ($\varphi = 0, 90^\circ, 180^\circ$ и 270°).

Вектор одиночного измерения теодолитом определяется по формуле:

$$r1_{\alpha,\varphi} = \begin{pmatrix} l \\ m \\ n \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} \cos(-Hz) \cdot \cos(90^\circ - V) \\ \sin(-Hz) \cdot \cos(90^\circ - V) \\ \sin(90^\circ - V) \end{pmatrix},$$

где *Hz*, *V* — значения горизонтального и вертикального отсчётов теодолита; α, φ — углы поворота высокоточной и вспомогательной платформ соответственно.

Подтверждение математической модели

Для подтверждения модели на стенде была проведена серия реальных измерений оптическими головками ОГ-32 из состава прибора звёздной ориентации мБОКЗ-2. Оптические головки основаны на КМОМ-матрице форматом 2048×2048 пикселей и имеют объектив с фокусным расстоянием 32 мм. Размер пикселя — 5,5 мкм. Угловое разрешение — 36 угл. с/пиксель. Приборы были дважды откалиброваны по реальному звёздному небу в апреле и июле 2017 г. и один раз — на СОЭВО в 2018 г. Таким образом, имелось три набора ЭВО: два — по кадрам натурных испытаний и один — при стендовой калибровке.

Сравнение ЭВО показано в *табл. 4.* На *рис. 12* приведены полиномы дисторсии натурных и стендовых измерений, а также разницы полиномов. Максимальное отклонение в полиномах дисторсии достигается на краях поля зрения и составляет менее 1 мкм.

	Натурные	испытания	Стендовые испытания
	апрель 2017 г.	июль 2017 г.	
Фокусное расстояние, мм	32,0068	32,0036	32,0089
Остаточные рассогласования, мкм	0,58	0,55	0,57
Количество кадров, шт.	33	63	587
Суммарное число звёзд/точек, шт.	1749	10 773	587





Рис. 12. Поверхности полиномов *dx* (*слева вверху*) и *dy* (*справа вверху*) дисторсии объектива по полю ФПУ и разницы полиномов (*внизу*). Данные получены при стендовой и натурной калибровке прибора ОГ-32 № 04. Размеры в миллиметрах



Рис. 13. Ошибки единицы веса (*вверху*) и определения углов ориентации *Al* и *Az* (*внизу*) при распознавании кадров звёздного неба с использованием трёх наборов ЭВО. Данные с прибора ОГ-32 зав. № 04. Кадры отсортированы по увеличению времени экспонирования от 25 до 1000 мс

Основным критерием качества калибровки являются остаточные рассогласования, полученные при распознавании реальных кадров с применением различных наборов ЭВО. Сравнение результатов калибровки проведено путём обработки кадров натурной съёмки. Было выбрано 50 кадров звёздного неба, сделанных с разным временем экспонирования от 25 до 1000 мс. Остаточные ошибки распознавания показаны на *рис. 13*.

Очевидно, что наилучший результат даёт обработка тех же кадров, по которым произведена калибровка (апрель). В то же время стендовая калибровка показывает результат, сравнимый с калибровкой по звёздному небу. Так, среднее значение невязок для всех кадров при их распознавании с применением ЭВО натурных калибровок составляет 0,57 мкм, а с применением ЭВО стендовой калибровки — 0,61 мкм.

Выводы

Предложена математическая модель стенда, в которой выделены три погрешности: наклон оси коллиматора, неперпендикулярность осей вращения платформ и непараллельность оптической оси и оси вращения. Погрешности стенда могут быть измерены путём автоколлимационных теодолитных измерений плоскопараллельного зеркала, установленного на стенд.

Показано, что для проведения калибровок приборов серии ОГ-32 с точностью не хуже 0,5 мкм требуется предварительная юстировка стенда и знание углов наклона и неперпендикулярности в диапазоне ± 10 угл. мин.

Анализ реальных измерений приборами ОГ-32 показал достоверность модели и точность калибровки ЭВО на уровне калибровки по реальному звёздному небу.

Литература

- 1. Бессонов Р.В., Брысин Н.Н., Полянский И.В., Воронков С.В., Белинская Е.В., Строилов Н.А., Полишук Г.С., Трегуб В.П., Завгородний Д.С. Стенды для определения фотограмметрических параметров высокоточных звездных датчиков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 3. С. 107–117. URL: http://jr.rse.cosmos.ru/article.aspx?id=1644.
- 2. *Бессонов Р.В., Белинская Е.В., Брысин Н.Н., Воронков С.В., Прохорова С.А., Строилов Н.А., Форш А.А.* Стендовое исследование погрешности определения энергетического центра яркости изображения звёзд в звёздных датчиках // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 6. С. 82–89.
- 3. Сметанин П. С., Аванесов Г.А., Бессонов Р.В., Куркина А. Н., Никитин А. В. Геометрическая калибровка звёздного датчика высокой точности по звёздному небу // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 2. С. 9–23. URL: http://jr.rse.cosmos.ru/article. aspx?id=1629.

Mathematical model of the measurement bench for determination of internal orientation elements

E.A. Bazina, R.V. Bessonov, N. N. Brysin, A.V. Nikitin, S.A. Prokhorova, N.A. Slivko, N.A. Stroilov, B.A. Yumatov

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

The measurement bench for determination of internal orientation elements is designed for photogrammetric calibration of optical star trackers developed in IKI RAS. The basic parameters of the optical system are defined: the focal length, the main point coordinates and the coefficients of the polynomial describing the lens distortion. In serial and small-scale production of devices the bench makes it possible to reduce or completely abandon the full-scale tests and calibrations on the real starry sky. A mathematical model of the bench is proposed. Coordinate systems, matrices and rotation angles are determined. The errors of the bench are determined and estimated – the deviations of parts and axes of rotation from the ideal positions. The formulas for simulating the instrument operation are proposed taking into account all the errors. The simulation of the bench operation is carried out. The software developed on the basis of the model allows to generate the output data obtained from the bench, similar to real measurements. The methods of bench measurement errors with the help of theodolite measurements are proposed.

Keywords: mathematical model, bench equipment, on-ground photogrammetric calibration, elements of interior orientation, focal length, main point, generalized distortion of the lens, star tracker, optical system, optical measuring instruments

Accepted: 19.11.2018 DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-131-144

References

- Bessonov R.V., Brysin N.N., Polyanskiy I.V., Voronkov S.V., Belinskaya E.V., Stoilov N.A., Polishchuk G.S., Tregub V.P., Zavgorodniy D.S., Stendy dlya opredeleniya fotogrammetricheskikh parametrov vysokotochnykh zvezdnykh datchikov (Test benches for the determination of star tracker photogrammetric parameters), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 3, pp. 107–117, URL: http://jr.rse.cosmos.ru/article.aspx?id=1644.
- 2. Bessonov R.V., Belinskaya E.V., Brysin N.N., Voronkov S.V., Prokhorova S.A., Stroilov N.A., Forsh A.A., Stendovoe issledovanie pogreshnosti opredeleniya energeticheskogo tsentra yarkosti izobrazheniya zvezd v zvezdnyh datchikakh (The test bench study of star image energy center determination error in star trackers), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 6, pp. 82–89.
- 3. Smetanin P. S., Avanesov G. A., Bessonov R. V., Kurkina A. N., Nikitin A. V., Geometricheskaya kalibrovka zvezdnogo datchika vysokoi tochnosti po zvezdnomu nebu (Geometric calibration of high-precision star tracker by starry sky), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 2, pp. 9–23, URL: http://jr.rse.cosmos.ru/article.aspx?id=16291.