

Геометрическая калибровка звёздного датчика высокой точности по звёздному небу

П.С. Сметанин¹, Г.А. Аванесов, Р.В. Бессонов, А.Н. Куркина, А.В. Никитин

Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия

¹*E-mail: guldthen@gmail.com*

Работа посвящена экспериментальному исследованию метода калибровки звездного датчика высокой точности по реальным звёздам на небесной сфере. В экспериментах используется оптическая головка ОГ-ВТ на базе объектива ОЗК-125/4 и КМОП-матрицы CMV20000 и анализируются полученные с ее помощью материалы съемки звезд небесной сферы. Рассматривается алгоритм геометрической калибровки звёздного датчика. Даются рекомендации по отбору кадров звёздного неба, подходящих для калибровки – вводится понятие коэффициента заполнения звёздами поля зрения прибора.

В ходе экспериментов пошагово определяются калибровочные параметры звёздного датчика: координаты главной точки, фокусное расстояние и функция обобщенной дисторсии, рассчитываются углы ориентации. Рассматривается зависимость калибровочных параметров от температуры, влияние точности определения фокусного расстояния и координат главной точки на точность определения функции обобщенной дисторсии. Проводится эксперимент по нахождению зависимости точности определения функции обобщенной дисторсии от спектрального класса звёзд, используемых в обработке.

Дается оценка результирующей точности калибровочных параметров ОГ-ВТ и получаемых с ее помощью параметров ориентации звёздного датчика. Приводится сравнение расчетных и экспериментальных результатов калибровки. Высокая точность знания взаимных угловых положений звезд на небесной сфере создает неоспоримые преимущества рассматриваемому методу калибровки звёздного датчика перед другими методами, использующими наземное оптическое оборудование.

Ключевые слова: геометрическая калибровка, дисторсия, параметры ориентации, звёздный датчик, фокусное расстояние, главная точка, спектральный класс звезды, температура, оценка точности

Одобрена к печати: 14.03.2017

DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-2-9-23

1. Постановка эксперимента

Геометрическая калибровка оптически связанной пары «объектив – матричный приемник излучения» выполняется с целью установления однозначного, с заданной точностью, соответствия положения координат наблюдаемых звезд на самой матрице в линейной мере и на небесной сфере в угловой мере. Соотношение между угловой и линейной мерами устанавливается через фокусное расстояние объектива с учетом геометрических искажений, вызванных оптикой, матрицей и конечной точностью сборки устройства.

Выполнить геометрическую калибровку звездного датчика (ЗД) – значит, найти оптимальные для данного прибора значения координат главной точки и фокусного расстояния, исправить геометрию изображения, в том числе с учетом хроматизма, проверить сохранность калибровочных параметров в требуемом диапазоне температур (Аванесов, Красиков, Никитин, 2008).

Координатные оси внутренней системы координат (ВСК) ЗД реализуются строками и столбцами фоточувствительной матрицы (оси Ox и Oy) и перпендикуляром (параллелен оси Oz), опущенным из узловой точки объектива на плоскость матрицы. Точку пересечения этого перпендикуляра с плоскостью фоточувствительной матрицы называют главной точкой (рис. 1), а ее координаты x_0 , y_0 являются калибровочными параметрами ЗД. Кроме

того, к калибровочным параметрам ЗД относится фокусное расстояние оптической системы, обозначаемое через f . В реальном ЗД связь координат центров яркости звезд на фотоприемнике с направлениями на них не подчиняется идеальным соотношениям модели центральной проекции. Для учета малых отклонений реальной модели от идеальной вводится понятие обобщенной дисторсии (Wilson et al., 1993). Обобщенную дисторсию можно представить в виде гладких функций $Dx(x, y)$ и $Dy(x, y)$, а уравнения, описывающие связь между координатами центров яркости изображений звезд (x, y) на плоскости фотоприемника и углами направления на звезды (α, β) , можно представить в виде:

$$\begin{aligned} x - x_0 + Dx(x, y) &= f \cdot \tan(\alpha) \\ y - y_0 + Dy(x, y) &= f \cdot \tan(\beta) \end{aligned} \quad (1)$$

Калибровка ЗД в данном случае сводится к определению фокусного расстояния f , координат главной точки x_0, y_0 и функций обобщенной дисторсии $Dx(x, y), Dy(x, y)$.

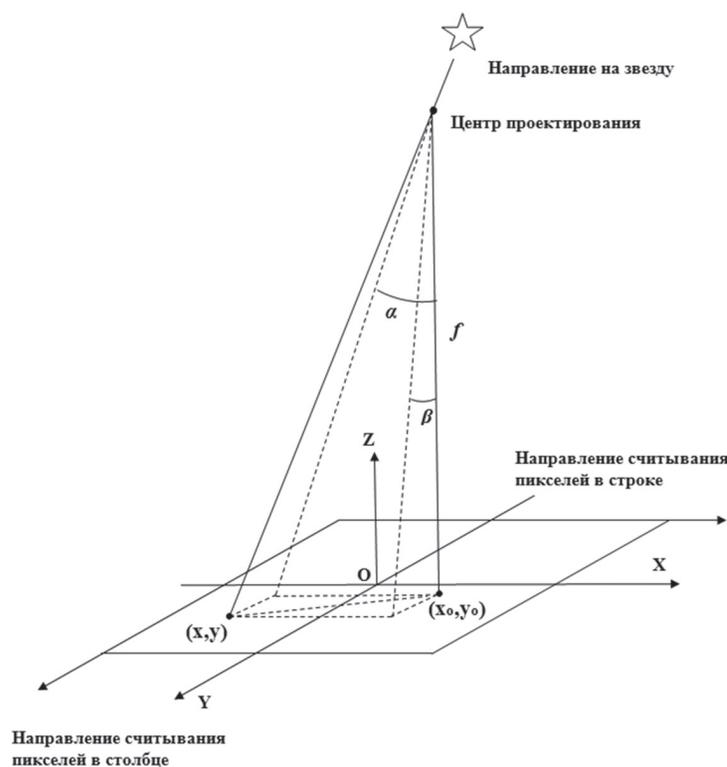


Рис. 1. Калибровочные параметры внутренней системы координат ЗД

Сложность геометрической калибровки ЗД связана с высокими требованиями по точности ее выполнения. В нашем случае геометрическая калибровка должна выполняться с целью обеспечения определения положения центров изображений звезд на матрице с точностью порядка 0,2 мкм. С учетом параметров используемого объектива это соответствует ошибке измерения положения звезд на небесной сфере порядка 0,3", требуемой от ЗД высокой точности. При этом точность знания положения звезд на небесной сфере определяется используемым в работе астрономическим каталогом Hipparcos и составляет

величину порядка $0,001''$. Именно большой запас по точности звездного каталога и делает калибровку по звездам предпочтительной по отношению к другим вариантам.

Метод геометрической калибровки по звездам в основном использует набор стандартных для звездных датчиков процедур: съемку небесной сферы с заданными параметрами, локализацию звезд, измерение координат звезд на матрице, отождествление конфигурации наблюдаемых звезд с каталогом (распознавание звезд), уравнивание сети наблюдаемых звезд с их каталожным аналогом методом наименьших квадратов (МНК) и вычисление параметров ориентации. Использование перечисленных процедур позволяет вычислять указанные калибровочные параметры: фокусное расстояние, положение главной точки и дисторсию.

Для исследования и отработки метода геометрической калибровки были выполнены съемки участка небесной сферы с помощью прибора ОГ-ВТ (оптическая головка высокой точности) с объективом ОЗК-125/4. ОГ-ВТ предназначена для формирования цифровой информации о координатном положении и яркостных характеристиках объектов в ее поле зрения. ОГ-ВТ обладает следующими характеристиками:

- Фотоприемное устройство – КМОП-матрица CMOSIS 20000 (5120×3840 пикселей).
- Размер элементарного детектора – 6,4 мкм.
- Фокусное расстояние – 125 мм.
- Относительное отверстие – 1:4.
- Поле зрения – 18,66 градуса по диагонали.
- Угловой размер пикселя – $10,5''$.

Наилучшие результаты калибровки достигаются в случае, когда изображения звезд равномерно покрывают всю поверхность матрицы. В связи с этим для оценки плотности заполнения введём понятие «коэффициента заполнения».

Экспериментально установлено, что для качественной калибровки необходимо минимум 400 равномерно расположенных на кадре точек. Разделим поле матрицы ОГ-ВТ на 400 одинаковых прямоугольников ($\sim 256 \times 192$ пикселя каждый). Будем считать, что при попадании одной или более распознанных звезд в один из прямоугольников у нас есть точка для расчета дисторсии. Максимально необходимое количество таких «успехов» – 400. В таком случае коэффициент заполнения поля зрения имеет вид:

$$K_f = \frac{N_s}{N_f}, \quad (2)$$

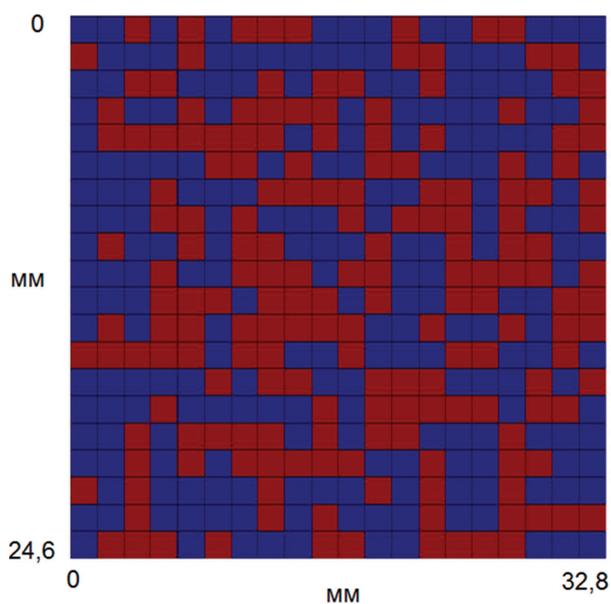
где N_s – число прямоугольников поля зрения, в которые попала одна или более распознанных звёзд, N_f – максимальное число прямоугольников поля зрения. На *рис. 2, 3* приведены примеры заполнения поля матрицы.

Для обеспечения высокого коэффициента заполнения оптическая головка ОГ-ВТ была установлена на платформу, позволяющую поворачивать прибор вокруг его визирной оси на заданный угол. Съёмка проводилась в двух режимах. В режиме 1 платформа была

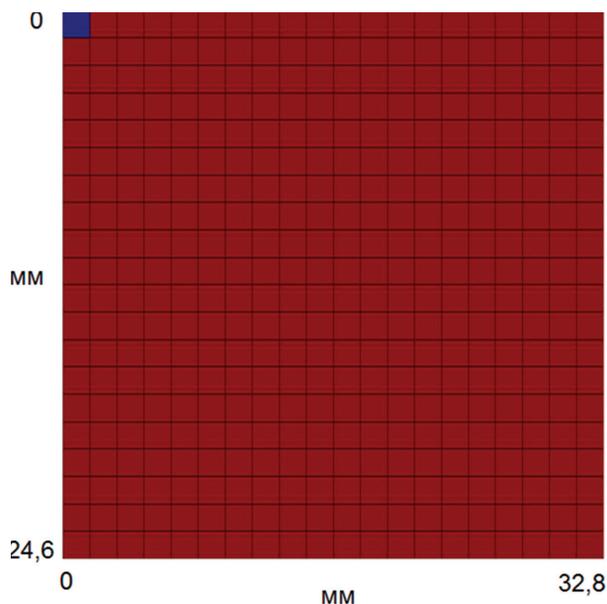
неподвижна, а смещение звёзд в поле зрения определялось вращением Земли. В режиме 2 каждый раз после выполнения съемки с разными временами экспозиции платформа поворачивалась на заданный угол. В *табл. 1* приводятся параметры отснятых материалов, использованных в данной работе.

Таблица 1. Сводная таблица параметров серий кадров, использованных в экспериментах

	<i>Режим 1 (статический)</i>	<i>Режим 2 (динамический)</i>
Даты съемки: 02.07.2016 – 17.07.2016		
Количество	11 серий по 200 кадров	11 серий по 72 кадра
Время между кадрами, с	4	8
Угловое смещение между кадрами, град.	–	10
Время экспозиции, мс	50, 100, 400, 1000	50, 100, 400, 1000
Дата съемки: 18.02.2016 (калибровка по отдельным спектральным классам)		
Количество	–	1 серия – 720 кадров
Время между кадрами, с	–	4
Угловое смещение между кадрами, град.	–	0,5
Время экспозиции, мс	–	500



*Рис. 2. Заполнение поля зрения звёздами:
1 кадр, 300 звёзд, $K_f=0,46$
(красный квадрат – есть хотя бы одна звезда, синий – звёзды отсутствуют)*



*Рис. 3. Заполнение поля зрения звёздами:
30 кадров, 9000 звёзд, $K_f=0,99$
(красный квадрат – есть хотя бы одна звезда, синий – звёзды отсутствуют)*

На оптической головке ОГ-ВТ было установлено 3 температурных датчика Т2, Т3, Т4 (*рис. 4*). Съёмки проводились на открытой местности, температура прибора менялась естественно с суточным изменением температуры окружающей среды (от 02.07.2016 – 17.07.2016), кроме 8-ой серии, в ходе которой производился нагрев объектива ОГ-ВТ. Во время эксперимента проводились замеры температуры для каждой серии кадров (кроме

серии от 18.02.2016). Для каждого момента съёма температуры были рассчитаны значения фокусного расстояния и главной точки.

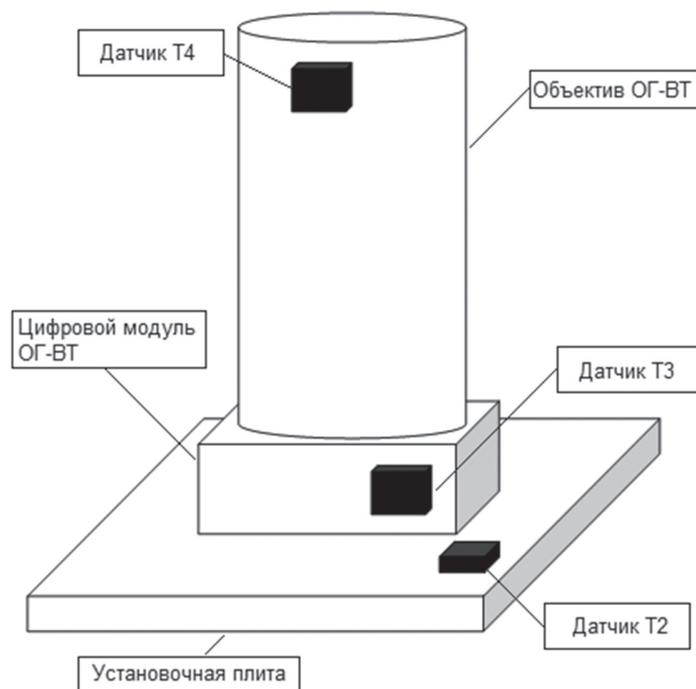


Рис. 4. Расположение датчиков температуры на ОГ-ВТ

Диапазон измеренных температур лежит от 15 до 35 градусов Цельсия.

После проведения основного эксперимента по определению точности метода калибровки его результаты сравнивались с расчетами, полученными ранее путем моделирования оптической системы на базе объектива ОЗК-125/4 при совместной работе ИКИ РАН и ЛОМО (Ленинградское оптико-механическое объединение).

2. Алгоритм калибровки

Эксперимент по калибровке ВСК проводился в соответствии с алгоритмом, представленным на рис. 5. На первом этапе производится отборка серии кадров с удовлетворительным коэффициентом заполнения. После локализации объектов на кадре и измерения их координат, составления и решения системы уравнений (1) поочередно находятся параметры x_0 , y_0 , f , $Dx(x,y)$, $Dy(x,y)$, следующим образом:

1. МНК-расчёт для каждого кадра серии шести калибровочных параметров: координат главной точки, фокусного расстояния и трех углов ориентации прибора. Расчёт среднего значения координат главной точки в серии и фиксация этих значений.

2. МНК-расчёт для каждого кадра серии четырёх калибровочных параметров: фокусного расстояния и углов ориентации при принятых значениях координат главной точки. Расчёт среднего значения фокусного расстояния в серии и фиксация этого значения.

3. МНК-расчёт для каждого кадра серии трех углов ориентации при принятых значениях координат главной точки и фокусного расстояния.

4. Расчёт для каждой звезды на каждом кадре серии остаточных отклонений от расчетного положения и определение функций обобщённой дисторсии путем аппроксимации остаточных ошибок полиномами.

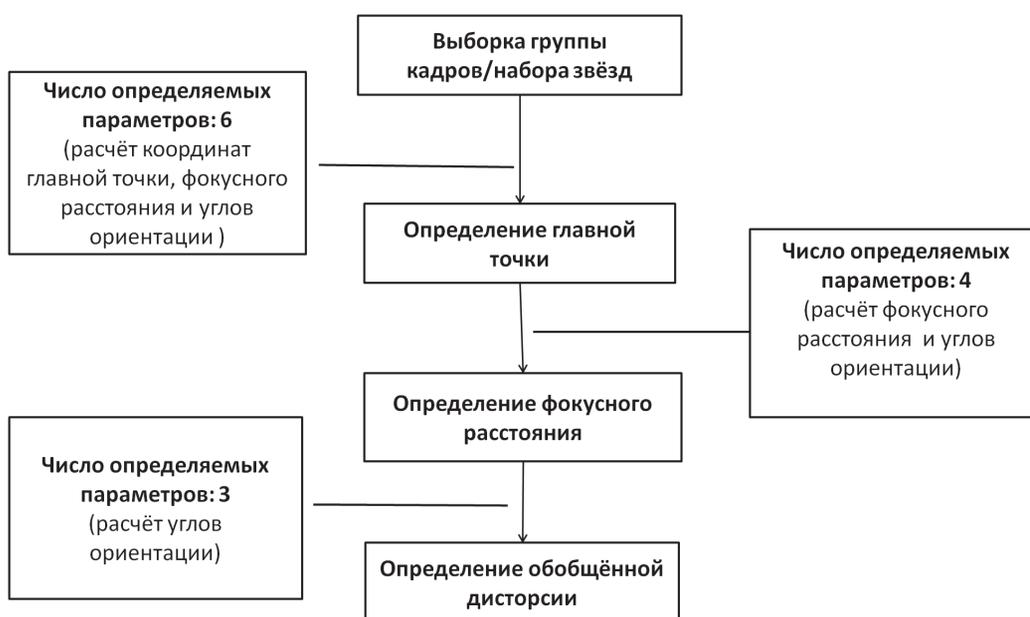


Рис. 5. Обобщённая схема алгоритма калибровки оптической системы 3Д

3. Определение координат главной точки

Проиллюстрируем зависимость точности определения координат главной точки от различных факторов. В табл. 2 приведены значения среднеквадратического отклонения (СКО) координат главной точки среди кадров одной серии для случая, когда в обработку на каждом кадре серии берётся 200 или 20 звёзд. СКО координат главной точки зависит от количества поступивших в обработку звёзд при одинаковом времени экспонирования и уменьшается с ростом их количества из-за увеличения числа уравнений в системе (1).

Таблица 2. Зависимость СКО координат главной точки от количества звёзд в обработке (режим 2 - вращение, серия из 200 кадров, время экспозиции 1000 мс)

СКО по оси X/Y 20 звёзд в обработке, мкм		СКО по оси X/Y 200 звёзд в обработке, мкм	
X	Y	X	Y
312	245	21	24

Рис. 6 демонстрирует, что при сравнении координат главной точки, полученных по двум последовательным сериям из 200 кадров вращения, их отклонение от среднего значения по двум сериям стремится практически к нулю (~ до 0,5 мкм при размере пикселя

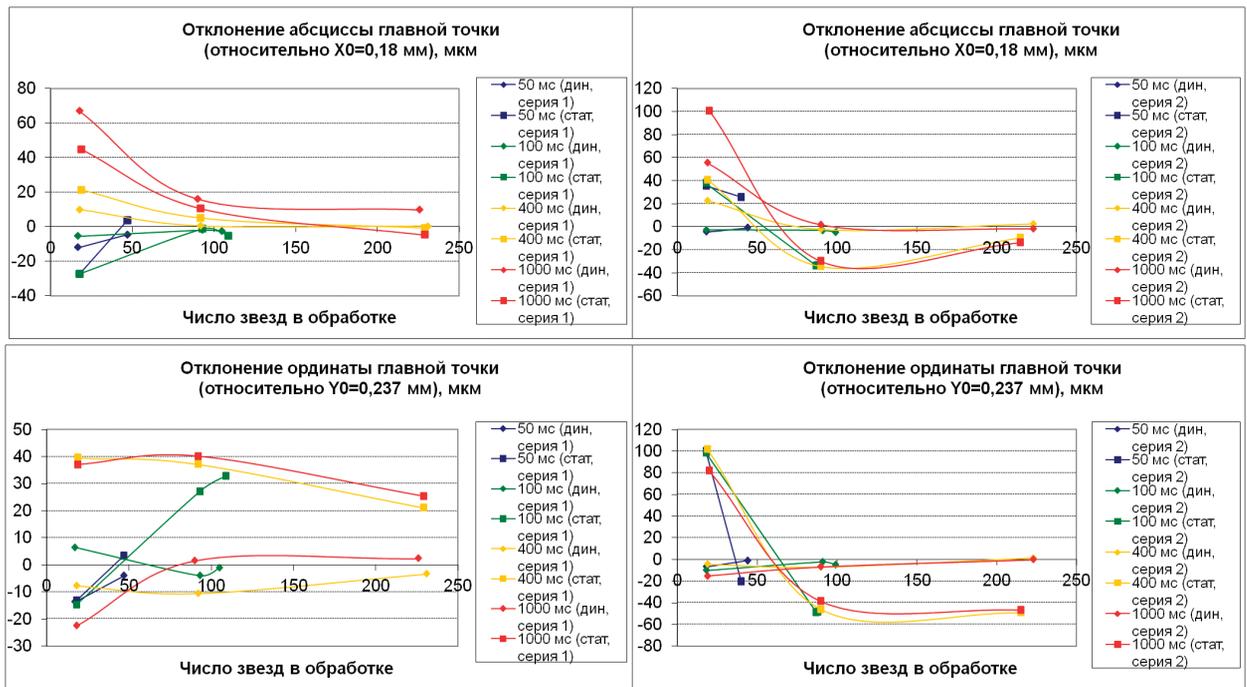


Рис. 6. Графики оценок координат главной точки для двух серий кадров вращения и двух серий кадров с фиксированной ОГ для экспозиций: 50, 100, 400, 1000 мс. Графики нормированы относительно среднего значения координат по двум сериям

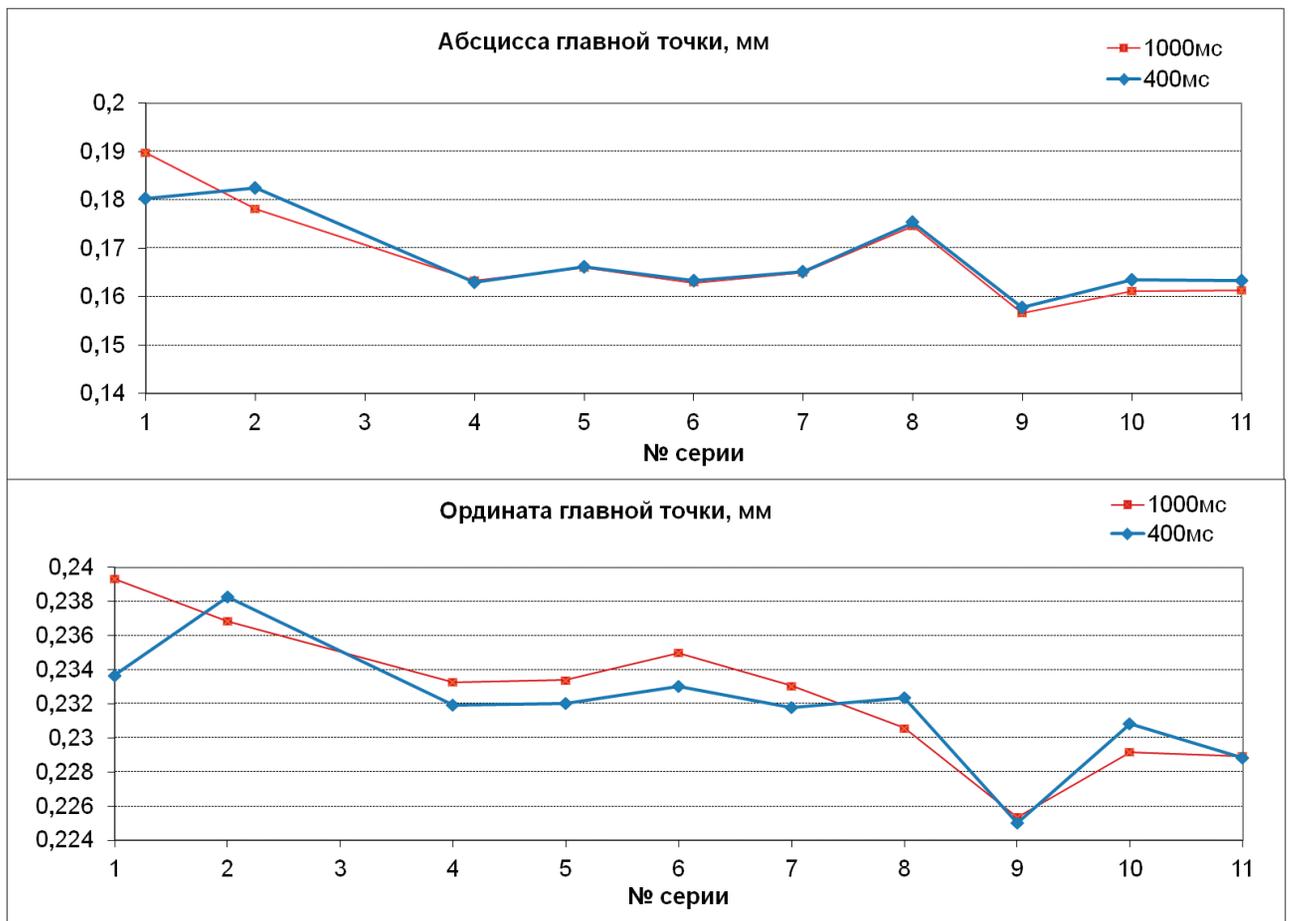


Рис. 7. Изменение оценки координат главной точки для 11 серий кадров с фиксированной ОГ-ВТ для экспозиций 400 мс и 1000 мс

6,4 мкм), в отличие от случая расчета координат по кадрам с фиксированной ОГ, где отклонение составляет десятки микрон. Этот результат подтверждает, что для более точного расчета калибровочных параметров требуется не только большое количество звёзд, но и их равномерное расположение по полю зрения. Работая по звёздному небу, этого можно добиться, вращая прибор вокруг своей оси (в лабораторных условиях для этого используется равномерная сетка точечных источников излучения). Также можно отметить уменьшение отклонения координат главной точки при увеличении времени экспозиции, что связано с увеличением отношения «сигнал/шум» для каждой звезды.

Сводные графики на *рис. 7* иллюстрируют изменение оценок координат главной точки по всем сериям для двух экспозиций – 400 мс и 1000 мс, которое достигает десятков микрометров. Эти вариации можно связать с изменением температуры: в 8-ой серии производился равномерный нагрев оптической головки, в остальных сериях температура изменялась естественно вместе с внешними условиями окружающей среды. Несмотря на то, что эти вариации значительно превышают размер пикселя, ниже будет показано, что данная точность определения координат главной точки после учёта температурной зависимости фокусного расстояния и дисторсии удовлетворяет требуемой точности калибровки ~ 0,2 мкм (Аванесов, Кондратьева, Никитин, 2008).

4. Определение фокусного расстояния

Проиллюстрируем влияние рассмотренных выше факторов на оценку фокусного расстояния. В *табл. 3* приведены значения СКО фокусного расстояния среди 200 кадров одной серии, когда в обработку на каждый кадр серии берётся 20 или 200 звёзд. При работе по большему количеству звёзд СКО фокусного расстояния достигает 1 мкм.

Таблица 3. Зависимость СКО фокусного расстояния от количества звёзд в обработке (режим 2 – вращение, серия из 200 кадров, время экспозиции 1000 мс)

<i>СКО по оси Y 20 звёзд в обработке, мкм</i>	<i>СКО по оси X 200 звёзд в обработке, мкм</i>
3	1

Рис. 8 показывает, что значение фокусного расстояния, полученное по кадрам вращения, в зависимости от количества звёзд изменяется в диапазоне от 1,2 мкм до 0,1 мкм, в то время как фокусное расстояние, рассчитанное по кадрам с неподвижной оптической головкой, меняется в диапазоне от 6 мкм до 1 мкм.

Так же как и в случае расчёта координат главной точки, точность определения среднего значения фокусного расстояния в серии и его СКО зависит от количества звёзд в кадре, равномерности их расположения и времени экспозиции.

Сводные графики на *рис. 9* иллюстрируют изменение значения фокусного расстояния по всем сериям в зависимости от температуры для экспозиции 1000 мс. В 8-ой серии про-

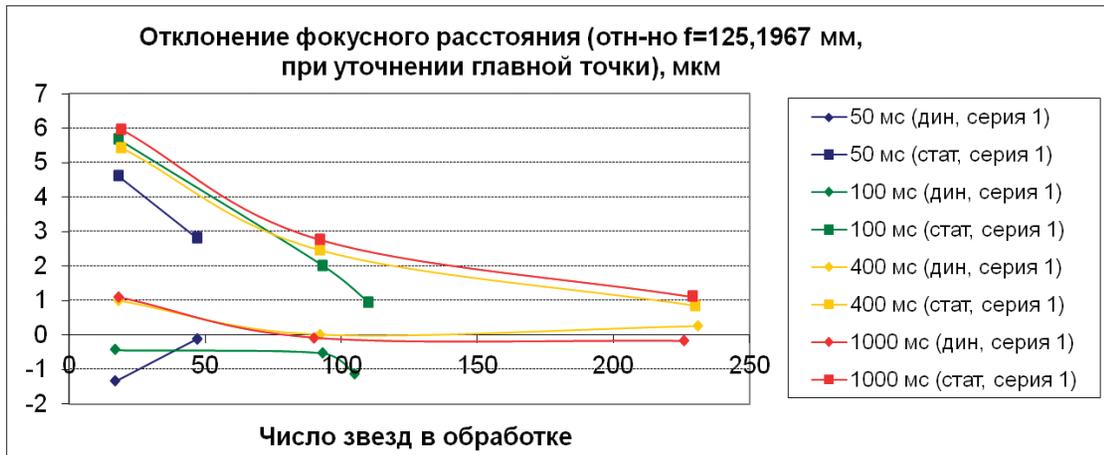


Рис. 8. Графики значений фокусного расстояния для 2 серий кадров вращения и 2 серий кадров с фиксированной ОГ для экспозиций: 50, 100, 400, 1000 мс. Графики нормированы относительно среднего значения по 2 сериям

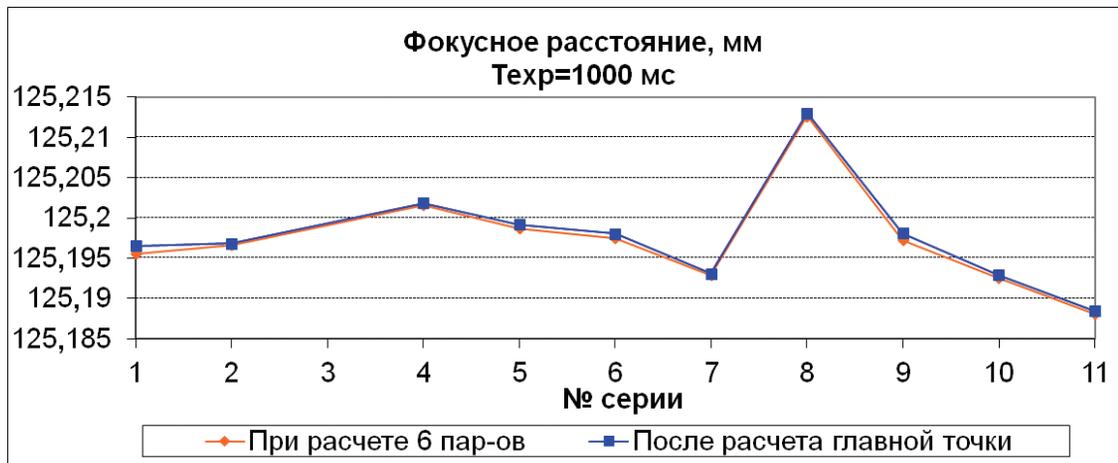


Рис. 9. Изменение оценки фокусного расстояния по 11 сериям кадров с фиксированной ОГ для экспозиций 400 мс и 1000 мс

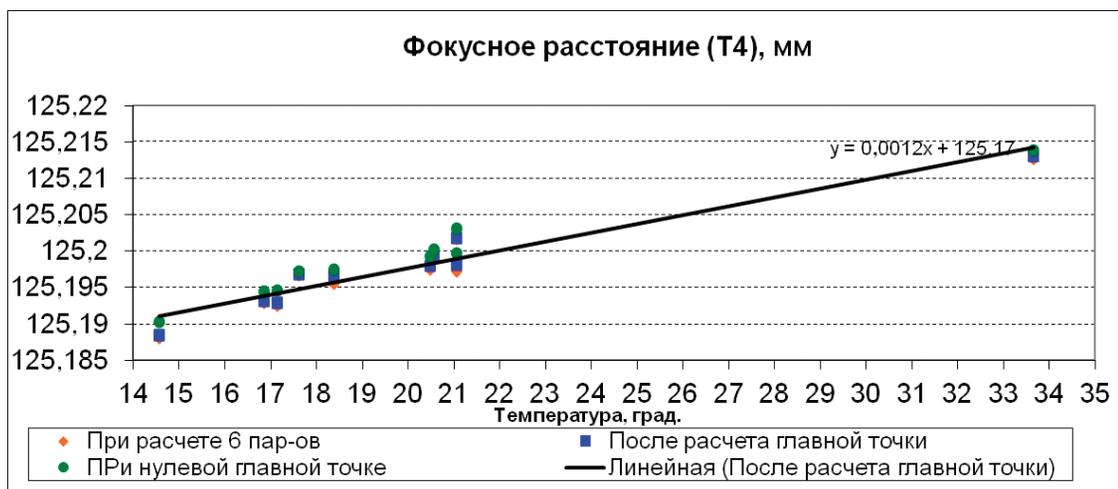


Рис. 10. Графики зависимости рассчитанного фокусного расстояния от температуры для датчика Т4 по 11 сериям кадров

изводился равномерный нагрев оптической головки, в остальных сериях температура изменялось естественно вместе с внешними условиями окружающей среды. Изменение фокусного расстояния в зависимости от температуры достигало 30 мкм, что делает необходимым перерасчёт фокусного расстояния во всем диапазоне изменения рабочих температур.

Датчик Т4, установленный непосредственно на объективе ОГ-ВТ, показал наибольшую корреляцию с оценкой фокусного расстояния: аппроксимирующая линейная функция имеет коэффициент наклона $\sim 1,2$ мкм/градус против модельного $\sim 1,5$ мкм/градус (рис. 10).

5. Определение углов ориентации и дисторсии

Зафиксировав средние значения координат главной точки и фокусного расстояния, анализируем зависимости ошибок определения углов ориентации прибора от различных факторов до и после учета дисторсии.

Из графиков на рис. 11 видно, что при учёте дисторсии СКО оценки углов ориентации на экспозиции 1000 мс доходит до 0,18 угл. сек. по углу склонения и 0,5 угл. сек. по азимуту. Выигрыш по сравнению с вариантом без учёта дисторсии составляет 2–3 раза. Остаточные рассогласования, косвенно характеризующие точность определения направления на звёзды, уменьшились в 4–5 раз – до 0,5–0,25 мкм.

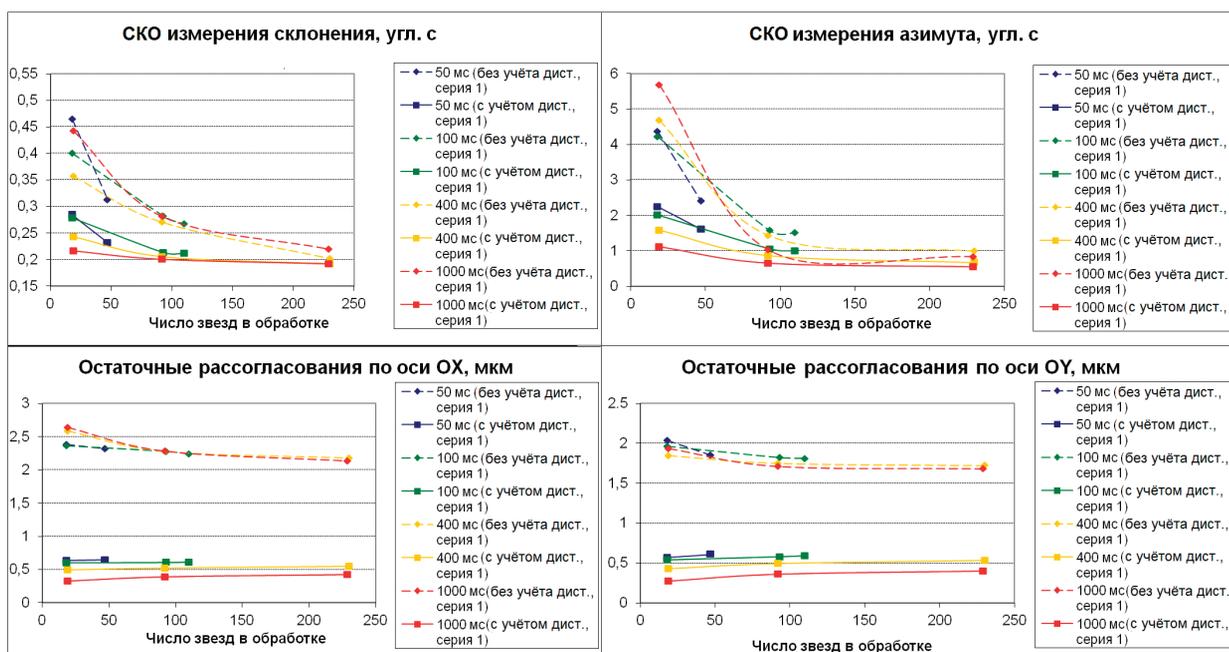


Рис. 11. Графики СКО углов ориентации и СКО остаточных рассогласований направлений на звёзды 1-ой серии кадров для экспозиций: 50, 100, 400, 1000 мс. С учётом дисторсии и без него

На рис. 12 представлена двумерная картина остаточных рассогласований (ошибок определения энергетических центров звёзд) по каждой звезде в серии кадров для расчета дисторсии по всему полю зрения прибора. Серия 72 кадров (порядка 16 000 точек-звёзд) получена поворотом прибора вокруг своей оси. На серии кадров до устранения дистор-

сии видны характерные искажения по краям поля зрения, после устранения дисторсии – остаётся только шумовая составляющая ошибки. До устранения дисторсии величина СКО остаточных рассогласований составляет 1,5 мкм, после устранения – 0,3 мкм.

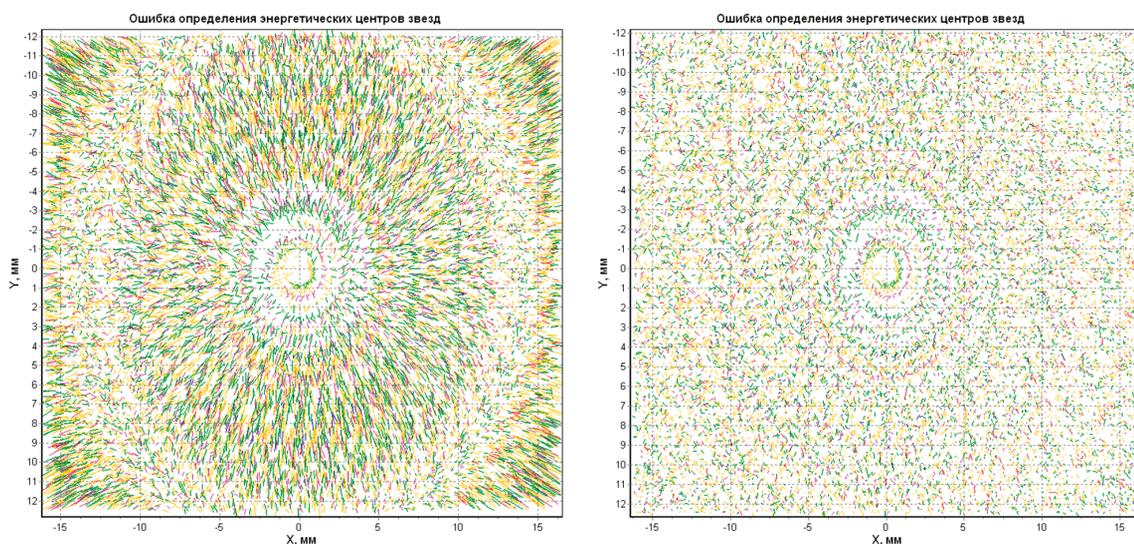


Рис. 12. Рисунок отображает серию изображений звёзд для расчета функции обобщённой дисторсии (72 кадра, полученные поворотом прибора вокруг своей оси). Остаточные рассогласования (ошибки определения энергетических центров звёзд) – цветные штрихи, где цвет соответствует спектральному классу звезды. Слева – остаточные рассогласования звёзд на поле матрицы без учёта дисторсии, справа – с учётом дисторсии. Указанные на изображении рассогласования имеют масштаб 200:1 по отношению к реальным

6. Сравнение теоретической и экспериментальной функций обобщённой дисторсии

В ходе теоретического расчёта прибора ОГ-ВТ на базе объектива ОЗК-125/4 была построена функция обобщённой дисторсии по всему полю зрения. По результатам рассмотренных экспериментов по звёздному небу была рассчитана реальная функция обобщённой дисторсии и проведено их сравнение. Из рис. 13, 14, трёхмерно отображающих функ-

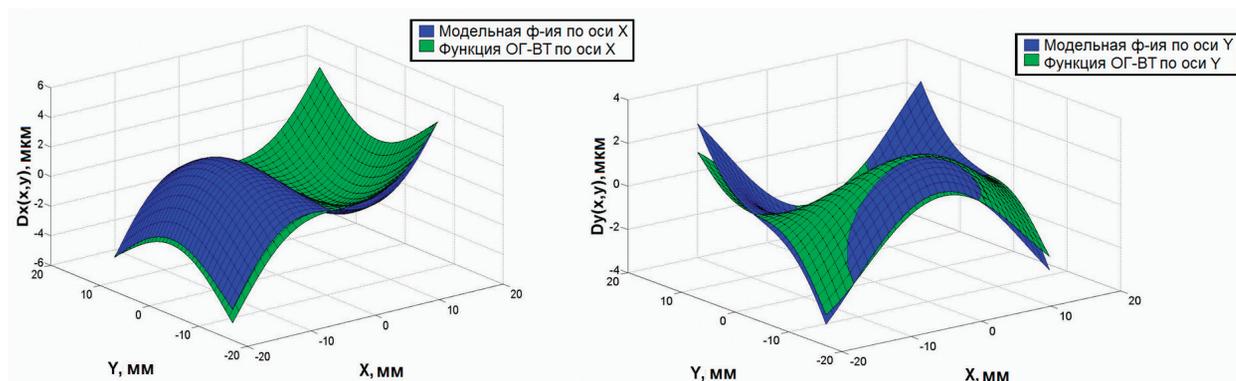


Рис. 13. Экспериментальная и теоретическая функции обобщённой дисторсии для объектива ОЗК -125/4, где $Dx(x,y)$ и $Dy(x,y)$ – величины функций обобщённой дисторсии по координатным осям X и Y

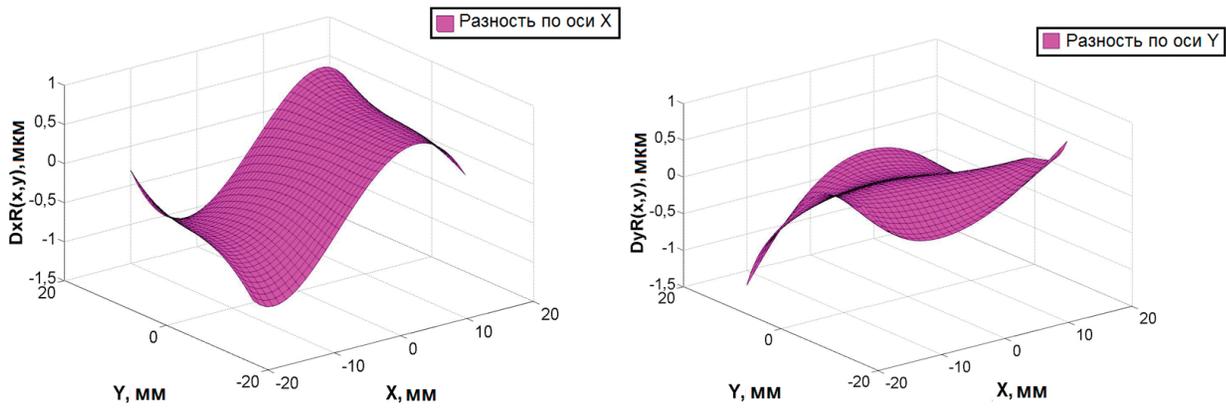


Рис. 14. Разница экспериментальной и теоретической функций обобщённой дисторсии для объектива ОЗК -125/4, где $DxR(x,y)$ и $DyR(x,y)$ – величины разницы функций обобщённой дисторсии по координатным осям X и Y

ции дисторсии (по оси Z отложена величина функции в мкм) видно, что теоретическая и измеренная функции почти полностью повторяют друг друга – разница по краям доходит до 1 мкм, а в среднем составляет 0,02 мкм.

7. Зависимость функции обобщённой дисторсии от температуры

Была исследована зависимость дисторсии от температуры объектива прибора. На рис. 15, 16 приведены разницы функций обобщённой дисторсии относительно функции 4-ой серии. При этом максимальные различия в функциях обобщенной дисторсии без учёта изменения фокусного расстояния составляют ~ 2 мкм. При использовании фокусного расстояния, рассчитанного для каждой температуры, функции обобщённой дисторсии совпадают с точностью до 0,2 мкм в диапазоне температур от 15 до 35 градусов Цельсия. Данный результат коррелирует с теоретическими расчетами, в которых до учёта изменения фокусного расстояния различия в функциях обобщённой дисторсии доходили до 7 мкм, а после составляли всего лишь 0,05–0,15 мкм в диапазоне температур от -15°C до $+50^{\circ}\text{C}$.

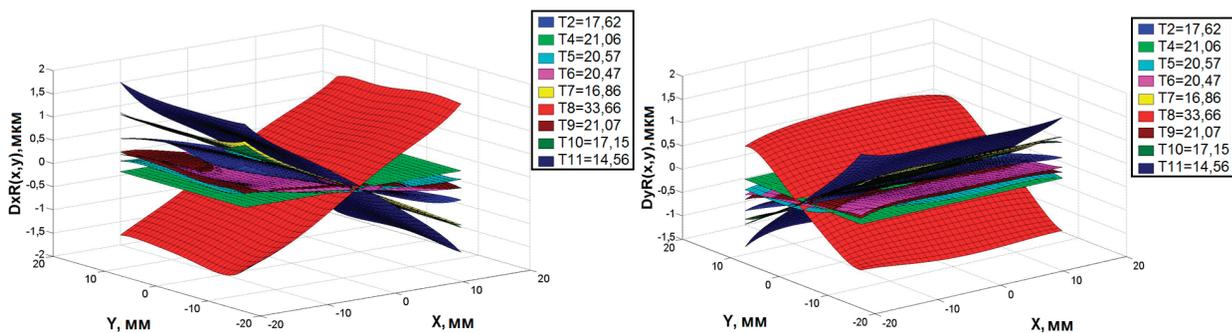


Рис. 15. Разница функций обобщенной дисторсии относительно 4-ой серии ($T_4=21,06^{\circ}\text{C}$) при фиксированном фокусном расстоянии 125,1974 мм и разных температурах (в градусах $^{\circ}\text{C}$), где $DxR(x,y)$ и $DyR(x,y)$ – величины разницы функций обобщённой дисторсии по координатным осям X и Y

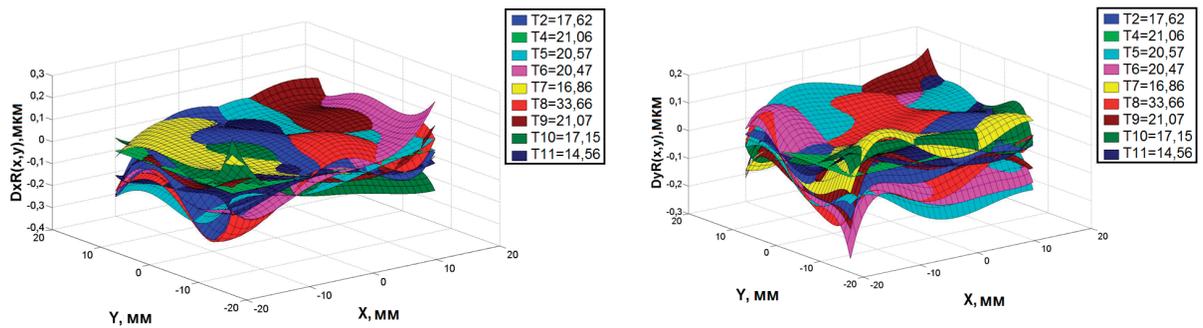


Рис. 16. Разница функций обобщенной дисторсии относительно 4-ой серии ($T_4=21,06^\circ\text{C}$) при фокусном расстоянии, вычисленном для каждой температуры, где $DxR(x,y)$ и $DyR(x,y)$ – величины разницы функций обобщенной дисторсии по координатным осям X и Y

8. Эксперимент по калибровке ЗД по отдельным спектральным классам звёзд

По серии кадров, полученных в режиме вращения, были рассчитаны координаты главной точки и фокусное расстояние. Их среднее значение было зафиксировано. После были рассчитаны коэффициенты дисторсии и построены трёхмерные функции отображения для каждого спектрального класса звезды и средняя функция обобщенной дисторсии для всех классов. Разность функций дисторсии рассчитывалась относительно спектрального класса K , при одинаковых значениях фокуса и координат главной точки.

На графиках рис. 17 видно, что по краям функции обобщенной дисторсии отличаются между собой в среднем на 0,3 мкм, а от спектрального класса K – всего на 0,17 мкм. Среднее значение разности функций дисторсии по всему полю варьируется от 0,05 мкм до 0,01 мкм.

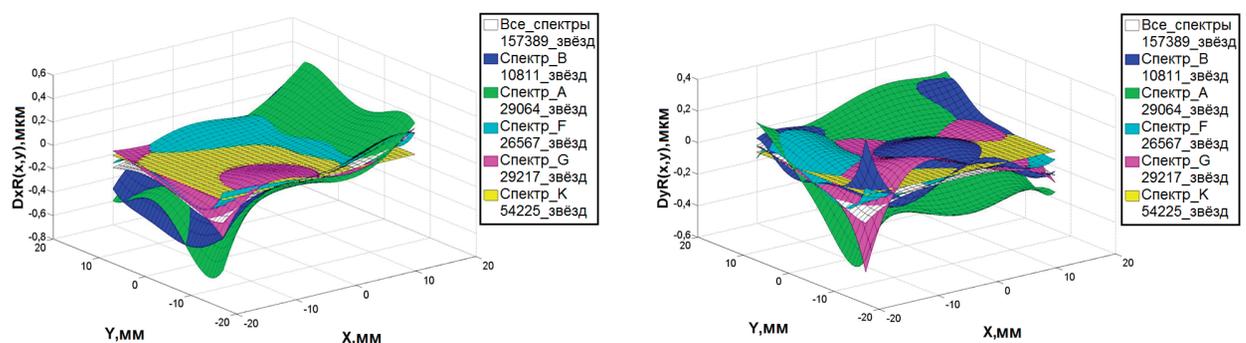


Рис. 17. Рисунок отображает экспериментальные функции разности дисторсии по осям ($Dx(x,y)$ слева и $Dy(x,y)$ справа) в мкм, представленные полиномами 5-й степени для функции обобщенной дисторсии (Все спектры) и функций дисторсии, рассчитанных по каждому спектральному классу (B, A, F, G, K, M). В легенде графика указаны количества точек - звёзд каждого спектрального класса на всей серии кадров

Из полученных результатов можно сделать вывод, что в программном обеспечении ОГ-ВТ достаточно использовать среднюю функцию обобщенной дисторсии, а не функции

отдельных спектральных классов, так как различия между функциями дисторсии по отдельным спектральным классам вызваны в большей степени количеством звёзд, принятых в обработку, чем спектральным классом. Звёзд класса К больше всего, и они равномерней расположены по полю зрения, поэтому функция дисторсии класса К наиболее близка к средней функции.

9. Результаты экспериментов

По результатам проведённых экспериментов и расчетов можно сделать следующие выводы:

1. При расчёте главной точки с оптимальным коэффициентом заполнения кадра СКО значений ее координат среди отдельных кадров стремится к 20 мкм, а разброс среднего значения по серии из 200 кадров не превышает 0,5 мкм.

2. При расчёте фокусного расстояния, если коэффициент заполнения поля зрения стремится к единице, его СКО среди отдельных кадров стремится к 1 мкм, а разброс среднего значения по серии также не превышает 1 мкм. Фокусное расстояние в диапазоне температур 15°C–35°C изменяется линейно. Коэффициент $\Delta f / \Delta T$ в случае работы при атмосферном давлении равен 1,2 мкм/°C для ОГ-ВТ, что хорошо согласуется с результатами модельных расчётов, где было получено $\Delta f / \Delta T = 1,5$ мкм/°C .

3. Экспериментальная функция обобщённой дисторсии ОС отличается от теоретической не более чем на 1 мкм по краям, в среднем по всему полю - не более чем на 0,02 мкм, что говорит о высокой точности моделирования.

4. СКО измеренных параметров ориентации в случае учёта результатов калибровки координат главной точки, фокусного расстояния и функции дисторсии для углов склонения стремится к 0,18 угл. сек., а азимута – 0,5 угл. сек. при времени экспозиции 400–1000 мс, что даёт выигрыш в 2–3 раза по сравнению со случаем, когда калибровка не производится.

5. При учёте изменения фокусного расстояния с температурой функции обобщённой дисторсии совпадают с точностью до 0,2 мкм в диапазоне температур от 15 до 35 градусов Цельсия. Данный результат согласуется с теоретическими расчетами, в которых до учёта изменения фокусного расстояния различия в функциях обобщённой дисторсии доходили до 7 мкм, а после составляли всего лишь 0,05–0,15 мкм в диапазоне температур от -15°C до +50°C.

Литература

1. *Аванесов Г.А., Красиков В.А., Никитин А.В.* Оценка точности звездного прибора БОКЗ-М по результатам наземных и летных испытаний // Всероссийская научно-техническая конференция «Современные проблемы определения ориентации и навигации космических аппаратов». Таруса, 22–25 сентября 2008 г. М.: ИКИ РАН, 2008. С. 387–408.
2. *Аванесов Г.А., Кондратьева Т.В., Никитин А.В.* Исследование смещения энергетического центра изображений звезд относительно геометрического центра на ПЗС-матрице и коррекция методической ошибки //

- Всероссийская научно-техническая конференция «Современные проблемы определения ориентации и навигации космических аппаратов». Таруса, 22–25 сентября 2008 г. М.: ИКИ РАН, 2008. С. 421–446.
3. Wilson R.G., Shafer S.A. What is the Centre of the Image? // Technical Report CMU-CS-93-122. Pittsburgh, Pennsylvania: School of Computer Science Carnegie Mellon University, 1993. 21 p.

Geometric calibration of high-precision star tracker by starry sky

P.S. Smetanin¹, G.A. Avanesov, R.V. Bessonov, A.N. Kurkina, A.V. Nikitin

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia

¹*E-mail: guldthen@gmail.com*

This work is devoted to experimental study of a high-precision star tracker calibration technique by real astronomical objects – stars on the celestial sphere. The high-precision optical head (OG-VT) based on the OZK-125/4 lens and CMOS image sensor CMV20000 has been used in experiments and the obtained images of the celestial sphere stars are analyzed. An algorithm of star tracker geometric calibration is considered.

Recommendations are given for selecting starry sky frames suitable for calibration and the concept of ratio of stars filling the field of view is introduced. During the experiments, the following star tracker calibration parameters are defined step by step: principal point coordinates, focal length and generalized distortion function. In addition, the orientation angles are calculated. The calibration parameters dependence on temperature, as well as influence of determining the focal length and accuracy of principal point coordinates on the accuracy of determining generalized distortion function are considered. An experiment on finding dependence of estimation accuracy of generalized distortion function on stars' spectral classes has been conducted.

The resulting accuracy of OG-VT calibration parameters as well as obtained orientation parameters are estimated. Theoretical and experimental calibration parameters are compared. Relative star angular positions on night sky would be known with high accuracy, thus providing for an advantage of the proposed star tracker calibration technique, compared with others methods using ground optical equipment.

Keywords: geometrical calibration, distortion, orientation parameters, star tracker, focal length, principal point, stellar classification, temperature, accuracy estimation

Accepted: 14.03.2017

DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-2-9-23

References

1. Avanesov G.A., Krasikov V.A., Nikitin A.V., Otsenka tochnosti zvezdnogo pribora BOKZ-M po rezul'tatam nazemnykh i letnykh ispytaniy (Accuracy estimation of BOKZ-M star tracker according to the results of ground and flight tests), *Tr. Vseross. nauch. konf. "Sovremennye problemy opredeleniya orientatsii i navigatsii kosmicheskikh apparatov"* (3rd All-Russian Science Conference "Contemporary Issues of Spacecraft Orientation and Navigation Definition"), Tarusa, September 22–25, 2008, Moscow: IKI RAS, 2008, pp. 387–408.
2. Avanesov G.A., Kondrat'eva T.V., Nikitin A.V., Issledovanie smeshcheniya energeticheskogo tsentra izobrazhenii zvezd otnositel'no geometricheskogo tsentra na PZS-matritse i korrektsiya metodicheskoi oshibki (Research of star image energy centre offset relatively to geometrical centre on CCD sensor and correction of methodological error), *Tr. Vseross. nauch. konf. "Sovremennye problemy opredeleniya orientatsii i navigatsii kosmicheskikh apparatov"* (3rd All-Russian Science Conference "Contemporary Issues of Spacecraft Orientation and Navigation Definition"), Tarusa, September 22–25, 2008, Moscow: IKI RAS, 2008, pp. 421–446.
3. Wilson R.G., Shafer S.A., *What is the Centre of the Image? Technical Report CMU-CS-93-122*, Pittsburgh, Pennsylvania: School of Computer Science Carnegie Mellon University, 1993, 21 p.