Критерии и методы фокусировки высокоточных оптических измерительных систем

Н.А. Строилов, Е.В. Белинская, Н.Н. Брысин, А.Н. Василейская, С.В. Воронков, А.В. Никитин, А.А. Форш

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

Рассмотрены особенности и методы фокусировки оптических систем звёздных датчиков по тест-изображениям одиночной звезды. Цель фокусировки состоит в установке плоскости фотоприёмника в требуемое положение относительно плоскости наилучшего изображения объектива. Такое требуемое положение должно обеспечивать оптимальную форму и размер изображения звезды по всему полю изображения с учётом смещения фокальной плоскости при изменении среды калибровки и эксплуатации. Оценка формы и размера звёзды может быть выполнена различными способами. Наиболее полную информацию даёт анализ функции рассеяния точки путём аппроксимации изображения двумерными функциями. Сохранение формы изображения звезды по всему полю обеспечивается отсутствием наклона между двумя рассматриваемыми плоскостями. Значение максимально допустимого наклона может быть определено путём анализа глубины резкости изображения. Корректировка наклона выполняется конструктивно при помощи юстировочных элементов. Изменение среды калибровки и эксплуатации влечёт смещение плоскости наилучшего изображения и должно учитываться в качестве поправки при фокусировке. Значение поправки может быть рассчитано в ходе проектирования объектива и подтверждено экспериментально. Также в статье описано стендовое оборудование, позволяющее проводить фокусировку различных оптических систем с учётом рассматриваемых критериев.

Ключевые слова: фокусировка, юстировка, оптическая система, объектив, фотоприёмное устройство, фокальная плоскость, плоскость наилучшего изображения, оптимальное изображение, одиночная звезда, бесконечно удалённая точка, автоколлиматор, тест-объект, фокусное расстояние, оптические измерительные приборы

Одобрена к печати: 15.06.2022 DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-119-130

Введение

Для любого оптического прибора фокусировка изображения считается одной из важнейшей процедур при его сборке и юстировке. В общем случае фокусировкой называют юстировочные операции по установке изображений, даваемых оптическими системами (OC), в заданную плоскость (Бардин, 1968).

В случае звёздного прибора фокусировка — это юстировочная операция по настройке оптической системы с целью получения требуемого изображения бесконечно удалённого точечного источника (одиночной звезды) по всему полю зрения. Термин «требуемое изображение» подразумевает, что такое изображение должно учитывать все аспекты функционирования прибора. Прежде всего необходимо учитывать параметры алгоритмов обработки изображений: фильтрации и локализации объектов на кадре, а также настройки распознавания ориентации по выделенным объектам.

В ходе фокусировки плоскость фотоприёмного устройства (ФПУ, обычно ПЗС-матрица (прибор с зарядовой связью, *англ*. ССD — Charge-Coupled Device) или КМОП-матрица (комплементарная структура «металл-оксид-полупроводник», *англ*. СМОЅ, complementary metal-oxide-semiconductor)) размещается в заданное положение относительно плоскости наилучше-го изображения (ПНИ) объектива, где изображение максимально сконцентрировано (*puc. 1*, см. с. 120).



Рис. 1. Оптическая схема идеальной сфокусированной системы

Конструктивно это можно выполнить двумя способами:

- 1) последовательным стачиванием *фокусировочного кольца*, на которое устанавливается объектив;
- 2) установкой подкладок известной толщины между объективом и ФПУ.

По окончании фокусировки все юстированные элементы фиксируются и не меняются в ходе эксплуатации.

Такая задача может показаться простой, ведь для размещения $\Phi\Pi Y$ достаточно знать расстояние *s'* от последней поверхности объектива до его заднего фокуса F'_{ob} . Тогда можно проводить сборку оптического узла прибора с учётом этого расстояния.

Однако на практике точно выдержать расстояние s' невозможно. Линзы объектива вмонтированы в оправы и корпуса, а фоточувствительная матрица распаяна на печатной плате и соединена с объективом через переходные детали. Да и детали изготавливаются с допусками, которые, как будет показано далее, превышают требуемую точность фокусировки. В итоге расстояние s' можно выдержать лишь приблизительно.

Более того, при установке $\Phi\Pi Y$ на расстоянии s' изображение звёзд будет максимально сконцентрированным. Далее будет показано, что наиболее «острое» изображение не всегда требуется при работе прибора.

В Институте космических исследований РАН (ИКИ РАН) накоплен достаточный опыт по юстировке различных оптических систем. Ниже рассмотрены теоретические аспекты фокусировки на примере высокоточного звёздного датчика с объективом $f'_{of} = 60$ мм и относительным отверстием 1:1,4, имеющего наиболее строгие требования к качеству изображения и фокусировки.

Особенности фокусировки звёздных датчиков

Юстировка звёздных датчиков имеет ряд особенностей, отличающих её от юстировки других оптических приборов.

- Применение *светосильных длиннофокусных объективов*, обладающих качеством изображения, близким к дифракционному пределу. Это влечёт уменьшение глубины резкости в пространстве изображений, что сокращает допустимую зону размещения ФПУ.
- 2. *ФПУ с мелким пикселем*, способные разрешать дифракционную картину в изображении звёзд. На изображениях вокруг основного диска Эри могут проявляться максимумы второго и больших порядков, что также должно учитываться при фокусировке.
- 3. *Большое поле изображения*, что влечёт необходимость контроля изображения и корректировки наклона ФПУ относительно ПНИ объектива.

- 4. Изменение среды фокусировки и эксплуатации линзовой среды. Звёздный датчик юстируется и проходит испытания на Земле, в воздушной среде, при нормальном давлении. Средой же его эксплуатации выступает вакуум. Относительные показатели преломления на границе сред «стекло воздух» и «стекло вакуум» различны. Уход воздуха из межлинзового пространства объектива влечёт изменение коэффициента преломления, что сдвигает ПНИ в сторону объектива.
- 5. Также звёздный датчик подвергается *влиянию температуры*. Полностью изолировать ОС от внешних тепловых потоков невозможно. Тепловыделение электронных компонентов, нагрев прибора при его освещении Солнцем и выхолаживании в тени вызывают тепловые деформации в ОС. Таким образом, плоскости ФПУ и ПНИ циклически перемещаются друг относительно друга, что вызывает изменение фокусировки.

Критерии фокусировки

Приведённые выше особенности формируют основное условие фокусировки звёздных приборов: размер и форма изображений звёзд должны обеспечивать их успешную локализацию с требуемой точностью по всему полю изображения с учётом изменения среды и во всём диапазоне температуры эксплуатации.

В итоге для каждого типа прибора (для каждой комбинации «объектив – ФПУ») должны быть сформулированы:

- *требования к форме и размеру изображения звезды*, обеспечивающим её успешную локализацию с достаточной точностью;
- допустимая глубина резкости Δ_{z'} (рис. 2) области в пространстве изображений относительно ПНИ, в которой форма и размер изображений звёзд удовлетворяют приведённым требованиям;
- максимальный наклон ΦΠУ ψ_{max} (см. *puc. 2*) относительно ПНИ, при котором сохраняется требуемое изображение звезды;
- смещение ПНИ при изменении среды калибровки и эксплуатации;
- *вклад термодеформаций ОС*, вызывающих перемещение ФПУ.



Рис. 2. Оптическая схема реальной сфокусированной системы

Приведённые требования должны быть сформированы на этапе расчёта OC, например при моделировании в среде Zemax. Либо могут быть получены или подтверждены экспериментально в ходе отработки лабораторных и технологических наземных образцов на стендовом оборудовании.

Стендовое оборудование для фокусировки

В ИКИ РАН для фокусировки и её контроля используется комплекс стендового оборудования (Бессонов и др., 2017). Ключевым считается стенд автоматизированной фокусировки, где в качестве коллиматора используется длиннофокусный телескоп-рефрактор с апохроматическим триплет-объективом. Телескоп дооборудован шаговым линейным энкодером (*англ.* linear encoder) и автоколлимационной насадкой с видеокамерой (*рис. 3, таблица*). Фокусное расстояние телескопа и диапазон перемещений фокусора обеспечивают возможность юстировки приборов с фокусными расстояниями от 32 до 125 мм с полной ошибкой не более 3 мкм. На стенде возможна фокусировка более короткофокусных приборов в ограниченном диапазоне глубины резкости, более длиннофокусных — с потерей точности.



Рис. З. Стенд фокусировки

Основные характеристики	стенда	фокусировки
-------------------------	--------	-------------

Параметр	Значение			
Фокусное расстояние коллиматора f'_{κ}	480 мм			
Диаметр выходного зрачка коллиматора	80 мм			
Диаметры точечных диафрагм	15, 25 или 50 мкм; 7, 11 или 22 угл. с			
Скорость перемещения фокусора	2 мм/с			
Диапазон перемещения фокусора Δ'_{κ}	от 0 до 95 мм			
Полная ошибка позиционирования фокусора телескопа во всём диапазоне, не более	10 мкм			
Параметр	Значение для f'_{o6} , мм			
	22	36	60	125
Диапазон возможностей фокусировки объектива прибора max Δ'_{o6} , мм, не более	0,2	0,5	1,5	6,4
Ошибка позиционирования со стороны ФПУ, мкм, не более	0,03	0,06	0,16	0,8
Вклад неточности аппроксимации изображений звёзд в ошибку позиционирования ФПУ, мкм, не более		3	2	1
Итоговая полная погрешность определения Δ'_{ob} , мм, не более	3	3	2	2

Автоколлимационная насадка стенда построена на базе светоделительной призмы, включает в себя видеокамеру и подсвечиваемую точечную диафрагму, моделирующую изображение одиночной звезды. Диафрагма заменяемая и выбирается в зависимости от углового разрешения юстируемого прибора. Для подсветки используется светодиод с расширенным в ближнюю инфракрасную (ИК) область спектром. Это даёт возможность фокусировать приборы как видимого, так и ИК-диапазонов.

Двигатель и энкодер обеспечивают точное перемещение фокусора с насадкой. Полная погрешность позиционирования не превышает 10 мкм, что составляет менее 0,2 мкм со стороны ОС прибора $f'_{\rm of} = 60$ мм.

Видеокамера позволяет проводить самокалибровку стенда через плоское зеркало с использованием маски Бахтинова. В ходе самокалибровки определяется нулевое положение телескопа, в котором звезда проецируется в бесконечности, либо подтверждается стабильность положения отсчёта в начале и в конце измерений.

Путём замены телескопа стенд может быть модифицирован для фокусировки приборов с любым номиналом фокусного расстояния без потери точности. Так, труба с $f'_{\kappa} = 350$ мм даёт возможность юстировать объективы с $f'_{o6} \ge 17$ мм, а труба с $f'_{\kappa} = 1000$ мм — объективы с $f'_{o6} \le 300$ мм.

На стенде используется специальное программное обеспечение (ПО) (рис. 4).



Рис. 4. Программное обеспечение стенда фокусировки

Программное обеспечение управляет перемещением фокусора, работой видеокамеры и обеспечивает взаимодействие с программой приёма кадров. Оператор единожды настраивает стенд, запускает процесс съёмки и ожидает окончания измерений. В ПО имеются предустановленные настройки для измерения различных приборов. Таким образом, влияние человеческого фактора минимизировано.

После измерений полученные в специальном формате изображения передаются на обработку, где анализируется зависимость формы изображения от дефокусировки приведённым ниже способом.

Анализ формы изображения

Полученные в ходе измерений точечного тест-объекта изображения подвергаются обработке с помощью специального программного обеспечения. Для оценки качества фокусировки применяются различные критерии:

- площадь звезды число элементов в изображении звезды;
- полуяркость HFD (*англ*. half flux diameter) диаметр окружности, описывающий половину интегральной яркости звезды (Weber, Brady, 2001);
- полуширина FWHM (*анел.* full width at half maximum) половина ширины на половине максимального сигнала в изображении звезды;
- функция рассеяния точки ФРТ (*анел.* point spread function PSF): одиночная или двойная функция Гаусса, функция Лоренца или функция Фокха.

Число элементов вычисляется после вычитания порогового значения вокруг звезды. Этот параметр непосредственно участвует во внутренних алгоритмах приборов при локализации звёзд. Число элементов характеризует только размер звезды и никак не характеризует её форму. То же самое относится и к *полуяркости*, где любая звезда считается круглой. Эти критерии подходят для экспресс-анализа. Алгоритмы вычисления числа пикселей и полуяркости достаточно просты и не требуют больших вычислительных ресурсов. Такая обработка может выполняться «на лету», в том числе самим прибором при работе в режиме локализации.

Оценку формы звезды можно проводить по её *полуширине*. Для этого полуширина вычисляется в двух взаимно перпендикулярных направлениях: вдоль строк и вдоль столбцов ФПУ. Отношение полученных значений характеризует овальность (сплюснустость) звезды.

Наиболее полную картину о качестве фокусировки даёт анализ *функции рассеяния точки* путём аппроксимации изображений звёзд двумерными функциями (*puc. 5*). Задача поиска наиболее подходящей функции представляется достаточно сложной. Функции аппроксимации могут быть различны и подбираться индивидуально для каждого сочетания объектива и ФПУ.



Рис. 5. Последовательность аппроксимации изображения звезды двумерной функцией Гаусса

Наиболее подходящими для аппроксимации считаются двумерные функции Гаусса, Лоренца или Фокха (уравнения (1), (2) и (3) соответственно) (*рис. 6*). Соотношения, связывающие функции с другими критериями, заданы формулами (4).

Двумерная функция Гаусса:

$$G(x, y) = z_0 + Ae - \left[\frac{(x - x_0)^2}{2\sigma_x^2} + \frac{(y - y_0)^2}{2\sigma_y^2}\right];$$
(1)

двумерная функция Лоренца:

$$L(x,y) = z_0 + \frac{A}{\left[\left(1 + \left(\frac{x - x_0}{\sigma_x}\right)^2\right) \cdot \left(1 + \left(\frac{y - y_0}{\sigma_y}\right)^2\right)\right]};$$
(2)

двумерная функция Фокха:

$$H(x,y) = z_0 + A \left[\frac{\mu}{\left[\left[1 + \left(\frac{x - x_0}{\sigma_x} \right)^2 \right] \cdot \left[1 + \left(\frac{y - y_0}{\sigma_0} \right)^2 \right] \right]} + (1 - \mu)e - \left[\frac{(x - x_0)^2}{2\sigma_x} + \frac{(y - y_0)^2}{2\sigma_y} \right] \right],$$
(3)

где G(x, y), L(x, y), H(x, y) — яркость пикселей с координатами x и y; x_0 , y_0 — координаты центра функции аппроксимации; z_0 — яркость фона вокруг изображения звёзд; A — максимальная яркость в изображении звезды; σ_x , σ_y — дисперсия звезды; μ — коэффициент схожести, $\mu = [0...1]$.



Рис. 6. Примеры функций: *а* – Гаусса; *б* – Лоренца; *в* – Фокха

Соотношения, связывающие функцию Гаусса с другими параметрами звезды, заданы формулами:

$$I = \iint z(x, y) \, dx \, dy = 2\pi A \sigma_x \sigma_y,$$

$$N = 2\pi \sigma_{\max}^2 \ln \frac{A}{z_0 + 3\sigma_{\sigma \, oi}} \approx 40\sigma_{\max}^2,$$
FWHM_{x,y} = HFD = $2\sqrt{2\ln 2\sigma_{x,y}} \approx 2,355\sigma_{x,y},$
(4)
при $N = \pi R_{out}^2, R_{out} = \sigma \sqrt{2\ln \frac{A}{z_0 + 3\sigma_{\max}}}, \sigma_{\max} = \max(\sigma_x, \sigma_y),$

где *I* — интегральная яркость звезды; *N* — число элементов в звезде; $\sigma_{\text{шум}}$ — среднее квадратическое отклонение фонового шума; $\sigma_{x,y}$ — дисперсия звезды по *x* и *y*; *R*_{out} — радиус окружности, описывающий изображение звезды; FWHM_{*x*, *y*} — полуширина изображения звезды вдоль строк и столбцов ФПУ; HFD — полуяркость изображения звезды. (В формулах приближённые вычисления выполнены для звёзд со следующими допущениями: *A* = 4094, *z*₀ = 300, $\sigma_{\text{шум}}$ = 5.)

 $\sigma_{\text{шум}} = 5.$) Результатами аппроксимации каждого изображения выступает набор подобранных параметров (x_0 , y_0 , z_0 , A, μ и др.). Также вычисляются коэффициент детерминации R^2 и остаточные рассогласования, которые характеризуют качество аппроксимации. В дальнейшую обработку берутся звёзды с $R^2 \ge 0.995$. Форму звезды характеризуют параметры дисперсии σ_x и σ_y . Соответственно, чем больше σ_x и σ_y , тем звезда крупнее. Чем больше отношение σ_x к σ_y , тем звезда более вытянута в вдоль оси *OX*.

Далее, по измерениям смещения фокусора строятся зависимости параметров σ_x и σ_y от дефокусировки Δ'_{ob} (*puc.* 7).



Рис. 7. Зависимость параметра о от дефокусировки Δ'_{o6} . Теоретический расчёт объектива $f'_{o6} = 60$ мм

На графике можно выделить следующие области:

- Область наиболее «острой» фокусировки, в которой значения σ_x и σ_y минимальны (σ ≤ 0,6). Это положение ПНИ. В этой области изображения звёзд имеют предельное для данного объектива качество и минимальный кружок рассеяния (область *б* на *рис.* 7, *рис.* 8*б*). Однако при обработке алгоритмами локализации такие изображения имеют малую площадь, что не обеспечивает их точную и уверенную локализацию.
- Две области *расфокусировки:* в предфокальном и зафокальном положениях. В этих областях изображение звёзд сильно расфокусировано и искажено. Вокруг центрального пятна проявляются кольца второго и большего порядков (область *в* на *рис. 7, рис. 8в*). Для большинства объективов такие изображения имеют σ > 1,2. Подобные изображения неприемлемы для работы прибора.
- 3. Область *требуемой* фокусировки выбранная область фокусировки, удовлетворяющая всем критериям для работы прибора (область *a* на *puc. 7, puc. 8a*). На графике это соответствует положению ФПУ.



Рис. 8. Примеры изображений звёзд на ФПУ из различных областей: *a* — требуемой фокусировки, *б* — «острой» фокусировки, *в* — предфокальной расфокусировки; указаны яркости в единицах младшего разряда в каждом пикселе изображения

Требуемое положение ФПУ может быть задано либо диапазоном значений параметра σ , либо расстоянием Δ'_{ob} между ФПУ и ПНИ, которое необходимо выдержать для получения заданного изображения звёзд. Для показанной на *рис.* 7 кривой параметр σ должен находиться в диапазоне от 0,6 до 0,8, а Δ'_{ob} должно быть равно 16±5 мкм.

Учёт и корректировка наклона ФПУ

Второй аспект, который необходимо контролировать при фокусировке, — это наклон $\Phi\Pi Y$ относительно ПНИ (угол ψ на *рис. 2*). Из *рис. 7* видно, что линейное отклонение от точки фокусировки больше чем на 5 мкм приводит к увеличению параметра о больше чем 1,2, и изображения звёзд становятся неприемлемыми.



Puc. 9. Пузырьковая диаграмма распределения параметра σ по полю изображения: *a* — для прибора со значительным наклоном ΦПУ; *б* — для исправленного прибора



Puc. 10. Визуализация положений ФПУ и ПНИ: *a* — до фокусировки и выравнивания; *б* — после фокусировки и выравнивания

Таким образом, при наличии наклона ФПУ звёзды в разных частях матрицы будут сфокусированы по-разному, в крайнем случае могут выходить за допустимую зону. Это видно на рис. 9 (см. с. 127), где звёзды в нижней части кадра имеют предельный размер и не локализуются.

Оценить предельно допустимый наклон ФПУ можно по формуле:

$$\psi_{\max} = a \tan \frac{\Delta_{z'}}{y'},\tag{5}$$

где ψ_{\max} — максимальный угол наклона ФПУ относительно ПНИ; $\Delta_{z'}$ — глубина резкости в пространстве изображений; y' — линейные размеры ФПУ. Так, для объектива $f'_{o6} = 60$ мм, y' = 11 мм для σ от 0,6 до 0,8, а $\Delta_{z'} = \pm 5$ мкм предельный наклон составляет 3 угл. мин. Больший наклон требует измерений и корректировки. Для этого нужно провести измерения по полю изображения с дальнейшим построением плоскостей ФПУ и ПНИ. В результате вычисляются толщины компенсационных подкладок (рис. 10, см. с. 127), которые затем подкладываются либо под объектив, либо под $\Phi\Pi Y$.

Учёт смещения ПНИ в вакууме

Одна из особенностей звёздного прибора — изменение среды его юстировки и эксплуатации с воздуха на вакуум. Это вызывает смещение ПНИ в сторону объектива и влечёт дефокусировку изображения (*puc. 11*). На графиках зависимости параметров σ от дефокусировки Δ'_{ob} это отражается смещением кривой в предфокальную область (рис. 12, см. с. 129). Зона фокусировки должна выбираться таким образом, чтобы изображения звёзд в воздухе и в вакууме были максимально близки друг к другу либо искажаться незначительно. Из рис. 12 следует:

- 1) расстояние между ПНИ на воздухе и в вакууме имеет величину $\Delta'_{\text{вак}}$, для рассматриваемого в работе объектива $\Delta'_{\rm вак} = 35$ мм;
- 2) для выбранной на воздухе зоны фокусировки (точка 1) при переходе в вакуум параметр σ остаётся в допустимом интервале от 0,6 до 0,75; следовательно, форма изображения звезды меняется незначительно.



Рис. 11. Изображение звезды в воздухе (a) и в вакууме (δ); указана яркость в каждом пикселе в единицах наименьшего разряда

Для данного объектива выбрана зона фокусировки в левой части кривой (см. рис. 12, точка 1). В этом случае форма звёзд приемлема для калибровки прибора на воздухе ($\sigma = 0,7$). При переходе в вакуум изображение звезды практически не меняется ($\sigma = 0,6$). В случае фокусировки в другие части кривой изображения звёзд на воздухе и в вакууме будут сильно различаться.



Рис. 12. Графики зависимости параметра о от дефокусировки на воздухе и в вакууме

Выводы

Фокусировка звёздных приборов должна учитывать параметры их алгоритмов работы и условия эксплуатации. Для каждого объектива и ФПУ обязательно формулирование критериев фокусировки и определение области требуемой фокусировки. Критерии должны содержать:

- требования к форме и размеру изображения звезды, которые задаются диапазоном значений параметров σ, и σ, двумерной функции Гаусса;
- смещение ПНИ в вакууме и прочие условия эксплуатации, которые задаются значением Δ'_{вак} и учитываются при выборе области требуемой фокусировки;
- допустимый наклон ФПУ относительно ПНИ, который задаётся углом ψ.

Оценка фокусировки успешно проводится по анализу графиков зависимости параметров о аппроксимации изображений звёзд двумерной функцией Гаусса от дефокусировки изображения. Анализ позволяет определить расстояние между текущей фокусировкой прибора относительно требуемой и наилучшей фокусировкой.

Фокусировка и калибровка лётных (штатных) и наземных (технологических, доводочных) образцов должна выполняться по-разному с учётом особенностей их эксплуатации. Так, лётные образцы необходимо фокусировать с учётом поправки на изменение среды при дальнейшей штатной эксплуатации. Образцы для наземных испытаний должны фокусироваться и отлаживаться в воздухе с такими же изображениями звёзд, какие имеют лётные приборы в их штатных условиях.

Литература

- 1. Бардин А. Н. Сборка и юстировка оптических приборов. М.: Высшая шк., 1968. 328 с.
- 2. 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 фотограмматичесикх параметров высокоточных звездных датчиков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 3. С. 107–117. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-3-107-117.
- 3. *Weber L., Brady S.* Fast Auto-focus Method and Software for CCD-based Telescopes // Minor Planet Amateur/Professional Worshop. Tucson, AZ, 2001. P. 104–113. URL: https://www.ccdware.com/Files/ITS%20Paper.pdf.

Criteria and methods for focusing high-precision optical measuring systems

N.A. Stroilov, E.V. Belinskaya, N.N. Brysin, A.N. Vasileiskaya, S.V. Voronkov, A.V. Nikitin, A.A. Forsh

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

The article discusses the features and methods of focusing the optical systems of star sensors using test images of a single star. The purpose of focusing is to set the photodetector plane to the desired position relative to the best image plane of the lens. Such a required position should provide the optimal shape and size of the star image over the entire image field taking into account the shift of the focal plane when the calibration and operation environment changes. Estimating the shape and size of a star can be done in a variety of ways. The most complete information is provided by the analysis of the point spread function by approximating the image by two-dimensional functions. The preservation of the shape of the image of the star over the entire field is ensured by the absence of an inclination between the two considered planes. The value of the maximum allowable tilt can be determined by analyzing the depth of field of the image. Tilt correction is carried out constructively with the help of adjusting elements. Changing the calibration and operating environment will shift the best image plane and should be taken into account as a correction when focusing. The correction value can be calculated during lens design and verified experimentally. The article also describes bench equipment that allows focusing various optical systems, taking into account the considered criteria.

Keywords: focusing, alignment, optical system, lens, photodetector, focal plane, best image plane, optimal image, image, single star, infinitely distant point, autocollimator, test-object, focal length, optical measuring instruments

Accepted: 15.06.2022 DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-119-130

References

- 1. Bardin A. N., *Sborka i yustirovka opticheskikh priborov* (Assembly and alignment of optical devices), Moscow: Vysshaya shkola, 1968, 328 p. (in Russian).
- Bessonov R.V., Brysin N.N., Polyanskii I.V., Voronkov S.V., Belinskaya E.V., Stroilov N.A., Polishchuk G.S., Tregub V.P., Zavgorodnii D.S., 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 (in Russian), DOI: 10.21.46/2070-7401-14-3-107-117.
- 3. Weber L., Brady S., Fast Auto-focus Method and Software for CCD-based Telescopes, *Minor Planet Amateur/Professional Worshop*, Tucson AZ, 2001, pp. 104–113, available at: https://www.ccdware.com/ Files/ITS%20Paper.pdf.