
ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 681.7.062
DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-7-537-542

АВТОКОЛЛИМАЦИОННЫЙ СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ ФОКУСНОГО РАССТОЯНИЯ ОБЪЕКТИВА

А. Г. ЕРШОВ

*Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова, 199053, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: ers@npgoi.ru*

Предложен автоколлимационный способ измерения фокусного расстояния линзового объектива „Апо-Марс-7“ на длине волны 1,064 мкм. Проанализированы источники неопределенностей, влияющих на конечную неопределенность измерения. Изложены ограничения по применению данного способа при других длинах волн и для других объективов.

Ключевые слова: *фокусное расстояние, автоколлимационный способ, неопределенность измеряемой величины**

Известные многочисленные способы измерения фокусных расстояний объективов условно можно подразделить на две большие группы — 1) с использованием установок, в состав которых входит коллиматор, и 2) с использованием установок, не содержащих коллиматор. К первой группе относятся следующие методы: регламентируемые гос. стандартом [1] метод увеличения и метод Фабри — Юдина, а также различные модификации этих методов [2, 3]; прямой метод, метод коллиматора и трубы с фокусировкой [4]. Ко второй группе можно отнести угломерный метод (также регламентируемый гос. стандартом [1]) и его модификации, автоколлимационный метод Русинова и другие автоколлимационные методы [2, 5]. Традиционные способы дополняются различными изобретениями [3, 6, 7].

Исторически сложилось так, что при реализации подавляющего большинства методов измерения фокусных расстояний объективов производятся в видимом диапазоне спектра. При необходимости определения фокусного расстояния в инфракрасном или ультрафиолетовом диапазоне возникают трудности реализации известных методов измерения, вызванные особенностями создания и юстировки коллиматоров, а также спецификой применения угломерных приборов в этих диапазонах. На практике это приводит к большим дополнительным материальным затратам. Однако определение фокусного расстояния в указанных диапазонах может быть необходимым условием при разработке некоторых оптических и оптико-электронных приборов. Например, при создании и настройке лазерного высотомера по программе „Фобос-Грунт“ [9, 10] знание абсолютных значений углов отклонения пучков излучения лазерного передающего модуля относительно одной из осей измерительной системы

* Термин „неопределенность измеренного значения“ (кратко — „неопределенность“), используемый в настоящей статье, и связанный с ним подход к оцениванию качества измерения закреплены в международных метрологических документах [8]. Эта концепция, связанная, в частности, с признанием непостижимости истинного значения измеряемой величины, не нашла, однако, широкой поддержки в научной среде в отличие от классической концепции, основанной на терминологии погрешностей.

координат и их неопределенностей является принципиальным для системы управления космическим аппаратом при посадке на поверхность Фобоса (спутник Марса). При настройке и юстировке лазерного высотомера угол отклонения пучка вычисляется по формуле, содержащей фокусное расстояние использованного при данных измерениях объектива, в фокальной плоскости которого создана имитация бесконечно удаленного облучаемого объекта.

Для имитации реальных условий работы, юстировки, настройки и измерения необходимых параметров лазерного высотомера была создана установка на базе линзового объектива „Апо-Марс-7“ с фокусным расстоянием 1800 мм и относительным отверстием 1:3,6. Данный объектив рассчитан и изготовлен для работы в видимом диапазоне спектра (ахроматизован в области 570...710 нм), а лазерный передающий модуль высотомера работает на длине волны 1,064 мкм. Поэтому при определении углов отклонения пучков необходимо не только выставить плоскость фоточувствительной матрицы, при помощи которой визуализируется излучение с $\lambda = 1,064$ мкм, в плоскость наилучшего изображения (фокальную плоскость), но и измерить фокусное расстояние объектива на этой длине волны. При больших габаритах объектива „Апо-Марс-7“ данная задача достаточно сложна и предполагает создание дорогостоящего оборудования. Наиболее подходящим для решения этой задачи мог бы быть один из описанных в работе [5, с. 32—37] автоколлимационных способов, однако их анализ показал, что в данном случае они неприемлемы. Таким образом, необходимо было разработать сравнительно простой способ измерения фокусного расстояния объектива „Апо-Марс-7“, который по неопределенности измеренного значения фокусного расстояния, трудоемкости и финансовым затратам на реализацию удовлетворял бы заданным ограничениям.

Основная задача заключалась в установке в единую плоскость источника излучения с $\lambda = 1,064$ мкм и фоточувствительной плоскости матрицы, предназначенной для фиксации пучков излучения лазерного передающего модуля и изображений волокон приемного модуля. Эту единую плоскость необходимо совместить с плоскостью наилучшего изображения для объектива „Апо-Марс-7“ [11]. В качестве источника первичного излучения был выбран светодиод LED1070-03 фирмы “Roithner Lasertechnik” (Австрия) с максимальной мощностью излучения на длине волны 1,07 мкм и полушириной спектральной полосы излучения 55 нм. Требуемая длина волны 1,064 мкм выделялась с помощью узкополосного прозрачного в видимой области спектра интерференционного фильтра “MaxLine™ LaserLineFilter 1064” фирмы “Edmund Optics” (США) с полной шириной полосы пропускания по полувысоте от максимума, составляющей более 4 нм. На рис. 1 показана спектрограмма $\tau(\lambda)$ пропускания интерференционного фильтра: справа — узкая полоса с центром на длине волны 1,064 мкм; в центре — широкая полоса пропускания в видимой области.

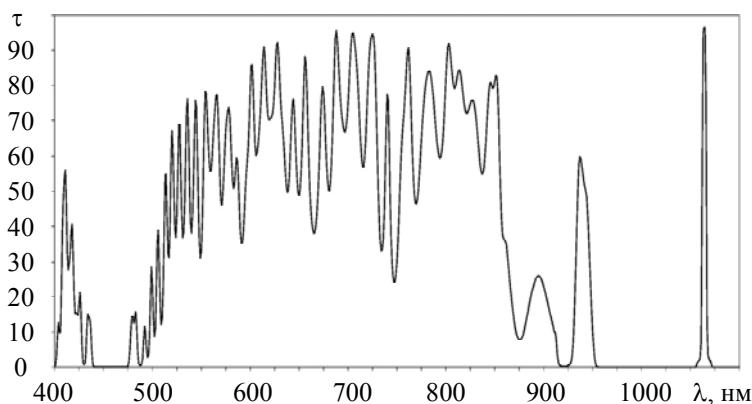


Рис. 1

Для повышения отношения сигнал/шум и увеличения контраста изображения на матрице камеры излучающая площадка светодиода была принята в качестве первичного и единственного источника излучения. Прозрачность узкополосного светофильтра в видимой области

играет решающую роль, так как с помощью микроскопа можно наблюдать как излучающую площадку светодиода, так и топологию фоточувствительных элементов матрицы при выставлении их в единую плоскость.

Схема установки для измерения фокусного расстояния объектива автоколлимационным способом приведена на рис. 2, а. Излучающая площадка светодиода 3 и плоскость фоточувствительных элементов матрицы 4 выставлены в одну плоскость, которая съюстирована по нормали относительно оптической оси объектива 2 в пределах $\pm 0,1$ мм. После светодиода по ходу лучей установлен интерференционный светофильтр 5, размер которого влияет на увеличение оптического пути до 0,7 мм. Наблюдаемая в микроскоп, через фильтр, излучающая площадка светодиода, посредством подвижек светодиода, приводится в плоскость наилучшего изображения. Микроскоп (без изменения фокусировки) перемещается параллельно плоскости наилучшего изображения в направлении матрицы ПЗС-камеры GRAS20 фирмы “Ophir-Spiricon” (Израиль), при этом фоточувствительный слой матрицы также должен находиться в плоскости наилучшего изображения для микроскопа. За объективом на подвижном основании установлено автоколлимационное плоское зеркало 1 со световым диаметром 345 мм и точностью формы $N=0,3$ и $\Delta N=0,1$. Посредством юстировочных подвижек зеркала 1 автоколлимационное изображение светодиода приводится в центр матрицы.

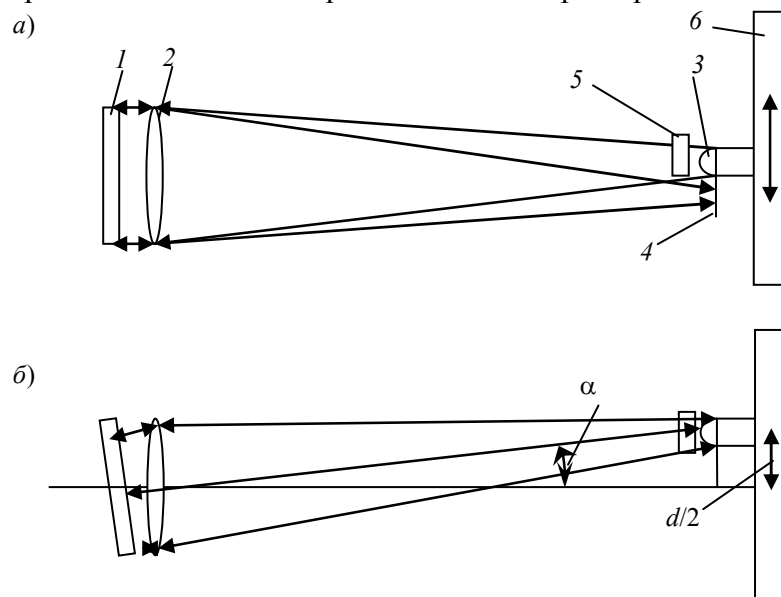


Рис. 2

Жесткая конструкция светодиод—матрица—интерференционный фильтр перемещается вдоль оптической оси объектива до получения четкого изображения излучающей площадки светодиода на матрице (рис. 3) ПЗС-камеры. Для наведения изображения использовался электронный инструмент программного обеспечения его захвата и обработки (на рисунке показан штриховыми линиями в центре); „провал“ в центре изображения обусловлен наличием электрода. Положение плоскости наилучшего изображения найдено с неопределенностью $\pm 0,1$ мм.

Необходимо отметить, что конструкция светодиод—матрица—интерференционный фильтр установлена на универсальный суппорт, позволяющий настраивать ее по трем координатам. Суппорт, в свою очередь, установлен на оптический рельс 6 (см. рис. 2, а), обеспечивающий передвижение суппорта перпендикулярно оптической оси объектива. Такая установка

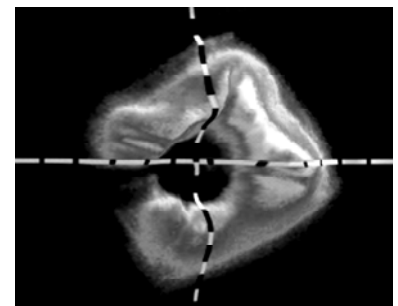


Рис. 3

позволила реализовать методику измерения фокусного расстояния объектива „Апо-Марс-7“ на длине волны 1,064 мкм.

Если передвигать конструкцию светодиод—матрица—интерференционный фильтр по оптическому рельсу в плоскости наилучшего изображения от условного нулевого положения (на оптической оси объектива), то, разворачивая зеркало l (см. рис. 2, a), можно компенсировать это линейное смещение, так чтобы изображение на матрице оставалось неподвижным в пределах менее 1 пиксела, равного $4,4 \times 4,4$ мкм. Тогда фокусное расстояние можно определить по формуле

$$f = d / (2 \operatorname{tg}(\alpha/2)),$$

где d — линейное смещение по оптическому рельсу; α — угол разворота автоколлимационного зеркала.

Измерение величины d осуществляется с помощью отсчетного устройства со стандартной неопределенностью $\pm 0,1$ мм, а наведение конструкции с точностью до 1 пиксела производится путем микроподвижки зеркала, при этом угол его разворота α измеряется автоколлимационным теодолитом ЗТ2КА со стандартной неопределенностью $\pm 2''$.

Измеренные значения d , α , f приведены в таблице. Среднее арифметическое значение $f = 1801$ мм, а расширенная неопределенность для доверительной вероятности 0,95 составляет ± 2 мм. Таким образом, результат измерения фокусного расстояния объектива „Апо-Марс-7“ на длине волны 1,064 мкм можно представить в виде $f = 1801 \pm 2$ мм.

| d , мм | α | f , мм |
|----------|------------|----------|
| 165,5 | 5° 15' 20" | 1803 |
| 166,0 | 5° 17' 08" | 1798 |
| 162,0 | 5° 09' 01" | 1801 |
| 161,0 | 5° 07' 02" | 1801 |
| 161,0 | 5° 07' 22" | 1800 |
| 160,0 | 5° 05' 15" | 1801 |
| 161,5 | 5° 07' 56" | 1802 |
| 160,0 | 5° 05' 15" | 1801 |

Необходимо более подробно пояснить, что величина d — это смещение конструкции светодиод—матрица—фильтр в плоскости наилучшего изображения в пределах $\pm d/2$ от оптической оси объектива. На рис. 2, b показано смещение в одну сторону от оптической оси (чтобы не перегружать рисунок), а в таблице — полное смещение d .

Достигнутую неопределенность можно проанализировать с учетом технических требований к юстировке лазерного высотомера. Согласно работе [7] конечная неопределенность при измерении углов расхождения боковых пучков излучения лазерного высотомера относительно центрального пучка определяется в основном неплоскостностью базового стола координатно-измерительной машины, неплоскостностью базового основания лазерного высотомера и неопределенностями автоколлимационных приборов: трубы ЮС-107 и теодолита ЗТ2КА. В случае уменьшения этих неопределенностей более, чем в два раза они будут соизмеримы с неопределенностью измерения фокусного расстояния, ограничение которой в данной схеме зависит от неопределенности положения плоскости наилучшего изображения, составляющей $\pm 0,1$ мм. Можно рассмотреть относительные неопределенности, составляющие неопределенность измерения фокусного расстояния: неопределенность измерения линейного смещения $\delta d = 0,1/160 = 0,0006$ и неопределенность измерения угла $\delta \alpha = 2/18315 = 0,0001$. Измерение величины d с неопределенностью 0,01 мм при современном уровне техники не представляет трудности, тогда как стандартная неопределенность измерения углов теодолитами или подобными приборами в редких случаях составляет менее $2''$. Таким образом, при достаточно малых материальных затратах конечную неопределенность измерения фокусного расстояния вышеописанным способом можно уменьшить более, чем в четыре раза — до значения

$\pm 0,4$ мм. Этого вполне достаточно, так как при использовании способа юстировки лазерного высотомера и измерений его параметров, изложенного в работе [9], неопределенность измерения фокусного расстояния значительно меньше неопределенности измерений остальных параметров.

Сравним полученные результаты с результатами измерения фокусных расстояний известными способами [1, 3, 4]. Например, в работах [1, 4] неопределенность измерения фокусного расстояния в относительной мере составляет от 0,1 до 0,02 %. При использовании предлагаемого способа это значение равно $2/1797=0,001=0,1$ %, если не прибегать к более точным измерениям величины d , и равно 0,02 %, если измерять d с неопределенностью 0,01 мм. Эти оценки также сравнимы с неопределенностью измерений фокусных расстояний различными способами, описанными в работе [3]: 0,1...0,01 %.

Рассмотрим условия, при которых предложенный способ измерения фокусного расстояния может быть реализован.

1. Источник излучения и его автоколлимационное изображение должны находиться в поле зрения объектива при всех измеряемых значениях d . При линейных размерах светодиодов 1 мм и более, а матриц — 5 мм и более минимальное ограничение линейного поля зрения составляет не менее десятка миллиметров.

2. Плоскость наилучшего изображения наблюдается с помощью матричного приемника, что накладывает особые ограничения, так как изображение на матричном приемнике, при наблюдении в псевдоцветах, в некоторых случаях может отличаться от ожидаемого.

3. Установка источника излучения и плоскости матричного приемника в единую плоскость ограничена глубиной резкости микроскопа, связанной, в свою очередь, с его рабочим расстоянием, большое значение которого предпочтительно для наблюдения и фиксации изображения.

4. Перемещение конструкции светодиод—матрица—интерференционный фильтр в пределах d не должно приводить к ее уходу из плоскости наилучшего изображения.

Таким образом, как следует из вышеизложенного, рассмотренный способ измерения фокусного расстояния предпочтителен для длиннофокусных объективов с линейными полями зрения, достаточными для размещения как источника излучения, так и матричного приемника.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 13095-82. Объективы. Методы измерения фокусного расстояния. М.: Изд-во стандартов, 1982.
2. Афанасьев В. А. Оптические измерения: Учебник для вузов. М.: Высш. школа, 1981. 229 с.
3. Пизюта Б. А., Михайлов И. О. Новые оптико-электронные приборы для оптических измерений: Учеб. пособие. Новосибирск: СГГА, 1996. 77 с.
4. Кирилловский В. К. Оптические измерения: Учеб. пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2005. Ч. 3. 67 с.
5. Афанасьев В. А., Жилкин А. М., Усов В. С. Автоколлимационные приборы. М.: Недра, 1982. 144 с.
6. Пат. 2072217 РФ. Способ определения фокусного расстояния длиннофокусных оптических систем и устройство для его осуществления / В. И. Мещеряков, О. К. Филиппов, М. И. Синельников. 1997.
7. Пат. 2408862 РФ. Способ определения фокусного расстояния оптической системы / С. В. Зуев. 2011.
8. Evaluation of Measurement Data — Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement [Электронный ресурс]: <<http://www.bipm.org/en/publications/guides/>>.
9. Ершов А. Г. Измерительная система координат космического лазерного высотомера-вертиканта, метод юстировки и анализ неопределенностей. // Вестн. ФГУП „НПО им. С. А. Лавочкина“. Космонавтика и ракетостроение. 2012. № 5. С. 73—79.
10. Kuvaldin E. V., Ershov A. G., Zakharenkov V. F., Polyakov V. M., Arhipova L. N. Testing unit for laser rangefinder // Proc. of SPIE. 2010. Vol. 7544. P. 754457.

11. Способ определения плоскости наилучшего изображения автоколлимационным методом / Ершов А. Г. Заявка на изобретение № 2011100518 РФ. 2012.

Сведения об авторе

Александр Георгиевич Ершов — „ГООИ им. С. И. Вавилова“; ст. научный сотрудник; E-mail: ers@npgoi.ru, alexer61@mail.ru

Рекомендована Институтом

Поступила в редакцию
11.02.15 г.

Ссылка для цитирования: Ершов А. Г. Автоколлимационный способ измерения фокусного расстояния объектива // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 7. С. 537—542.

AUTOCOLLIMATION METHOD FOR MEASURING THE FOCAL DISTANCE OF A LENS

A. G. Ershov

S. I. Vavilov State Optical Institute, 199053, Saint Petersburg, Russia
E-mail: ers@npgoi.ru

An autocollimation method for measuring the focal distance of a long-range lens Apo-Mars-7 at the wavelength of 1.064 μm is described. Factors affecting the final measurement uncertainty are considered. Limitations of the method application to other wavelengths and lenses are specified.

Keywords: focal distance, measurement, uncertainty.

Data on author

Aleksander G. Ershov — S. I. Vavilov State Optical Institute; Senior Researcher;
E-mail: ers@npgoi.ru, alexer61@mail.ru

Reference for citation: Ershov A. G. Autocollimation method for measuring the focal distance of a lens // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroyeniye. 2015. Vol. 58, N 7. P. 537—542 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-7-537-542