

---

# ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

---

УДК 681.777.2, 681.783.25  
DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-10-887-891

## АНАЛИЗ АБЕРРАЦИЙ ЛИНЗОВОГО КОЛЛИМАТОРА УСТАНОВКИ ДЛЯ ЮСТИРОВКИ АКТИВНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

А. Г. ЕРШОВ

*Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова, 199053, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: alexer61@mail.ru*

При совместной юстировке лазерного передающего модуля и приемного модуля активного лазерного оптико-электронного прибора (лазерного локатора, дальномера или высотомера) используют установку с коллиматором. Если поле зрения прибора превышает один градус, то для настройки необходимо применить линзовый коллиматор. При использовании линзового коллиматора, рассчитанного не на длину волны лазерного передающего модуля, вследствие aberrаций коллиматора, возникают ошибки определения центроидов пятен рассеяния, что приводит к ошибке визирования (пеленгационной ошибке, ошибке положения линии визирования). Рассмотрено влияние aberrаций линзового коллиматора с полем зрения  $8^\circ$  на ошибку положения линии визирования. После оптимизации коллиматора, рассчитанного первоначально на видимый диапазон спектра, пеленгационная ошибка для длины волны 1064 нм уменьшилась в несколько раз.

**Ключевые слова:** коллиматор, aberrации, юстировка, установка, пеленгационная ошибка, ошибка визирования, boresight error

Для юстировки активных лазерных оптико-электронных приборов (ОЭП), в зависимости от поля зрения, используют два типа коллиматоров:

1) зеркальный в виде одиночного сферического или параболического зеркала [1—3] — позволяет юстировать при поле зрения до  $1^\circ$ . При больших углах поля зрения aberrация типа „кома“ приводит к ошибке положения линии визирования более  $2''$ ;

2) линзовый — позволяет выполнять юстировку при углах поля зрения ОЭП более  $1^\circ$  [4]. Например, при юстировке лазерного высотомера-вертиканта по программе „Фобос-Грунт“ поле зрения коллиматора составляло  $2^\circ$ , а погрешность юстировки не превышала десятков угловых секунд [5].

В литературе не анализируется влияние aberrаций объектива коллиматора на ошибку положения линии визирования и, как следствие, на точностные характеристики ОЭП; цель настоящей работы — восполнить этот пробел.

Будем называть линию, соединяющую заднюю главную точку объектива приемного модуля (ПМ) ОЭП с геометрическим центром фотоприемника (центром локального поля зрения), линией визирования. Несовпадение центра локального поля зрения с центром лазерного пучка лазерного ПМ (ЛПМ) в предметной плоскости называется ошибкой положения линии визирования (boresight error, BSE).

Активные ОЭП могут быть как однолучевыми (один лазерный пучок на выходе ЛПМ), так и многолучевыми, важной технической характеристикой последних является величина угла между локальными полями зрения. При юстировке, в частности, измеряется угол между центрами локальных полей зрения [5] с использованием установки, в состав которой входит коллиматор. Аберрации коллиматора влияют на конечную величину неопределенности измерения угла.

Из фокальной плоскости объектива ПМ проецируют изображение полевой диафрагмы, определяющей локальное поле зрения, в фокальную плоскость объектива коллиматора и определяют угол  $\alpha_{12}$  между центрами локальных полей зрения 1 и 2:

$$\alpha_{12} = r/f', \quad (1)$$

где  $r$  — линейное расстояние между центрами 1 и 2,  $f'$  — фокусное расстояние объектива коллиматора. На рис. 1 представлена оптическая схема установки, используемая для моделирования в программе Zemax с целью определения центроидов ЛПМ и ПМ (1 — первое положение локального поля объектива ПМ и пятна от лазерного пучка ЛПМ в фокальной плоскости коллиматора 3, 2 — второе положение локального поля объектива ПМ и пятна от ЛПМ, 4 — объектив ПМ, 5 — выход лазерных пучков из ЛПМ). Неопределенность измерения угла  $\alpha$  можно получить, продифференцировав формулу (1) по частным производным от  $r, f'$ :

$$\delta\alpha_{12} = \sqrt{\Delta^2 + \delta^2\alpha_{12}^2}, \quad (2)$$

где  $\Delta = \Delta r/f'$ ,  $\delta = \Delta f'/f'$  — относительные неопределенности измерения  $r$  и  $f'$ . Ошибка положения линии визирования может входить в подкоренное выражение формулы (2) как независимая случайная величина, тогда

$$\Delta\alpha_{12} = \sqrt{2(\text{BSE})^2 + \Delta^2 + \delta^2\alpha_{12}^2}. \quad (3)$$

Удвоенное значение BSE возникает вследствие того, что инструмент, предназначенный для измерения  $r$ , фиксируют дважды: в точках 1 и 2.

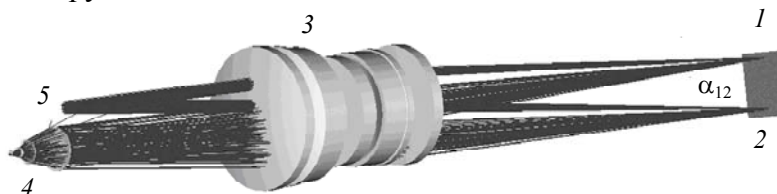


Рис. 1

Для анализа влияния аберраций объектива коллиматора на ошибку положения линии визирования с помощью компьютерного моделирования вычислена разница положения центроидов от пучка ЛПМ и пучка от подсвеченной в обратном ходе полевой диафрагмы (локального поля зрения) относительно положения главного луча. Моделирование проводилось для объектива коллиматора типа Апо-Марс (АМ) ( $f' = 1800$  мм, 1:4) в результате оптимизации которого для длины волны 1064 нм и поля зрения  $\pm 4^\circ$  был получен объектив Деймос (Д) ( $f' = 1800$  мм, 1:4).

Оптимизация объектива проводилась в два этапа: на первом уменьшены сферическая аберрация и кома при фиксированном фокусном расстоянии, на втором — уменьшено среднее квадратичное отклонение центроида, при фиксированных фокусном расстоянии и сохраненных минимальных аберрациях.

В табл. 1 приведены суммарные коэффициенты Зайделя для исходного и оптимизированного объективов.

Таблица 1

Коэффициенты Зайделя

Коэффициент	SPHA S1	COMA S2	ASTI S3	FCUR S4	DIST S5
Апо-Марс	0,065711	−0,006918	0,001284	0,005434	−0,001458
Деймос	0,000000	0,000003	0,002365	0,005908	−0,003169

Координаты центроидов  $(x, y)$  вычислялись по формулам

$$x = \frac{\sum_j \sum_i (j D_{i,j})}{\sum_i \sum_j D_{i,j}}, \quad (4)$$

$$y = \frac{\sum_i \sum_j (i D_{i,j})}{\sum_i \sum_j D_{i,j}}, \quad (5)$$

где  $D_{i,j}$  — двумерная функция распределения интенсивности в пятне.

Ошибка положения центроида вычислялась как разница между координатами центроида  $(x, y)$  и координатами главного луча. Результаты сведены в табл. 2.

Таблица 2

Ошибки положения центроида пятна от лазерного пучка ЛПМ  
и от пучка обратной подсветки ПМ (...)

Поле, ...°		4	3	2	1	0	-1	-2	-3	-4
АМ	ЛПМ	19,5	10,3	8,0	7,4	5,4	3,3	1,3	-0,7	-9,2
	ПМ	12,8	3,6	4,2	-0,5	-2,9	-6,0	-4,6	-6,9	-15,3
	BSE	6,7	6,7	3,8	7,9	8,3	9,3	5,9	-6,2	-6,1
Д	ЛПМ	-2,2	-1,3	-0,7	-0,2	-0,1	-0,1	0,0	0,8	2,2
	ПМ	-1,5	-0,5	-0,2	0,0	0,0	0,0	0,3	0,6	1,7
	BSE	-0,7	-0,8	-0,5	-0,2	-0,1	-0,1	0,3	0,2	0,5

На рис. 2 приведены изображения пятен и их смещения в фокальных плоскостях соответствующих объективов. Перекрестие соответствует положению главного луча; *a* — до оптимизации коллиматорного объектива, *б* — после оптимизации, поле 4°. Если на практике значение ошибки положения линии визирования затруднительно определить, при анализе формулы (3) эта величина должна быть учтена как случайная.

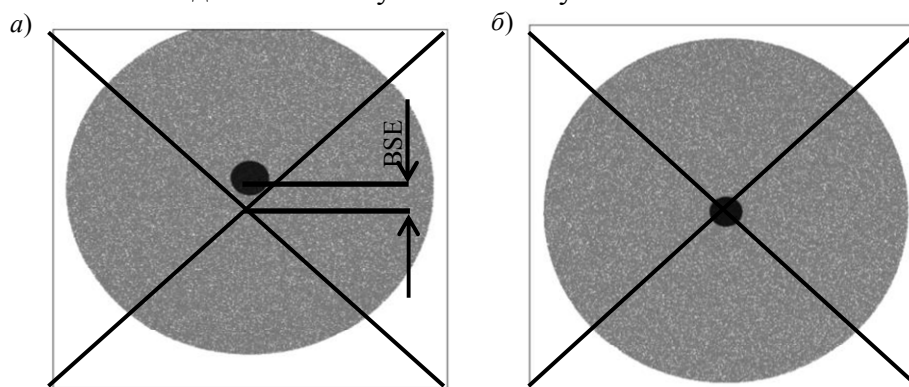


Рис. 2

Проанализируем составляющие подкоренного выражения в формуле (3). Для балансирования неопределенностей необходимо, чтобы их уровень был соизмерим: пусть  $BSE = \Delta = \delta\alpha_{12} = 1'' = 0,005$  мрад. Тогда при  $f' = 1800$  мм,  $\Delta r = 0,01$  мм,  $\Delta f' = 0,13$  мм (поле 4°). При современном уровне развития техники измерение линейного расстояния 126 мм (поле зрения 4° при  $f' = 1800$  мм) с погрешностью 0,01 мм не представляется трудным. Необходимо измерить фокусное расстояние коллиматорного объектива на длине волны зондирующего излучения с относительной неопределенностью 0,07 %, что возможно автоколлимационным методом [6]. Тогда неопределенность  $\Delta\alpha_{12} = 2''$ .

При проектировании установки, предназначенной для юстировки активных ОЭП (лазерных локаторов, дальномеров, высотмеров) следует учитывать aberrации входящего в нее коллиматорного объектива. Эти aberrации приводят к ошибке положения линии визирования (пеленгационной ошибке, boresight error) и к ухудшению точностных характеристик ОЭП. Для ОЭП с угловыми полями более одного градуса следует применять оптимизированный (по

критерию уменьшения среднеквадратичного отклонения центроида) линзовый коллиматор, что позволит уменьшить пеленгационную ошибку в несколько раз (до единиц угловых секунд).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cole T. D., Boies M. T., El-Dinary A. S. et al. Laser Rangefinder for the Near Earth Asteroid Rendezvous (NEAR) Mission // *Proc. SPIE*. Vol. 2581. Lidar Techniques for Remote Sensing II, 2. December 15, 1995. DOI: 10.1117/12.228504
2. Ramos-Izquierdo L., Bufton J. L., Hayes P. Optical system design and integration of the Mars Orbiter Laser Altimeter // *Applied Optics*. 1994. Vol. 33, N 3.
3. Chakraborty S., Affolter M., Gunderson K. et al. High accuracy alignment facility for the receiver and transmitter of the BepiColombo Laser Altimeter // *Applied Optics*. 2012. Vol. 51, N 20.
4. Kuvaldin E. V., Ershov A. G., Zakharenkov V. F. et al. Testing unit for laser rangefinder // *Proc. of SPIE*. 2010. Vol. 7544. P. 754457.
5. Ершов А. Г. Измерительная система координат космического лазерного высотомера-вертиканта, метод юстировки и анализ неопределенностей // *Вестн. НПО им. С.А.Лавочкина. Космонавтика и ракетостроение*. 2012. № 5. С. 73—79.
6. Ершов А. Г. Автоколлимационный способ измерения фокусного расстояния объектива // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2015. Т. 58, № 7. С. 537—542.

#### Сведения об авторе

Александр Георгиевич Ершов

— ГОИ им. С. И. Вавилова; научное отделение № 5 „Расчет оптических систем“; старший научный сотрудник; E-mail: alexer61@mail.ru

Поступила в редакцию  
23.04.18 г.

**Ссылка для цитирования:** Ершов А. Г. Анализ аберраций линзового коллиматора установки для юстировки активных лазерных оптико-электронных приборов // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2018. Т. 61, № 10. С. 887—891.

### ANALYSIS OF ABERRATIONS OF LENS COLLIMATOR IN AN INSTALLATION FOR ACTIVE LASER OPTOELECTRONIC DEVICES ALIGNMENT

A. G. Ershov

S. I. Vavilov State Optical Institute, 199053, St. Petersburg, Russia  
E-mail: alexer61@mail.ru

In joint alignment of laser transmitting and receiving modules of an active laser optoelectronic device (laser locator, rangefinder or altimeter), an installation with a collimator is used. If the device field-of-view angle exceeds one degree, a lens collimator should be used for adjustment. When applied lens collimator is designed for a wavelength other than that of the laser emitter, the collimator aberrations lead to errors in determining centroids of the scattering spots in the focal plane and result in sighting error (direction-finding error). The effects of aberrations of a lens collimator with field-of-view angle of  $8^\circ$  are studied. After optimization of the collimator initially designed for the visible spectral range, the direction-finding error for the wavelength of 1064 nm is reported to decrease several times.

**Keywords:** collimator, aberrations, alignment, installation, direction-finding error, sight error

#### REFERENCES

1. Cole T.D., Boies M.T., El-Dinary A.S. et al. *Proc. SPIE*, Lidar Techniques for Remote Sensing II, 1995, vol. 2581. DOI: 10.1117/12.228504
2. Ramos-Izquierdo L., Bufton J.L., Hayes P. *Applied Optics*, 1994, no. 3(33).
3. Chakraborty S., Affolter M., Gunderson K. et al. *Applied Optics*, 2012, no. 20(51).
4. Kuvaldin E.V., Ershov A.G., Zakharenkov V.F. et al. *Proc. of SPIE*, 2010, vol. 7544, pp. 754457.
5. Ershov A.G. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*, 2012, no. 5, pp. 73—79. (in Russ.)
6. Ershov A.G. *Journal of Instrument Engineering*, 2015, no. 7(58), pp. 537—542. (in Russ.)

**Data on author**

**Alexander G. Ershov**

— S. I. Vavilov State Optical Institute; Department of Optical Systems Calculation; Senior Scientist; E-mail: alexer61@mail.ru

**For citation:** Ershov A. G. Analysis of aberrations of lens collimator in an installation for active laser optoelectronic devices alignment. *Journal of Instrument Engineering*. 2018. Vol. 61, N 10. P. 887—891 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-10-887-891