

УДК 681.7.01, 535.317.2

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДВУХКОМПОНЕНТНОГО АФОКАЛЬНОГО КОМПЕНСАТОРА В ЗЕРКАЛЬНО-ЛИНЗОВЫХ СИСТЕМАХ ДЛЯ КОРРЕКЦИИ ТЕРМОАБЕРРАЦИИ ПОЛОЖЕНИЯ

С.Е. Иванов^a, Г.Э. Романова^b

^a Санкт-Петербургский филиал АО «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения», Санкт-Петербург, 190103, Российская Федерация

^b Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

Адрес для переписки: Stepan.Ivanov.82@gmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию 10.03.17, принята к печати 04.04.17

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-3-373-379

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Иванов С.Е., Романова Г.Э. Использование двухкомпонентного афокального компенсатора в зеркально-линзовых системах для коррекции термоабберации положения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 3. С. 373–379. doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-3-373-379

Аннотация

Предмет статьи. Традиционно афокальные компенсаторы, располагаемые в параллельных или сходящихся пучках лучей, используются для коррекции аббераций зеркальных систем. Дополнительное свойство афокальности позволяет практически не обращать внимания на подбор материалов при проектировании, так как в этом случае апохроматическая коррекция достигается автоматически. Изменение температуры окружающей среды приводит к изменению формы зеркал и их взаимного расположения, кроме того, изменяются оптические характеристики материала компенсатора, что приводит к расфокусировке. **Основные результаты.** На основе анализа параксиальных соотношений, справедливых для коррекции хроматических аббераций и терморасфокусировки, получены соотношения, позволяющие оценить характеристики материалов, необходимых для пассивной атермализации, т.е. для сохранения качества изображения при изменении температуры окружающей среды без использования механического смещения приемника. Показано, что в двухлинзовом компенсаторе, используемом для коррекции аббераций двухзеркальных объективов в сходящемся пучке лучей, для пассивной атермализации необходимо использовать сочетание оптических стекол и полимерных материалов. **Практическая значимость.** На основе полученных теоретических соотношений выполнен расчет двухзеркальной системы с афокальным компенсатором, в котором высокое качество изображения сохраняется в широком температурном диапазоне. Использование полученных соотношений на практике позволило продемонстрировать возможность создания атермализованных зеркально-линзовых объективов с использованием комбинаций обычных стекол с современными полимерными материалами. Представленный метод не является универсальным, однако позволяет выполнить подбор материалов для расчета афокальных двухлинзовых систем, позволяющих компенсировать терморасфокусировку изображения без использования активных методов коррекции (механических подвижек).

Ключевые слова

расчет оптических систем, зеркально-линзовая система, афокальный компенсатор, термоабберация положения, термооптический параметр, оптический полимер

TWO-LENS AFOCAL COMPENSATOR FOR THERMAL DEFOCUS CORRECTION OF CATADIOPTRIC SYSTEM

S.E. Ivanov^a, G.E. Romanova^b

^a SPb Branch of JSC "Research & Production Corporation "Precision Systems and Instruments", Saint Petersburg, 190103, Russian Federation

^b ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

Corresponding author: Stepan.Ivanov.82@gmail.com

Article info

Received 10.03.17, accepted 04.04.17

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-3-373-379

Article in Russian

For citation: Ivanov S.E., Romanova G.E. Two-lens afocal compensator for thermal defocus correction of catadioptric system. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 373–379 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-3-373-379

Abstract

Subject of Research. Traditionally, afocal compensators, located in parallel or in converging beams, are used to correct the aberrations of mirror systems. The additional property of afocality gives the possibility to ignore practically the selection of materials in the design, since, in this case, the achromatic correction is achieved automatically. A change in the ambient temperature leads to a change in the shape of the mirrors and their mutual arrangement, in addition, the optical characteristics of the compensator material change that leads to defocusing. **Main Results.** Based on the analysis of paraxial formulas valid for the correction of chromatic aberrations and thermal defocusing, we have obtained formulas that enable to evaluate the characteristics of the materials necessary for passive athermalization, that is, to keep image quality when the ambient temperature changes without using a mechanical offset of the sensor. It is shown that in a two-lens compensator used to correct aberrations of two-mirror lens in a converging beam of rays, it is necessary to use a combination of optical glasses and polymer materials for passive athermalization. **Practical Relevance.** Based on the theoretical correlations obtained, a two-mirror system with an afocal compensator is calculated with a high image quality maintained over a wide temperature range. The use of obtained formulas in practice made it possible to demonstrate the possibility of creation of athermalized catadioptric lens involving combinations of conventional glasses with modern polymeric materials. The method presented is not universal, but it gives the possibility to select materials for calculating the afocal two-lens systems, compensating the thermal defocusing of the image without active correction methods (mechanical shifts).

Keywords

optical system design, catadioptric system, afocal compensator, athermalization, thermo-optical coefficient, optical plastic

Введение

Как известно в зеркально-линзовых системах главная роль в образовании изображения отводится отражающим поверхностям. Преломляющие поверхности вводятся в систему прежде всего с целью коррекции aberrаций зеркальной части и, как правило, обладают сравнительно небольшими оптическими силами. Таким образом, они являются своего рода компенсаторами aberrаций с малой или нулевой оптической силой, т.е. афокальными.

При изменении температуры происходит смещение приемника излучения от плоскости наилучшей установки (ПНУ) на величину ds' , которая складывается из трех составляющих:

$$ds' = ds'_{\text{констр}} + ds'_{\text{зерк}} + ds'_{\text{линз}},$$

где $ds'_{\text{констр}}$ – смещение приемника излучения вследствие термического расширения элементов конструкции; $ds'_{\text{зерк}}$ – смещение ПНУ вследствие изменения формы зеркал, вызванной ненулевым коэффициентом теплового расширения материалов; $ds'_{\text{линз}}$ – смещение ПНУ вследствие изменения оптической силы линзовой части (компенсатора).

Классические методы возвращения качества при терморасфокусировке заключаются в механическом смещении приемника излучения методами, описанными в [1–7], чтобы его положение совпадало с ПНУ. Однако этот путь может потребовать либо сложных конструктивных решений, либо наличия приводов и микропроцессора для их управления. Эти методы влекут за собой существенное усложнение конструкции, а также уменьшают надежность объектива.

Альтернативный путь – это разработка такого афокального компенсатора, который при номинальной температуре имеет оптическую силу, равную нулю, и выполняет все возложенные на него функции коррекции aberrаций. После изменения температуры оптическая сила этого компенсатора становится отличной от нуля и принимает значение, которое согласует смещение приемника излучения $ds'_{\text{констр}}$ со смещением ПНУ, возникшее вследствие изменения формы зеркал $ds'_{\text{зерк}}$.

Целью работы является исследование возможности использования афокального компенсатора для коррекции термоaberrации положения, т.е. температурной расфокусировки в зеркально-линзовых системах, а также нахождения характеристик оптических материалов, позволяющих достичь такой коррекции.

Исследование термоaberrации положения объектива

Рассмотрим зеркальный объектив с фокусным расстоянием $f'_{\text{зерк}}$, в котором при изменении температуры на величину dT приемник излучения смещается на величину ds' относительно плоскости изображения. В этом случае можно рассматривать изменение фокусного расстояния объектива на величину ds' , тогда оптическая сила зеркального объектива при изменении температуры равна

$$\Phi_{\text{зерк}} = \frac{1}{ds' + f'_{\text{зерк}}}.$$

Изменение оптической силы при изменении температуры составляет

$$d\Phi_{\text{зерк}} = \frac{1}{ds' + f'_{\text{зерк}}} - \frac{1}{f'_{\text{зерк}}} = -\frac{ds'}{f'_{\text{зерк}}(ds' + f'_{\text{зерк}})}. \quad (1)$$

Исходя из того, что ds' по сравнению с фокусным расстоянием зеркального объектива $f'_{\text{зерк}}$ является незначительной величиной, соотношение (1) можно записать как

$$d\varphi_{\text{зерк}} \cong -\frac{ds'}{f'_{\text{зерк}}{}^2}. \quad (2)$$

Данное изменение оптической силы можно создать с помощью афокального ахроматизованного двухлинзового компенсатора. Для такого компенсатора справедливы следующие соотношения:

$$\begin{aligned} \varphi_{\text{комп}} = \varphi_1 + \varphi_2 = 0 & \quad - \text{условие масштаба,} \\ \varphi_1/v_1 + \varphi_2/v_2 = 0 & \quad - \text{уравнение ахроматизации,} \\ \varphi_1 V_1 + \varphi_2 V_2 = d\varphi_{\text{комп}}/dT & \quad - \text{термоабберация положения,} \end{aligned} \quad (3)$$

где φ_1 и φ_2 – оптические силы компонентов компенсатора; v – коэффициент дисперсии; V – термооптический параметр [8]; dT – величина изменения температуры.

Традиционно для расчета афокального компенсатора используют одинаковые материалы. Как видно из второго соотношения в системе (3), при этом автоматически выполняется условие ахроматизации. Более того, в этом случае исправлен и вторичный спектр, т.е. система обладает апохроматической коррекцией. Однако при этом исправить термоабберацию положения, возникающую в системе при изменении температуры, невозможно.

Как можно видеть из соотношений (3), для одновременной коррекции хроматизма, терморасфокусировки и выполнения условия масштаба необходимо:

1. $\varphi_1 = -\varphi_2$, оптические силы двух компонентов должны быть одинаковы по модулю, но противоположны по знаку;
2. $v_1 = v_2$, компоненты должны быть выполнены из материалов с одинаковыми или близкими коэффициентами дисперсии для отсутствия хроматизма положения;
3. $V_1 \neq V_2$, для возникновения оптической силы при изменении температуры термооптические параметры материалов должны быть различны.

В зеркально-линзовом объективе значения оптических сил компонентов двухлинзового афокального компенсатора определяются из соображений коррекции aberrаций зеркальной части системы методами, описанными в [9–14], следовательно, для создания соответствующего изменения оптической силы компенсатора необходимо найти пару оптических материалов со строго определенной разницей термооптических параметров ΔV . Выражение для определения этой разницы следует из (3):

$$\Delta V = -\frac{d\varphi_{\text{комп}}}{\varphi_1 \cdot dT}. \quad (4)$$

Полученные соотношения позволяют рассчитать компенсатор, располагающийся вплотную к объективу. Однако во многих практически важных случаях расстояние между компенсатором и объективом может достигать значительных величин, например, в зеркальных системах с линзовым афокальным компенсатором в сходящемся пучке лучей. Следовательно, зеркально-линзовый объектив можно рассмотреть как двухкомпонентную систему с расстоянием между компонентами, в которой задний отрезок равен

$$s' = \frac{1 - \varphi_{\text{зерк}} \cdot d}{\varphi_0}, \quad (5)$$

где $\varphi_0 = \varphi_{\text{зерк}} + \varphi_{\text{комп}} - d \cdot \varphi_{\text{зерк}} \cdot \varphi_{\text{комп}}$ – оптическая сила зеркально-линзового объектива; d – расстояние между эквивалентными главными плоскостями зеркальной части системы и компенсатора.

Продифференцировав выражение (5) по $\varphi_{\text{зерк}}$ и $\varphi_{\text{комп}}$, получим смещение плоскости изображения относительно приемника излучения вследствие изменения температуры. Для атермализованной системы это значение должно быть равно нулю:

$$ds' = -\frac{d\varphi_{\text{зерк}} \cdot d\varphi_{\text{комп}} (d\varphi_{\text{зерк}} - 2) + d\varphi_{\text{комп}} + d\varphi_{\text{зерк}}}{\varphi_0}.$$

Откуда следует, что

$$d\varphi_{\text{комп}} = -\frac{d\varphi_{\text{зерк}}}{d\varphi_{\text{зерк}} (d\varphi_{\text{зерк}} - 2) + 1}. \quad (6)$$

Так как компенсатор афокальный, то $\varphi_{\text{зерк}} = 1/f'_{\text{об}}$, где $f'_{\text{об}}$ – фокусное расстояние всего зеркально-линзового объектива, а выражение для $d\varphi_{\text{зерк}}$ приведено в (2). Тогда выражение (6) принимает вид

$$d\varphi_{\text{комп}} = \frac{ds'}{(d - f'_{\text{об}})^2}. \quad (7)$$

Полученное соотношение (7) совместно с (4) позволяет выполнить подбор материалов для расчета афокальных двухлинзовых компенсаторов. Проиллюстрируем его примером.

Пример расчета системы

Рассмотрим базовую схему Кассегрена с афокальным компенсатором в сходящемся пучке, предложенную М.А. Варвариной, приведенную в [15] и изображенную на рис. 1. Схема обладает следующими парааксиальными характеристиками:

- фокусное расстояние 1200 мм;
- относительное отверстие 1:5;
- угловое поле $\pm 1^\circ$;
- коэффициент экранирования 0,4.

Конструктивные параметры схемы приведены в табл. 1. Компенсатор находится на расстоянии $D=0,85f_{об}$, а оптические силы компонентов компенсатора равны $1,1 \times 10^{-3}$ дптр по модулю. При изменении температуры с -40°C до $+60^\circ\text{C}$ смещение ПНУ, вызванное термическим расширением конструкции и зеркал, при условии, что зеркала изготовлены из ситалла с коэффициентом линейного теплового расширения (КЛТР) $0,1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, а детали корпуса – из нержавеющей стали с КЛТР $13,6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, составляет 2,25 мм. Для компенсации этого смещения разница термооптических параметров должна составлять $6,3 \times 10^{-4}$.

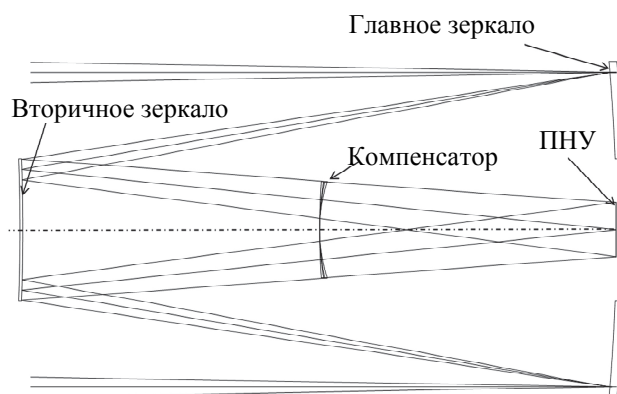


Рис. 1. Базовая схема М.А. Варвариной

R , мм	d , мм	n	$D_{св}$, мм	e^2
-1470,6	-456,0	-1,0	243,0	1,748
-1442,4	228,0	1,0	109,0	50,43
179,51	0,0	1,42	74,2	0,0
122,23	0,0	1,0	74,2	0,0
231,46	0,0	1,42	74,2	0,0
584,89	183,0	1,0	74,2	0,0

Таблица 1. Характеристики и параметры базовой схемы:

R – радиус кривизны поверхности; d – осевое расстояние; n – коэффициент преломления среды; $D_{св}$ – световой диаметр поверхности; e^2 – квадрат эксцентриситета

Было проведено исследование отечественных и зарубежных каталогов оптических материалов для видимой области спектра. Результаты приведены в табл. 2.

Пары, составленные из обычных марок стекол и оптических минералов, способны достичь значения ΔV не более 10^{-5} , чего явно недостаточно. Такой разницы термооптических параметров можно добиться за счет использования оптических полимеров. При совместном использовании этих материалов с обычными марками стекол удастся получить требуемые значения разницы термооптических параметров. В данном случае хорошо подходит пара AD-5503 из каталога компании TEIJIN и LAN80 из каталога компании OHARA. Они не только имеют значение разницы термооптических параметров, близкое к искомому, но и коэффициенты дисперсий этих материалов близки по значению.

В результате оптимизации конструктивных параметров компенсатора с использованием показанной пары оптических материалов была получена оптическая схема, изображенная на рис. 2, с конструктивными параметрами, указанными в табл. 3. Остаточная дефокусировка ПНУ вследствие температурных

изменений составляет 28 мкм. Также удалось достичь качества изображения, близкого к дифракционно-ограниченному, графики частотно-контрастной характеристики представлены на рис. 3.

Наименование (каталог)	Разница коэффициентов дисперсии $\Delta\nu$ (спектральный диапазон: $F'-e-C'$)	Разница термооптических параметров $\Delta V, ^\circ\text{C}^{-1}$ (диапазон температур: $dT = -40 ^\circ\text{C}$ до $+60 ^\circ\text{C}$)
Оптические стекла		
H-ZLAF1 (CDGM) – S-NBM51 (OHARA)	3×10^{-4}	$7,0 \times 10^{-7}$
H-ZBAF3 (CDGM) – КФ7 (ГОСТ)	1×10^{-3}	$7,6 \times 10^{-6}$
H-BAK2 (CDGM) – L-BAL43 (OHARA)	1×10^{-3}	$4,1 \times 10^{-6}$
S-BAL50 (OHARA) – L-BAL35 (OHARA)	1×10^{-3}	$3,5 \times 10^{-6}$
H-K5 (CDGM) – H-BAK4 (CDGM)	1×10^{-3}	$2,0 \times 10^{-6}$
SF6 (SCHOTT) – H-ZLAF90 (CDGM)	1×10^{-4}	$8,3 \times 10^{-6}$
D-ZLAF81 (CDGM) – N-LASF31 (SCHOTT)	1×10^{-3}	$2,9 \times 10^{-6}$
Оптические стекла + полимеры		
AD-5503 (TEIJIN) – LAN80 (OHARA)	$3,0 \times 10^{-4}$	$2,5 \times 10^{-4}$
SP-1516 (TEIJIN) – H-ZF7LA (CDGM)	$7,5 \times 10^{-2}$	$2,2 \times 10^{-4}$
SD-1414 (TEIJIN) – N-SF11 (SCHOTT)	$5,8 \times 10^{-2}$	$2,5 \times 10^{-4}$
K26R (ZEON) – D-LAK70 (CDGM)	$3,0 \times 10^{-2}$	$2,5 \times 10^{-4}$
330R (ZEON) – ТК4 (ГОСТ)	$7,3 \times 10^{-2}$	$2,9 \times 10^{-4}$
480R (ZEON) – ТК4 (ГОСТ)	$5,0 \times 10^{-3}$	$2,7 \times 10^{-4}$

Таблица 2. Характеристики пар оптических материалов

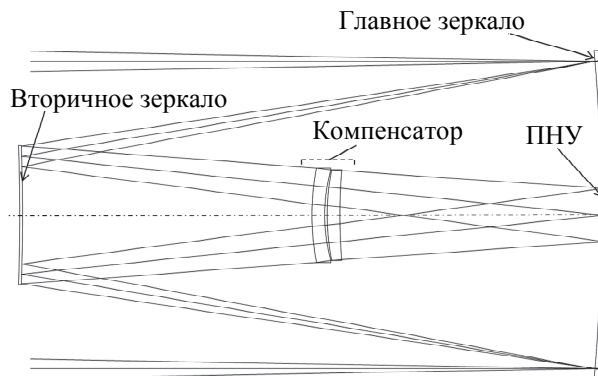


Рис. 2. Система после оптимизации

$R, \text{мм}$	$D, \text{мм}$	n	$D_{\text{св}}, \text{мм}$	e^2
-1470,6	-456,0	-1,0	243,0	1,748
-1442,4	228,0	1,0	109,0	50,43
197,41	10,0	LAN80	74,6	0,0
133,18	2,0	1,0	71,7	0,0
182,09	10,0	AD-5503	71,0	0,0
449,29	207,9	1,0	70,6	0,0

Таблица 3. Параметры схемы с оптимизированным компенсатором

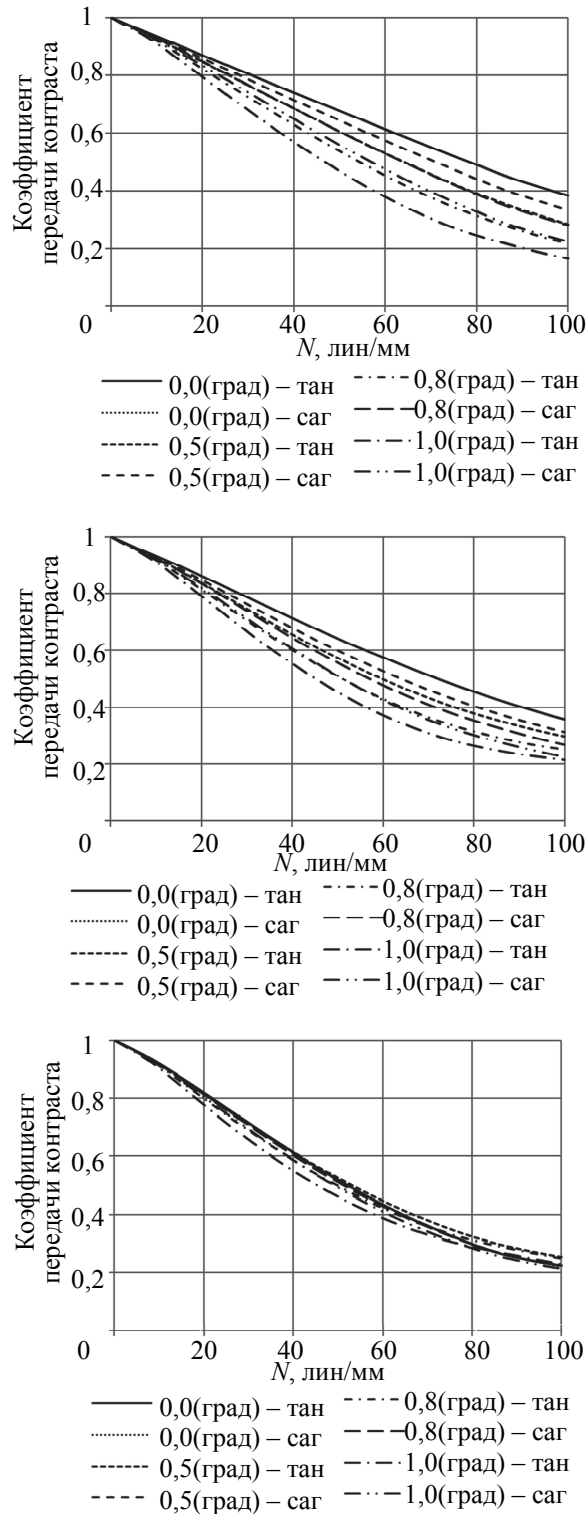


Рис. 3. Частотно-контрастная характеристика атермализованной системы.
 $T = -40\text{ }^{\circ}\text{C}$ (а); $T = +20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (б); $T = +60\text{ }^{\circ}\text{C}$ (в); N – число линий на миллиметр;
 тан – тангенциальная составляющая; саг – сагиттальная составляющая

Заключение

В работе показано, что для компенсации термоабберации положения можно использовать двухлинзовый афокальный компенсатор. Подход особенно актуален для зеркально-линзовых систем, где афокальный компенсатор используется как в сходящемся, так и в параллельном пучке лучей. Приведены соотношения, позволяющие выполнить подбор оптических материалов для выполнения этой задачи. Анализ характеристик оптических материалов современных производителей показал, что решение задачи использования афокального компенсатора для коррекции термоабберации положения возможно при ис-

пользовании сочетания стекол и полимерных материалов. Применение предложенного подхода продемонстрировано на примере расчета зеркально-линзового объектива. Рассчитанный объектив обладает высоким качеством изображения в широком температурном диапазоне.

Литература

1. Chen J.L., Chang C.C., Tung C.H. Autofocus searching method. Patent US 20080151097 A1. 2008.
2. Ahn J.H., Ko J., Lee I.Y., Kim S.H. A fast continuous auto focus algorithm using the state transition model // *Pacific Science Review*. 2011. V. 13. N 3. P. 125–130.
3. Ooi K., Izumi K., Nozaki M., Takeda I. An advanced autofocus system for video camera using quasi condition reasoning // *IEEE Transaction on Consumer Electronics*. 2002. V. 36. N 3. P. 526–530. doi: 10.1109/30.103169
4. Hanma K., Masuda M., Nabeyama H., Saito Y. Novel technologies for automatic focusing and white balancing of solid state color video camera // *IEEE Transactions on Consumer Electronics*. 1983. № CE-29. P. 376–382. doi: 10.1109/TCE.1983.356324
5. Kuster M. Autofocusing method and device for a microscope. Patent US 9036021B2. 2015.
6. Bueno-Ibarra M.A., Alvarez-Borrego J., Acho L., Chavez-Sanchez M.C. Fast autofocus algorithm for automated microscopes // *Optical Engineering*. 2005. V. 44. N 6. P. 063601–063601-8. doi: 10.1117/1.1925119
7. Беззубик В.В., Белашенков Н.Р., Устинов С.Н. Оптимизация алгоритмов автофокусировки цифрового микроскопа // *Оптический журнал*. 2009. Т. 76. № 10. С. 16–22.
8. Волосов Д.С. Фотографическая оптика. Теория, основы проектирования, оптические характеристики. М.: Искусство, 1978. 543 с.
9. Русинов М.М. Композиция оптических систем. М.: Libroком, 2010. 296 с.
10. Андреев Л.Н., Дегтярева Г.С. Афокальный компенсатор aberrаций // *Известия ВУЗов. Приборостроение*. 2015. Т. 58. № 8. С. 621–624. doi: 10.17586/0021-3454-2015-58-8-621-624
11. Андреев Л.Н., Дегтярева Г.С. Афокальный компенсатор сферической aberrации. Патент РФ №147777. Оpubл. 15.11.2014.
12. Андреев Л.Н., Дегтярева Г.С., Ежова В.В. Афокальный компенсатор сферической aberrации. Патент РФ №133947. Оpubл. 27.10.2013.
13. Андреев Л.Н., Дегтярева Г.С. Афокальный компенсатор кривизны поверхности изображения. Патент РФ №148389. Бюл. 2014. № 34.
14. Андреев Л.Н., Ежова В.В., Дегтярева Г.С. Прикладная теория aberrаций. Часть 3. СПб.: НИУ ИТМО, 2016. 46 с.
15. Слюсарев Г.Г. Расчет оптических систем. Л.: Машиностроение, 1975. 640 с.

Авторы

Иванов Степан Евгеньевич – ведущий инженер, Санкт-Петербургский филиал АО «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения», Санкт-Петербург, 190103, Российская Федерация, Stepan.Ivanov.82@gmail.com

Романова Галина Эдуардовна – кандидат технических наук, доцент, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, romanova_g_e@mail.ru

References

1. Chen J.L., Chang C.C., Tung C.H. *Autofocus searching method*. Patent US 20080151097A1, 2008.
2. Ahn J.H., Ko J., Lee I.Y., Kim S.H. A fast continuous auto focus algorithm using the state transition model. *Pacific Science Review*, 2011, vol. 13, no. 3, pp. 125–130.
3. Ooi K., Izumi K., Nozaki M., Takeda I. An advanced autofocus system for video camera using quasi condition reasoning. *IEEE Transaction on Consumer Electronics*, 2002, vol. 36, no. 3, pp. 526–530. doi: 10.1109/30.103169
4. Hanma K., Masuda M., Nabeyama H., Saito Y. Novel technologies for automatic focusing and white balancing of solid state color video camera. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 1983, no. CE-29, pp. 376–382. doi: 10.1109/TCE.1983.356324
5. Kuster M. *Autofocusing method and device for a microscope*. Patent US 9036021B2, 2015.
6. Bueno-Ibarra M.A., Alvarez-Borrego J., Acho L., Chavez-Sanchez M.C. Fast autofocus algorithm for automated microscopes. *Optical Engineering*, 2005, vol. 44, no. 6, pp. 063601–063601-8. doi: 10.1117/1.1925119
7. Bezzubik V.V., Ustinov S.N., Belashenkov N.R. Optimization of algorithms for autofocusing a digital microscope. *Journal of Optical Technology*, 2009, vol. 76, no. 10, pp. 603–608.
8. Volosov D.S. *Photographic Optics. Theory, Principles of Design, Optical Characteristics*. Moscow, Iskusstvo Publ., 1978, 543 p. (In Russian)
9. Rusinov M.M. *Composition of Optical Systems*. Moscow, Librocom Publ., 2010, 296 p. (In Russian)
10. Andreev L.N., Degtyareva G.S. Afocal compensator of aberrations. *Journal of Instrument Engineering*, 2015, vol. 58, no. 8, pp. 621–624. (In Russian) doi: 10.17586/0021-3454-2015-58-8-621-624
11. Andreev L.N., Degtyareva G.S. *Afocal compensator of spherical aberration*. Patent RU147777, 2014.
12. Andreev L.N., Degtyareva G.S., Ezhova V.V. *Afocal compensator of spherical aberration*. Patent RU133947, 2013.
13. Andreev L.N., Degtyareva G.S. *Afocal curvature compensator for the image surface*. Patent RU 148389, 2014.
14. Andreev L.N., Ezhova V.V., Degtyareva G.S. *Applied Theory of Aberrations*. Part 3. St. Petersburg, NRU ITMO Publ., 2016, 46 p. (In Russian)
15. Slyusarev G.G. *Calculation of Optical Systems*. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1975, 640 p. (In Russian)

Authors

Stepan E. Ivanov – leading engineer, SPb Branch of JSC "Research & Production Corporation "Precision Systems and Instruments", Saint Petersburg, 190103, Russian Federation, Stepan.Ivanov.82@gmail.com

Galina E. Romanova – PhD, Associate professor, Associate professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, romanova_g_e@mail.ru