

2. Ermakov S. M. *Matematicheskaya teoriya planirovaniya eksperimenta* (The mathematical theory of experiment planning). Moscow, Nauka, GRFML, 1983, 392 p.

3. Pavlov V. N. *Mezhotraslevye sistemy: matematicheskie modeli i metody* (Cross-industry systems: mathematical models and methods). Novosibirsk: Nauka, SO, 1986, 218 p.

4. Shishmarev V. Yu. *Osnovy avtomaticheskogo upravleniya: uchebnoe posobie dlya studentov vysshikh*

uchebnykh zavedeniy (Fundamentals of automatic control: a textbook for university students). Moscow. Akademiya Publ, 2008, 352 p.

5. Ivanovskiy R. I. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika. Osnovy, prikladnye aspekty s primerami i zadachami v srede Mathcad* (Probability theory and mathematical statistics. Fundamentals, applications with examples and problems in Mathcad). Saint Petersburg: BHV-Petersburg Publ., 2008, 528 p.

© Больсевичус А. В., Ковалев И. В., Лосев В. В., 2013

УДК 520.2

НОВЫЕ СВЕТОСИЛЬНЫЕ ОБЪЕКТИВЫ – АПОХРОМАТЫ ДЛЯ АСТРОНОМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

С. А. Веселков, Е. Г. Лапухин

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 660014, г. Красноярск, просп. имени газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: slovotk@mail.ru, pulsar1963@yandex.ru

Отечественная стекловаренная промышленность добилась значительных успехов в деле разработки новых оптических материалов, в частности особых стекол с малой дисперсией. Именно благодаря таким материалам снова проявился интерес к линзовым оптическим системам со значительно уменьшенным вторичным спектром – так называемым апохроматам. Используя специальную оптимизирующую программу расчета хода лучей, авторы численными методами исследовали значительное количество вариантов объективов – апохроматов, которые могут использоваться в астрономических исследованиях. Рассчитано несколько новых перспективных объективов – апохроматов с исправленным вторичным спектром из особых стекол, что позволило поднять светосилу и качество исправления аберраций.

Ключевые слова: оптическая система, аберрационный расчет, астрономические наблюдения.

NEW APERTURE LENS AS APOCHROMATS FOR ASTRONOMICAL RESEARCH

S. A. Veselkov, E. G. Lapukhin

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31 “Krasnoyarskiy Rabochiy” prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia.
E-mail: slovotk@mail.ru, pulsar1963@yandex.ru

The domestic glass melting industry has made significant progress in the development of new optical materials, in particular the special low-dispersion glass. Thanks to these materials, we can observe the increased interest to the optical lens system with significantly reduced secondary spectrum, the so-called apochromats. Using a special optimization program of ray-tracing, the authors investigated a numerically significant number of lens options – apochromats that can be used in astronomical research. The authors calculated several promising new lenses – apochromats with the corrected secondary spectrum of special glasses that allowed to increase the aperture ratio and the quality of correction of aberrations.

Keywords: optical system, aberration calculation, astronomical observations.

Построенные в 18–19 вв. астрономические рефракторы, которые изготавливались из двух марок обычного оптического стекла (крон и флинт), обладают значительным вторичным спектром. В начале двадцатого века, после работ Аббе, на заводе Шотта появились новые марки стекол под названием «квартц-

флинты» с помощью которых можно строить рефракторы с укороченным вторичным спектром [1].

Лыткаринский Завод Оптического Стекла разработал и выпускает новые стекла марок ОФ6 (особый флинт) и ОК4 (особый крон, по своим дисперсионным свойствам напоминает кристаллы флюорита). Именно

эти, пока еще, дорогие стекла были использованы при расчете новых светосильных апохроматов.

Известны объективы апохроматы, состоящие из нескольких линз выполненных из нескольких марок стекла, где вследствие большой величины фокусного расстояния астрономических линзовых объективов величина вторичного спектра становится значительной и заметно влияет на качество изображения. При больших относительных отверстиях объективов, предназначенных для астрофотографии, необходимо исправлять и сферохроматическую aberrацию, действие которой аналогично действию вторичного спектра [1].

Применение особых стекол позволило рассчитать объективы диаметром до 250 мм и относительным отверстием до 1:3 с высоким качеством изображения. Расчет проводился в специальной оптимизирующей программе CODE V [2].

Все рассчитанные объективы содержат шесть линз – трехлинзовый объектив и трехлинзовый корректор поля. Это позволило безупречно устранить сферическую aberrацию, астигматизм и кривизну поля. Дисторсия практически равна нулю. Единственной недоисправленной aberrацией является кома высших порядков. Оптическая схема рассчитанных апохроматов

приведена на рис. 1, где в объективе первая линза отделена значительным воздушным промежутком от остальных двух с целью лучшего исправления сферохроматической aberrации. Заднее рабочее расстояние объектива q имеет значительную величину, что очень удобно, так как позволяет использовать различное вспомогательное оборудование (колесо со светофильтрами, фокусер и прочее) [3].

В табл. 1–3 приведены конструктивные параметры систем, различных диаметров и относительных отверстий, где r – радиус кривизны оптической поверхности по ходу луча, d – толщина линзы или расстояние между оптическими элементами. В последней графе приведен материал линз. Расстояние от последней поверхности объектива до фокальной плоскости – q , приведено в последней строке второй графы таблицы.

Объективы, приведенные в табл. 1 и 2, дают близкое к дифракционному качество изображения по всему полю – $2\omega = 4,5$ градуса. Спектральный диапазон, для которого исправлялись хроматические aberrации $\lambda = 0,486-0,656$ мкм. Линейное поле изображений составляет 52 мм. Объектив № 3 имеет еще более высокое качество изображения, что позволяет использовать его в качестве визуальной оптической трубы. Все поверхности линз имеют сферическую форму.

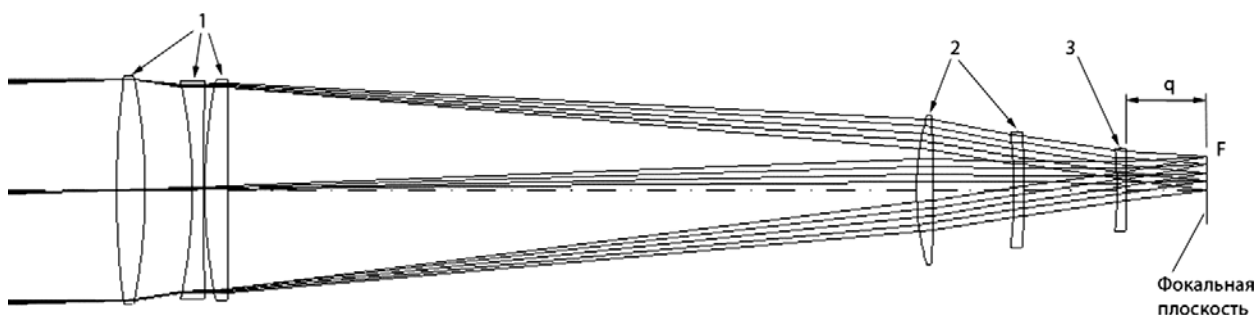


Рис. 1. Оптическая схема апохроматического объектива:

1 – трехлинзовый объектив; 2, 3 трехлинзовый корректор поля; q – задний рабочий отрезок; F – фокальная плоскость

Таблица 1

Конструктивные данные для объектива диаметром 205 мм, $f/3$

r , мм	d , мм	Материал
615.4181	30.0000	OK4
-422.7848	30.5690	Воздух
-367.9253	8.4500	OF6
2198.4770	1.3000	Воздух
385.8102	22.0000	OK4
53403.0000	439.3716	Воздух
229.3745	15.0000	OK4
-755.6668	63.8822	Воздух
-315.3995	7.8000	OF6
-964.4873	113.9574	Воздух
-275.5883	6.5000	OF6
1037.5370	40.0000	Воздух

Конструктивные данные для объектива диаметром 170 мм, f/4

r , мм	d , мм	Материал
668.2626	22.0000	ОК4
-453.7245	36.5955	Воздух
-392.6650	8.4500	OF6
2448.9851	1.3000	Воздух
427.7769	18.0000	ОК4
-7594.3498	532.7914	Воздух
212.3154	13.0000	ОК4
-1030.0242	62.5172	Воздух
-349.9245	7.8000	OF6
-603.6320	71.9943	Воздух
-278.2124	6.5000	OF6
526.9286	63.0000	Воздух

Конструктивные данные для объектива диаметром 135 мм, f/5

r , мм	d , мм	Материал
656.5689	17.0000	ОК4
-453.9426	36.9528	Воздух
-391.7346	8.0000	OF6
2337.1405	1.0000	Воздух
427.2101	14.0000	ОК4
-7535.6494	534.6116	Воздух
207.5663	11.0000	ОК4
-1061.7002	62.9912	Воздух
-370.9875	7.0000	OF6
-675.6085	72.6170	Воздух
-262.6651	6.0000	OF6
558.9767	63.0000	Воздух

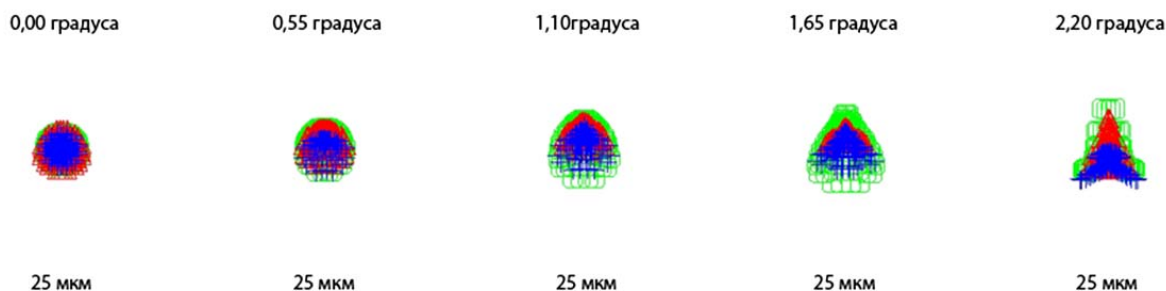


Рис. 2. Пятна рассеяния в фокальной плоскости апохроматического объектива в зависимости от угла поля зрения. Серые квадраты имеют размер 25×25 мкм

В качестве примера, для экономии места, приведем графики aberrаций одного из рассчитанных объективов (табл. 2).

Диаметр = 170 мм, фокусное расстояние = 682 мм, относительное отверстие = 1:4, основная длина волны = 0,58 мкм, угловое поле зрения в пространстве предметов = 4,4 градуса, линейное поле зрения в пространстве изображений = 52,5 мм.

На рис. 2 приведены точечные диаграммы пятен рассеяния для пяти углов поля зрения. Среднеквадратичный размер пятен рассеяния составляет 2,6 мкм на оси и 3,5 мкм для угла 2,2 градуса.

Диаметр кружка Эри составляет 4 мкм. Полный размер пятен рассеяния можно определить на рис. 3, где представлена зависимость размера пятна рассеяния от количества энергии собранного объективом в пятне. 100 % энергии попадает в пятно размером 4,3 мкм в центре и 8,5 мкм на краю поля зрения.

Рис. 4 содержит графики сферической aberrации, астигматизма и дисторсии в %. Видно, что продольная сферическая (а также и сферохроматическая) aberrации малы, астигматизм исправлен очень хорошо, а дисторсия вообще практически равна нулю.

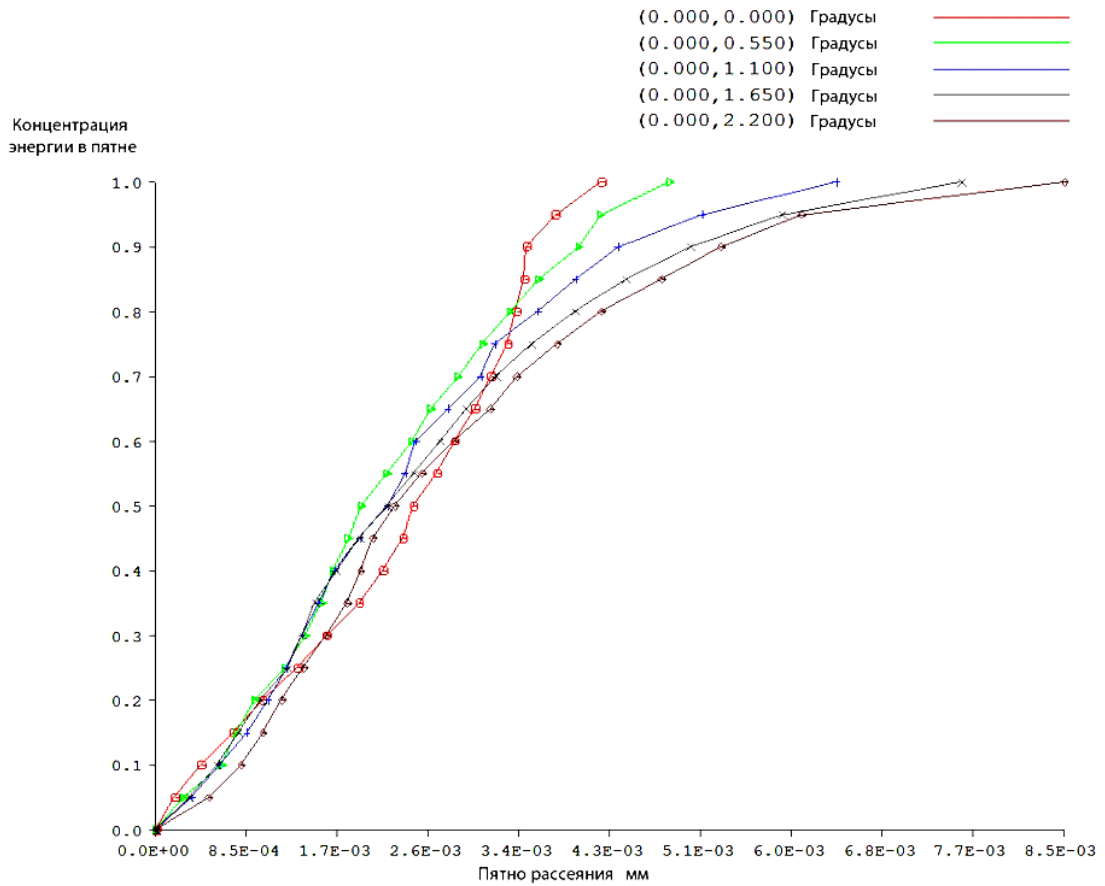


Рис. 3. Графики концентрации световой энергии в пятне рассеяния в фокальной плоскости апохроматического объектива

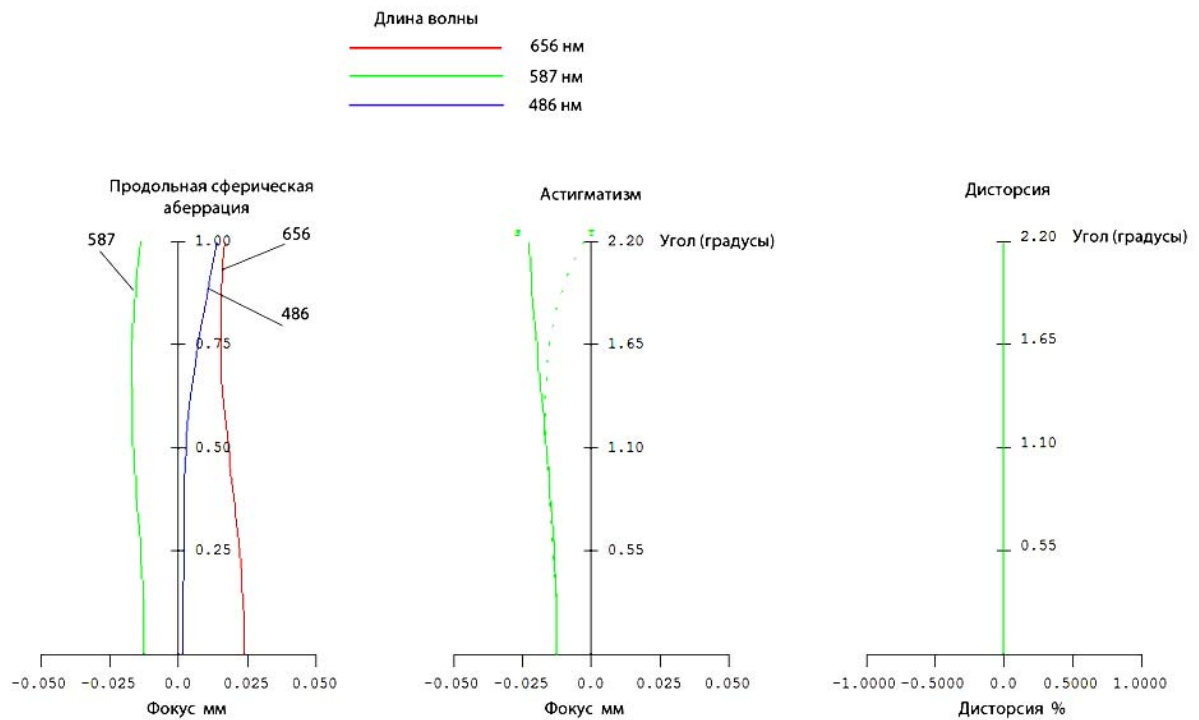


Рис. 4. Графики продольной сферической aberrации, астигматизма и дисторсии

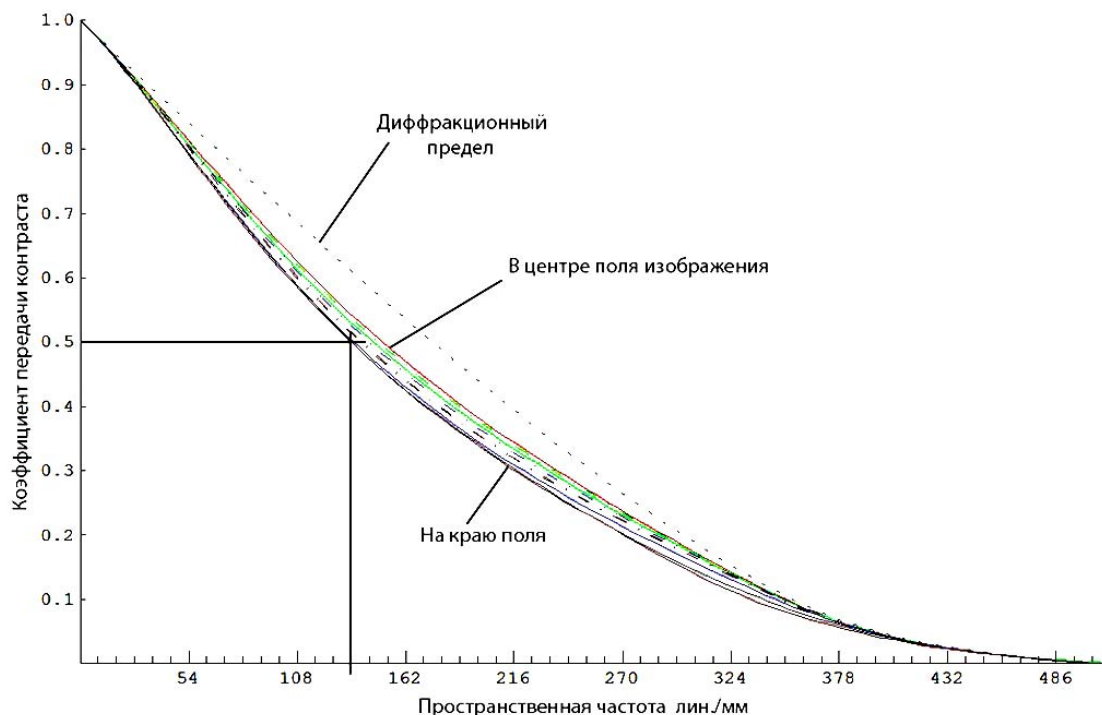


Рис. 5. График частотно-контрастной характеристики объектива при действующем отверстии 170 мм (относительное отверстие 1:4)

На рис. 5 показаны графики частотно-контрастной характеристики предлагаемого объектива, из которых видно, что по уровню контраста 0,5 объектив имеет разрешающую способность 135 лин./мм на краю поля и 150 лин./мм в центре. Это очень высокие значения.

Рассчитанные апохроматические объективы могут быть применены для фотографирования звездного неба с использованием современных ПЗС-матриц с большим размером чипа и малым размером пикселя, например для поиска переменных звезд [4; 5] или визуального наблюдения при помощи окуляров. Наилучшая область применения предлагаемых объективов – производство астрономических телескопов до 250 мм диаметром, высокой светосилы и большого поля изображения.

Библиографические ссылки

1. Слюсарев Г. Г. Расчет оптических систем. М. : Машиностроение, 1975.
2. Перспективные телескопы для проекта загородной астрономической обсерватории СибГАУ / С. А. Веселков, Е. Г. Лапухин, А. Г. Михайличенко и др. // Вестник СибГАУ. 2011. № 1 (34). С. 88–91.

3. Веселков С. А. Оптическая система высокого разрешения для получения снимков земли из космоса // Вестник СибГАУ. 2009. № 3 (24). С. 49–52.

4. Four New Variable Stars in Ursa Major / S. A. Veselkov, E. G. Lapukhin [et al.] // *Peremennye Zvezdy, Prilozhenie*. Vol. 11, No. 36 (2011). URL: <http://www.astronet.ru/db/varstars/msg/1252443>.

5. Veselkov S. A., Lapukhin E. G. New UV-type Variable Star in Lacerta // *Peremennye Zvezdy, Prilozhenie*. Vol. 12, N 3 (2012). URL: <http://www.astronet.ru/db/varstars/msg/1254808>.

References

1. Slusarev G. G. *Raschet opticheskikh system* (Calculation of optical systems). 1975. 639 p.
2. Veselkov S. A., Lapukhin E. G., Mihailichenko A. G., Fomin D. A., Bagenov P. A. *Vestnik SibGAU*. 2011, № 1 (34). p. 88–91.
3. Veselkov S. A. *Vestnik SibGAU*. 2009, № 3 (24), p. 49–52.
4. Veselkov S. A. et al. *Peremennye Zvezdy, Prilozhenie*, vol. 11, N 36 (2011), available at: <http://www.astronet.ru/db/varstars/msg/1252443>
5. Veselkov S. A. et al. *Peremennye Zvezdy, Prilozhenie*, vol. 12, N 3 (2012), available at: <http://www.astronet.ru/db/varstars/msg/1254808>.