

2. Вайнштейн В. И. Математическое и программное обеспечение оптимизации проведения профилактических восстановлений при эксплуатации электронно-вычислительных систем : дис. ... канд. физ.-мат. наук. Красноярск. 2006. 149 с.

3. Сугак Е. В. [и др.] Надежность технических систем. Красноярск : М ГП «РАСКО», 2001. 608 с.

### References

1. Beichelt F., Franken P. *Nadezhnost' i tekhnicheskoye obsluzhivaniye. Matematicheskiy podkhod* [Reliability and Maintenance. Mathematical Approach]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1988, 392 p.

2. Vainshtein V. I. *Matematicheskoye i programmnoye obespecheniye optimizatsii provedeniya profilakticheskikh vosstanovleniy pri ekspluatatsii elektronno-vychislitel'nykh sistem*. Diss. kand. fiz.-mat. nauk [Mathematical and software providing of optimization of carrying out of preventive restorations at operation of electronic computing systems. Diss. on competition of a scientific degree of the candidate of phys. and math. sci.]. Krasnoyarsk, 2006, 149 p.

3. Sugak E. V. et al. *Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem* [Reliability of technical systems]. Krasnoyarsk, RASKO Publ., 2001, 608 p.

© Вайнштейн И. И., Михальченко Г. Е.,  
Вайнштейн Ю. В., Сафонов К. В., 2014

УДК 520.2

## ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА РИЧИ–КРЕТЬЕНА В КАЧЕСТВЕ ОБЗОРНОГО ШИРОКОУГОЛЬНОГО ТЕЛЕСКОПА

С. А. Веселков, М. В. Земцова, М. А. Шилова

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: pulsar1963@yandex.ru, soffits.tel@gmail.com, viruskay@rambler.ru

*С помощью специальной оптимизирующей программы CODE V была численно исследована возможность использования апланатического телескопа системы Ричи–Кретьена в качестве широкоугольного обзорного. Рассмотрены различные варианты с использованием линзового корректора поля, установленного в сходящемся пучке вблизи фокальной поверхности, а также исследован вариант с применением асферики 6-го и 8-го порядка для зеркал и линзового корректора системы. Относительное отверстие оптических систем доведено до  $f = 1:4$ . Приведены конструктивные параметры и графики качества изображения двух рассчитанных систем. Рассмотрены возможности их применения в исследовании космического пространства, а также критерии качества оптических систем и эффективности обзорных телескопов.*

*Ключевые слова: оптическая система, абберационный расчет, астрономические наблюдения.*

## OPTICAL SYSTEM RITCHEY–CHRETIEN AS PANORAMIC WIDEFIELD TELESCOPE

S. A. Veselkov, M. V. Zemtsova, M. A. Shilova

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation  
E-mail: pulsar1963@yandex.ru, soffits.tel@gmail.com, viruskay@rambler.ru

*With the help of CODE V specialized software suite, we numerically evaluated the possibility of utilizing the aplanatic Ritchey–Chretien system in the wide-field telescope construction. Different variants of using the lens corrector field installed in a converging beam near the focal surface, as well as to explore options with the use of aspheric 6th and 8th order for mirrors and lens corrector system are considered. Relative aperture optical systems have been brought to  $f = 1:4$ . The subject of this article is the representation of the design parameters and imaging quality graphs for two systems. Moreover speculations regarding the possibility of application of the aforementioned systems in space exploration and the criteria of optical systems quality and effectiveness of the telescopes are presented.*

*Keywords: optical system, aberration calculation, astronomical observations.*

Телескопы с большим полем зрения нужны для изучения космологической эволюции активных галактик, построения шкалы межгалактических расстояний с помощью переменных и сверхновых звезд, поисков гравитационных линз и черных дыр, исследования проходящих событий в галактиках, в частности,  $\gamma$ -всплесков, обнаружения астероидов, а также многих других астрономических задач. В последние годы к ним добавился ряд проблем, возникших в ходе околоземной деятельности человечества. Для решения этих задач планируется обновление информации обо всех небесных объектах ярче  $\sim 24^m$  за время порядка одной недели. Реализация программы предусматривает создание сети телескопов с полем зрения  $2^\circ\text{--}3^\circ$  и эффективным диаметром вплоть до 6,5 м [1].

Широкоугольные телескопы небольшого диаметра (0,4–0,8 м) также могут быть с успехом использованы при наблюдениях космического мусора как техногенного, так и естественного происхождения [2]. В обсерватории СибГАУ подобные телескопы с успехом применяются для поиска новых переменных звезд [3].

Разработка широкоугольных оптических систем признана сейчас приоритетным направлением в экспериментальной астрономии [1]. Широкоугольными телескопами принято считать телескопы, обеспечивающие качество изображений не хуже одной угловой секунды ( $1''$ ) в пределах поля зрения не менее одного углового градуса:  $2\omega > 1^\circ$ . При наземных наблюдениях атмосфера случайным образом искажает приходящие от объектов световые волны, а оптика телескопа зачастую несовершенна – обладает аберрациями. Ухудшаются изображения и при центральном экранировании света, характерном для рефлекторов. При описании качества изображений в реальных условиях удобно использовать параметр  $\Delta_{80}$  – диаметр круга, в пределах которого содержится 80 % светового потока от звезды, будем называть его пятном рассеяния звезды. Будем считать, что если при расчете телескопа нам удастся «уложить» 80 % падающих на входной зрачок лучей в кружок диаметром около одной угловой секунды ( $\Delta_{80} < 1''$ ), то данная оптическая система обладает высоким качеством изображения [1].

Одними из первых широкоугольных телескопов можно считать апланатические (где исправлены сферическая аберрация и кома) оптические системы Ричи–Кретьена, которые были предложены французским оптиком Кретьеном в 1922 году. Системы Ричи–Кретьена [4] стали очень популярны во второй половине XX века и применялись для всех телескопов, начиная с диаметра 1 м. В системе Ричи–Кретьена (RC) кома уменьшается путем замены параболического главного зеркала гиперболоидом, так что оба зеркала становятся однотипными коническими сечениями (рис. 1). Апланат Грегори достигает той же цели путем замены главного зеркала эллипсоидом, здесь оба зеркала – тоже конические сечения одного типа. Вследствие сферической аберрации главные зеркала апланатов не дают хороших изображений даже на оси; нужное качество изображений достигается компенсацией аберраций главного и вторичного зеркал. Поле зрения наземных апланатов, определяемое

условием  $\Delta_{80} < 1''$ , обычно составляет около  $20'$ , что примерно вдвое больше размеров поля классических телескопов (системы Ньютона и Кассегрена), однако еще недостаточно велико, чтобы телескоп можно было отнести к широкоугольным системам в принятом нами смысле.

Все современные телескопы являются в настоящее время зеркально-линзовыми. Это, например, необходимо для увеличения поля зрения телескопа, но чревато появлением хроматических аберраций, которые, впрочем, можно удерживать в разумных пределах.

За прошедшие 90 лет оптиками было предложено много различных широкоугольных оптических систем – камера Шмидта, система Корша, Шварцшильда, менисковые системы Максудова и др.

Авторы решили рассмотреть систему Ричи–Кретьена в качестве широкоугольного телескопа. Были рассчитаны несколько десятков различных вариантов светосильных (относительное отверстие  $1/4\text{--}1/5$ ) и широкоугольных оптических систем RC-WF (Widefield), которые численно исследовались с помощью специальной оптимизирующей программы CODE V. Один из вариантов представлен на рис. 1 и табл. 1, 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 табл. 1.

Таблица 1

**Конструктивные данные для оптической системы Ричи–Кретьена диаметром 1 м,  $f/4.1$  с трехлинзовым корректором поля**

$r$ , мм	$d$ , мм	Материал	Режим
-3553,1430	-1041,3553	Воздух	Отражение
-2657,0883	1000,0000	Воздух	Отражение
1183,8825	32,0000	К8	Преломление
-5936,0821	78,8516	Воздух	Преломление
744,9217	18,7500	К8	Преломление
297,6207	188,7146	Воздух	Преломление
270,4193	25,0000	К8	Преломление
316,3438	325,2442	Воздух	Преломление

Главное зеркало оптической системы имеет диаметр 1 м, относительное отверстие  $f/4.1$ , поле изображения  $2\omega = 3^\circ$ . Спектральный диапазон  $\lambda = 486\text{--}656$  нм. Система удовлетворяет условию  $\Delta_{80} < 1''$  при масштабе  $1'' = 20$  мкм в линейной мере. Рассчитанная RC-WF-система собирает более 80 % энергии в кружок диаметром 10 мкм или 100 % в кружок диаметром 20 мкм. График концентрации световой энергии в пятне рассеяния в фокальной плоскости представлен на рис. 2.

Главное и вторичное зеркала, а также первая поверхность первой линзы корректора имеют гиперболическую форму с эксцентриситетами  $e_1^2 = 1,3109$ ,  $e_2^2 = 10,5394$  и  $e_3^2 = 6,1181$  соответственно. Остальные поверхности линз сферические. На рис. 3 приведены точечные диаграммы пятен рассеяния для различных углов поля зрения.

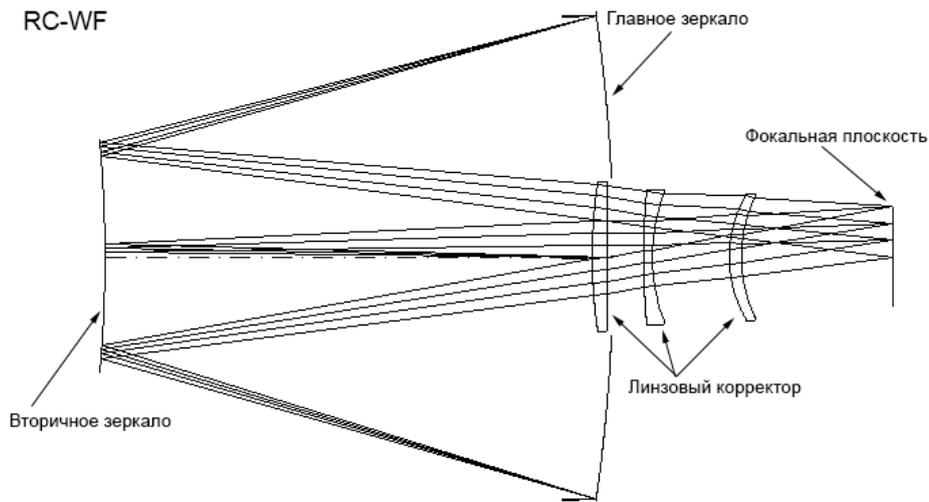


Рис. 1. Оптическая схема широкоугольного телескопа системы Ричи–Кретьена с трехлинзовым корректором поля

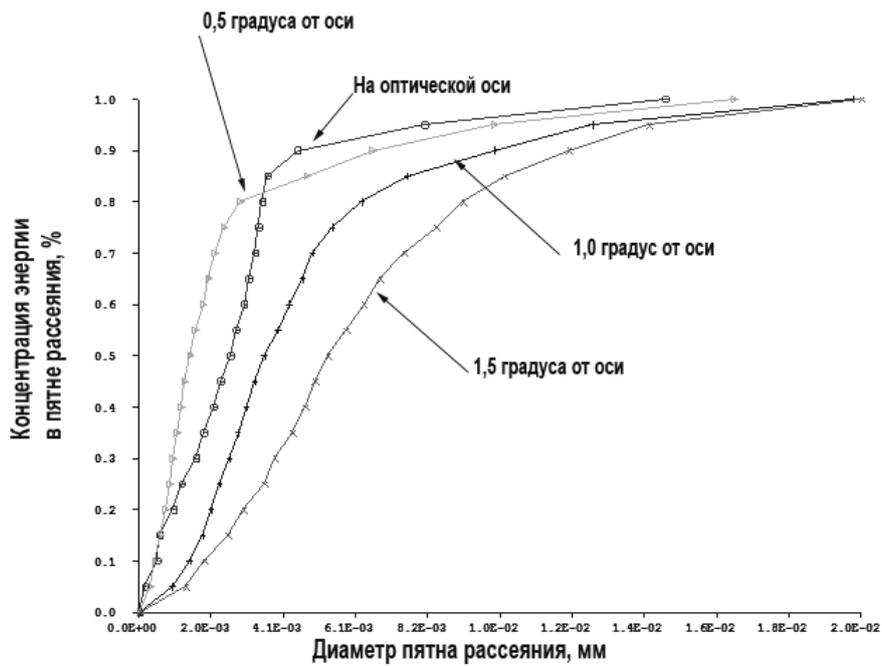


Рис. 2. Графики концентрации световой энергии в пятне рассеяния в фокальной плоскости Ричи–Кретьена диаметром 1 м и  $f/4.1$

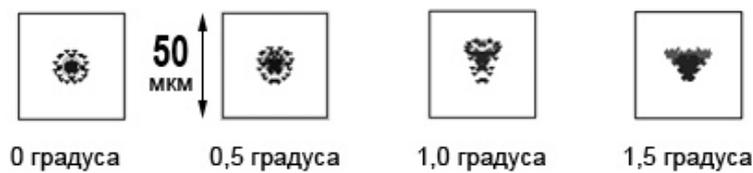


Рис. 3. Среднеквадратичный размер пятен рассеяния в фокальной плоскости системы Ричи–Кретьена (диаметр 1 м, относительное отверстие  $f/4.1$ , сторона квадрата имеет размер 50 мкм)

Аберрации в системе исправлены достаточно хорошо. Дисторсия составляет 0,66 %. Таким образом, оптическая система Ричи–Кретьена с зеркалами в виде конических сечений, может использоваться в качестве широкоугольного и достаточно светосильного телескопа, до диаметра примерно 1,5 м. Необходимо подчеркнуть, что оптимизацию оптической системы нужно проводить совместно с линзовым корректором, а значит, в чисто зеркальном варианте система работать не сможет.

Дальнейшее улучшение качества изображения и увеличение апертуры связано с введением асферики высших порядков как для зеркал, так и для линз корректора телескопа. Так, например, поступили при проектировании телескопов сети Pan-STARRS (Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System). Оба его зеркала – гиперboloиды с полиномиальными асфериками 6-го порядка, причем эксцентриситет вторичного зеркала очень велик:  $e^2 = 18,3$ ; некоторые поверхности трехлинзового корректора тоже асферичны [1].

Сложность оптических схем затрудняет изготовление и эксплуатацию телескопов с кассегреновским корректором, что существенно сказывается на их стоимости. Однако все это окупается востребованностью широкоугольных систем. В табл. 2 приведены конструктивные параметры системы с введением асферики высших порядков (полиномиальные коэф-

фициенты до 8-го порядка) для зеркал и двух поверхностей (полиномиальные коэффициенты до 6-го порядка) линз корректора. Диаметр апертуры и относительное отверстие оставлены практически без изменений.

Оптическая система имеет фокусное расстояние  $F = 3975,86$  мм и  $f/3.976$ ,  $2\omega = 3^\circ$ . Все линзы из одного материала – стекло К8. Спектральный диапазон, для которого рассчитывалась система,  $\lambda = 486–656$  нм. В основе поверхностей 1, 2, 3, и 5 лежат конические сечения с эксцентриситетами  $e_1^2 = 1,0969$ ,  $e_2^2 = 9,2928$ ,  $e_3^2 = 0,3174$  и  $e_5^2 = 14,6623$  соответственно и соответствующими полиномиальными асфериками у зеркал 8-го порядка, у линз – 6-го. Это позволило улучшить качество изображения (рис. 4 и 5).

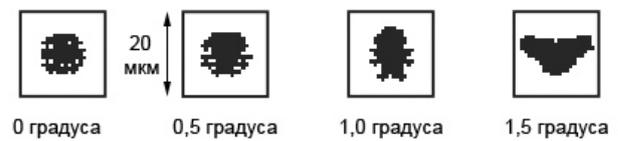


Рис. 4. Среднеквадратичный размер пятен рассеяния в фокальной плоскости системы Ричи–Кретьена с асферикой (диаметр 1 м, относительное отверстие  $f/3.97$ , сторона квадрата имеет размер 20 мкм)

Таблица 2

Конструктивные данные для оптической системы Ричи-Кретьена диаметром 1 м,  $f/4,0$  с трехлинзовым корректором поля

Тип поверхности	$r$ , мм	$d$ , мм	Материал	Режим
Асферика	-3548,1686	-1043,3441	Воздух	Отражение
Асферика	-2679,9851	1000,0000	Воздух	Отражение
Асферика	1029,2142	32,0000	К8	Преломление
Сфера	47909,0000	73,3309	Воздух	Преломление
Асферика	1251,5115	18,7500	К8	Преломление
Сфера	377,9450	158,3334	Воздух	Преломление
Сфера	262,1200	25,0000	К8	Преломление
Сфера	297,0987	310,1168	Воздух	Преломление

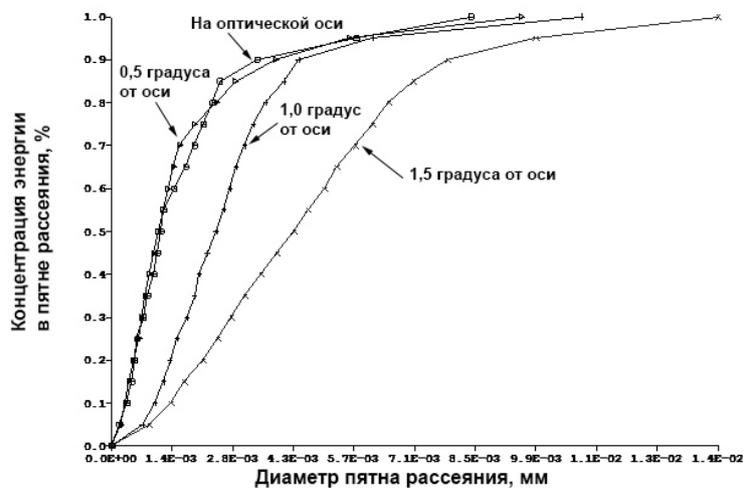


Рис. 5. Графики концентрации световой энергии в пятне рассеяния в фокальной плоскости Ричи–Кретьена с асферикой диаметром 1 м и  $f/3.97$

Диск Эри в нашей системе имеет диаметр

$$\Delta = 2,44 \lambda / A = 2,44 \cdot 0,582 \cdot 3,97 = 5,7 \text{ мкм,}$$

или в угловой мере  $\Delta'' = \lambda / 2D = 0,29''$ , где  $\lambda$  – длина волны света;  $A$  – относительное отверстие системы;  $D$  – диаметр апертуры.

На рис. 5 видно, что 100 % световой энергии собирается в кружке 14 мкм, а более 80 % – в кружке менее 7 мкм. Вполне допустимо увеличить диаметр этой системы в два раза (масштабировать ее), соответственно, умножить все диаметры, толщины и расстояния между элементами на два. Естественно, в два раза увеличатся и пятна рассеяния в фокальной плоскости, но даже в этом случае система будет удовлетворять условию  $\Delta_{80} < 1''$ , так как более 80 % энергии будет попадать в кружок 14 мкм, а  $1'' = 19 \text{ мкм}$ .

Чтобы можно было сравнивать телескопы, существует понятие эффективности обзорных телескопов. Объем пространства, изучаемый телескопом в течение одной экспозиции, пропорционален произведению телесного угла  $\Omega = \pi\omega^2$ , охватывающего поле зрения, и эффективной площади апертуры  $S = \pi D_e^2/4$ , где  $D_e$  – эффективный диаметр телескопа, учитывающий центральное экранирование света. Параметр  $E = S \cdot \Omega$  называют эффективностью или производительностью обзорного телескопа [1]. Примем центральное экранирование равным 0,5. Тогда  $E = 4,16 \text{ м}^2\text{гр}^2$  для телескопа диаметром 1 м и  $E = 16,63 \text{ м}^2\text{гр}^2$  для двухметрового инструмента. В качестве примера рассмотрим RC-телескоп, считавшийся во второй половине истекшего века широкоугольным в классе больших рефлекторов. Пусть его диаметр  $D = 4 \text{ м}$ , как у известных рефлекторов им. Мэйолла (N. U. Mayall, Kitt Peak National Observatory) и Бланко (V. Blanco, Cerro Tololo Inter-American Observatory), а диаметр поля зрения  $2\omega = 20'$ . Полагая центральное экранирование равное 0,30, мы приходим к значению  $E \sim 1,0 \text{ м}^2\text{гр}^2$ , которое легко запомнить в качестве референтного.

Таким образом, рассчитанные авторами телескопы могут заменить 4 или даже 16 четырехметровых телескопов предыдущего поколения [5].

## Библиографические ссылки

1. Теребиж В. Ю. Современные оптические телескопы. М. : Физматлит. 2005. 80 с.
2. Шустов Б. М., Рыхлова Л. В. Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра. М. : Физматлит. 2010. 402 с.
3. Veselkov S. A., Lapukhin E. G. New UV-type Variable Star in Lacerta // *Peremennye Zvezdy, Prilozhenie*. 2012. Vol. 12, № 3. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.astronet.ru/db/varstars/msg/1254808>.
4. Веселков С. А. Оптическая система высокого разрешения для получения снимков Земли из космоса // *Вестник СибГАУ*. 2009. № 3 (24). С. 49–52.
5. Веселков С. А. [и др.] Перспективные телескопы для проекта загородной астрономической обсерватории СибГАУ // *Вестник СибГАУ*. 2011. № 1 (34). С. 88–91.

## References

1. Terebizh V. Y. *Sovremennye opticheskie teleskopy* [Modern optical telescopes]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2005, 80 p.
2. Shustov B. M., Ryhlova L. V. *Asteroidno-kometnaja opasnost': vchera, segodnja, zavtra* [Asteroid and Comet Hazard: yesterday, today and tomorrow]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2010, 402 p.
3. Veselkov S. A., Lapukhin E. G. *Peremennye Zvezdy, Prilozhenie*. 2012, Vol. 12, no. 3. (In Russ.) Available at: <http://www.astronet.ru/db/varstars/msg/1254808>.
4. Veselkov S. A. [The optical system for high-resolution images of the Earth]. *Vestnik SibGAU*, 2009, vol. 24, no. 3, p. 49–52. (In Russ.)
5. Veselkov S. A., Lapukhin E. G., Mihailichenko A. G., Fomin D. A., Bagenov P. A. [Prospective telescopes for astronomical observatory project countryside SibSAU]. *Vestnik SibGAU*, 2011, vol. 34, no. 1, p. 88–91. (In Russ.)