

С. А. Веселков, Е. Г. Лапухин, А. Г. Михайличенко, Д. А. Фомин, П. А. Баженов

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕЛЕСКОПЫ ДЛЯ ПРОЕКТА ЗАГОРОДНОЙ АСТРОНОМИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ СИБИРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО АЭРОКОСМИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ИМЕНИ АКАДЕМИКА М. Ф. РЕШЕТНЕВА

Рассчитано несколько новых перспективных оптических телескопов для загородной астрономической обсерватории СибГАУ для наблюдений переменных звезд, астероидов и комет, а также геостационарных объектов и космического мусора, которые проводятся в университете.

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

После года работы обсерватории СибГАУ определился круг научных интересов сотрудников: это фотометрия переменных звезд (в том числе поиск и открытие новых переменных), астрометрия и фотометрия малых тел Солнечной системы (астероиды, кометы) и околоземная астрометрия (наблюдения ГСО и космического мусора).

Было выяснено, что заниматься подобными наблюдениями в городе чрезвычайно сложно, а под час и невозможно. Поэтому руководством университета было принято решение о строительстве загородной астрономической обсерватории СибГАУ в достаточно удаленном месте в отсутствие городской засветки и смога, где инструменты смогут работать на своем теоретическом пределе.

Универсальных телескопов не существует, поэтому под каждую задачу необходим свой специализированный инструмент. Более того, нужно рассчитывать оптическую систему в связке с приемником излучения, а также знать качество астроклимата в том месте, где будет установлен телескоп. Астроклимат средней полосы России [1] достаточно хорошо изучен. Качество астроклимата Сибири практически не отличается от равнинных областей средней полосы России. Примем размер турбулентного кружка изображения звезды в фокальной плоскости телескопа равным 2 угл. сек. дуги, как наиболее типичный для загородной обсерватории на территории России. В Москве, на территории обсерватории ГАИШ неоднократно наблюдалось качество атмосферы около 1 угл. сек. дуги.

Задачей настоящей работы являлся расчет общих характеристик нескольких систем оптических телескопов, обеспечивающих профессиональную работу загородной университетской обсерватории по выбранной тематике, исходя из требований к современным астрономическим наблюдениям. В настоящее время университетскими считаются телескопы со световым диаметром вплоть до 2-х метров.

Расчет оптических систем будем выполнять в оптимизирующей программе по расчету оптики CODE V. Кроме того, следует учитывать экономические аспекты. Простота изготовления, небольшие габариты и, как следствие, невысокая стоимость – вот ключевые параметры, которые следует учитывать.

Известно, что для хорошей астрометрии и фотометрии пятно рассеяния звезды должно покрывать по диа-

метру примерно 2,5–3 пикселя на ПЗС-матрице [2], чтобы с достаточной точностью определить центр «масс» пятна. Далее по тексту будут рассматриваться только наиболее популярные в настоящее время ПЗС-матрицы, используемые в качестве приемников излучения. При расчете оптической системы важно учитывать характеристики ПЗС-матрицы, применяемой в качестве светоприемника (ее линейные размеры и размер пикселя).

Как показывает современное состояние наблюдательной техники, для решения задач околоземной астрономии нужны телескопы со световым диаметром (от этого зависит светособирающая способность) 1–1,5 метра, которые позволяют получать уверенную астрометрию объектов около 10 см в поперечнике на околоземных орбитах вплоть до геостационарных. При наблюдениях астероидов и комет в настоящее время желательно получать на снимках объекты 23 зв. вел. (уверенная фотометрия до 21,5 зв. вел.). Это позволяют делать телескопы 1,5-метрового класса при экспозиции около 1 мин, так как объекты движутся, и длительные экспозиции невозможны. Изучение переменных звезд предполагает уверенную фотометрию объектов от 14 зв. вел. и слабее. Для этого нужны телескопы со световой апертурой от 20 см и более.

Нами было рассчитано около 100 оптических систем различной светосилы, из которых выбраны 3, отвечающие предъявленным требованиям, а именно:

- система Кассегрена со световым диаметром 1 метр с предфокальным трехлинзовым корректором и эквивалентным относительным отверстием $f/6.2$;
- система прямого фокуса диаметром 0,6 метра с предфокальным трехлинзовым корректором $f/2.8$;
- система прямого фокуса диаметром 0,2 метра с предфокальным трехлинзовым корректором $f/5$.

Схемы оптических систем приведены на рис. 1–3.

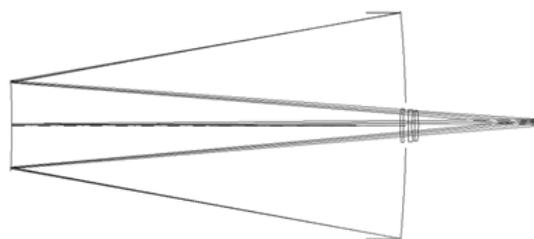


Рис. 1. Схема телескопа системы Кассегрена с диаметром главного зеркала 1 метр и предфокальным трехлинзовым корректором

Конструктивные параметры систем приведены в табл. 1–3.

Пятна рассеяния (точечные диаграммы) рассчитанных систем приведены на рис. 4–6.

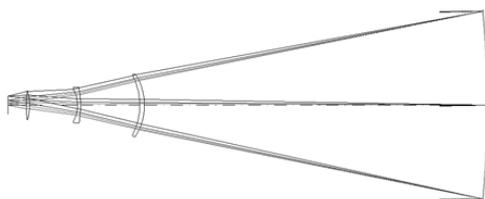


Рис. 2. Схема прямого фокуса с параболическим главным зеркалом диаметром 0,6 метра и предфокальным трехлинзовым корректором



Рис. 3. Схема прямого фокуса с параболическим главным зеркалом диаметром 0,2 метра и предфокальным трехлинзовым корректором

Таблица 1

Данные для телескопа системы Кассегрена с диаметром главного зеркала 1 м и трехлинзовым корректором $f/6.2$

Поверхность #	Имя Поверхности	Тип Поверхности	У Радиус	Толщина	Стекло	Режим Преломления	У Апертура
Предмет		Сфера	Бесконечность	Бесконечность		Преломлени	∞
Диафрагма		Коническая	-5565.5295 П	-1730.1077 П		Отражение	1000.0000 ∞
2		Коническая	-3864.1934 П	1705.5595 П		Отражение	394.8826 ∞
3		Сфера	568.8719 П	15.0000	'К8'	Преломлени	142.7469 ∞
4		Сфера	2923.0715 П	20.8822 П		Преломлени	140.6698 ∞
5		Сфера	7568.1344 П	15.0000	'К8'	Преломлени	135.5154 ∞
6		Сфера	343.6917 П	13.6469 П		Преломлени	131.8780 ∞
7		Сфера	-3044.1652 П	15.0000	'К8'	Преломлени	131.4798 ∞
8		Сфера	-664.7912 П	540.0000		Преломлени	131.1639 ∞
Изображение		Сфера	Бесконечность	0.0688		Преломлени	54.1451 ∞

Таблица 2

Данные для оптической системы прямого фокуса с диаметром главного параболического зеркала 0,6 м и трехлинзовым корректором $f/2.8$

Поверхность #	Имя Поверхности	Тип Поверхности	У Радиус	Толщина	Стекло	Режим Преломления	У Апертура
Предмет		Сфера	Бесконечность	Бесконечность		Преломлени	∞
Диафрагма		Коническая	-3000.0000	-1091.6650 П		Отражение	600.0000 ∞
2		Сфера	-184.3956 П	-15.0000	'К8'	Преломлени	193.7175 ∞
3		Сфера	-202.2508 П	-188.6190 П		Преломлени	187.0070 ∞
4		Сфера	-331.8848 П	-10.0000	'К8'	Преломлени	109.9863 ∞
5		Сфера	-110.4895 П	-152.3015 П		Преломлени	102.5508 ∞
6		Сфера	-162.9640 П	-10.0000	'К8'	Преломлени	87.5655 ∞
7		Сфера	714.6068 П	-58.0263 П		Преломлени	86.8783 ∞
Изображение		Сфера	Бесконечность	-0.3707		Преломлени	58.7352 ∞

Таблица 3

Данные для оптической системы прямого фокуса с диаметром главного параболического зеркала 0,2 м и трехлинзовым корректором $f/5$

Поверхность #	Имя Поверхности	Тип Поверхности	У Радиус	Толщина	Стекло	Режим Преломления	У Апертура
Предмет		Сфера	Бесконечность	Бесконечность		Преломление	∞
Диафрагма		Коническая	-1780.0000	-738.0000		Отражение	200.0000 ∞
2		Сфера	-64.1216 П	-5.0000	'К8'	Преломление	56.3389 ∞
3		Сфера	-76.8729 П	-49.9624 П		Преломление	54.7536 ∞
4		Сфера	-122.6020 П	-6.0000	'К8'	Преломление	40.9626 ∞
5		Сфера	-42.8292 П	-73.7664 П		Преломление	38.2374 ∞
6		Сфера	-94.6617 П	-6.0000	'К8'	Преломление	40.5529 ∞
7		Сфера	200.0000	-25.0000		Преломление	40.1975 ∞
Изображение		Сфера	Бесконечность	-0.0467		Преломление	31.8015 ∞

В таблицах приведены диаметры, радиусы и толщины (конструктивные элементы) линз и зеркал. Телескоп системы Кассегрена диаметром 1 метр имеет относительное отверстие $f/6.2$ (квадраты эксцентриситетов зеркал равны $e^2 = 1$ и $e^2 = 6,1373$, соответственно) и угловое поле предметов $2\omega = 0,5^\circ$. Соответствующее ему линейное поле изображений составляет 54 мм. Расчет выполнен для широко используемой ПЗС матрицы фирмы FLI – ML09000, с размером чипа 36×36 мм, что по диагонали составляет около 52 мм.

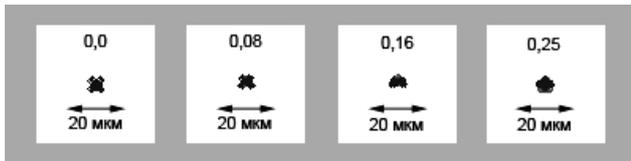


Рис. 4. Структура пятна рассеяния оптической системы со световым диаметром 1 м, $f/6.2$ в зависимости от угла поля (отрезок длиной 20 мкм задает масштаб изображения)

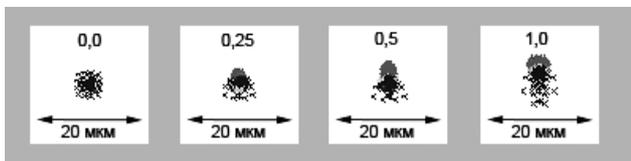


Рис. 5. Структура пятна рассеяния оптической системы со световым диаметром 0,6 м, $f/2.8$ в зависимости от угла поля (отрезок длиной 20 мкм задает масштаб изображения)



Рис. 6. Структура пятна рассеяния оптической системы со световым диаметром 0,2 м, $f/5.0$ в зависимости от угла поля (отрезок длиной 20 мкм задает масштаб изображения)

Диаграммы энергетического анализа приведены на рис. 7–9.

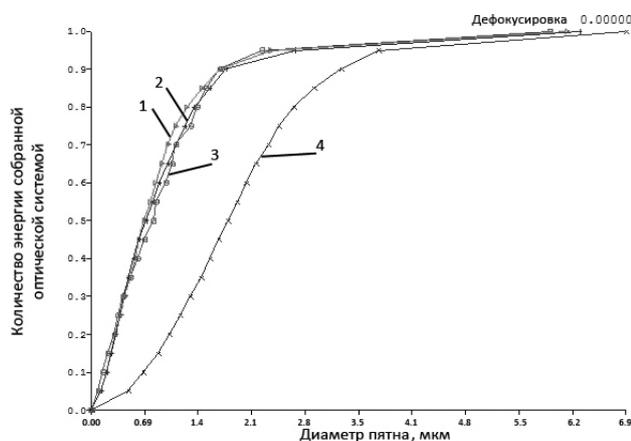


Рис. 7. Концентрация энергии в пятне рассеяния для различных углов поля; оптическая система диаметром 1,0 м, $f/6.2$ (кривая 1 – в центре поля; кривые 2, 3, 4 – на $0,08^\circ$, $0,16^\circ$ и $0,25^\circ$ от центра поля, соответственно)

Телескоп содержит трехлинзовый корректор поля со сферическими линзами, который слабо влияет на относительное отверстие системы [3] и может быть изготовлен из стекла одной марки (К8). Система свободна от аберраций на угловом поле предметов $2\omega = 0,5^\circ$ и диапазона длин волн $0,4–0,85$ мкм. Пятна рассеяния представлены на различных расстояниях от оси в градусах на рис. 4 (масштабный отрезок на рис. 4–6 равен 20 мкм). Размер пятен рассеяния не превышает 7 мкм по всему полю. Таким образом, качество изображения определяется только качеством (разрешающей способностью) атмосферы, так как диаметр дифракционного кружка для длины волны 0,5 мкм равен 7,5 мкм. Линзы корректора сферические. Более 90 % энергии попадает в пятно менее 3 мкм в диаметре и только все 100 % образуют пятно в 7 мкм (рис. 7).

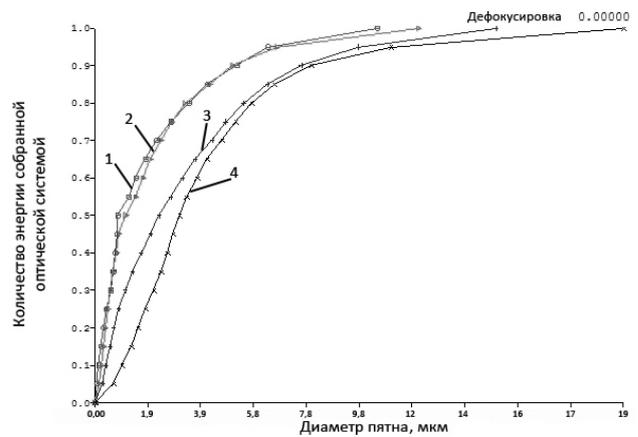


Рис. 8. Концентрация энергии в пятне рассеяния для различных углов поля; оптическая система диаметром 0,6 м, $f/2.8$ (кривая 1 – в центре поля, кривые 2, 3, 4 – на $0,25^\circ$, $0,5^\circ$ и $1,0^\circ$ – от центра поля, соответственно)

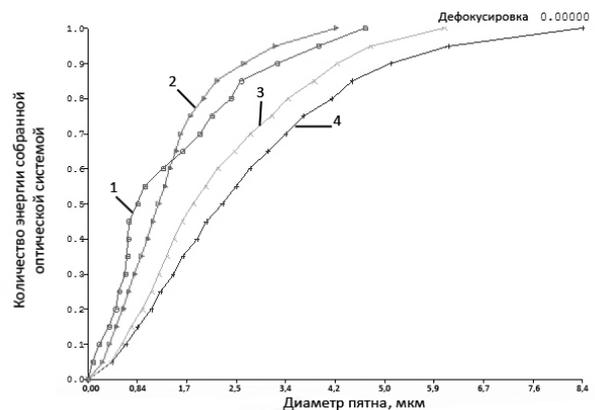


Рис. 9. Концентрация энергии в пятне рассеяния для различных углов поля; оптическая система диаметром 0,2 м, $f/6.2$ (кривая 1 – в центре поля; кривые 2, 3, 4 – на $0,3^\circ$, $0,6^\circ$ и $0,9^\circ$ – от центра поля, соответственно)

Принципиально другую схему имеет следующая оптическая система, которая изображена на рис. 2. Параболическое зеркало и трехлинзовый корректор, установленный вблизи фокальной плоскости, образуют изображение практически свободное от всех аберраций на поле более 2° . Это корректор Винна [4], который вместе с параболическим зеркалом образует простую, но качествен-

ную оптическую систему высокой светосилы. В системе исправлены аберрации на угловом поле изображений $2\omega - 2^\circ$ и диапазона длин волн 0,4–0,7 мкм. Линзы корректора состоят из одного сорта стекла (К8). Диаметр параболического зеркала – 0,6 м, относительное отверстие – $f/2.8$.

Изображения пятен рассеяния, которые имеют размер на оси около 5 мкм и на краю поля примерно 18 мкм, представлены на рис. 5. При фокусном расстоянии системы 1680 мм и линейном поле качественных изображений 58 мм (около 2°) масштаб изображения составляет 1 угл. сек. 8,2 мкм. Значит, при типичном разрешении атмосферы в 2 угл. сек., размер турбулентного пятна будет примерно равен 16,5 мкм, что хорошо согласуется с размером пятен рассеяния, полученных нами при численном исследовании оптической системы. Проведенный энергетический анализ системы показал, что более 90 % энергии на оси концентрируется в кружке менее 4 мкм, а на краю поля в кружке около 9 мкм (рис. 8).

Третья оптическая система диаметром 0,2 м с фокусным расстоянием 1000 мм и относительным отверстием $f/5$ представлена на рис. 3. Система свободна от аберраций на угловом поле $2\omega - 1,8^\circ$ и диапазона длин волн 0,4–0,7 мкм. Линейное исправленное поле изображений составляет 31 мм. На рис. 6 приведены пятна рассеяния точечного источника в фокальной плоскости. Их размеры составляют от 5 мкм на оси, до 7–8 мкм на краю поля. Энергетический анализ показывает, что 90 % энергии на оси концентрируется в кружке диаметром около 2 мкм, а на краю поля – в кружке 5,5 мкм.

Максимальный световой диаметр телескопа был принят равным 1 м из экономических соображений. Тем не менее, рассчитанные телескопы позволяют решать поставленные задачи в полной мере с учетом возможностей загородной обсерватории. Например телескоп Кассегрена имеет угловое поле $0,5 \times 0,5^\circ$ на матрице 36×36 мм и одинаково успешно может использоваться для исследования астероидов, комет и переменных звезд, а также для наблюдений ГСО и космического мусора.

При разрешении атмосферы в 2 угл. сек. на ПЗС-матрице (с размером пикселя 12×12 мкм) образуется пятно размером 60 мкм, которое охватывает в среднем пять пикселей. Таким образом, имеется запас на случай улучшения качества атмосферы до 1 угл. сек. дуги.

Компактная, светосильная система ($f/2.8$) диаметром 0,6 м не очень требовательна к разрешению атмосферы

и предназначена для поисковых и обзорных наблюдений. Тем не менее, обладая масштабом изображения 1 угл. сек. на пиксель, она позволяет проводить качественную астрометрию небесных объектов, особенно быстро движущихся. При использовании ПЗС ML16803-65 с размером пикселя 9 мкм получим условие – два пикселя в пятне рассеяния. Это несколько не соответствует нашей концепции, но при этом позволяет ослабить требование к качеству фокусировки при условии: три пикселя на пятно для качественной астрометрии.

Третья система, со световым диаметром 0,2 м предназначена для экспедиционных астрономических работ. Может быть рекомендована и для самостоятельного изготовления опытными любителями астрономии.

Численное исследование представленных систем показало хорошее исправление аберраций для заданных углов, довольно большой спектральный диапазон, в котором они могут работать, и небольшую асферичность [5] зеркал, способствующую качественному изготовлению оптики. Кроме того, следует отметить небольшие габариты труб телескопов, что ведет к снижению стоимости телескопа и его павильона. Это хорошо согласуется с определением – телескоп университетского класса в России.

Представленные в работе оптические системы при условии оснащения ими астрономической обсерватории университета позволяют поднять уровень космических исследований в СибГАУ на современный профессиональный уровень.

Авторы выражают благодарность С. В. Карпову за обсуждение работы и полезные замечания.

Библиографические ссылки

1. Щеглов П. В. Проблемы оптической астрономии. М.: Наука, 1980.
2. Миронов А. В. Прецизионная фотометрия [Электронный ресурс]. URL: <http://www.astronet.ru/db/msg/1211924>.
3. Wynne C. G. Field correctors for large telescopes // Appl. Opt. 1965. V. 4. № 9. P. 1185–1195.
4. Wynne C. G. Field correctors for astronomical telescopes // Progress in Optics / Ed E. Wolf. 1972. Vol. 10. P. 137–164.
5. Максудов Д. Д. Изготовление и исследование астрономической оптики. М.: Наука, 1984.

S. A. Veselkov, E. G. Lapukhin, A. G. Mihailichenko, D. A. Fomin, P. A. Bagenov

PROSPECTIVE TELESCOPES FOR SUBURBAN ASTRONOMICAL OBSERVATORY OF SIBERIAN STATE AEROSPACE UNIVERSITY NAMED AFTER ACADEMICIAN M. F. RESHETNEV

We have calculated several new optical systems of telescopes for observations of variable stars, asteroids and comets, as well as geostationary objects and space debris that are currently being performed at the university and are planned to be conducted at the suburban astronomical observatory of SibSAU in the future.

Keywords: optical system, aberrational calculation, astronomical observations.