

УДК 524.337

Фокальный редуктор к 48-дюймовому телескопу Крымской астрофизической обсерватории

В.Ю. Тербиж

98409 Крым, Научный, Украина; terebizh@crao.crimea.ua
Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Москва
Крымская астрофизическая обсерватория

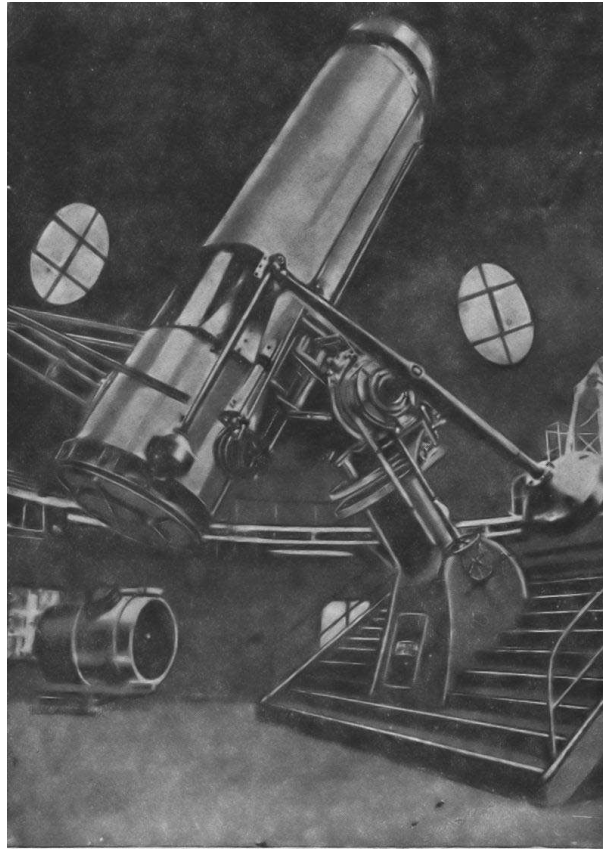
Поступила в редакцию 19 декабря 2005 г.

Аннотация. Выполнен расчет фокального редуктора для наблюдений в прямом фокусе 122-см телескопа КраО. Редуктор состоит из вогнутого сферического зеркала диаметром 386 мм и пяти линз со сферическими поверхностями, наибольшая из которых имеет световой диаметр 120 мм. Все линзы изготавливаются из одного сорта стекла, в качестве которого можно взять наиболее доступный и надежный сорт BK7 фирмы Schott или его отечественный аналог – К8, а при необходимости расширить спектральный диапазон за пределы видимой области – плавленый кварц. Исходное фокусное расстояние 8.4 м приводится к 5.0 м, диаметр поля зрения составляет 25'2 (37.0 мм). Оптическая система обеспечивает качество изображений, близкое к дифракционному пределу: диаметр кружка, в пределах которого содержится 80% энергии в изображении звезды, изменяется от 0''48 в центре поля зрения до 0''66 на его краю (полихроматическое излучение с длинами волн 0.39 – 1.01 мкм). Доля виньетированного потока находится в пределах 10.0% – 13.8%, дисторсия не превосходит 0.93%. Задний отрезок оптической системы составляет 124 мм.

A FOCAL REDUCER FOR THE 48-INCH TELESCOPE OF THE CRIMEAN ASTROPHYSICAL OBSERVATORY, by *V.Yu. Terebizh*.

A focal reducer at the prime focus of the 122-cm telescope of the Crimean Astrophysical Observatory is designed. The reducer consists of a concave spherical mirror 386 mm in diameter and five lenses with spherical surfaces, largest of which has light diameter 120 mm. All lenses are made of a same glass, e.g., of the most accessible and reliable Schott BK7, its domestic analogue – K8, or, if one needs to expand waveband beyond visible range, of the fused silica. The initial focal length 8.4 m is reduced to 5.0 m, the field of view is 25'2 (37.0 mm) in diameter. The optical system provides image quality close to the diffraction limit; the D_{80} value varies from 0''48 at the centre of field up to 0''66 at its edge (polychromatic light in the spectral range 0.39 – 1.01 μm). The fraction of vignetted rays varies in the interval 10.0% – 13.8%, distortion is less than 0.93%. The back focal length of the optical system is 124 mm.

Ключевые слова: Телескопы, астрономическая оптика



Фиг. 24. Самый большой отражательный телескоп Европы, установленный на Берлинской обсерватории в Бабельсберге. Фокусное расстояние параболического основного зеркала составляет 8,4 м. Диаметр его 1,22 м. Построен К. Цейссом в Иене в 1915 г.

Рис.

1. Фотография 48-дюймового телескопа, приведенная в русском переводе книги А. Зоннефельда (1935), сотрудника фирмы Карл Цейсс

1 Введение

Телескоп диаметром 1.22 м изготовлен фирмой Carl Zeiss согласно классической схеме Кассегрена с фокальным отношением $\phi \equiv F/D \approx 19.7$ (рисунок 1). Для начала XX века его параболическое главное зеркало было достаточно светосильным: $\phi_1 \approx 6.9$. Качество оптики телескопа превосходно; в реальных условиях наблюдений телескоп обеспечивает звездные изображения диаметром не хуже одной угловой секунды.

Естественно, что за почти вековой период времени изменился круг задач, стоящих перед наблюдателями, существенно эволюционировали приборы к телескопу и приемники света. Эквивалентное фокусное расстояние кассегреновской системы телескопа (~ 24 м) представляется слишком большим для согласования частотно-контрастных характеристик оптической системы и современных приемников света типа ПЗС. Это же справедливо и в отношении прямого фокуса ($F_1 = 8.4$ м), поэтому в КрАО было принято решение изготовить редуктор прямого фокуса, дающий эквивалентное фокусное расстояние системы около 5 метров. При этом масштаб изображения составит ~ 24 мкм в угловой секунде, и если оптическая система сохранит качество изображений порядка $1''$, то детекторы с пикселями размером 8 – 13 мкм станут практически согласованными с

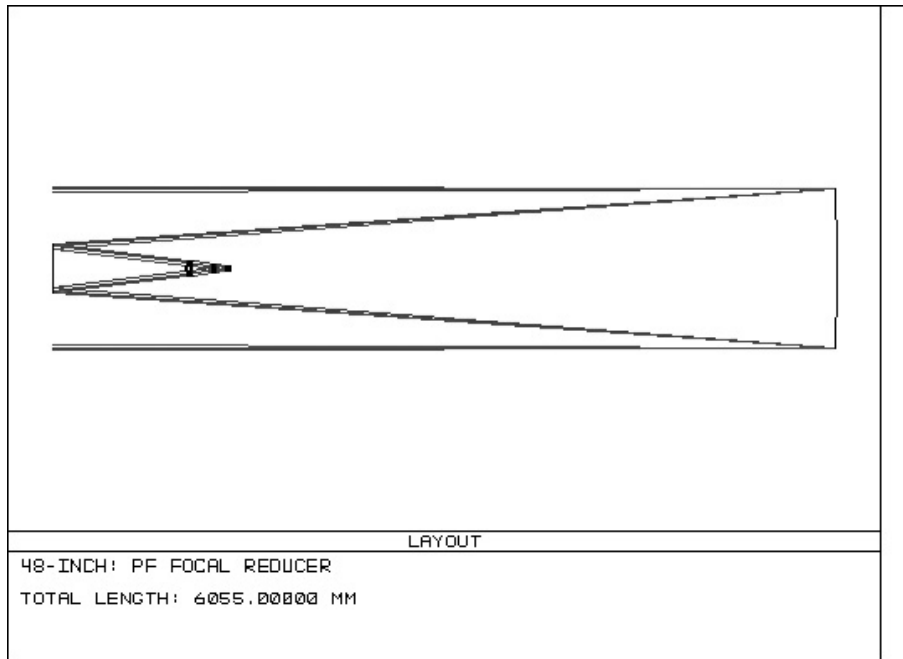


Рис. 2. Оптическая схема телескопа, оснащенного редуктором в прямом фокусе. См. также рисунок 3, на котором показана в увеличенном масштабе линзовая часть редуктора

телескопом. В самом деле, согласно теореме Котельникова–Шеннона (см., например, Пресс и др., 1992, § 12.1) дискретная совокупность отсчетов сохраняет пространственное разрешение оптической системы, если на диаметре изображения точечного источника располагается не менее четырех пикселей детектора. Уменьшение количества пикселей до трех мало снижает контраст. Если же задача получить предельное пространственное разрешение не ставится, то можно использовать детектор с крупными пикселями размерами около 24 мкм и тем самым достичь большего поля зрения.

Заметим, что разработка фокального редуктора значительно труднее расчета удлинителя фокусного расстояния, который обычно представляет собой простую или несколько усложненную линзу Барлоу. Описанные в литературе фокальные редукторы чаще всего применяются в кассегреневском фокусе; это – сложные оптические системы, включающие в себя несколько линз или/и зеркала с асферическими поверхностями (Михельсон, 1995, §8.8; Вилсон, 1996, §4.5).

2 Основные требования к редуктору

При разработке всякой оптической системы нужно учитывать прогресс в области приемников света: оптика живет гораздо дольше детекторов. Изначально предполагалось, что основной задачей наблюдений с редуктором будет получение оценок блеска звезд при помощи ПЗС формата 512×512 пикселей размером 24 мкм. При этом диагональ детектора, т.е. линейный диаметр поля зрения, составляет 17.4 мм. В наших расчетах предполагается, что наблюдения проводятся с детектором размерами 26 мм \times 26 мм (например, матрицей 2К \times 2К пикселей, каждый из которых имеет размер 13 мкм). Соответственно, линейный диаметр невиньетированного поля зрения составляет около 37 мм. При фокусном расстоянии системы 5 м угловой диаметр невиньетированного поля зрения $2w = 0.42 = 25'2$.

Качество изображений характеризуется ниже величиной D_{80} – диаметром кружка, в пределах которого содержится 80% энергии в дифракционном изображении точечного источника.

Основные требования к фокальному редуктору сводятся к следующему.

1. Эквивалентное фокусное расстояние системы близко к 5 м.
2. Спектральный диапазон 0.39 – 1.01 мкм включает в себя 4 стандартные полосы: В, V, R и I (границы полос указаны в таблице 2).
3. Величина D_{80} в упомянутых выше полосах не превосходит 1" в пределах плоского поля зрения диаметром 37 мм ($\approx 25'$).
4. Поверхности оптических элементов имеют сферическую форму.
5. Количество линз по возможности невелико.
6. Исключается применение склеенных линз.
7. В качестве материала для линз используются сорта стекол, выпускаемые фирмой Schott или Лыткаринским заводом оптического стекла (ЛЗОС), причем желательно ограничиться наиболее популярными, недорогими сортами стекол, всегда имеющимися в наличии.
8. Задний отрезок редуктора – не менее 70 мм.
9. Диаметр используемых с редуктором фильтров – не более 50 мм.
10. Установка редуктора в телескопе производится независимо от существующих узлов, в частности, кассегреновского и нэсмитовского зеркал.

3 Описание фокального редуктора

Редуктор состоит из вогнутого сферического зеркала со световым диаметром 386 мм (фокальное отношение $\phi_m \approx 8.6$) и пяти линз со сферическими поверхностями, наибольшая из которых имеет световой диаметр 120 мм (см. рисунки 2 и 3). Все линзы редуктора – при соответствующем изменении их параметров – можно изготовить из стекла какого-либо одного сорта. Таблица 1 дает описание версии редуктора, рассчитанной для стекла Schott BK7HT; значения параметров сохраняются и для его отечественного аналога – стекла ЛЗОС К8. Редуктор на основе плавленного кварца описан в разделе 9.

Зеркало редуктора устанавливается на расстоянии 6055.0 мм от вершины главного зеркала телескопа, недалеко от вторичного зеркала системы Кассегрена. Линзовая часть редуктора расположена в теневой зоне, создаваемой его зеркалом. Длина редуктора составляет 1259.13 мм, что включает в себя расстояние 1033.28 мм от зеркала редуктора до ближайшей к нему линзы и расстояние 225.85 мм между первой и последней поверхностями линзовой части редуктора.

Участок детектора диаметром 37.0 мм защищен окном толщиной 2.0 мм; зазор между окном и детектором принят равным 14.0 мм. Фильтр имитируется плоской пластиной толщиной 5 мм, удаленной от окна детектора на 20 мм. Очевидно, последние величины можно изменять в широких пределах, сохраняя величину заднего отрезка системы. Расстояние от центра последней линзы редуктора до приемника света равно 123.9 мм.

Эквивалентное фокусное расстояние главного зеркала с фокальным редуктором на длине волны 0.70 мкм составляет 5000.0 мм; при переходе к спектральным диапазонам В, V, R, I фокусное расстояние изменяется в пределах ± 1.1 мм.

Расчеты были выполнены с помощью оптической программы ZEMAX¹.

4 Качество изображений

В таблице 2 для всего спектрального диапазона и каждой из спектральных полос указаны значения среднеквадратического радиуса R_{rms} точечной диаграммы² и D_{80} для центра и края плоского поля зрения диаметром 37 мм. Сами точечные диаграммы представлены на рисунке 4. Этот рисунок дает непосредственное представление об условиях регистрации в том случае, когда используется матрица с пикселями размером 24 мкм.

¹ ZEMAX Development Corporation, U.S.A.

² Точечная диаграмма – картина пересечения фокальной поверхности воображаемыми световыми лучами, идущими от источника излучения пренебрежимо малых угловых размеров.

Таблица 1. Параметры редуктора с использованием стекол BK7HT или K8

Номер поверхности	Комментарий	Радиус кривизны (мм)	Расстояние до следующей поверхности (мм)	Материал	Световой диаметр (мм)
1	Круговой экран	∞	6055.0	–	386.0
2	Главное зеркало*	-16800	-6055.0	Зеркало	1220.1
3	Зеркало редуктора	6667.0	1033.28	Зеркало	386.0
4	Линза 1	151.53	12.0	BK7HT	120.0
5		173.16	15.11	–	115.7
6	Линза 2	-761.42	9.0	BK7HT	114.7
7		275.84	0.20	–	112.0
8	Линза 3	149.13	12.2	BK7HT	111.8
9		322.63	156.92	–	110.1
10	Линза 4	223.88	6.0	BK7HT	69.2
11		77.76	4.92	–	66.2
12	Линза 5	159.54	9.5	BK7HT	66.3
13		-526.46	82.87**	–	65.7
14	Фильтр	∞	5.0	BK7HT	46.1
15		∞	20.0	–	45.3
16	Окно детектора	∞	2.0	BK7HT	40.6
17		∞	14.0	–	40.3
18	Детектор	∞	–	–	37.0

*Коническая константа главного зеркала равна -1.

**Изменение фокусировочного расстояния 82.87 мм при переходе от интегрального диапазона 0.39 – 1.01 мкм к спектральным участкам BVRI не превосходит 3 мкм.

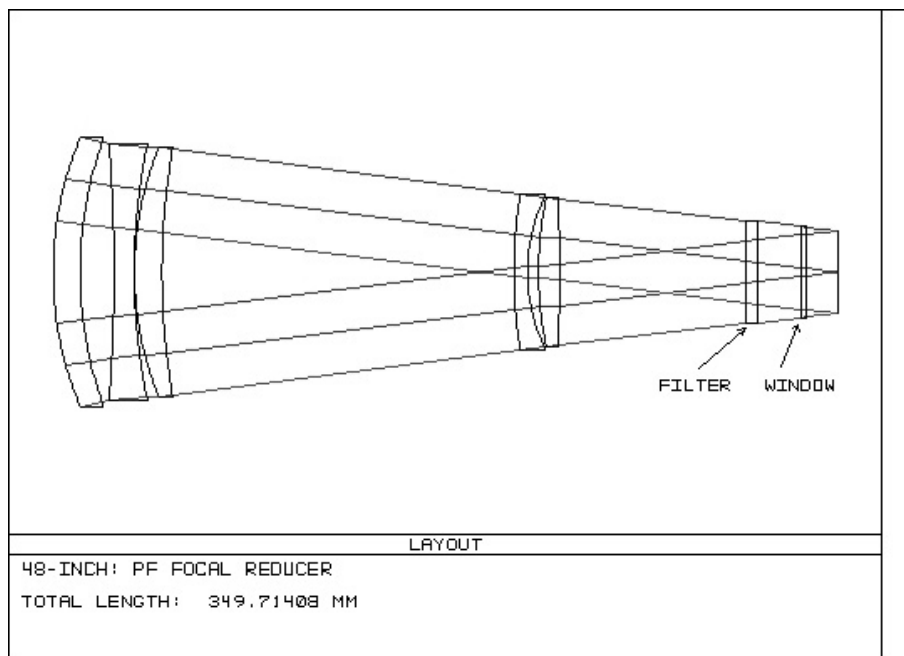


Рис. 3. Линзовая система фокального редуктора

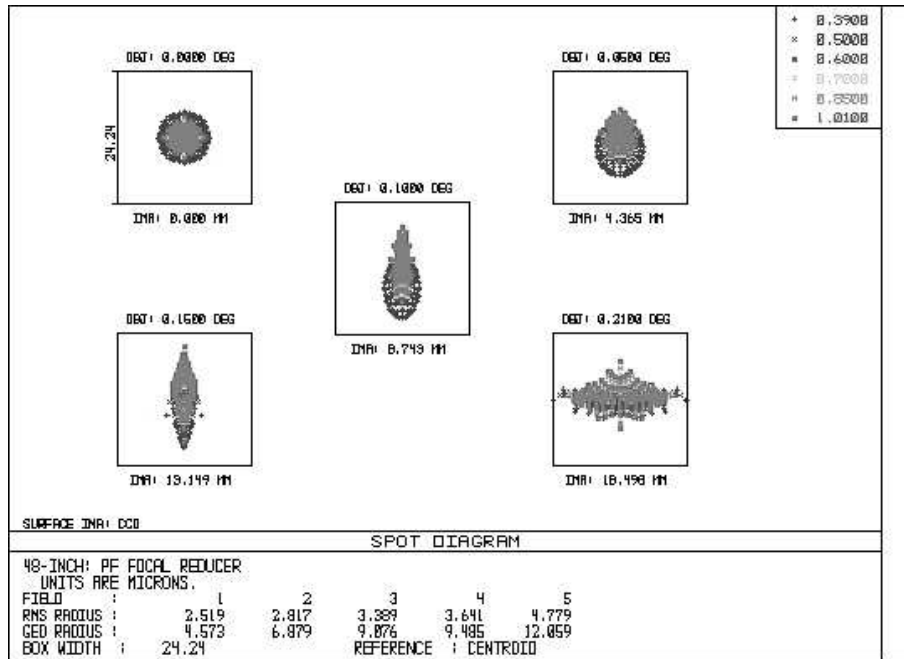


Рис. 4. Точечные диаграммы для центра поля зрения (верхнее левое изображение) и полевых углов 3', 6', 9' и 12'6" в интегральном диапазоне спектра 0.39 – 1.01 мкм. Сторона квадрата соответствует 24 мкм (1"), внизу квадратов указано расстояние от центра поля зрения (мм)

Таблица 2. Характеристики изображения точечного источника (центр – край поля зрения)

Спектральная полоса	$\Delta\lambda$ (мкм)	R_{rms} (мкм)	D_{80} (мкм)	D_{80} (угл. сек)
B	0.39 – 0.49	3.7 – 4.5	11.0 – 13.1	0.45 – 0.54
V	0.51 – 0.59	2.5 – 4.6	10.7 – 14.2	0.44 – 0.59
R	0.60 – 0.80	1.9 – 4.8	11.0 – 16.0	0.45 – 0.66
I	0.79 – 1.01	1.5 – 5.0	12.9 – 18.2	0.53 – 0.75
Весь диапазон	0.39 – 1.01	2.5 – 4.8	11.8 – 15.8	0.48 – 0.66

При фокальном отношении оптической системы $\phi = 4.1$ и длине волны 0.7 мкм диаметр центрального пика в дифракционном изображении звезды (круга Эри) составляет 7.0 мкм. Как показывает рисунок 4, размеры изображений в интегральном свете имеют тот же порядок величины, т.е. оптическая система обеспечивает качество изображений, близкое к дифракционному. Об этом же свидетельствует и рисунок 5, на котором представлена доля энергии в изображении точечного источника в зависимости от диаметра кружка, центр которого совмещен с центром тяжести изображения. Для наглядности на этом рисунке отмечен уровень, соответствующий доле энергии 80%; очевидно, на оси абсцисс ему отвечают значения $R_{80} = D_{80}/2$ для выбранных значений полевого угла. Диаметр изображения звезды в интегральном свете, содержащего 80% энергии, не превосходит 0''66 в пределах всего поля зрения.

Более полное представление о качестве изображений дает частотно-контрастная характеристика оптической системы, включающей в себя главное зеркало телескопа и фокальный редуктор. Эта функция представлена на рисунке 6 (экранирование света зеркалом редуктора учтено).

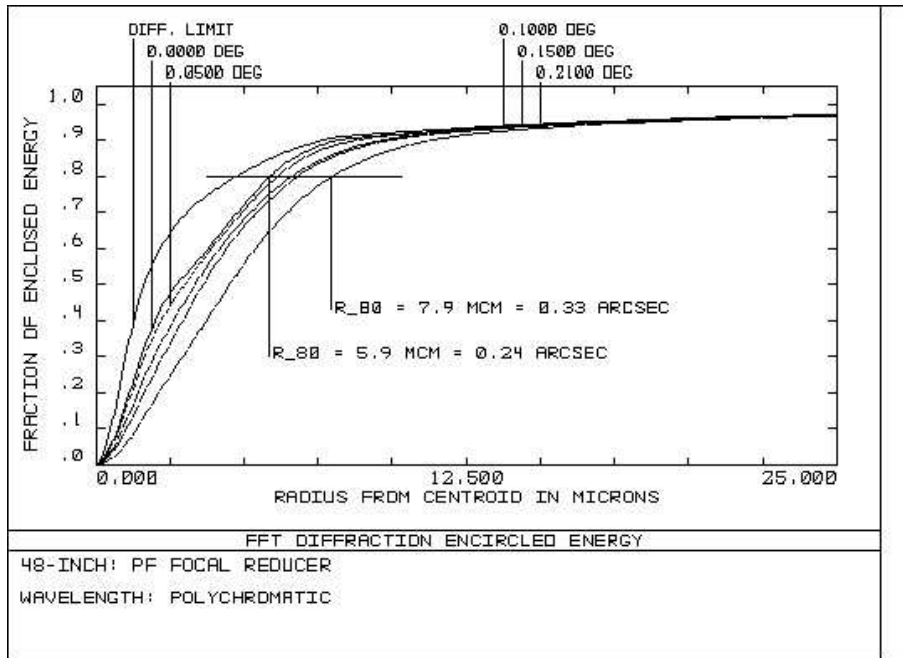


Рис. 5. Доля энергии в изображении точечного источника как функция радиуса кружка (мкм), центрированного на центроид изображения. Обозначен уровень 80%. Рассматривается интегральный спектральный диапазон 0.39 – 1.01 мкм. Верхняя кривая соответствует дифракционному пределу, другие кривые – различным полевым углам

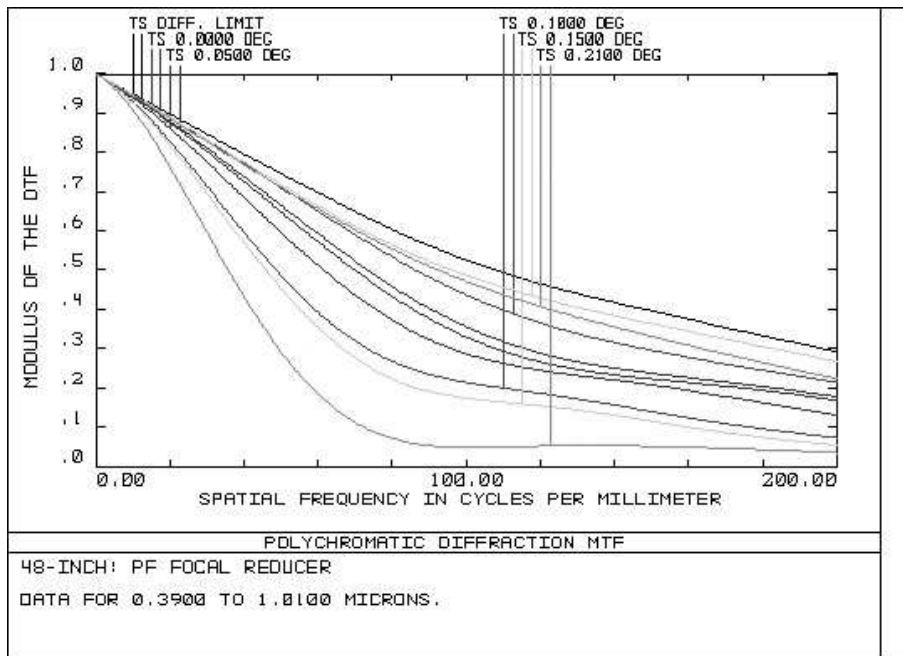


Рис. 6. Частотно-контрастная характеристика оптической системы в полихроматическом свете 0.39 – 1.01 мкм. Показан диапазон значений пространственной частоты (ось абсцисс) вплоть до 200 циклов/мм. Верхняя кривая соответствует дифракционному пределу, другие кривые – различным полевым углам

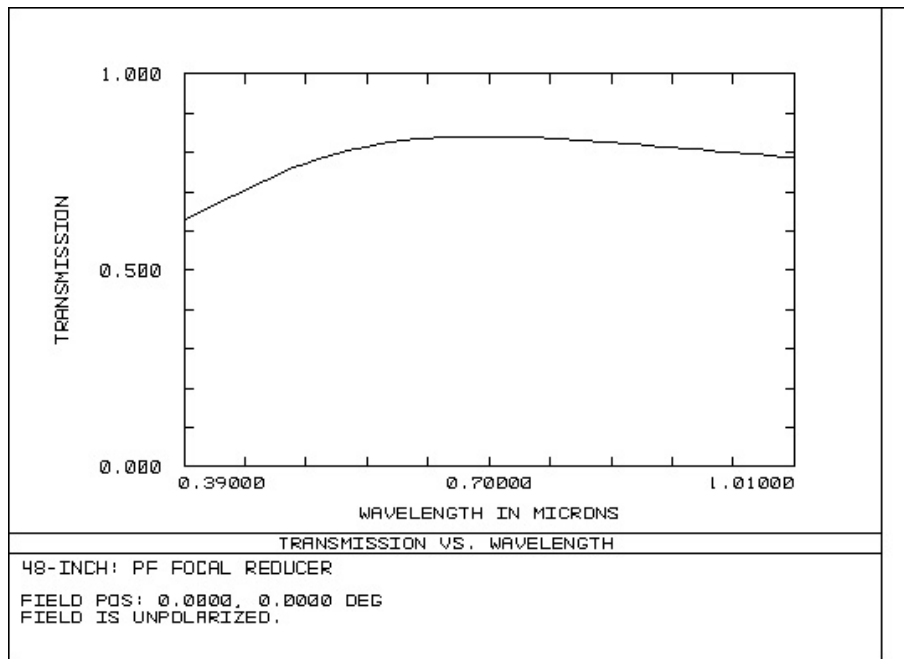


Рис. 7. Зависимость пропускания редуктора от длины волны при нанесении на поверхности однослойного покрытия MgF_2

5 Виньетирование света

Световой диаметр зеркала редуктора, равный 386 мм, отвечает центральному экранированию света $\eta = 0.316$; соответствующие потери потока составляют 10.0%. Заметим в этой связи, что существующий узел вторичного зеркала телескопа вносит несколько большее экранирование. Как и следовало ожидать, при переходе от центра поля зрения к его краям освещенность уменьшается незначительно – лишь на 3.8%.

6 Прозрачность редуктора

Добиться высокого качества изображений при столь значительном заднем отрезке (124 мм) удастся при использовании не менее пяти одиночных линз, однако стекла Schott BK7 и ЛЗОС К8 обеспечивают достаточно хорошую прозрачность редуктора. Как уже отмечалось, при необходимости расширить спектральный диапазон за пределы видимой области спектра можно изготовить все линзы редуктора из плавленого кварца (см. таблицу 7).

Если просветляющее покрытие не будет нанесено на поверхности линз, то пропускание редуктора почти во всем спектральном диапазоне составит около 50%, а основным источником потерь света явится френелевское отражение от поверхностей. Нанесение простейшего покрытия в виде одиночного слоя MgF_2 заметно повышает пропускание редуктора (рисунок 7). Современные многослойные покрытия, работающие в очень широком спектральном диапазоне, позволят поднять пропускание выше уровня 80%.

7 Дисторсия

Максимальное значение дисторсии на длине волны 0.70 мкм равно 0.93%. В коротковолновой области спектра дисторсия несколько возрастает – до 0.98% при $\lambda = 0.39$ мкм, в длинноволновой

области она составляет 0.92%. Дисторсионная картина не меняется со временем, так что соответствующая корректировка изображений может выполняться в процессе первичной обработки данных.

8 Допуски

Поскольку качество изображений телескопа с редуктором близко к дифракционному пределу, допуски на приведенные в таблице 1 параметры по необходимости оказываются достаточно жесткими. Заметному смягчению допусков способствует то обстоятельство, что все оптические поверхности редуктора имеют сферическую форму.

Расчеты допусков проводились в рамках как *прямой* задачи, когда по заданным отклонениям оптических параметров рассчитывались изображения звезды, так и *обратной* задачи, когда разыскивались отклонения параметров, отвечающие заданному ухудшению качества изображений. Оба вида расчетов согласуются между собой. Компенсаторами служили расстояния между элементами и величина заднего отрезка системы.

Таблица 3. Допуски центрированных поверхностей

Номер поверхности	Радиус R, мм	Допуск на R, мм	Иррегулярность поверхности, инт. полосы	Толщина t, мм	Допуск на t, мм
2	-16800	± 2.5	± 0.2	-6055.0	± 2
3	6667	± 5.0	± 0.2	1033.3	± 0.2
4	151.53	± 0.1	± 0.2	12.0	± 0.2
5	173.16	± 0.15	± 0.2	15.11	± 0.2
6	-761.42	± 3.0	± 0.2	9.0	± 0.2
7	275.84	± 1.0	± 0.2	0.20	± 0.2
8	149.13	± 0.1	± 0.2	12.2	± 0.2
9	322.63	± 1.0	± 0.2	156.92	± 0.2
10	223.88	± 1.0	± 0.2	6.0	± 0.2
11	77.758	± 0.1	± 0.2	4.92	± 0.2
12	159.54	± 1.0	± 0.2	9.5	± 0.2
13	-526.46	± 3.0	± 0.2	82.87	см. табл. 6

Характеристикой качества изображения звезды служил среднеквадратический разброс лучей на точечной диаграмме – R_{rms} . Для номинальной оптической системы, описанной в таблице 1, среднее по полю значение $R_{\text{rms}} = 3.6$ мкм; в качестве крайнего рассматривалось ухудшение, которому отвечает величина $R_{\text{rms}} = 6.5$ мкм. Всего рассматривались 156 возможных типов изменений параметров системы. Результаты анализа сведены в таблицы 3 – 5; ниже даны необходимые пояснения. Здесь мы лишь добавим, что расчеты сопровождалось статистическим моделированием системы при изменении ее параметров (*метод Монте Карло*). Это означает, что в очередном цикле испытаний каждому из 156 параметров придавалось случайное отклонение от его номинального значения, независимое от значений других параметров, а затем рассчитывалось качество изображений при одновременной вариации всех параметров. Таких циклов было сделано несколько сотен. При указанных в таблицах 3 – 5 допусках для 50% моделированных систем величина R_{rms} не превосходила 6.6 мкм, и для 90% систем – не превосходила 8.0 мкм.

Номера поверхностей в таблицах 3 – 5 соответствуют номерам, указанным в таблице 1. Линзы обозначены номерами передней и задней поверхностей. Подвижки элементов вычисляются в системе координат, связанной с главным зеркалом.

Под иррегулярностью поверхности понимается отклонение, состоящее наполовину из сферической аберрации и наполовину из астигматизма. Такой подход наиболее просто моделирует отклонения, часто встречающиеся на практике. Допуски на иррегулярность поверхностей даны в интерференционных полосах для длины волны 0.6328 мкм. Рассматривается край поверхности; предполагается, что интерференционные полосы формируются при двойном прохождении света в установке типа той, которая используется для образования колец Ньютона.

Принятое в литературе сокращение *TIR* означает *Total Indicator Runout* – полный размах отсчетов индикатора при его перемещении по краю поверхности. Очевидно, *TIR* характеризует допуск на наклон поверхности. Максимальное смещение края поверхности вдоль оптической оси равно половине величины *TIR*.

Таблица 4. Допуски на децентровку и наклон поверхностей

Номер поверхности	Децентровка по X и Y, мм	TIR по X и Y, мм
2	см. таблицу 5	
3	см. таблицу 5	
4	± 0.10	0.05
5	± 0.10	0.05
6	± 0.10	0.05
7	± 0.10	0.05
8	± 0.05	0.05
9	± 0.10	0.05
10	± 0.10	0.05
11	± 0.10	0.05
12	± 0.10	0.05
13	± 0.10	0.05

Поскольку мы вычисляем допуски на подвижки элементов в системе координат, жестко связанной с главным зеркалом, допуски на его децентровку и наклон, указанные в таблице 5, означают приемлемые изменения параметров остальных оптических элементов телескопа, взятых в совокупности.

Таблица 5. Допуски на положения оптических элементов

Номер элемента	Номера поверхностей	Децентровка по X и Y, мм	Наклон по X и Y, градусы
1	2	± 2.0	± 0°01
2	3	± 1.5	± 0°03
3	4 – 5	± 0.20	± 0°03
4	6 – 7	± 0.10	± 0°03
5	8 – 9	± 0.07	± 0°05
6	10 – 11	± 0.05	± 0°05
7	12 – 13	± 0.20	± 0°05

Допуски на показатели преломления и показатели дисперсии Аббе стекла BK7HT равны,

соответственно, ± 0.001 и ± 0.1 . То же справедливо для стекла К8 производства Лыткаринского завода оптического стекла. Впрочем, мягкость указанных выше допусков не связывает изготовление оптики с ее конкретным производителем.

В принятой нами системе обозначений t_{13} есть расстояние от последней линзы редуктора до фильтра. Представляет интерес диапазон вариаций t_{13} , которые нужно вводить для компенсации отклонений основных параметров редуктора от их номинальных значений. Соответствующие данные приведены в таблице 6. Как видно из таблицы, стандартное отклонение t_{13} при 20 реализациях не превосходило 0.57 мм; примерно на утроенную величину, ± 2 мм, следует ориентироваться при разработке фокусирующей подвижки линзовой части редуктора.

Таблица 6. Статистика значений расстояния от последней линзы до фильтра

Номинальное значение	82.87 мм
Минимальное значение	81.92 мм
Максимальное значение	83.86 мм
Среднее значение	82.91 мм
Стандартное отклонение	0.57 мм

Наиболее жестким в таблице 3 представляется допуск $\delta R \approx \pm 0.1$ мм на радиусы кривизны некоторых поверхностей. В этой связи нужно заметить, что указанная величина допуска типична для оптического производства (см., например, Креопалова и др., 1987). В КрАО реализована точность $\delta R \approx \pm 0.05$ мм. При контроле поверхностей с помощью пробных стекол обычно задается точность порядка двух интерференционных полос. Количество таких полос N и величина зазора между испытываемой и контрольной поверхностями δt связаны соотношением $\delta t = N \cdot \lambda/2$, а зазор, очевидно, равен $\delta t = D^2 \delta R / (8R^2)$, где D – диаметр поверхности. Из этих двух соотношений следует:

$$\delta R = 4\lambda N \frac{R^2}{D^2}. \quad (1)$$

Подставляя сюда $\lambda = 0.6328$ мкм (He-Ne лазер), $N = 2$, $R = 100$ мм и $D = 110$ мм, получаем для измеримой ошибки радиуса поверхности значение $\delta R \approx 0.004$ мм, что гораздо меньше нужного в данном случае допуска 0.1 мм.

В отношении других допусков уместно привести краткие пояснения. Номинальный радиус кривизны главного зеркала телескопа, -16800 мм, должен быть задан с точностью ± 2.5 мм. Точности продольной и поперечной установки редуктора составляют ± 2 мм. Точность поперечной установки зеркала редуктора равна ± 1.5 мм. Допустимая децентровка линз примерно равна 0.03 мм. Допуски на характеристики стекла достаточно мягки, чтобы не стремиться получить образцы из одной плавки.

9 Редуктор на основе плавленного кварца

Наличие в КрАО однородных заготовок плавленного кварца (fused silica, FS) побудило нас рассчитать соответствующую схему, которая рассматривается в качестве запасной (таблица 7). Сравнение с таблицей 1 свидетельствует о близости систем; этого и следовало ожидать ввиду незначительного различия оптических характеристик материалов: для плавленного кварца показатель преломления $n_d = 1.45846$ и параметр Аббе $\nu_d = 67.821$, а для стекла ВК7НТ величины $n_d = 1.51633$, $\nu_d = 64.143$.

Данная схема может служить исходной при расчете аналогичных систем, предназначенных для работы в широком спектральном диапазоне.

`Таблица 7. Параметры редуктора с использованием плавленого кварца

Номер поверхности	Комментарий	Радиус кривизны (мм)	Расстояние до следующей поверхности (мм)	Материал	Световой диаметр (мм)
1	Круговой экран	∞	6055.0	–	386.0
2	Главное зеркало*	–16800	–6055.0	Зеркало	1220.1
3	Зеркало редуктора	6718.4	1036.82	Зеркало	386.0
4	Линза 1	150.07	12.0	FS	120.0
5		175.26	15.24	–	115.9
6	Линза 2	–695.47	9.0	FS	115.0
7		277.45	0.20	–	112.1
8	Линза 3	143.16	12.1	FS	111.7
9		290.59	156.86	–	109.9
10	Линза 4	195.18	6.0	FS	69.4
11		74.30	5.37	–	66.3
12	Линза 5	162.10	9.5	FS	66.3
13		–499.05	82.07	–	65.7
14	Фильтр	∞	5.0	FS	46.2
15		∞	20.0	–	45.3
16	Окно детектора	∞	2.0	FS	40.6
17		∞	14.0	–	40.3
18	Детектор	∞	–	–	37.0

*Коническая константа главного зеркала равна –1.

10 Заключительные замечания

Реализация качества изображений, близкого к дифракционному пределу, в поле зрения диаметром около полуградуса при достаточно высоком коэффициенте редукции фокусного расстояния и едином материале для линзовой оптики стала возможной благодаря использованию общего принципа разработки катадиоптрических систем, который полезно сформулировать явным образом: *силовые функции желательно возлагать на зеркальные элементы, тогда как основное назначение близкой к афокальной линзовой оптики – устранить монохроматические aberrации системы, по возможности не внося собственного хроматизма*. Этот подход обуславливает, в частности, достоинства камеры Шмидта (1931), оригинальной системы Рихтера–Слефогта (1941), а также ее развития, при котором в телескопе достигается поле зрения дифракционного качества диаметром более 6° (Теребиж, 2001, 2005). Продуктивность высказанной точки зрения нетрудно проследить и в других разработках оптических систем различного рода.

Изложенное выше свидетельствует, что рассчитанные нами схемы редуктора фокусного расстояния удовлетворяют всем требованиям, перечисленным в разделе 2. В 2006 г. Пулковская обсерватория и Крымская астрофизическая обсерватория приступили к совместному изготовлению редуктора.

Автор признателен сотрудникам двух названных выше обсерваторий за полезное обсуждение сопутствующих вопросов.

Литература

- Вилсон (R.N. Wilson). // Reflective Telescope Optics. V. I. Springer. 1996.
 Зоннефельд А. // Вогнутые зеркала. С. 68. М-Л.: ОНТИ. 1935.
 Креопалова Г.В., Лазарева Н.Л., Пуряев Д.Т. // Оптические измерения. М.: Машиностроение. 1987.
 Михельсон Н.Н. // Оптика астрономических телескопов и методы ее расчета. М.: Физматлит. 1995.

- Пресс и др. (W.H. Press, S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling, and B.P. Flannery). // Numerical Recipes. Cambridge University Press. 1992.
- Рихтер и Слефогт (R. Richter, H. Slevogt). // German Patent Application 1941. No. Z 26592 IXa 42h.
- Тербиж В.Ю. // Известия Крымской астрофизической обсерватории. 2001. Т. 97. С. 101 – 113.
- Тербиж В.Ю. // Современные оптические телескопы. М.: Физматлит. 2005.
- Шмидт (B. Schmidt). // Central-Zeitung fur Optik und Mechanik, Jg. 52, N 2, S. 25–26, 1931.