

УДК 520.224.5-13

ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ТЕЛЕСКОПА ЦЕЙСС-1000 С ПОМОЩЬЮ ДАТЧИКА ВОЛНОВОГО ФРОНТА ШАКА–ГАРТМАНА

© 2017 С. В. Драбек^{1*}, В. В. Комаров¹, С. А. Потанин²,
А. Д. Саввин², А. С. Москвитин¹, О. И. Спиридонова¹

¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

²Государственный астрономический институт им. Штернберга Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва, 119992 Россия

Поступила в редакцию 7 сентября 2016 года; принята в печать 20 марта 2017 года

Представлены результаты исследования оптики 1-м телескопа Цейсс-1000 (САО РАН) методом Шака–Гартмана (ШГ). Использование датчика волнового фронта ШГ при юстировке оптической системы с помощью сдвигов и наклонов вторичного зеркала позволило существенно уменьшить аберрации, появившиеся в ходе многолетней эксплуатации инструмента. С применением новой методики исследования качества поверхностей зеркал телескопа Цейсс-1000 удастся достичь характеристик, близких к дифракционному пределу. В целом, вся оптико-механическая система телескопа теперь позволяет получать качество изображений порядка 0".5 по уровню 80% энергии.

Ключевые слова: *телескопы*

1. ВВЕДЕНИЕ

В 2015 г. отмечалась 25-летняя годовщина со дня первых наблюдений 1-метрового оптического телескопа САО РАН Цейсс-1000. Он был изготовлен для САО в 1983 г. НП «Карл Цейсс Йена» [1]. Благодаря оптической системе Ричи–Кретьена вместе с системой куде, Цейсс-1000 является универсальным инструментом для решения различных задач наблюдательной астрономии. Главное зеркало имеет форму гиперболоида и образует вместе со вспомогательным гиперболическим зеркалом широкопольную систему Ричи–Кретьена, у которой отсутствует кома третьего порядка и сферическая аберрация. У телескопа два фокуса: фокус Кассегрена с эквивалентным фокусным расстоянием 13.3 м и фокус куде (36.5 м), поэтому вспомогательных (вторичных) зеркал два. Одно перенаправляет лучи от главного зеркала в фокус Кассегрена через отверстие главного зеркала, другое — через систему плоских зеркал в фокус куде. Английская монтировка ЕМ 2 предоставляет преимущество направления хода лучей к фокусу куде всего двумя плоскими зеркалами. Оба вспомогательных зеркала смонтированы на одной передней опорной крестовине тыльными сторонами друг к другу и

могут путем переворачивания крестовины на 180° включаться в соответствующую схему хода лучей. Для фокусировки вторичные зеркала перемещаются вдоль оптической оси по безззорной роликовой направляющей. В технической документации Цейсс-1000 [2] приведены следующие данные о концентрации энергии в фокусах телескопа:

- фокус Кассегрена: 0".23, 0".34 и 0".46;
- фокус куде: 0".22, 0".35 и 0".49,

для уровней 50%, 75% и 90%, соответственно.

После сборки Цейсс-1000 в 1990 году была проведена его юстировка [3]. Качество оптики телескопа исследовали Снежко и Тихонов [4]. Они использовали метод Гартмана и показали, что концентрация энергии в изображении, как в центре поля, так и в круге диаметром 28' даёт экспериментальное значение не хуже 1".4 для уровня 85%. Был сделан вывод, что устранение всех аберраций Зайделя может улучшить качество изображения до 0".9 для уровня 85%, устранив постоянную кому с помощью наклона/сдвига зеркал.

За 25 лет эксплуатации телескопа износ оборудования привел к участвовавшим отказам техники, а также к ухудшению состояния оптического тракта телескопа. Помимо разработки новой, автоматизированной, системы управления необходимым стало одновременное переоснащение целого

*E-mail: drabek@sao.ru

ряда устаревших и износившихся узлов комплекса. К настоящему времени на телескопе проведена комплексная модернизация электромеханических систем и полностью обновлен программно-управляемый комплекс телескопа [5]. Это значительно улучшило качество ведения и позволило реализовать новый режим наблюдений с возможностью программного сопровождения быстродвижущихся небесных объектов [6]. Стала очевидной актуальность проверки качества оптической системы телескопа и его юстировки.

Ухудшение качества оптики телескопа, приводящее к увеличению аберрации комы, связано, в основном, с расхождением осей зеркал. Также при длительной эксплуатации инструмента может ухудшаться качество работы разгрузок главного зеркала, что приводит к появлению таких аберраций, как «трилистник» и астигматизм, а возможно, и искажений более высокого порядка. Функционирование разгрузочных механизмов затрудняется в результате действия коррозии и засорения оправы зеркала пылью. С целью выявления накапливающихся ошибок оптомеханики необходимо время от времени контролировать состояние оптического тракта телескопа. Работа, способствовавшая улучшению оптической системы Цейсс-1000, была проведена нами впервые после очень длительного периода бесконтрольной эксплуатации. Для исследования качества поверхностей зеркал телескопа и его юстировки был использован датчик волнового фронта ШГ. Благодаря применению методики, описанной в данной статье, удается получить качество изображений, близкое к дифракционному пределу.

2. МЕТОД ИЗМЕРЕНИЙ

Для измерения аберраций оптики телескопа могут применяться различные методики. Ранее (до середины—конца XX века) применялся метод Гартмана с полноапертурной диафрагмой. Это градиентный метод, использующий, однако, только малые части всей апертуры (отверстия в диафрагме). Кроме того возникает ряд неудобств, связанных с установкой и снятием диафрагмы.

Более эффективным методом является метод Шака—Гартмана. Способ измерений похож на метод Гартмана, но вместо полноапертурной диафрагмы используется микролинзовый растр, расположенный в выходном зрачке телескопа. Таким образом, контролируются средние по субапертурам наклоны волнового фронта. Прибор такого типа позволяет использовать весь свет, попадающий на зеркало, а также легко может быть установлен на телескоп. Благодаря этим свойствам датчик ШГ успешно применяется в системах адаптивной коррекции изображений.

Конкретная реализация специализированного для измерений аберраций телескопов датчика ШГ была выполнена в ГАИШ в 2008–2009 гг. [7]. В указанной работе рассмотрены основные принципы работы датчика ШГ, приведена схема прибора и дано детальное описание методики восстановления волнового фронта. Датчик был испытан на 70-см телескопе АЗТ-2 ГАИШ МГУ, а также на телескопах: 1.5-м АЗТ-22 Майданакской обсерватории [8]; 1.0-м Цейсс-1000 Майданакской обсерватории; 2.6-м ЗТШ и 1.25-м АЗТ-11 Крымской астрофизической обсерватории [9]. В 2013–2015 гг. с ним проводилась официальная приемка оптики 2.5-метрового телескопа ГАИШ МГУ у французской фирмы REOSC [10].

Прибор имеет следующие основные характеристики:

- Рабочая длина волны λ — 532 нм.
- Внутренний рабочий отрезок (расстояние от посадочной поверхности фланца до внутренней фокальной плоскости) — 60 мм.
- Фокусное расстояние коллиматора — 125 мм.
- Диаметр коллиматора — 25 мм.
- Диаметр выходного зрачка (для телескопа Цейсс-1000) — 9.3 мм.
- Фокусное расстояние микролинз — 45 мм.
- Период микролинзового растра — 400 мкм.
- Количество субапертур (при работе на Цейсс-1000) ~ 400 .
- Размер субапертуры на входном зрачке (Цейсс-1000) — 43×43 мм.
- Поле зрения подсмотра — 10 мм ($2'56$ при фокусе 13 400 мм).
- Приемник — EEV1300BI (размер пикселя 20×20 мкм).

Измерения проводятся следующим образом:

- 1) Выполняется калибровка от лазерного оптоволоконного источника света.
- 2) Снимаются калибровочные кадры (темновой сигнал).
- 3) Делается серия снимков гартманогамм от звезды.
- 4) Для каждого кадра находятся смещения точек относительно калибровочных положений.
- 5) Для каждого кадра выполняется пересчет измеренных смещений в локальные производные волнового фронта по направлению.

- 6) Для каждого кадра выполняется аппроксимация совокупности нормальных производных суммой полиномов Цернике (см. Приложение). Максимальный порядок полиномов может варьироваться от 11 до 35 в зависимости общего количества субапертур (пространственного разрешения).
- 7) Выполняется усреднение полученных волновых фронтов по всем кадрам из серии.
- 8) Делаются оценки полного и среднеквадратического отклонения волнового фронта.
- 9) С помощью двумерного Фурье-преобразования вычисляется функция рассеяния точки (ФРТ).
- 10) По синтетической ФРТ определяется концентрация энергии в круге.

В программном обеспечении реализован также второй метод восстановления волнового фронта. Это двумерное дискретное Фурье-преобразование по заданному набору частот. Частоты по координатам X и Y (в системе координат прибора) выбираются с равномерным шагом от нуля до максимальной частоты, которая соответствует периоду в 5 субапертур. Шаг по частоте задается из расчета максимального количества информации, соответствующего полному количеству субапертур на гартманограмме. Этим методом не удастся разделить отдельные aberrации (такие, как кома, астигматизм или сферическая aberrация), однако он позволяет выявить более высокочастотные ошибки, по сравнению с разложением в ряд по полиномам Цернике. Как показано в работе [7], оба метода дают похожие результаты и могут рассматриваться как дополнение друг к другу. В измерениях на телескопе Цейсс-1000 САО РАН нами применялись оба метода.

3. ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИЗМЕРЕНИЙ С ДАТЧИКОМ ШАКА–ГАРТМАНА

В процессе многочисленных измерений, как на 2.5-м телескопе ГАИШ МГУ, так и на других телескопах, был выявлен ряд очевидных обстоятельств, мешающих получать надёжные результаты с датчиком Шака–Гартмана. Эти же обстоятельства сказываются и на корректности измерений всем другими методами (диафрагма Гартмана, сдвиговый интерферометр, теневой прибор), поскольку имеют отношение не к конкретной схеме прибора, а к сложным процессам, происходящим в подкупольном пространстве (воздушные потоки и термическое состояние узлов телескопа).

Метод ШГ позволяет выполнять усреднение по большому числу измерений (до 1000 и более). Однако в случае квазистатистических потоков воздуха

Таблица 1. Основные aberrации системы перед началом юстировки

Аберрация	Величина, λ	Стандартное отклонение
Дефокус	1.21	0.38
Астигматизм X	0.66	0.43
Астигматизм Y	0.30	0.41
Кома X	-0.76	0.30
Кома Y	-1.72	0.33
Сферическая	-0.82	0.29
Трилистник X	-0.06	0.20
Трилистник Y	-0.25	0.21

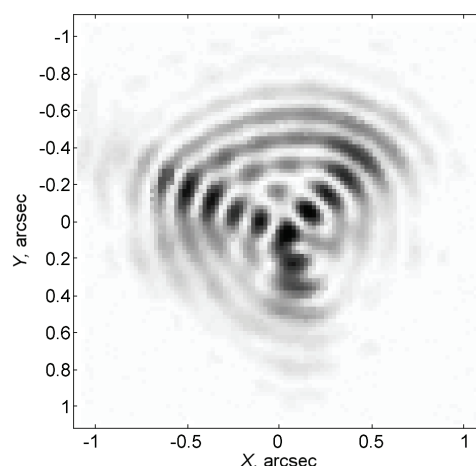


Рис. 1. Синтетическая функция рассеяния точки перед началом юстировки.

(воздушные тепловые линзы и пр.) данные недостаточно отражают aberrации оптики и не могут быть усреднены без потери точности. Необходимо дожидаться выравнивания температуры подкупольного пространства и всех частей телескопа.

В остальном сам прибор показал высочайшую стабильность, а многочисленные тесты в различных ориентациях не выявили никаких дополнительных (инструментальных) aberrаций вплоть до 0.1λ (общего отклонения волнового фронта). Все измеряемые искажения реально имеют отношение только к волновому фронту, прошедшему через атмосферу, воздух подкупольного пространства и оптический тракт телескопа.

Итак, среди основных причин, влияющих на корректность результатов измерений, устранить которые практически невозможно из-за их естественной природы, можно выделить следующие:

1. Градиент температур телескопа и подкупольного пространства, приводящий к искажению дан-



Рис. 2. Синтетические интерферограммы системы в одном проходе перед началом юстировки ($PTV=2.1\lambda$, $RMS=0.37\lambda$ при $\lambda=532$ нм).

ных. Корректно учесть влияние этого фактора предельно сложно и следует ожидать выравнивания температур.

2. Плохое качество изображений из-за турбулентности атмосферы (хуже $2''5$). Точность результатов можно увеличить, усредняя большое число измерений.
3. Сильный порывистый ветер (упорядоченные движения звезды в фокальной плоскости с амплитудой около угловой секунды или больше). Нужно либо выбрать для наблюдений объект на другом зенитном расстоянии, либо ожидать уменьшения скорости ветра.

Наличие перечисленных выше факторов не всегда позволяет получить адекватные оценки качества оптики. В таких случаях необходимо ожидать более подходящих условий. О корректности и точности измерений можно судить по среднеквадратическим отклонениям значений различных aberrаций в результате усреднения.

4. ИЗМЕРЕНИЯ НА ТЕЛЕСКОПЕ ЦЕЙСС-1000 САО РАН. КОРРЕКЦИЯ АБЕРРАЦИЙ.

Измерения, необходимые для определения состояния оптической системы Цейсс-1000, и юстировка телескопа проводились в течение двух ночей. При анализе искажений волнового фронта мы использовали объективные характеристики для оценки качества оптики: общее отклонение волнового фронта, выраженное в длинах волн (PTV), среднеквадратическое отклонение (RMS) и концентрация энергии в круге по уровню 80% ($EE80$).

Датчик волнового фронта ШГ был установлен в фокусе Кассегрена. Сопутствующая аппаратура (контроллер ПЗС-камеры, блок управления калибровочным лазером) была закреплена на телескопе. Наблюдались объекты с зенитным расстоянием около 45 градусов в северо-восточном

направлении. Применялось усреднение по 50 измерениям.

Как отмечалось выше, волновой фронт восстанавливался двумя способами: разложением в ряд по полиномам Цернике и дискретным Фурье-преобразованием. По интегральным характеристикам, таким как полное отклонение волнового фронта (PTV), среднеквадратическое отклонение (RMS), а также концентрации энергии в изображении ($EE80$), — эти методы дают отличия в пределах 20%. Кроме того, разложение по полиномам Цернике (см. Приложение) позволяет дать рекомендации по юстировке оптической системы, так как оперирует сразу с aberrациями третьего и более высоких порядков.

По первым измерениям были получены карты волнового фронта и синтетические интерферограммы, а также оценены основные aberrации оптической системы. На рис. 1–3 показаны синтетические функции рассеяния точки, интерферограммы, а также график концентрации энергии в круге по уровню 80% перед юстировкой. Сведения об основных aberrациях телескопа приведены в таблице 1.

На основании полученных результатов был сделан вывод о том, что в системе присутствует aberrация комы, которую можно скорректировать настройкой наклонов вторичного зеркала относительно оптической оси телескопа.

После изучения чертежей крепления вторичного зеркала мы приняли решение произвести коррекцию aberrации комы с помощью наклонов вторичного зеркала вместе с оправой. Было проведено моделирование в программе ZEMAX, позволившее оценить амплитуды и направления поворотов оправы, необходимые для уменьшения величины измеренной комы.

Юстировка осуществлялась в несколько этапов. На вторичном узле устанавливался индикатор часового типа для контроля поворота вторичного зеркала вместе с оправой. Далее проводился ряд контрольных наблюдений. Вторая контрольная серия была выполнена после ослабления болтов крепления вторичного узла, она не показала значительных изменений в величине комы. Для проведения изменений наклонов вторичного зеркала относительно оптической оси телескопа были выбраны базовые условные направления X и Y . Далее делался ряд поворотов оправы вместе со вторичным зеркалом с последующими измерениями. Результаты измерений при поворотах в условном направлении X приведены на рис. 4. Затем аналогичная операция была выполнена по второй координате (рис. 5). Телескоп для работы со вторичным зеркалом каждый раз опускали в горизонт

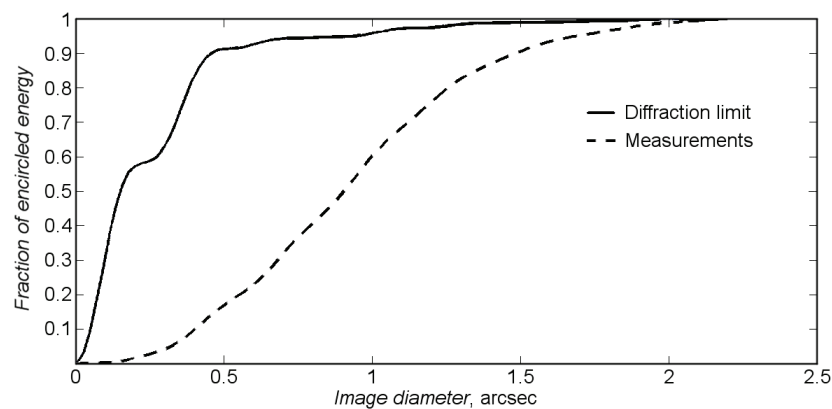


Рис. 3. График концентрации энергии перед началом юстировки. Диаметр EE80 равен 1.26 угловой секунды.

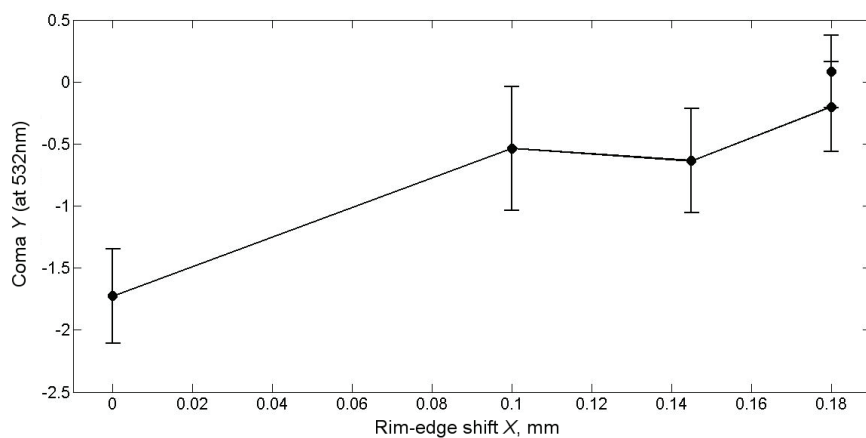


Рис. 4. Изменения aberrации комы при последовательных поворотах оправы в условном направлении $X+$. Последняя точка соответствует контрольному измерению без сдвига.

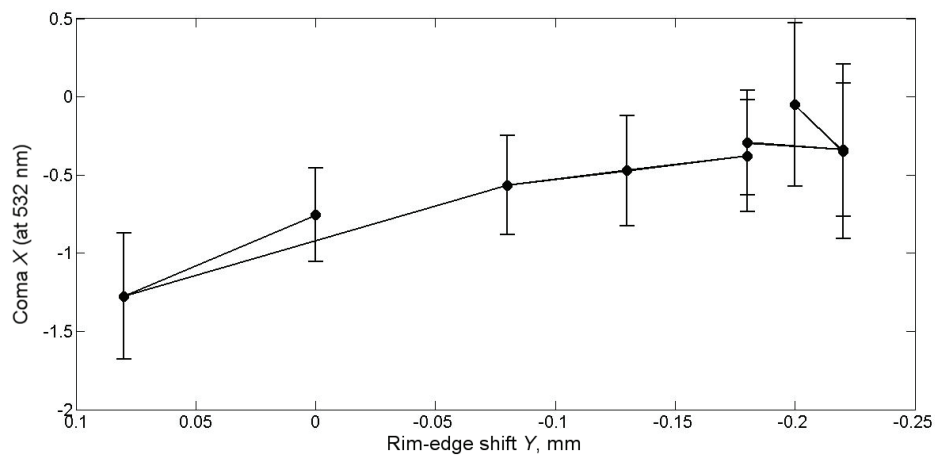


Рис. 5. То же, что на рис. 4, но в условном направлении $Y-$. Вначале осуществили сдвиг в неправильном направлении, в конце — «отскок» в результате затяжки болтов.

Таблица 2. Зависимость абберации комы и качества изображений от положения телескопа.

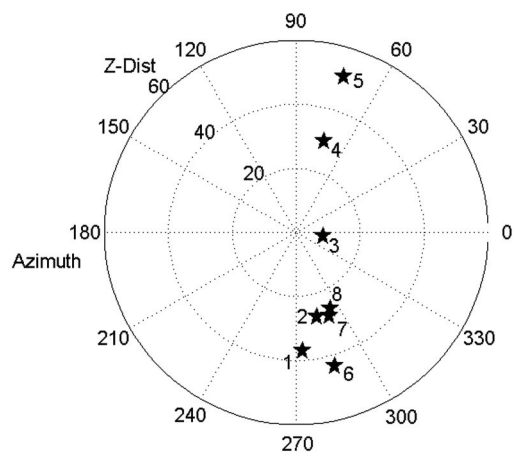
N точки	A, град	Z, град	Coma Y, λ	Ошибка Coma Y, λ	Фронт PTV, λ	Фронт PTV, λ	EE80, arcsec
1	273	37	0.62	0.15	1.55	0.17	0.77
2	284	27	0.56	0.10	1.30	0.16	0.76
3	352	8.5	0.51	0.17	1.32	0.16	0.76
4	73	30	0.74	0.19	1.65	0.21	0.87
5	73	51	0.84	0.15	1.76	0.23	0.92
6	286	44	0.62	0.13	1.42	0.18	0.80
7	292	28	0.60	0.17	1.30	0.17	0.77
8	294	26	0.66	0.14	1.44	0.18	0.80

Таблица 3. Изменения измеряемых параметров при юстировке.

	Номер итерации				
	0	1	2	3	4
Показания					
микрометра, мм	0	-0.10	-0.20	-0.28	-0.32
Coma Y, λ	0.66	0.40	0.20	0.15	0.11
Ошибка Coma Y, λ	0.14	0.18	0.11	0.17	0.16
Фронт PTV, λ	1.44	1.28	0.94	0.97	0.63
Фронт RMS, λ	0.18	0.16	0.12	0.10	0.06
Диаметр EE80, arcsec	0.80	0.76	0.56	0.52	0.46

Кроме того были проверены предположения о зависимости комы от положения телескопа. Было подтверждено, что при работе на востоке вплоть до зенита кома сохраняет своё значение, но при переключке на запад (через зенит) увеличивается скачком примерно на 0.3λ . Это может быть связано с остаточной подвижностью растяжек вторичного узла. При этом другие абберации практически не меняются. На рис. 6 показано расположение объектов на небе, по которым проводились наблюдения. В таблице 2 указаны их средние азимутальные координаты и величины абберации комы и EE80.

Видно, что до меридиана кома не меняется, а после его прохождения возрастает.

**Рис. 6.** Последовательность наведения на объекты для измерений и их азимутальные координаты.

к установленной тележке. После выполнения соответствующей итерации юстировки осуществлялся перевод на звезду для измерений.

После затяжки болтов крепления оправы была выполнена продолжительная серия измерений.

5. ОКОНЧАТЕЛЬНАЯ ЮСТИРОВКА

Последовательные изменения ФРТ по юстировке вторичного узла показаны на рис. 7. В таблице 3 приведены значения показаний индикатора на вторичном зеркале и соответствующие данным показаниям параметры изображений. На рисунках ниже показаны итоговые карты волнового фронта после юстировки (рис. 8), синтетические интерферограммы (рис. 9) и график концентрации энергии для наилучшего изображения (рис. 10). Форма фронта показана по вычислениям двумя способами для иллюстрации того, что они дают примерно одинаковый результат. Также видно, что метод с преобразованием Фурье даёт более высокие пространственные частоты.

После окончания юстировки опять был произведен тест с прохождением через меридиан. Он дал те же результаты: при прохождении меридиана кома возрастала примерно на 0.3λ . При возврате на восточное направление величина комы уменьшалась до исходного состояния, близкого к нулю (с точностью до погрешности измерений).

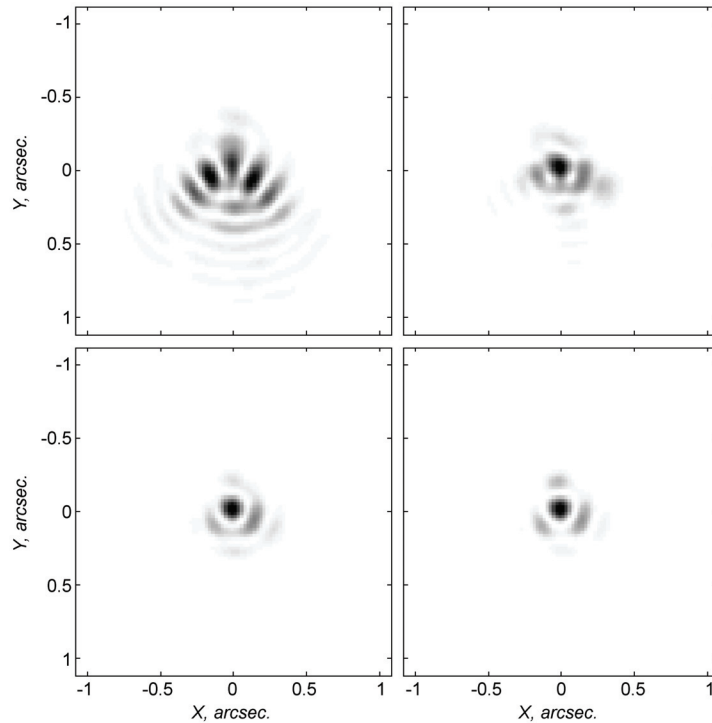


Рис. 7. Синтетические ФРТ при последовательных итерациях юстировки наклонами вторичного зеркала.

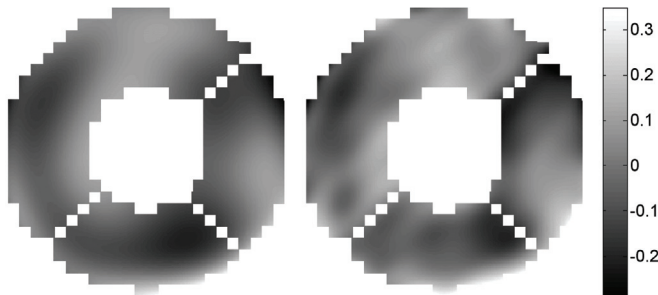


Рис. 8. Итоговые карты волнового фронта после юстировки: при восстановлении дискретным Фурье-преобразованием (слева) и 35-ю модами Цернике (справа). Шкала высот дана в долях рабочей длины волны $\lambda = 532$ нм.

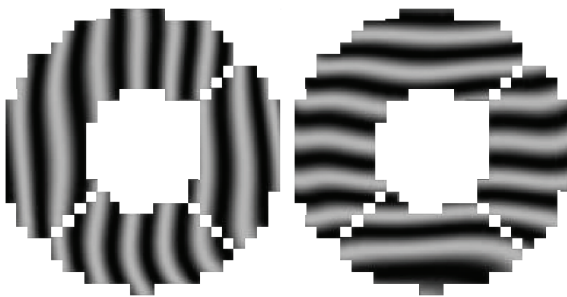


Рис. 9. Синтетические интерферограммы системы (главное + вторичное зеркало) в одном проходе после юстировки.

6. КАЧЕСТВО ИЗОБРАЖЕНИЯ (SEEING) ЦЕЙСС-1000 ПОСЛЕ ЮСТИРОВКИ

Для оценки качества изображения был проведен анализ данных, полученных после юстировки телескопа. Использованы ПЗС-изображения поля блазара 0133+476. Наблюдения были проведены в одну из ясных ночей, 22 октября 2016 года, с помощью штатного фотометром с фильтрами $UBVR_cI_c$ системы Джонсона–Коузинса и матрицей EEV 42-40 при фотометрических условиях.

Были проанализированы два прямых снимка в фильтре R_c с экспозициями 300 и 100 секунд, сделанных без бинирования. Обработка изображений проводилась в среде ESO-MIDAS¹ стандартным образом с учётом кадров электронного нуля и плоского поля. Чтобы оценить качество изображений, мы выбрали порядка десяти изолированных звездообразных объектов на каждом кадре, максимальные потоки которых находятся в рабочем диапазоне ПЗС-приёмника. На 300-секундном кадре выбрано 15 звёзд в диапазоне примерно 3000–30 000 ADU (см. рис. 11). На изображении с экспозицией 100 секунд объекты этой выборки, соответственно, имели меньшие потоки, поэтому качество проверялось по дополнительным

¹<http://www.eso.org/sci/software/esomidas/>

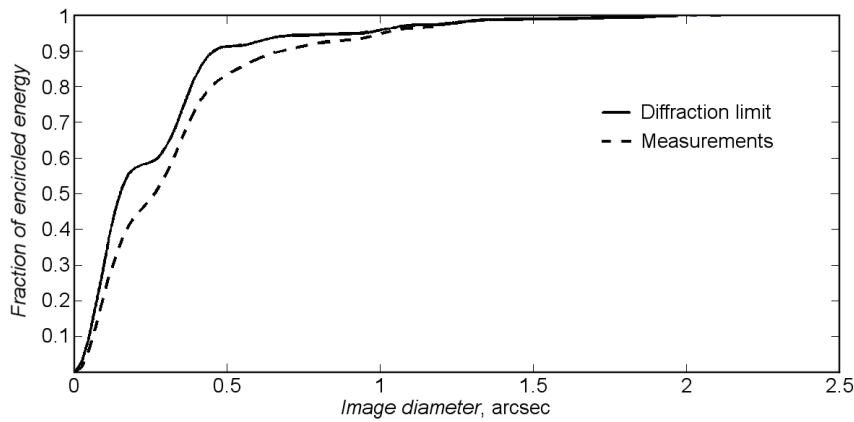


Рис. 10. Итоговый график концентрации энергии после окончания юстировочных работ.

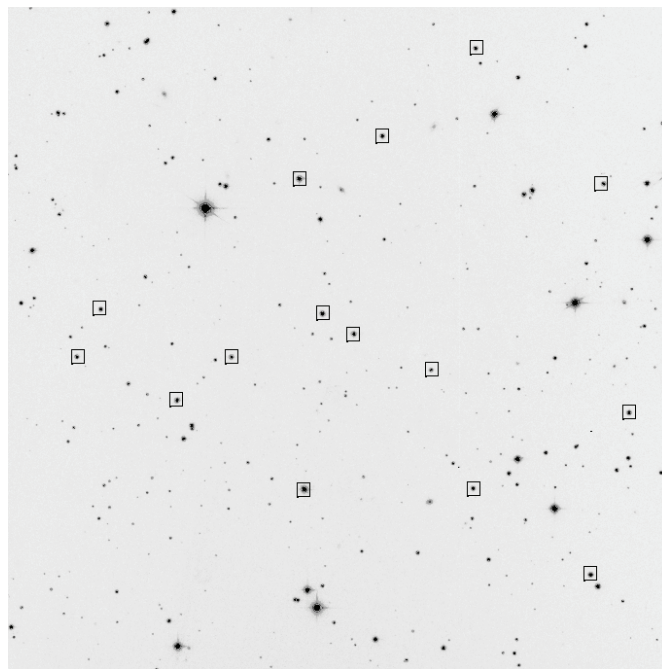


Рис. 11. Прямое изображение поля блазара 0133+476, полученное на Цейсс-1000 со штатным ПЗС-фотометром после юстировки телескопа (фильтр R_c , $t_{\text{exp}} = 300$ с). Звездчатые объекты, выбранные для оценки качества изображения, выделены квадратами.

шести ярким звёздам. Качество изображения оценивалось по размеру звезд как диаметру профиля FWHM. Измерения проводились стандартной процедурой **CENTER/GAUSS** пакета **ESO-MIDAS**. Полученные результаты показаны на рис. 12 и 13.

Анализ данных показал, что:

- среднее качество изображения на 300-секундном кадре составило $0''.98 \pm 0''.03$;
- имеется асимметрия профиля звезды (по RA: $0''.99 \pm 0''.02$, по Dec: $0''.96 \pm 0''.02$), что может быть объяснено незначительной расфокусиров-

кой телескопа (ветер в эту ночь не превышал 5 м с^{-1});

- на 100-секундном кадре среднее качество изображения составило $0''.95 \pm 0''.02$ по выборке звёзд с 300-секундного кадра (сигнал на уровне 1000–12 000 ADU) и $0''.96 \pm 0''.02$ по более ярким звёздам (9000–29 000 ADU);
- в реальных наблюдениях (с временами накопления порядка сотен секунд) основными факторами, влияющими на формирование изображений, являются состояние атмосферы, а также дрейф фокуса в течение ночи.

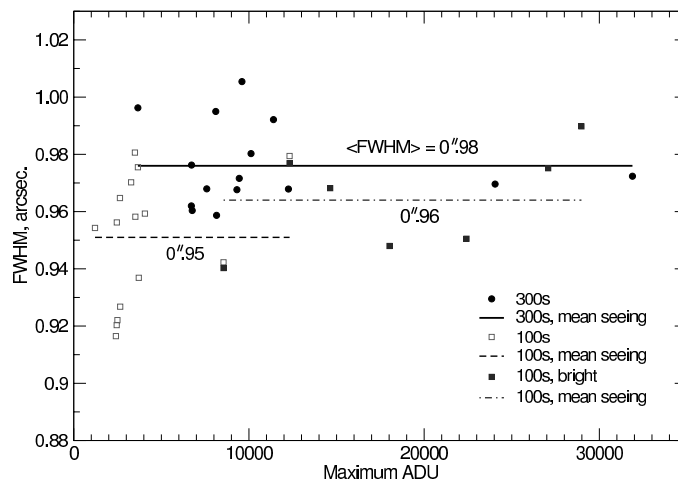


Рис. 12. Усредненная по обеим координатам величина FWHM объекта в зависимости от максимального потока.

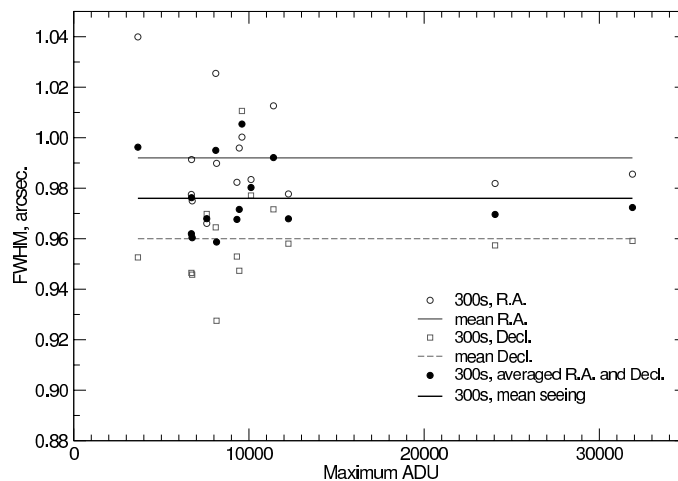


Рис. 13. Разброс измерений FWHM вдоль оси X (RA, кружки и тонкая сплошная линия), вдоль оси Y (Дес, квадраты и штриховая линия). Также показаны средние значения (черными сплошными кружками и толстой линией).

Для полноценного заключения о качестве изображения Цейсс-1000 желателен анализ наблюдательного материала большого объема.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. На основе измерений с использованием новой методики показано, что RMS ошибок волнового

фронта после прохождения системы телескопа (главное зеркало + вторичное) близко к $\lambda/16$.

2. Использование данной методики для исследования качества поверхностей зеркал телескопа Цейсс-1000 позволяет получить качество изображений, близкое к дифракционному пределу.

3. В целом, вся оптико-механическая система телескопа Цейсс-1000 (Разгрузки + Оптика +

Оправа вторичного зеркала + крестовина) позволяет достичь качества изображений порядка 0.5 угловой секунды по уровню 80% энергии.

4. Разгрузки главного или вторичного зеркала (разделить их не представляется возможным) продуцируют ряд ошибок волнового фронта, главной из которых является трилистник с амплитудой порядка 0.15λ . Эти аберрации слабо зависят от высоты и не являются критическими.

5. Обнаруженное появление комы при переходе телескопа через меридиан, скорее всего, говорит о том, что есть небольшое свободное перемеще-

ние в закреплении крестовины к трубе, либо к узлу вторичного зеркала. Причем возможно два варианта, как поворот узла крепления вторичных зеркал относительно трубы, так и сдвиг его в поперечном направлении. Для объяснения комы такой величины (0.3λ) надо предположить, что эти сдвиги составляют десятые доли миллиметра и могут быть обнаружены индикатором, закрепленным на трубе.

6. Целесообразным представляется исследование качества изображения Цейсс-1000 на наблюдательном материале большого объема.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Список усредненных аберрационных коэффициентов Цернике (первые 35 мод с описанием системы полиномов). Изменения измеряемых параметров при юстировке.

N	Название моды	Значение λ	STD λ	Формула для Zernice_Fringe_Coefs(ZEMAX)
1	Константа	0*	0	1
2	Наклон X	-2.1350**	2.1791	$(p) * \cos(A)$
3	Наклон Y	7.3804**	1.8771	$(p) * \sin(A)$
4	Дефокус	-0.2003***	0.1939	$(2p^2 - 1)$
5	Астигматизм X	-0.0691	0.2875	$(p^2) * \cos(2A)$
6	Астигматизм Y	0.0377	0.2611	$(p^2) * \sin(2A)$
7	Кома X	0.0780	0.1952	$(3p^2 - 2) p * \cos(A)$
8	Кома Y	0.1206	0.1647	$(3p^2 - 2) p * \sin(A)$
9	Сферич.	0.0761	0.1003	$(6p^4 - 6p^2 + 1)$
10	Трил. X	0.0121	0.1620	$(p^3) * \cos(3A)$
11	Трил. Y	0.0941	0.1522	$(p^3) * \sin(3A)$
12	Астигматизм 5X	-0.0677	0.0986	$(4p^2 - 3) p^2 * \cos(2A)$
13	Астигматизм 5Y	0.0457	0.1199	$(4p^2 - 3) p^2 * \sin(2A)$
14	Кома 5X	-0.0750	0.0922	$(10p^4 - 12p^2 + 3) p * \cos(A)$
15	Кома 5Y	0.0478	0.0966	$(10p^4 - 12p^2 + 3) p * \sin(A)$
16	Сферич. 5	-0.0106	0.0593	$(20p^6 - 30p^4 + 12p^2 - 1)$
17	4хлистник X	0.0492	0.1091	$(p^4) * \cos(4A)$
18	4хлистник Y	0.0044	0.0912	$(p^4) * \sin(4A)$
19	Угловая 3	-0.0617	0.0535	$(5p^2 - 4) p^3 * \cos(3A)$
20	Угловая 3	-0.0544	0.0738	$(5p^2 - 4) p^3 * \sin(3A)$
21	Астигматизм 7X	-0.0142	0.0546	$(15p^4 - 20p^2 + 6) p^2 * \cos(2A)$
22	Астигматизм 7Y	0.0304	0.0597	$(15p^4 - 20p^2 + 6) p^2 * \sin(2A)$
23	Кома 7X	0.0374	0.0562	$(35p^6 - 60p^4 + 30p^2 - 4) p * \cos(A)$
24	Кома 7Y	-0.0027	0.0537	$(35p^6 - 60p^4 + 30p^2 - 4) p * \sin(A)$
25	Сферич 7	-0.0281	0.0452	$(70p^8 - 140p^6 + 90p^4 - 20p^2 + 1)$
26	Угловая 5	0.0344	0.0640	$(p^5) * \cos(5A)$
27	Угловая 5	0.0637	0.0727	$(p^5) * \sin(5A)$
28	Угловая 4	-0.0576	0.0543	$(6p^2 - 5) p^4 * \cos(4A)$
29	Угловая 4	-0.0250	0.0529	$(6p^2 - 5) p^4 * \sin(4A)$
30	Угловая 3	0.0156	0.0449	$(21p^4 - 30p^2 + 10) p^3 * \cos(3A)$
31	Угловая 3	0.0278	0.0395	$(21p^4 - 30p^2 + 10) p^3 * \sin(3A)$
32		-0.0011	0.0381	$(56p^6 - 105p^4 + 60p^2 - 10) p^2 * \cos(2A)$
33		0.0021	0.0356	$(56p^6 - 105p^4 + 60p^2 - 10) p^2 * \sin(2A)$
34		0.0330	0.0348	$(126 p^8 - 280p^6 + 210p^4 - 60p^2 + 5) p * \cos(A)$
35		-0.0129	0.0359	$(126 p^8 - 280p^6 + 210p^4 - 60p^2 + 5) p * \sin(A)$

Примечания: * Первая мода — постоянный фазовый сдвиг. Она не может быть определена.

** Наклоны — могут быть определены, но не имеют значения и вычитаются.

*** Дефокус — определяется, но не участвует в оценках фронта и изображения

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. P. Köhler, D. Gutcke, and H.-J. Teske, *Jenaer Rundschau* **32**, 189 (1987).
2. "Zeiss-1000 Technical Documentation" (1986).
3. V. P. Romanenko, Report No. 210, SAO RAS (Special Astrophysical Observatory of RAS, Nizhnij Arkhyz, 1992).
4. L. I. Snezhko and N. A. Tikhonov, Report No. 215, SAO RAS (Special Astrophysical Observatory of RAS, Nizhnij Arkhyz, 1993).
5. V. V. Vlasyuk, S. V. Drabek, V. V. Komarov, and V. S. Shergin, in *Proc. Conf. on Ground-based and Space Optics-electronic Complexes* (Lytkarino, 2014), p. 81.
6. V. V. Vlasyuk, S. V. Drabek, V. V. Komarov, and V. S. Shergin, in *Present and Future of Small and Medium-size Telescopes* (Nizhnij Arkhyz, Russia, 2015), p. 45.
7. S. A. Potanin, *Astronomy Reports* **53**, 703 (2009).
8. B. P. Artamonov, V. V. Bruevich, A. S. Gusev, et al., *Astronomy Reports* **54**, 1019 (2010).
9. S. A. Potanin, arXiv:1101.3882 (2011).
10. S. A. Potanin, A. A. Belinski, O. V. Vozyakova, et. al., in *Proc. Conf. on Present and Future of Small and Medium-size Telescopes* (Nizhnij Arkhyz, 2015), p. 70.

Study of the Quality of the Zeiss-1000 Telescope Optical System Using the Shack–Hartmann Wavefront Sensor

S. V. Drabek, V. V. Komarov, S. A. Potanin, A. D. Savvin, A. S. Moskvitin, and O. I. Spiridonova

The results of studies of the optics of the 1-m Zeiss-1000 telescope of the Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences (SAO RAS) by the Shack–Hartmann (SH) method are presented. Using a Shack–Hartmann wavefront sensor (SH WFS) we have adjusted the telescope optical system by means of shifts and tilts of the secondary mirror. The procedure has significantly reduced the aberrations that appeared during the long-term instrument operation. A new method to investigate the surface quality of the mirrors of the Zeiss-1000 being applied, characteristics close to the diffraction limit are achieved. In general, the entire opto-mechanical telescope system provides an image quality of about 0.5'' at 80% energy level.

Keywords: *telescopes*