

УДК 520.8.07:520.353

СИСТЕМА ГИДИРОВАНИЯ И КАЛИБРОВКИ SCORPIO-2 В ПЕРВИЧНОМ ФОКУСЕ 6-М ТЕЛЕСКОПА

© 2017 В. Л. Афанасьев^{1*}, В. Р. Амирханян^{1,2},
А. В. Моисеев¹, Р. И. Уклеин¹, А. Е. Перепелицын¹

¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

²Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия

Поступила в редакцию 10 июля 2017 года; принята в печать 14 сентября 2017 года

Описано устройство (адаптер) для внеосевого гидирования и фотометрической калибровки широкоугольных спектрографов первичного фокуса 6-м телескопа БТА. Для компенсации комы в изображении внеосевых звезд применяется ахроматический линзовый корректор, обеспечивающий качество изображения ($FWHM$) около $1''$ на расстоянии $15'$ от оптической оси. Прибор имеет два подвижных поля гидирования диаметром $54''$, которые перемещаются в прямоугольных полях размером $10' \times 4'5$ каждое. Реализован автоматический поиск звезд гидирования, контроль по их яркости вариаций прозрачности атмосферы и фокусировка телескопа во время экспозиции. Предельные величины пригодных для гидирования звезд $m_R \sim 17^m$. В тракте калибровки, в оптической схеме которого выполнено условие телецентризма, имеется возможность засветки спектрографа как источником линейчатого спектра (лампа с наполнением He–Ne–Ar), так и источником непрерывного спектра. В качестве последнего используется либо галогеновая лампа, либо набор светодиодов, дающих засветку с приблизительно одинаковой интенсивностью в диапазоне длин волн 350–950 нм. Адаптер постоянно используется для наблюдений с многорежимным редуктором светосилы SCORPIO-2.

Ключевые слова: инструменты: разное — методы: наблюдательные

1. ВВЕДЕНИЕ

Шестиметровый Большой Азимутальный Телескоп (БТА) является первым крупным телескопом на альт-азимутальной монтировке с компьютерным сопровождением наблюдаемых объектов [1]. Для своего времени — конец шестидесятых годов прошлого века — данное техническое решение было пионерским, оно положило начало использованию альт-азимутальной схемы при создании больших телескопов со значительной массой. Помимо специфики ведения, требующей компьютеризированной системы управления, особенностью такой монтировки, в отличие от параллактической, является вращение поля зрения. При этом точность сопровождения наблюдаемого объекта определяется не только качеством механики и приводов телескопа, но и изменением атмосферных условий. Поэтому при длинных экспозициях в большом поле зрения требуется внеосевое гидирование по крайней мере по двум звездам. Если по одной звезде корректируется ведение монтировки телескопа, то использование второй звезды позволяет учесть

ошибку компенсатора вращения поля. Последняя максимальна при наблюдениях в первом вертикале, а также на малых зенитных расстояниях, где скорость изменения параллактического угла максимальна. Изначально телескоп был укомплектован штатной кассетой Ричи, предназначенной для фотографической съемки в первичном фокусе в поле диаметром $18'$. Это устройство имело два подвижных внеосевых микроскопа гидирования.

Установка в первичном фокусе БТА тяжелых электронно-оптических приборов (длиннощелевых, многообъектных и панорамных спектрографов, редукторов фокуса и пр.) для регистрации изображений в большом поле потребовала поиска новых конструктивных решений для внеосевого гидирования. Использование в первичном фокусе схем, аналогичных кассетеновскому адаптеру 3.6-м телескопа ESO [2], сопряжено с рядом трудностей. Большая светосила пучка ($f/4$) и малый вынос фокальной плоскости над плоскостью поворотного стола не позволяют реализовать оптико-механическую схему с подвижными полями с использованием линзовых коллективов.

Для первичного фокуса БТА была разработа-

*E-mail: vafan@sao.ru

на платформа-адаптер. Она проходила поэтапную модернизацию, в том числе в результате появления новых технологий и программных решений. На настоящий момент можно говорить о четырех ее версиях:

1. В первом варианте адаптера изображения полей гидирования сводились в одно поле с помощью жгутов оптических световодов. Входные торцы жгутов двигались в радиальном и тангенциальном направлениях в фокальной плоскости телескопа, а выходные — располагались неподвижно в фокальной плоскости окуляра гидирования. Поиск звезд осуществлялся наблюдателем вручную, а гидирование по звездам — визуально. Впервые на БТА такая система гидирования была применена в 1979 г. для оптического отождествления радиосточников 5С-обзора с электронно-графической камерой МакМиллана [3]. Хорошее качество гидирования позволяло получать очень глубокие снимки с этой камерой и выполнять наблюдения слабых галактик до 25 звездной величины [4].
2. Следующая версия платформы-адаптера была снабжена лампой для калибровки шкалы длин волн, а изображение со жгутов световодов передавалось на телевизионную камеру ЛИ-702 с предусилением на ЭОП. Управление адаптером осуществлялось с помощью дистанционного пульта по длинной линии связи из комнаты наблюдателей, расположенной в башне БТА. Начиная с 1990 г. этот адаптер применялся для наблюдений с тремя версиями панорамного (integral-field) спектрографа MPFS [5, 6] и многообъектным спектрографом MOFS [7]. Он же применялся и для первых наблюдений с многорежимным редуктором первичного фокуса SCORPIO [8].
3. Начиная с 2001 г. наблюдения с приборами SCORPIO и MPFS продолжились с новым адаптером, в конструкцию которого были внесены принципиальные усовершенствования: установлены линзовые корректоры гидировочных полей, исправляющие кому главного зеркала, добавлены лампа «плоского поля», механизм фокусировки жгутов световодов и регулируемая подсветка крестов нитей, модернизирована оптика калибровки, обеспечивающая телецентрическую засветку от интегрирующей сферы. Управление всеми подвижными узлами и лампами осуществлялось с помощью микропроцессора, который, в свою очередь, контролировался управляющим компьютером в первичном фокусе телескопа. С 2007 г. вместо телевизионной трубки в подсмотре была установлена ПЗС-камера. На основе каталога USNO 2.0 был реализован автоматический поиск звезд для

гидирования. Этот вариант адаптера, описанный в статьях [8, 9], до сих пор (лето 2017 г.) используется с прибором SCORPIO для дистанционных наблюдений, проводимых с нижней научной площадки САО, удаленной от БТА на 5 км.

Новая, четвертая, версия платформы-адаптера представлена в настоящей работе. При ее создании был учтен опыт использования перечисленных модификаций и добавлены такие возможности, как коррекция фокуса телескопа во время экспозиции и контроль прозрачности атмосферы. Общая схема адаптера и особенности её реализации описаны в Разделе 2, Раздел 3 касается гидирования и свойств подсмotra, в Разделе 4 рассматриваются особенности калибровочного модуля, основные тезисы работы даны в Заключении.

2. ОПИСАНИЕ АДАПТЕРА

2.1. Общая схема

Адаптер устанавливается на поворотном столе в кабине первичного фокуса БТА и применяется как для внеосевого гидирования, так и для телецентрической засветки входа устанавливаемого на нем прибора различными калибровочными источниками света. Кроме фокального редуктора SCORPIO-2 на нем могут быть установлены и другие спектрографы весом до 150 кг и рабочим отрезком не более 40 мм.

На рис. 1 приведена схема адаптера. В адаптере имеются два подвижных поля для поиска опорных звезд. Свет от такой звезды сначала попадает на внеосевой линзовый корректор (3), который компенсирует кому главного зеркала телескопа. Далее диагональное зеркало (4) перебрасывает свет на входной торец жгута световодов (5), который вместе с зеркалом перемещается по полю в двух перпендикулярных направлениях линейными подвижками фирмы STANDA¹. Угловой диаметр жгута световодов в проекции на небесную сферу при этом составляет 54", а размер поля для его перемещения — 10' × 4"5. Центры гидировочных полей находятся на расстоянии 12' от центра полей зрения системы, относительное расположение полей показано далее в Подразделе 3.2. Изображения выходных торцов световодов проецируются линзой (6) и направляются призмой (7) и диагональным зеркалом (9) на фокальную плоскость светоприемника подсмotra (8). Зеркало (9) имеет два рабочих положения — FIBERS (9a) и FIELD (9b). На рис. 1 показаны оба положения. При положении FIBERS свет от объектов наблюдения принимается аппаратурой, установленной на

¹<http://www.standa.lt/>

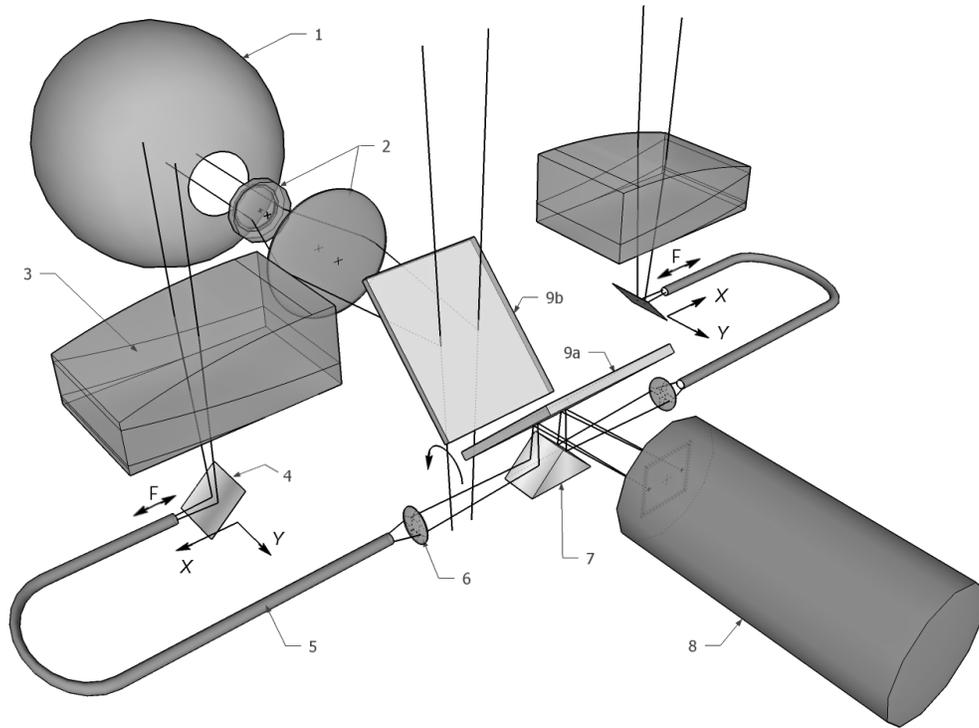


Рис. 1. Оптическая схема платформы-адаптера: (1) — интегрирующая сфера, (2) — оптика осветителя калибровки, (3) — внеосевой линзовый корректор, (4) — зеркало, (5) — жгут световодов, (6) — линза световода, (7) — отражающая призма, (8) — подсмотр, (9) — диагональное зеркало (показаны оба положения: (9a) — FIBERS, (9b) — FIELD).

адаптере (зеркало выведено из пучка), а подсмотр принимает изображения опорных звезд. В положении FIELD диагональное зеркало передает изображение основного поля зрения на подсмотр (зеркало перекрывает центральный пучок), что позволяет делать отождествление поля, в том числе устанавливая на щель яркие объекты. Размер поля FIELD на подсмотре составляет $3' \times 2'$. В этой же позиции зеркала проводится калибровка основного приемника с помощью интегрирующей сферы (1). Подробнее калибровочный модуль описан в Разделе 4.

2.2. Внеосевой линзовый корректор

Основной проблемой при внеосевом гидировании на БТА является aberrация комы параболического зеркала. Штатный корректор исправляет aberrации в поле диаметром $18'$ и не может быть использован в нашей схеме, поскольку устанавливаемые на адаптер приборы работают без линзового корректора. Нами разработан и изготовлен относительно простой двухлинзовый корректор из отечественных стекол К8 и ТФ3. Корректор ахроматизован в диапазоне $0.5\text{--}0.7\ \mu\text{м}$ и дает эквивалентное фокусное расстояние телескопа $18.5\ \text{м}$. Оптическая схема корректора представлена

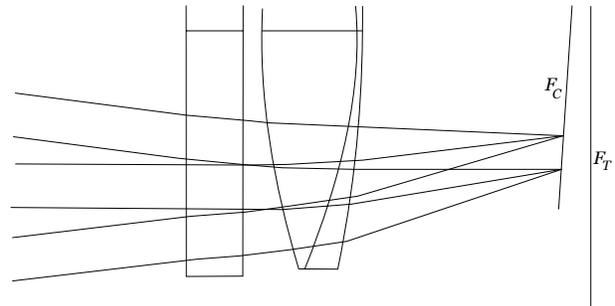


Рис. 2. Оптическая схема внеосевого линзового корректора.

на рис. 2. Фокальная поверхность корректора F_C в пределах движения жгута световодов в первом приближении плоская. Ее наклон к фокальной плоскости телескопа F_T составляет $3^\circ 9'$.

На рис. 3 показан результат исправления комы на расстоянии примерно $12'$ от оси главного зеркала. Расчетная полихроматическая функция рассеяния скорректированного изображения показана на рис. 4. Как видно на рисунке, качество ($FWHM$) формируемого совместно с корректором изображения не хуже $40\ \mu\text{м}$, что соответствует примерно $1''$; этого вполне достаточно для гиди-

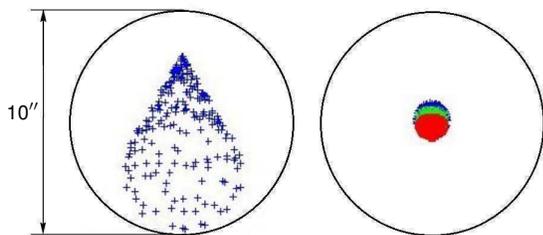


Рис. 3. Расчетные точечные диаграммы на расстоянии примерно $12'$ от оси главного зеркала: слева — без корректора, справа — с корректором.

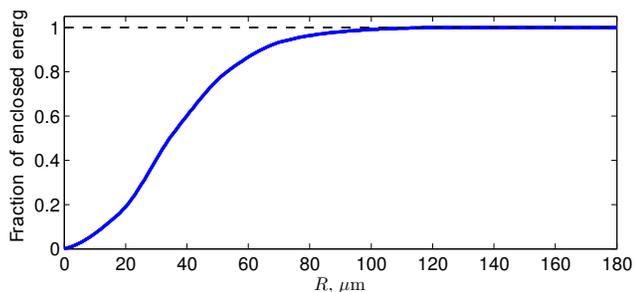


Рис. 4. Средняя концентрация энергии в кружке (пятне) рассеяния в пределах диапазона расстояний $8-15'$ от оптической оси.

рования. Расчеты оптической схемы сделаны при помощи программы ZEMAX².

2.3. Подсмотр

Вначале мы использовали в качестве подсмотров телевизионные передающие трубки ЛИ-702 с предусилением на ЭОП с микроканальной пластиной. Начиная с 2007 г. в качестве подсмотра для гидрирования используется промышленный монохромный приемник ПЗС Sony ICX429ALL формата $1/2$ дюйма. Число элементов — 582×752 . Управление его параметрами осуществляется с помощью интерфейса RS-232, а оцифровка изображения производится TV-тюнером. К концу 2017 г. планируется переход на коммерческую камеру Atik Titan³ на основе аналогичного приемника Sony ICX424 с передачей изображений в компьютер по интерфейсу USB.

На рис. 5 (слева) приведен пример изображения основного поля звезд — FIELD. Для наглядности приведены значения звездных величин в полосе R для некоторых звезд. Для режима FIELD размер поля составляет $3' \times 2'$. Справа на рис. 5 приведен

пример изображения от световодов — FIBERS. Из-за поглощения в световодах в режиме FIBERS пропускание в два раза ниже, чем в режиме FIELD. Однако чувствительности приемника достаточно для уверенной регистрации безлунного фона неба.

2.4. Система управления

Управление адаптером реализовано аналогично управлению другими узлами прибора SCORPIO-2. Разработаны две платы, оснащенные микропроцессорами ATmega8535L и силовыми микросхемами для управления семью шаговыми двигателями и калибровками адаптера. Одна плата управляет четырьмя двигателями перемещения двух гидрировочных полей по координатам X, Y и двумя двигателями фокусировки этих полей. Вторая плата управляет двигателем переброса диагонального зеркала FIELD/FIBERS, лампой линейчатого спектра (NEON), лампой непрерывного спектра (QUARTZ) и работой 32 светодиодов, формирующих плоское поле.

Пределы перемещений всех подвижек контролируются концевыми выключателями. Текущее положение гидрировочных полей (X, Y) и величина фокуса рассчитываются по числу пройденных шагов от начального положения. Внешние команды управления на микропроцессоры передаются по стандартному интерфейсу RS-422 от управляющего промышленного компьютера, работающего в среде Windows. Программы микропроцессоров настроены на самостоятельную работу: получив команду, они выполняют ее и по запросу управляющего компьютера сообщают о результатах. Интерфейс управления адаптером написан на языке IDL⁴ и интегрирован в общую систему управления прибором SCORPIO-2.

3. ГИДРИРОВАНИЕ

После наведения на исследуемый объект перед началом гидрирования наблюдатель выполняет ряд подготовительных процедур, включающих поиск опорных звезд, подбор оптимальной яркости на подсмотре, предварительное центрирование. Потом запускается программа гидрирования. В случае отклонения центра изображения звезды от заданного наблюдателем положения на подсмотре она отправляет управляющей телескопом программе поправки для коррекции.

²<http://www.zemax.com/>

³<https://www.atik-cameras.com/product/atik-titan/>

⁴<http://www.harrisgeospatial.com/>

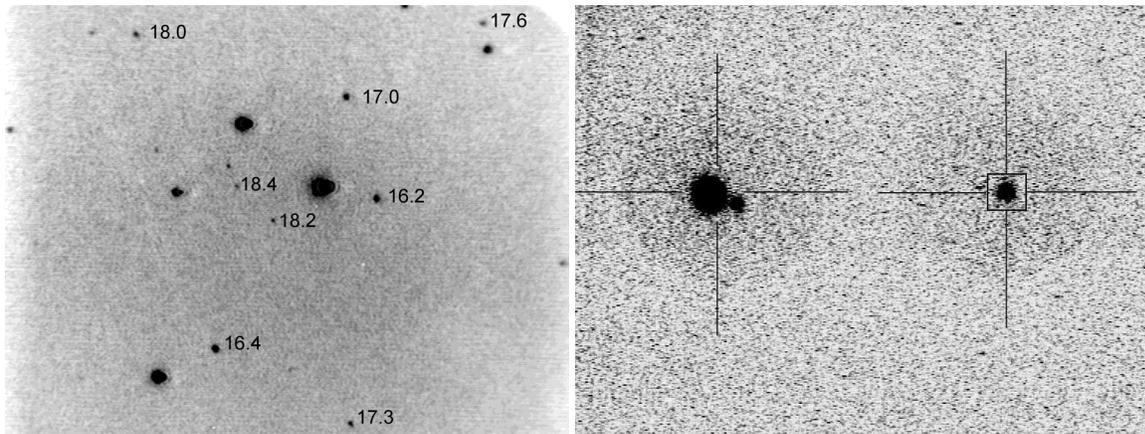


Рис. 5. Пример изображений в режиме FIELD (слева) и FIBERS (справа). Указаны звездные величины слабых звезд в полосе R по данным USNO 2.0.

3.1. Программа поиска опорных звезд

Для ускорения процесса наведения и поиска опорных звезд мы используем пакет программ IDENTSTAR, написанный на языке IDL и позволяющий по переданным из управляющего компьютера БТА координатам и ориентации поворотного стола вычислять текущие инструментальные координаты полей звезд гидирования в поле зрения адаптера. На рис. 6 показан вид интерфейса программы поиска звезд.

После запуска программа считывает с сервера БТА текущие координаты телескопа и выбирает из каталога USNO 2.0 координаты всех звезд ярче 20^m в данной площадке неба радиусом $15'$. Большой центральный квадрат в окне отмечает положение поля зрения SCORPIO-2 ($6' \times 6'$), прямоугольниками выделены положения пределов перемещения полей гидирования, внутри которых программа ищет звезды для гидирования. Маленькими кружками, размеры которых соответствуют диаметрам жгутов световодов, выделены наиболее яркие звезды, которые были автоматически выбраны программой. Их звездные величины и положение в системе координат платформы-адаптера отображаются в правых нижних полях окна программы. При необходимости наблюдатель может выбрать другую опорную звезду из доступных в поле. Одновременно со звездной картой из каталога на подсмотре отображается расчетная конфигурация звезд в положениях FIELD/FIBERS. Как показывает опыт наблюдений, время на поиск и установку звезд гидирования обычно не превышает нескольких минут. При этом предварительная установка звезд во время перенаведения телескопа с одного объекта на другой.

3.2. Программа гидирования

Для автоматического гидирования по выбранной звезде используется программа TVGuide, написанная нами в среде IDL, а оцифровка изображения подмотра с кадровой частотой 25 Гц производится с помощью программы работы с телевизионным тюнером типа AverMedia, написанной на языке C++ Ивановым Е. А. Кроме визуализации изображения с подмотра программа позволяет накладывать на изображение электронные кресты и метки. В зависимости от положения зеркала адаптера в большом окне программы на изображении отображаются либо положение щели в поле FIELD с исследуемым объектом, либо два креста в полях гидирования FIBERS, в центры которых захватываются звезды.

3.3. Предельные звездные величины

В процессе гидирования тюнер опрашивает выход подмотра с частотой 25 кадров в секунду; для улучшения шумовых характеристик изображения усредняются скользящим средним с окном от 2 до 50 кадров.

Измерения предельных величин звезд, пригодных для гидирования, проводились в ноябре 2015 г. при ясном небе и качестве изображений $\theta = 1'' - 1''.5$. График оценок потока опорных звезд в зависимости от их звездной величины по каталогу USNO 2.0 приводится на рис. 7. Интенсивность была предварительно скорректирована за коэффициент усиления ПЗС-подмотра, настраиваемый отдельно для каждой опорной звезды. Штриховые линии показывают уровни шума ночного неба с порогом обнаружения $3\sigma_{NS}$ и $5\sigma_{NS}$. Линия регрессии пересекает штриховые линии в точках 18^m0 и 17^m4 , что дает предельные звездные величины в полосе R для отношений сигнала к шуму $S/N = 3$

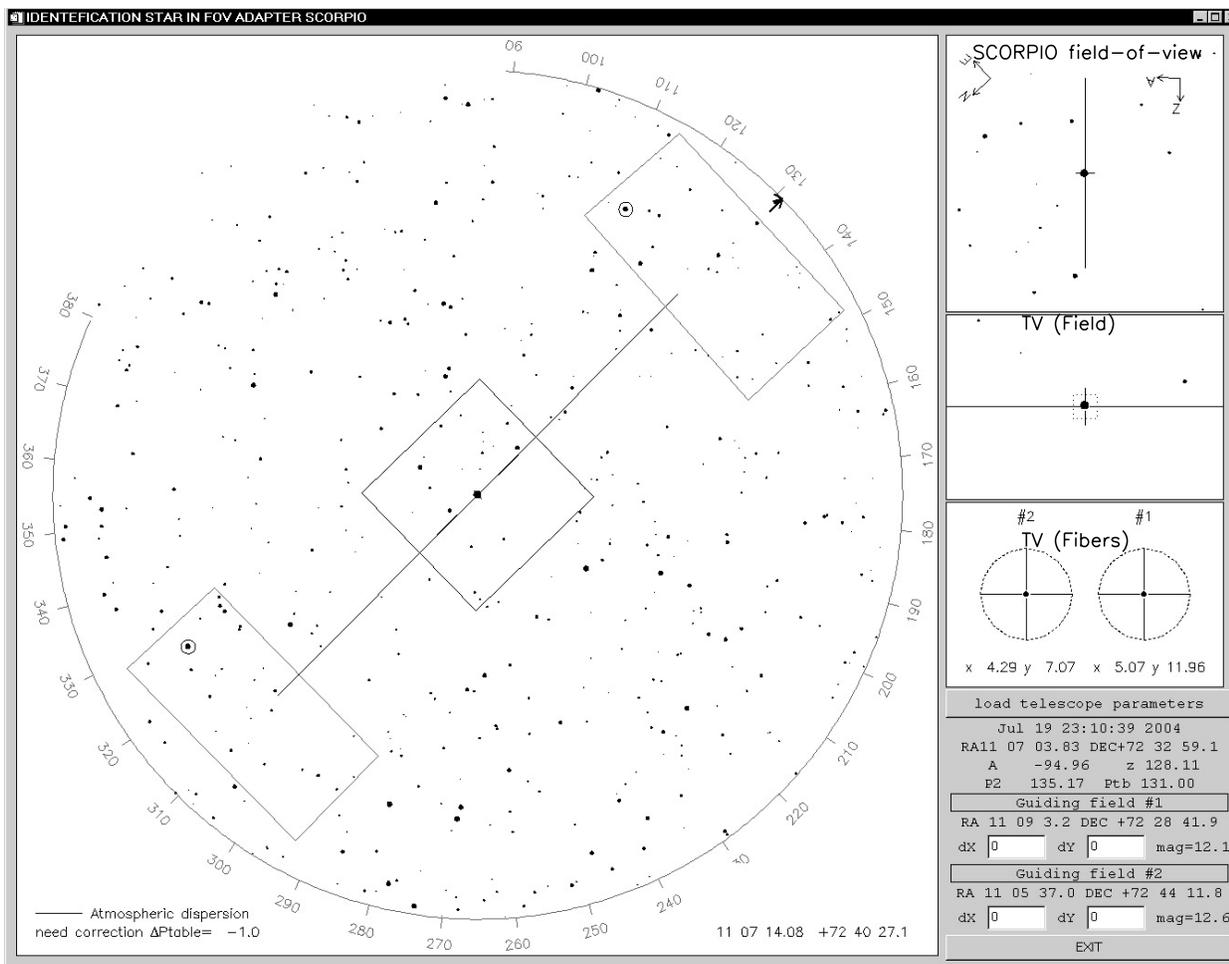


Рис. 6. Интерфейс программы поиска опорных звезд.

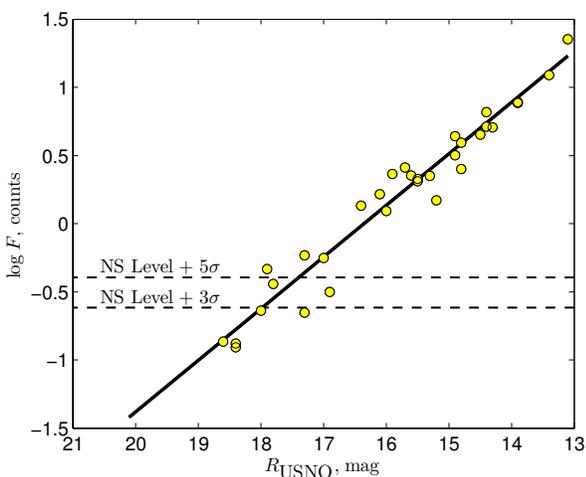


Рис. 7. Логарифмы потоков опорных звезд $\lg F$ в зависимости от их звездной величины R_{USNO} . При считывании изображений использовался режим скользящего среднего по 10 кадрам.

и 5 соответственно. Оптимальным для гидирования является диапазон звездных величин 10^m-15^m . Гидирование по звездам слабее 15^m возможно только при хорошем качестве изображений и достаточной прозрачности.

Следует отметить, что из-за особенностей системы управления БТА автоматическая коррекция координат осуществляется с частотой не более 0.1 Гц.

3.4. Контроль прозрачности атмосферы и качества гидирования

Калибровка нуля-пункта для каждого жгута световодов подсмотра осуществлялась по наблюдениям реальных звезд при хорошей прозрачности. Ее результаты представлены на рис. 8.

После проведенных нами процедур калибровки стал возможен количественный контроль прозрачности атмосферы по опорным звездам. Отметим, что в ходе наблюдений калибровочные зависимости продолжают уточняться. Систематические ошибки

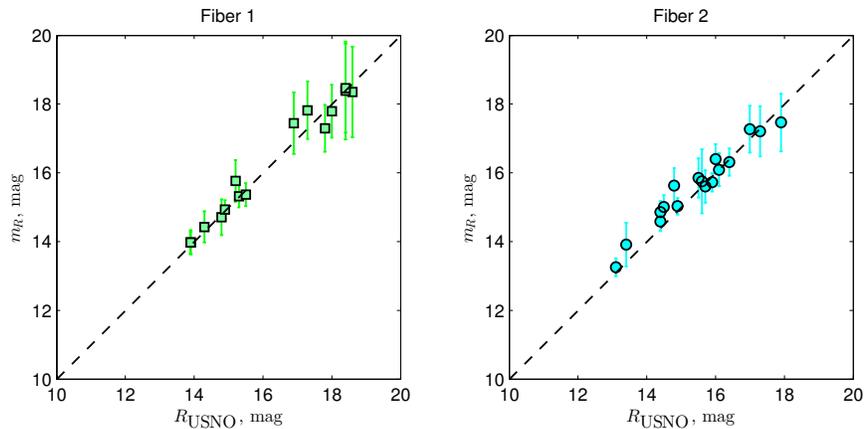


Рис. 8. Калибровка подсмotra: по оси абсцисс — звездные величины в фильтре R , взятые из каталога USNO 2.0, по оси ординат — инструментальные величины m_R с учетом рассчитанного нуля-пункта.

измерения поглощения в атмосфере из-за несоответствия кривой чувствительности приёмника подсмotra и кривой пропускания фильтра R_{USNO} по нашим оценкам не превышают $0^m.5$.

Для контроля качества гидирования на монитор управляющего компьютера может выводиться график, на котором отображаются: текущее значение поглощения, размер изображения опорной звезды и величины коррекции по азимуту и зенитному расстоянию (см. рис. 9).

3.5. Фокусировка

Входной торец каждого из гидировочных жгутов перемещается вдоль оптической оси в пределах $0-9.7$ мм для фокусировки опорной звезды (см. рис. 1). Это дает возможность проводить при необходимости коррекцию фокуса телескопа во время длительной (более одного часа) серии спектральных экспозиций. Опыт наблюдений на БТА показывает, что изменения фокуса из-за температурных деформаций штанг трубы телескопа за это время могут превышать $0.1-0.2$ мм, что является существенной величиной в случае хорошего качества изображений ($\theta < 2''$). Выполнив фокусировку телескопа и гидировочных микроскопов перед началом серии экспозиций, можно в дальнейшем контролировать положение лучшего фокуса, используя механизм фокусировки гидировочных полей и осуществлять компенсирующую коррекцию фокусного расстояния телескопа. Наличие двух гидировочных полей позволяет проводить процедуру контроля фокуса по одной из звезд, пока другое поле используется для сопровождения телескопа.

4. КАЛИБРОВОЧНЫЙ МОДУЛЬ

4.1. Общее описание

Калибровочный модуль состоит из интегрирующей сферы (шар Ульбрихта), оптики осветите-

ля калибровки и системы управления. Интегрирующая сфера имеет два осветителя линейчатого спектра, осветитель непрерывного спектра и 32 порта для установки светодиодов в качестве осветителей. Как источник линейчатого спектра используется газоразрядная радиолампа СГЗС с наполнением He-Ne-Ar. Источники непрерывного спектра — одна галогеновая лампа с кварцевым стеклом Osram Halopar-16 50W и серия из 32 светодиодов.

Оптика осветителя калибровки формирует на входе редуктора сходящийся пучок со светосилой, эквивалентной светосиле телескопа ($f/4$). При этом изображение равномерно освещенной площадки на выходе интегрирующей сферы строится там же, где находится изображение зеркала телескопа (выходной зрачок) и, следовательно, выполняется условие телецентризма. Проецируемый диаметр площадки осветителя совпадает с диаметром зрачка. В нашем случае точность выполнения условия телецентризма оказывается не хуже 0.2% . Такое решение позволяет проводить корректную калибровку шкалы длин волн лампой линейчатого спектра и калибровку пропускания системы по полю в различных режимах спектральных наблюдений («плоское поле»).

Выходная площадка интегрирующей сферы освещается тремя способами:

- NEON: лампа с He-Ne-Ar-наполнением для калибровки шкалы длин волн. Используется в режимах щелевой и панорамной спектроскопии, а также при наблюдениях со сканирующим интерферометром Фабри-Перо [10]. Калибровка обычно выполняется каждый раз, когда изменение зенитного расстояния телескопа превышает $10-20^\circ$, с целью учета гнутый прибора.

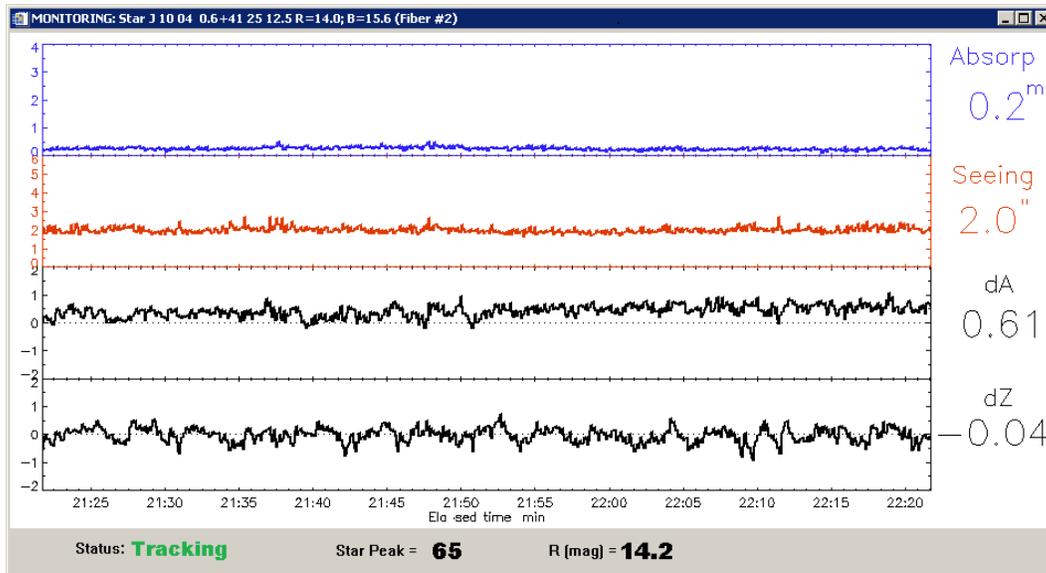


Рис. 9. Интерфейс окна мониторинга изображения опорной звезды. В заголовке окна: координаты звезды, звёздные величины в фильтрах R и B из каталога USNO 2.0, номер жгута световодов. Графики сверху вниз: поглощение в фильтре R , качество изображения, смещение центра опорной звезды по азимуту (в угловых секундах), аналогичное смещение по зенитному расстоянию. Справа: текущие значения; внизу: статусная строка.

- **QUARTZ:** кварцевая галогеновая лампа непрерывного спектра для создания «плоского поля.» Калибровка обычно выполняется в начале и в конце наблюдений в режиме сканирующего интерферометра и несколько раз в течение ночи при спектральных наблюдениях на разных зенитных расстояниях. Существенным недостатком такого осветителя является сильное падение яркости лампы в голубой области, так как максимум ее излучения приходится на длину волны около 1200 нм. Поэтому на длинах волн $\lambda < 500$ нм в наблюдаемый спектр лампы вносится существенный вклад рассеянного света от более длинноволновой части спектра. Применение выравнивающих светофильтров немного улучшает ситуацию.
- **LEDS:** система светодиодов, обеспечивающая формирование непрерывного спектра для «плоского поля» с приблизительно равномерной по спектру яркостью в широком диапазоне длин волн. Это позволяет проводить равноточную засветку плоского поля в различных спектральных диапазонах и уменьшает паразитный рассеянный свет в голубой области. Впервые подобное решение было предложено для фотометрической калибровки на малых телескопах [11, 12] и пока еще не используется на крупных. Например, систему из 18 светодиодов планируется применить в осветителе «белого света» спектрографа EXPRES [13].

Остановимся подробнее на последнем варианте засветки — светодиодной системе LEDS.

4.2. Светодиодная система

Современная промышленность предоставляет широкий ассортимент различных светодиодов (light-emitting diode, LED) во всем оптическом диапазоне. Каждый светодиод излучает непрерывный спектр в узком диапазоне с шириной полосы около 10–20 нм. Подбирая яркости отдельных элементов в наборе таких светодиодов, можно конструировать спектральное «плоское поле» для различных решеток с учетом спектральной чувствительности устанавливаемого на адаптере прибора.

Для управления яркостью отдельных светодиодов мы используем широтно-импульсную модуляцию. При этом на каждый светодиод подается периодический сигнал прямоугольной формы с различной скважностью, изменяющейся дискретно в диапазоне от 0 до 253. Такая реализация наряду с простотой в исполнении обеспечивает высокую стабильность яркости светодиодов. Управление светодиодами осуществляется тем же микропроцессором, который установлен на второй плате (см. Подраздел 2.4). Программа, запускаемая на управляющем компьютере в среде IDL, позволяет выбирать либо стандартную конфигурацию засветки, либо индивидуально настраивать яркости отдельных светодиодов.

Для иллюстрации методики LEDS на рис. 10 приведен пример сконструированного «плоского поля» для решетки VPHG 940@600, имеющей рабочий диапазон 3500–8500 Å.

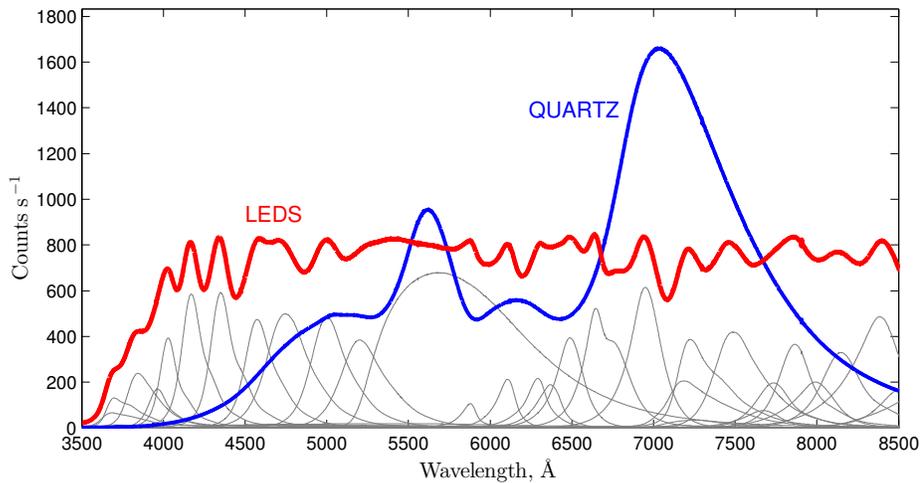


Рис. 10. Спектральные «плоские поля» для решетки VPHG940@600, полученные с помощью кварцевой лампы QUARTZ (с выравнивающим светофильтром) и системы светодиодов (LEDS). Порядковыми номерами показаны спектральные кривые соответствующих светодиодов. Спектры нормированы на экспозицию в 1 секунду.

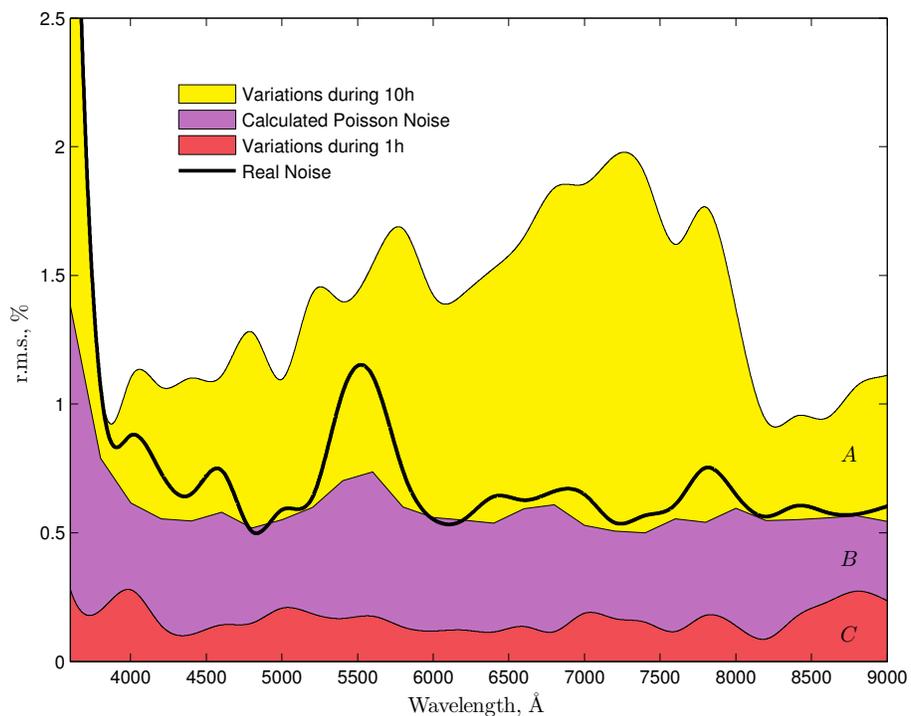


Рис. 11. Относительные вариации спектрального «плоского поля» с решеткой VPHG 940@600, полученного светодиодной засветкой, в зависимости от длины волны.

4.3. Стабильность светодиодов

Калибровочная лампа, состоящая из набора светодиодов, должна обеспечивать повторяемость формы спектра в диапазоне температур $\Delta T = -20\dots+40^\circ\text{C}$. Оценивая стабильность светового потока излучения диода при изменениях

температуры внешней среды T , будем руководствоваться эмпирическим выражением из [14]:

$$F = F_{300} \exp\left(-\frac{T[\text{K}] - 300}{T_1}\right), \quad (1)$$

Температурный коэффициент красных светодиодов

$T, ^\circ\text{C}$	-20	0	27	40
dF/F_{300}	-0.017	-0.014	-0.0105	-0.0009

где F_{300} — поток диода при температуре, близкой к комнатной, T_1 — характеристическая температура для данного класса диодов. Экспериментальные значения параметра T_1 для синих, зеленых и красных диодов — 1600, 295 и 95 К соответственно взяты из [14]. Как видно из (1), поток излучения красных диодов наиболее чувствителен к изменениям температуры и, следовательно, в этом диапазоне вариации формы спектра будут наиболее сильны. Оценим ее стабильность, рассмотрев чувствительность потока красных светодиодов как худший вариант. Возьмем производную от выражения (1):

$$dF/F_{300} = -\exp\left(-\frac{T-300}{T_1}\right) \frac{dT}{T_1} \quad (2)$$

и рассчитаем температурный коэффициент потока при изменении температуры на один градус.

В таблице для иллюстрации эффекта приведены характерные значения производных в рабочем диапазоне температур для красных светодиодов.

При оценке возможных колебаний спектра лампы необходимо учесть, что за время спектральной экспозиции (от 5 до 60 минут) температура в первичном фокусе телескопа изменяется не более чем на 1–2°С.

Для оценки реальной стабильности светодиодной засветки в лаборатории были получены два ряда спектральных «плоских полей» с прибором SCORPIO-2 с использованием решетки VPHG 940@600 — в течение 10 часов с шагом в 1 час и в течение 1 часа с шагом в 1 минуту. На рис. 11 показаны относительные вариации «плоского поля» в зависимости от длины волны. Область *A* показывает разброс для 10-часового эксперимента, что примерно имитирует ситуацию одной наблюдательной ночи. Для сравнения приведена область *B*, соответствующая расчетному пуассоновскому шуму. Пуассоновский шум рассчитывался как $1/\sqrt{N_s} \times \text{gain}$, где N_s — число отсчетов на данной длине волны, gain — коэффициент усиления ПЗС-приемника. Реальный шум в спектре показан жирной линией и хорошо согласуется с теоретическим. Область *C* показывает разброс для 1-часового эксперимента, что примерно имитирует ситуацию наблюдений одного объекта. Видно, что вариации в течение часа (*C*) меньше пуассоновского шума (*B*). Определение вариаций обоих рядов данных и величины пуассоновского шума проводилось в интервалах шириной 200 Å.

Следует отметить, что, несмотря на небольшие колебания температуры внешней среды за 10 часов (в пределах 5°С), мы видим постепенное увеличение амплитуды вариаций от 1% до 2% с ростом длины волны. После 7500 Å вариации падают до 1%, что отражает вклад второго порядка решетки VPHG 940@600, а засветка в этом диапазоне также формируется голубыми светодиодами.

Итак, «плоское поле» получаемое по методике LEDS, дает более равномерную засветку по длинам волн в сравнении с QUARTZ (рис. 10). Было бы разумно предположить, что гибридное «плоское поле» QUARTZ+LEDS, в котором LEDS исправляет недостатки QUARTZ в синем спектральном диапазоне, является оптимальным решением. Однако светодиоды и кварцевая лампа расположены близко друг к другу, и кварцевая лампа при включении сильно прогревается, поэтому при одновременном использовании обеих засветок свойства светодиодов изменяются. Это стоит учитывать при наблюдениях и проектировании аналогичных систем. Мы рекомендуем при спектральных наблюдениях в течение ночи использовать LEDS до QUARTZ (если необходимы оба типа засветки), а также ограничить их использование при калибровках до или после наблюдений.

Тот факт, что светодиоды сейчас широко распространены и относительно дешевы, дает основание полагать, что подобная методика может легко внедряться на современных спектрографах.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Новейшая, четвертая, версия адаптера, разработанная, как и предшествующие две версии, в лаборатории спектроскопии и фотометрии внегалактических объектов САО РАН, с 2012 г. применяется для наблюдений с фокальным редуктором SCORPIO-2 [15].

В отличие от предшествующего варианта адаптера, до сих пор (лето 2017 г.) используемого с прибором SCORPIO, удалось значительно уменьшить хроматическую аберрацию в гидировочных полях, а калибровка плоского поля формируется суммарным излучением линейки светодиодов, что позволило многократно увеличить сигнал в синей части спектра.

Отметим основные особенности представленной платформы-адаптера:

1. Для сведения изображений опорных звезд на подсмотр используются два жгута световодов с возможностью индивидуальной фокусировки во время наблюдений.

2. Благодаря использованию внеосевого линзового корректора исправляется кома изображений опорных звёзд до расстояний примерно $15'$ от оптической оси.
3. Оптика калибровочной засветки выполнена с соблюдением условия телецентризма.
4. Светодиодная система позволяет относительно равномерно по спектру засвечивать приемник CCD с учетом его кривой чувствительности и кривых пропускания гризм.
5. На основе фотометрии изображений опорных звезд в ходе наблюдений осуществляется количественный контроль прозрачности атмосферы и фокусировки телескопа.

Описанная система гидирования и калибровки прошла многолетнюю апробацию на 6-метровом телескопе САО РАН.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа поддержана грантом Российского научного фонда 17-12-101335. Авторы благодарят Е. А. Иванова за разработку программы управления телевизионным тюнером.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В. Ioannisiani, Bull. Spec. Astrophys. Obs. **3**, 3 (1971).
2. S. Milner and M. Ziebell, Messenger **8**, 14 (1977).
3. D. McMullan and R. Powell, New Scientist **73**, 715 (1977).
4. I. Karachentsev, Astronomy Letters **6**, 3 (1980).
5. V. Afanasiev, V. Vlasyuk, S. Dodonov, and O. Sil'chenko, Preprint № 54, SAO RAS (Spec. Astrophys. Obs., Nizhnij Arkhyz, 1990).
6. V. Afanasiev, S. Dodonov, and A. Moiseev, in *Stellar Dynamics: From Classic to Modern*, Ed. by L. P. Ossipkov and I. I. Nikiforov (Sobolev Astron. Inst., St.-Petersburg, 2001), p. 103.
7. V. Afanasiev, V. Vlasyuk, S. Dodonov, and S. Drabek, Report № 242, SAO RAS (Spec. Astrophys. Obs., Nizhnij Arkhyz, 1995).
8. V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev, Astronomy Letters **31**, 194 (2005).
9. V. Afanasiev, E. Gazhur, S. Zhelenkov, and A. Moiseev, Bull. Spec. Astrophys. Obs. **58**, 90 (2005).
10. A. V. Moiseev, Bull. Spec. Astrophys. Obs. **54**, 74 (2002).
11. J. L. Marshall and D. L. DePoy, arXiv:astro-ph/0510233 (2005).
12. J. L. Marshall and D. L. DePoy, Publ. Astron. Soc. Pacific **125**, 1277 (2013).
13. C. Jurgenson, D. Fischer, T. McCracken, et al., Proc. SPIE **9908**, 99086T (2016).
14. E. F. Shubert, *Light-Emitting Diodes* (Cambridge Univ. Press, 2006).
15. V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev, Baltic Astronomy **20**, 363 (2011).

SCORPIO-2 Guiding and Calibration System in the Prime Focus of the 6-m Telescope

V. L. Afanasiev, A. V. Moiseev, V. R. Amirkhanyan, R. I. Uklein, and A. E. Perepelitsyn

We describe a device (adapter) for off-axis guiding and photometric calibration of wide-angle spectrographs operating in the prime focus of the 6-m telescope of the Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences. To compensate coma in off-axis star images an achromatic lens corrector is used, which ensures maintaining image quality ($FWHM$) at a level of about $1''$ within $15'$ from the optical axis. The device has two $54''$ -diameter movable guiding fields, which can move in $10' \times 4'5$ rectangular areas. The device can perform automatic search for guiding stars, use them to control the variations of atmospheric transmittance, and focus the telescope during exposure. The limiting magnitude of potential guiding stars is $m_R \sim 17^m$. The calibration path whose optical arrangement meets the telecentricism condition allows the spectrograph to be illuminated both by a source of line spectrum (a He–Ne–Ar filled lamp) and by a source of continuum spectrum. The latter is usually represented either by a halogen lamp or a set of light-emitting diodes, which provide illumination of approximately uniform intensity over the wavelength interval from 350 to 900 nm. The adapter is used for observations with SCORPIO-2 multimode focal reducer.

Keywords: *instrumentation: miscellaneous—methods: observational*