

УДК 520.353:520.84

СПЕКТРОГРАФ НИЗКОГО И СРЕДНЕГО РАЗРЕШЕНИЯ АДАМ ДЛЯ 1.6-М ТЕЛЕСКОПА АЗТ-ЗЗИК

© 2016 В. Л. Афанасьев^{1*}, С. Н. Додонов¹, В. Р. Амирханян^{1,2}, А. В. Моисеев^{1**}¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия²Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва, 119992 Россия

Поступила в редакцию 21 июля 2016 года; принята в печать 5 сентября 2016 года

Описывается конструкция подвешенного спектрографа низкого и среднего разрешения ($R \approx 300\text{--}1300$), разработанного и изготовленного в САО РАН для 1.6-м телескопа АЗТ-ЗЗИК Саянской обсерватории ИСЗФ СО РАН. Приводятся результаты лабораторных измерений параметров прибора и тестовых испытаний на 1-м телескопе Цейсс-1000 САО РАН. Выполнены измерения полной квантовой эффективности системы «спектрограф + телескоп + приемник» на АЗТ-ЗЗИК, которая в максимуме достигает 56%. Такая высокая прозрачность спектрографа позволяет использовать его на 1.6-м телескопе для определения типов и красных смещений объектов с интегральной звездной величиной $m_{\text{ДВ}} \approx 20\text{--}21$, что подтверждается наблюдениями.

Ключевые слова: *инструменты: спектрографы — техники: спектроскопические*

1. ВВЕДЕНИЕ

Возможности спектроскопии слабых галактик и звезд на телескопах умеренного размера — диаметром 1–1.5 метра — определяются эффективностью применяемых спектрографов. Хорошо известные коммерческие универсальные спектрографы фирм Boller & Chivens [1] и Carl Zeiss Jena [2] имеют, несмотря на превосходное качество оптики, низкое (15–20%) пропускание. Последние три десятилетия широкое распространение на больших телескопах получили спектральные приборы с редуцией светосилы, использующие исключительно линзовую оптику. Прототипом таких приборов следует назвать камеру EFOSC 3.6-м телескопа ESO [3]. В конце прошлого века в обсерватории университета Копенгагена (Дания) был изготовлен эффективный спектрометр среднего и низкого разрешения с редуктором поля зрения DFOSC (Danish Faint Object Spectrograph and Camera) [4] для 1.54-м телескопа, который аналогичен EFOSC. Пропускание оптики такого спектрографа более 70%, а полная квантовая эффективность на телескопе с учетом чувствительности ПЗС-приемника порядка 30%. В дальнейшем было изготовлено девять таких спектрографов для оснащения небольших телескопов различных

обсерваторий. Следует отметить, что упомянутые спектрографы многорежимные, что, на наш взгляд, оправдано при наблюдениях на крупных телескопах, где выполнение наблюдательных программ жестко регламентировано. Многорежимные спектрографы имеют большое количество оптических элементов, что снижает их эффективность и делает их использование на малых телескопах нецелесообразным. Малые телескопы эффективнее ориентировать на одну задачу, при этом навесное оборудование должно быть узкоспециализированным. В настоящее время современные оптические элементы (новые типы стекол, AR-покрытия, объемные голографические решетки и пр.) и доступные коммерческие системы с высокоэффективными твердотельными матричными фотоприемниками в принципе позволяют построить спектрограф низкого разрешения с эффективностью более 50–60%.

В настоящей работе описан спектрограф низкого и среднего разрешения (от $R = \lambda/\delta\lambda \approx 300$ до $R \approx 1300$), разработанный для 1.6-м телескопа АЗТ-ЗЗИК Саянской обсерватории Института солнечно-земной физики СО РАН (ИСЗФ). Прибор предназначен для получения спектров слабых галактик и звезд в оптическом диапазоне по программе наземной поддержки космической обсерватории «Спектр-РГ.»

*E-mail: vafan@sao.ru

**E-mail: moisav@sao.ru

Таблица 1. Основные параметры спектрографа АДАМ на телескопе АЗТ-ЗЗИК

| | |
|--|---|
| Эквивалентная светосила | $F/4.1$ |
| Поле зрения | $3'46 \times 3'46$ |
| Масштаб изображения | $0''81 \text{ пиксел}^{-1}$ |
| Спектральный диапазон | $3600\text{--}10\,000 \text{ \AA}$ |
| QE_{max}^* (телескоп + спектрограф + ПЗС) | 56% |
| Спектральное разрешение (для щели шириной $1''5$) | $FWHM = 6\text{--}15 \text{ \AA}$ ($R = 1320\text{--}270$) |

* — максимальная квантовая эффективность

2. КОНСТРУКЦИЯ ПРИБОРА

При конструировании спектрографа нами был учтен опыт создания приборов SCORPIO [5] и SCORPIO-2 [6] для 6-м телескопа, аналогичных EFOSC и ориентированных на удаленное управление. В них мы впервые в отечественной практике астроприборостроения применили объемные фазовые голографические решетки [7], которые эффективнее обычных нарезных решеток на 30–80%.

Разработанный спектрограф устанавливается в фокусе Ричи–Кретьена (эквивалентное фокусное расстояние 30 м) 1.6-м телескопа АЗТ-ЗЗИК на поворотной управляемой платформе. От прибора требуется высокое пропускание в видимом диапазоне, что в сочетании с современным ПЗС-приемником, изготовленным по технологии глубокого обеднения (Deep Depletion), позволит получать спектры слабых (до 21^m) звездобразных объектов в голубом и красном диапазонах за разумное время экспозиции. Для точной установки исследуемого объекта на щель в спектрографе предусмотрен режим получения прямых изображений.

Отметим также, что одно из важнейших требований к спектрографу — бесперебойная работа в диапазоне внешних температур от -30°C до $+20^\circ\text{C}$. Это обусловлено климатическими условиями Саянской обсерватории.

2.1. Оптическая схема

Спектрограф выполнен по традиционной схеме (рис. 1): внеосевой зеркальный коллиматор, формирующий в параллельном пучке выходной зрачок, и катадиоптрическая линзовая камера. Коллиматор имеет фокусное расстояние 500 мм и формирует выходной зрачок диаметром 27 мм. Для уменьшения габаритных размеров спектрографа

используются два дополнительных плоских зеркала, ломающих пучок. Камера спектрографа — шестилинзовый апохромат с фокусным расстоянием 109 мм, состоящий из трех компонентов и имеющий геометрическую светосилу $F/3$. Физическая светосила — отношение фокуса камеры к диаметру коллимированного пучка — равна $F/4.36$. На линзы нанесены просветляющие семислойные покрытия, работающие в диапазоне 0.36–1 мкм и имеющие коэффициент пропускания не менее 98%. Зеркала покрыты отражающим слоем из защищенного серебра, имеющем коэффициент отражения около 99% во всем рабочем диапазоне. Просветляющие и отражающие покрытия рассчитаны и нанесены ООО «Опто-Технологическая Лаборатория»¹. Механические и оптические части спектрографа изготовлены в макетных мастерских САО РАН. Детектором является ПЗС-система NEWTON, описанная ниже в разделе 2.3. Основные характеристики спектрографа приведены в таблице 1.

Эквивалентное фокусное расстояние системы «телескоп + спектрограф» составляет 6584 мм, что соответствует масштабу изображения в плоскости светоприемника 32 мкм на секунду дуги. Размер невиньетированного поля зрения — 3.5×3.5 минуты дуги. В качестве диспергирующих элементов в спектрографе используются объемные фазовые голографические решетки, параметры которых приводятся ниже. Кружок рассеяния в спектрографе не более 15 мкм в диапазоне длин волн 0.35–1.0 мкм. Расчетные точечные диаграммы для двух спектральных диапазонов — синего и красного — показаны на рис. 2.

Телецентрическая оптическая схема блока калибровки состоит из двухлинзового конденсора и линзы поля, которые строят изображения площадки, освещаемой калибровочными лампами, в положении выходного зрачка коллиматора.

2.2. Механическая конструкция спектрографа

Конструктивно прибор выполнен в виде жесткого корпуса из дюралюминия, к которому крепятся различные узлы прибора:

- ПЗС-приемник
- узел калибровки;
- механизм ввода/вывода диагонального зеркала перед щелью;
- турель щелей;
- турель светофильтров;

¹www.optot1.ru

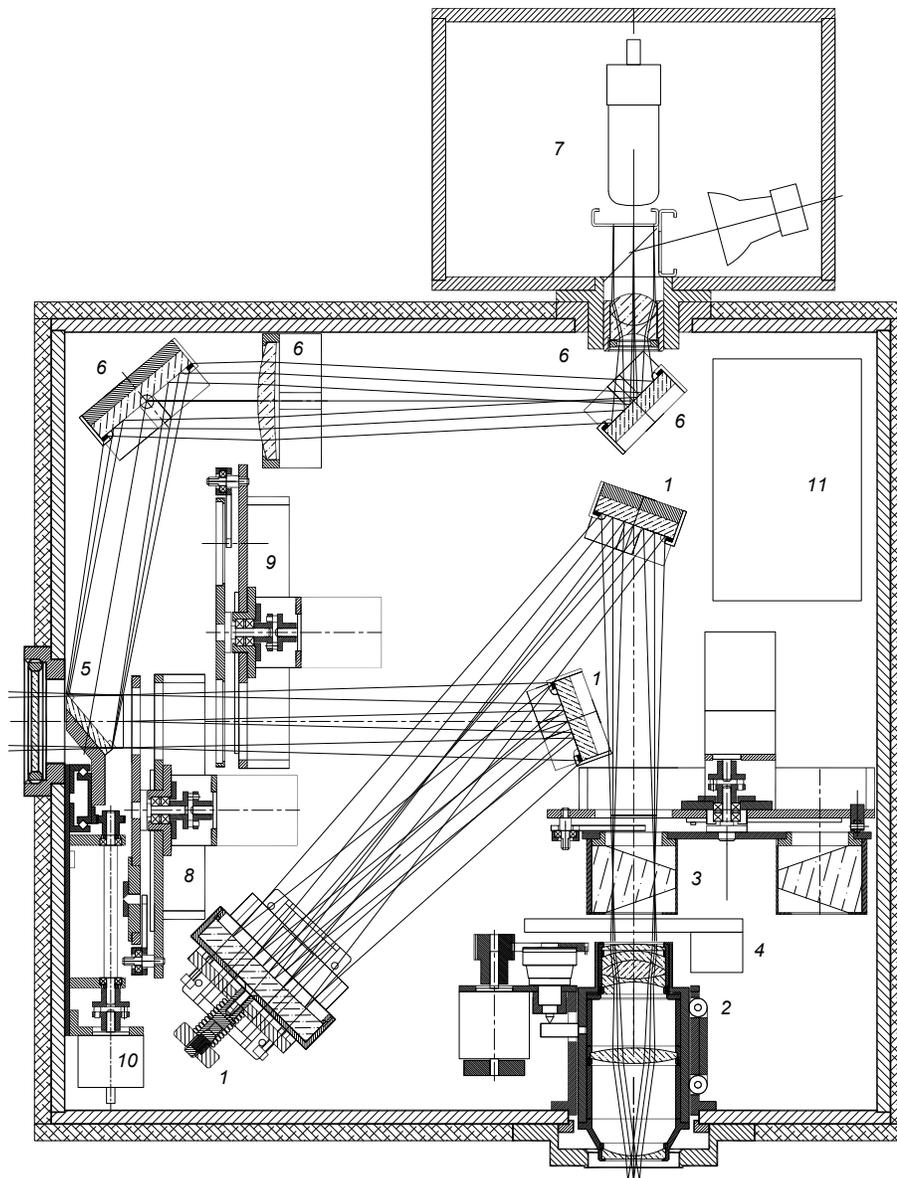


Рис. 1. Оптико-механическая схема спектрографа АДАМ: (1) — коллиматор, состоящий из внеосевого сферического зеркала и двух ломающих пучок плоских зеркал; (2) — камера; (3) — турель дифракционных решеток; (4) — электромеханический затвор; (5) — вводимое зеркало узла калибровки; (6) — проектор узла калибровки, состоящий из двухлинзового конденсора, линзы поля и двух ломающих пучок плоских зеркал; (7) — узел калибровочных ламп (линейчатого и непрерывного спектров); (8) — турель щелей; (9) — турель фильтров; (10) — механизм ввода/вывода зеркала калибровки; (11) — управляющий компьютер.

- турель решеток;
- юстируемое сферическое зеркало коллиматора;
- четыре плоских зеркала и линза поля осветителя калибровки;
- механизм фокусировки камеры спектрографа.

Внутри спектрографа также смонтированы: источники питания, плата управления спектрографом, плата термостата, управляющий компьютер

и панель управления спектрографом. Одна стенка

спектрографа съемная, что открывает доступ ко всем оптико-механическим элементам для юстировки и чистки оптики. Расположение элементов

внутри спектрографа показано на рис. 3. Вес спек-

трографа без поворотного круга и светоприемника составляет 39 кг.

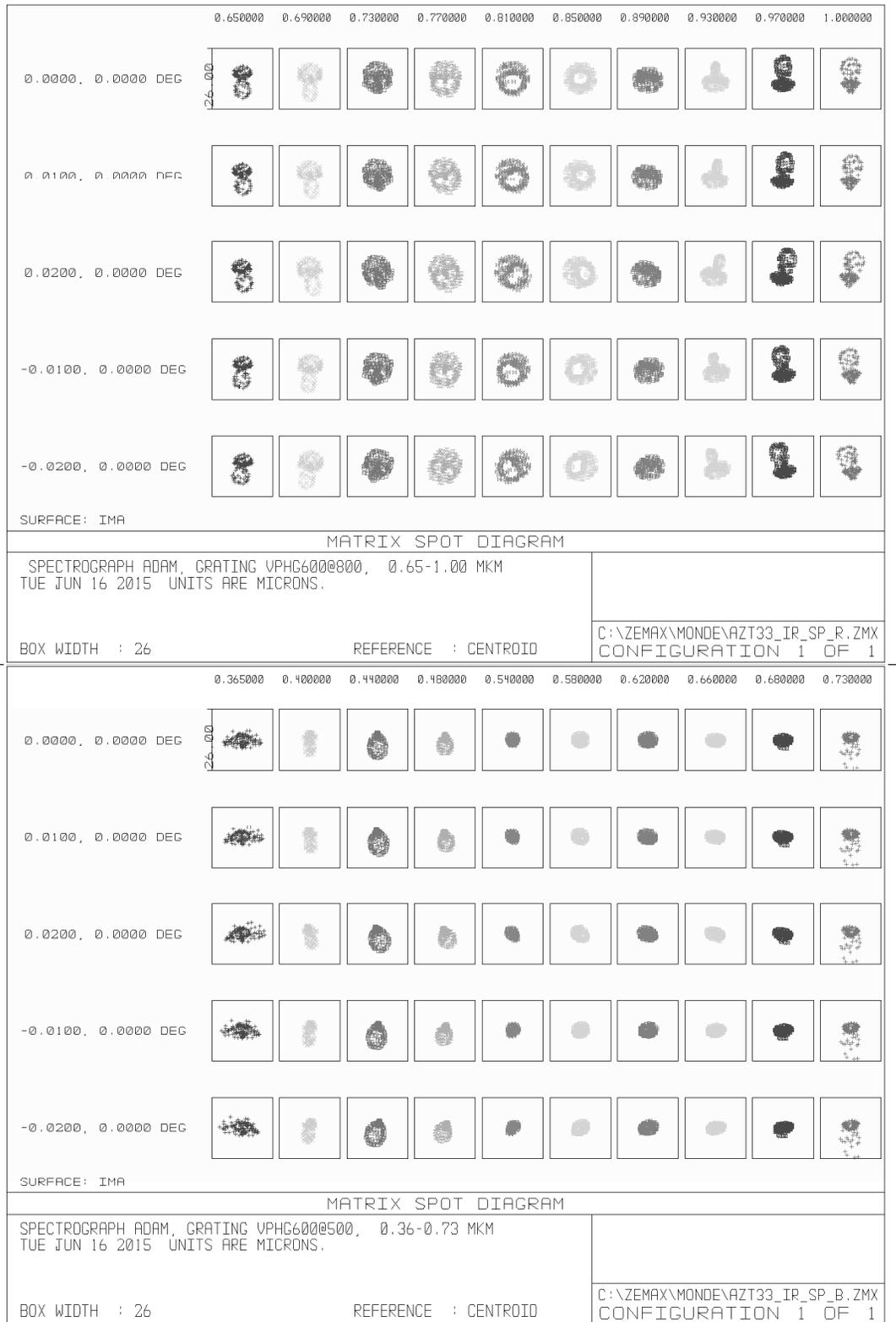


Рис. 2. Расчетные точечные диаграммы в режиме спектроскопии. Вверху — красный диапазон 0.65–1.00 мкм, внизу — голубой диапазон 0.365–0.73 мкм. Размер квадратика 26 мкм, что соответствует размеру 1 пиксела детектора NEWTON.

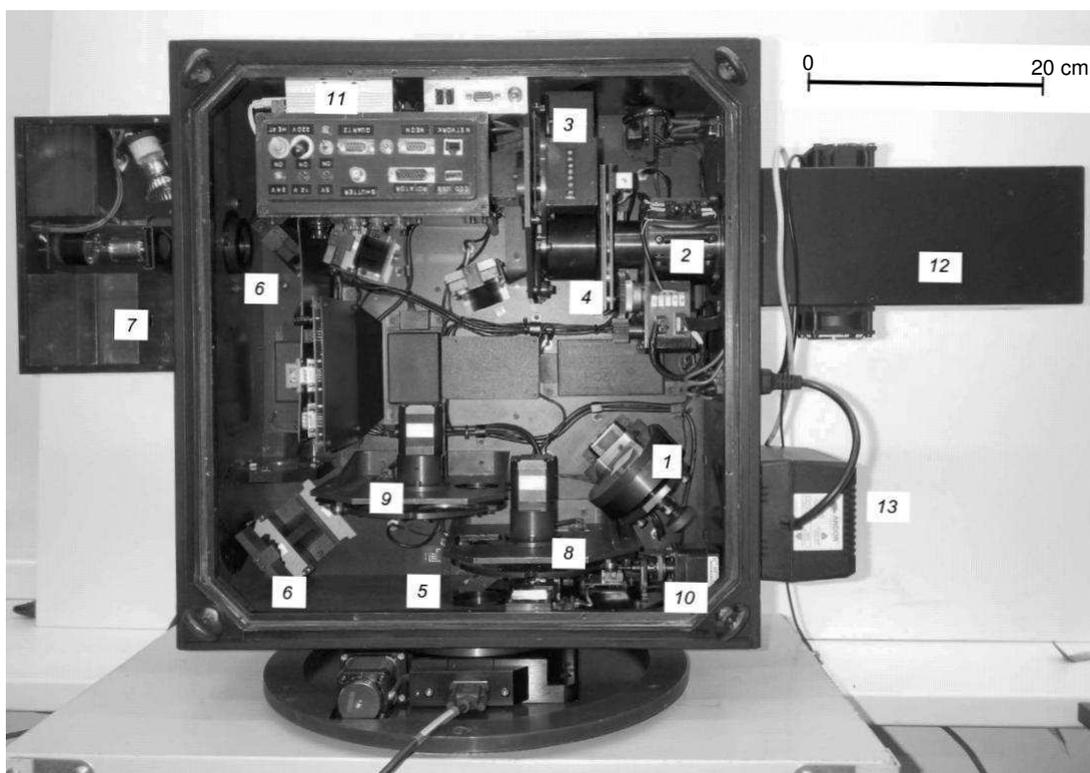


Рис. 3. Вид спектрографа АДАМ со снятой стенкой: (1) — коллиматор, состоящий из внеосевого сферического зеркала и двух ломающих пучок плоских зеркал; (2) — камера; (3) — турель дифракционных решеток; (4) — электромеханический затвор; (5) — вводимое зеркало узла калибровки; (6) — проектор узла калибровки, состоящий из двух линз проектора и двух ломающих пучок плоских зеркал; (7) — узел калибровочных ламп (линейчатого и непрерывного спектров); (8) — турель щелей; (9) — турель фильтров; (10) — механизм ввода/вывода зеркала калибровки; (11) — управляющий компьютер; (12) — ПЗС-камера; (13) — блок питания ПЗС.

2.3. ПЗС-приемник

В качестве фотоприемника используется установка высокочувствительной регистрации оптических сигналов NEWTON, производства ANDOR² (Северная Ирландия) на базе ПЗС-приемника E2V CCD30-11. Камера подключается к управляющему компьютеру через интерфейс USB-2. Основные характеристики прибора, согласно паспорту производителя, приведены в таблице 2. Программа управления спектрографом позволяет устанавливать рабочую температуру ПЗС, выбирать режимы с различными значениями коэффициента усиления (gain), а также скорость и шумом считывания. Данные записываются в виде стандартного FITS-файла с оцифровкой 16 бит.

Система охлаждения ПЗС-камеры на трехступенчатом Пельтье обеспечивает рабочую температуру -100°C . Для отвода тепла с горячей Пельтье используется система жидкостного охлаждения, состоящая из мощного промышленного чиллера CW-3000 и блока климат-контроля

Таблица 2. Параметры ПЗС E2V CCD30-11

| | |
|--|--|
| Тип | Тонкий, с обратной засветкой |
| Формат | 1024 × 256 |
| Размер пиксела | 26 μ × 26 μ |
| QE _{max} | 95% |
| RON* _{min} | 3.5 e ⁻ (T = 100° C) |
| Темновой ток | < 0.3e ⁻ пикс. ⁻¹ мин. ⁻¹ |
| Gain, e ⁻ ADU ⁻¹ | 2.6 (high) 5.2 (normal) 11 (low) |

* — минимальный шум считывания

ВС103. Климат-контроль поддерживает на постоянном уровне температуру теплоносителя, в качестве которого мы используем пропиленгликоль. Рабочая температура теплоносителя 4–5°С, что полностью исключает эффекты запотевания шлан-

²<http://www.andor.com/>

гов, по которым охлаждающая жидкость транспортируется от chillера к ПЗС-камере.

2.4. Блок калибровки

Выходная площадка тракта калибровки освещается двумя калибровочными лампами: с линейчатый спектром для калибровки шкалы длин волн с Ne-Ar-Ne-наполнением (далее лампа NEON) и галогенной лампой непрерывного спектра для создания «плоского поля» (далее лампа FLAT). Для выравнивания яркости линий в красной и синей частях спектра в лампе NEON используется комбинация фильтров СЗС7 и СС1. Лампа FLAT снабжена светофильтром из стекла СЗС7, уменьшающим плотность потока от лампы для длин волн больше 5500 Å, что необходимо для создания более равномерной засветки детектора в спектральном режиме.

2.5. Щели

Турель (1) содержит оправы с пятью щелями для спектральных наблюдений. Ширины щелей жестко фиксированы и соответствуют размеру 1", 1"5, 2", 3" и 10" в фокальной плоскости.

2.5.1. Светофильтры

В турели (2) предусмотрена установка пяти светофильтров диаметром 50 мм и толщиной до 4 мм. В одной из позиций расположен фильтр OS11, отсекающий второй порядок при наблюдениях с решеткой VPHG600R.

2.6. Дифракционные решетки

Турель (3) содержит оправы с тремя гризмами прямого зрения (комбинация прозрачной дифракционной решетки и двух призм). Используются объемные фазовые голографические решетки, изготовленные фирмой Wasatch Photonics³. Параметры решеток приведены в таблице 3.

2.7. Система термостабилизации

Корпус спектрографа покрыт теплоизолирующим материалом. Корпус подвесной части спектрографа обеспечивает температурную стабилизацию прибора на уровне выше +5°C при внешних температурах ниже 0°C. В качестве нагревательных элементов использованы восемь транзисторов 2Т907А, смонтированных на основной плите корпуса спектрографа. Мостовая схема с датчиком

температуры на базе термосопротивления настроена таким образом, что уменьшение температуры корпуса ниже заданной вызывает увеличение коллекторного тока транзисторов. Точность удержания заданной температуры плиты составляет несколько десятых долей градуса. Максимальная мощность, рассеиваемая термостатом — не более 60 Вт.

2.8. Поворотная платформа

Спектрограф установлен на поворотной платформе (Standa⁴, 8MR190-90-4247), обеспечивающей возможность вращения всего прибора вокруг своей оси с целью позиционирования щели на небесной сфере. Поворот осуществляется с относительной точностью около 0°015, что соответствует одному шагу двигателя. Положение нуль-пункта контролируется с помощью датчика Холла. Чтобы избежать перекручивания кабеля, программа управления разрешает поворот только в пределах ±90° относительно нулевого положения.

3. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ

3.1. Электроника управления

Процесс наблюдения включает в себя переход из режима прямых снимков в спектральный режим, смену фильтров, решеток, включения калибровок и т.д. Именно эту задачу решает встроенная в спектрограф система управления. Ее «мозгом» является промышленный компьютер ARK-1122F (производства Advantech). Команды компьютера принимает микропроцессор Atmega8535 и через силовые элементы передает их исполняющим механизмам. В нашем случае такими механизмами являются:

- (1) затвор;
- (2) турель щелей (1) на шесть позиций;
- (3) турель фильтров (2) на шесть позиций;
- (4) турель решеток на четыре позиции;
- (5) ввод/вывод зеркала засветки калибровок;
- (6) фокус камеры;
- (7) поворотный стол;
- (8) калибровочная лампа плоского поля;
- (9) калибровочная лампа с линейчатым спектром.

³<http://wasatchphotonics.com/>

⁴<http://www.standa.lt/>

Таблица 3. Параметры гризм

| Название | Штрих, мм ⁻¹ | Спектральный диапазон, Å | Дисперсия, Å пикс. ⁻¹ | Спектральное разрешение R (щель 1''5) |
|----------|-------------------------|--------------------------|----------------------------------|---|
| VPHG300 | 300 | 3507–10307 | 6.4–7.6 | 273–678 |
| VPHG600G | 600 | 3588–7251 | 3.2–3.7 | 561–980 |
| VPHG600R | 600 | 6430–10031 | 3.2–3.6 | 1005–1319 |

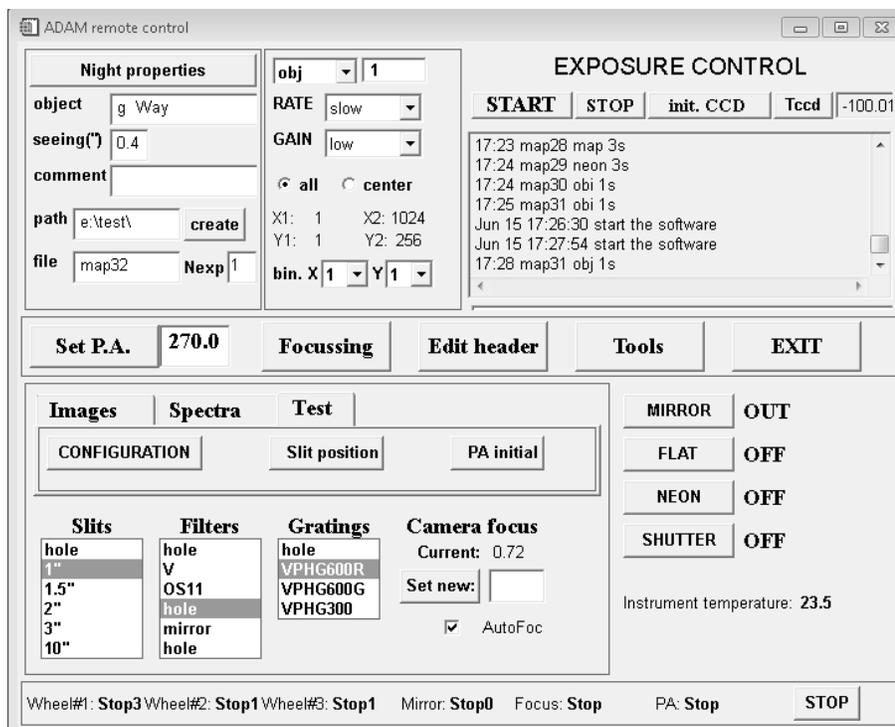


Рис. 4. Меню управления спектрографом.

Затвор приводится в действие соленоидом, механизмы со (2) по (7) — шаговыми двигателями, калибровочные лампы — подачей высокого напряжения. Встроенная в микропроцессор программа не только запускает механизмы, но и определяет логику их работы и контролирует их состояние. Для упрощения монтажа и повышения ремонтнопригодности исполнительных механизмов на них смонтированы локальные платы, на которые вынесена часть элементов системы управления. Это датчики положения, электронные ключи, разъемы. Температура несущей плиты спектрографа контролируется датчиком LM75.

Вышеперечисленные технические решения позволили значительно сократить количество внешних коммуникаций, снизить интеллектуальную нагрузку

ку на компьютер и упростить модификацию режима работы спектрографа.

3.2. Программы управления

Компьютер АРК-1122F с программами, управляющими спектрографом и контролирующими его состояние и сбор наблюдательных данных, работает под операционной системой Windows7. Интерфейс управления написан на языке IDL⁵ и позволяет передавать команды как локальному микропроцессору, так и серверу ПЗС (программы Фатхулина Т. А.). На рис. 4 показано главное меню управления экспозициями и спектрографом. Наблюдатель может находиться в удаленном от

⁵<http://www.harrisgeospatial.com/>

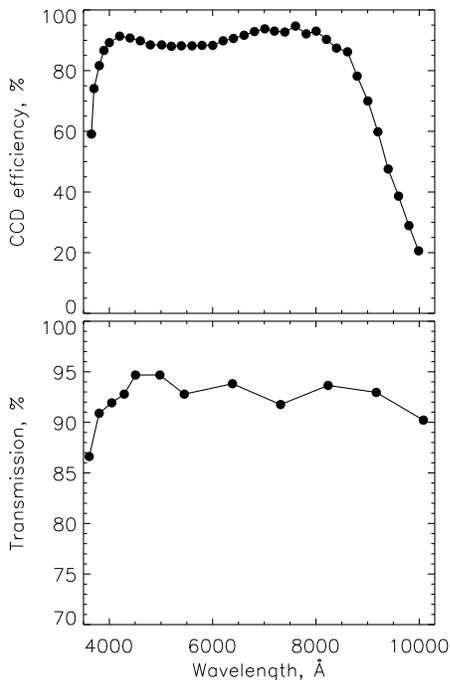


Рис. 5. Результаты лабораторных измерений квантовой эффективности ПЗС (вверху) и пропускания оптики спектрографа без призм (внизу).

телескопа помещении и управлять прибором по протоколу TCP/IP с помощью комплекса удаленного администрирования компьютеров NetOp⁶.

Все параметры текущего состояния спектрографа (расположение подвижных элементов, температура и т.д.), а также основные параметры телескопа (координаты, фокус) автоматически сохраняются в заголовке FITS-файлов с накоплениями.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТОВЫХ ИСПЫТАНИЙ

4.1. Лабораторные тесты

После изготовления спектрографа нами были проведены лабораторные измерения критических для эксплуатации параметров, таких как пропускание оптики, квантовая эффективность и др.

4.1.1. Квантовая эффективность ПЗС

Измерения проводились при помощи монохроматора МДР-41 в интервале длин волн 0.36–1.0 мкм. В качестве источника света использовалась галогенная лампа, а детектирование осуществлялось калиброванным охлаждаемым кремниевым светодиодом фирмы Optronic Laboratory. Поток от светодиода регистрировался радиометром OL730D

той же фирмы. Измерения показали, что квантовая эффективность соответствует паспортным данным ПЗС E2V CCD30-11 — более 90% в диапазоне 0.42–0.83 мкм и более 40% на краях диапазона измерений (рис. 5).

4.1.2. Пропускание оптики

Для определения пропускания оптики без диспергирующих элементов было проведено сравнение монохроматического потока на входе и выходе спектрографа в интервале длин волн 0.36–1.0 мкм. Источник монохроматического излучения со светосилой $F/20$ формировался при помощи монохроматора Jarrel Ash и галогенной лампы. Измерения проводились с фотодиодом ФД-4А. Таким образом было измерено относительное спектральное пропускание спектрографа. Абсолютное пропускание было определено по излучению лазера на длине волны 0.6438 мкм. Как показали наши измерения, пропускание оптики спектрографа составляет 90–95% практически во всем рабочем диапазоне длин волн (рис. 5).

4.1.3. Качество изображений

Качество изображения в спектральном режиме оценивалось по фокусирующим зависимостям для серий спектров, полученных с разными величинами фокуса камеры и в различных позициях по высоте щели. Измерения показали, что в пределах каустики, которая не превышает значения 0.1 мм вокруг наилучшего фокуса камеры, размер $FWHM$ щели не превышает величины 1.4 пиксела. Монохроматический размер секундной щели равен 1.22 пиксела. Таким образом можно заключить, что кружок рассеяния оптики в спектральном режиме составляет не более 0.5 пиксела (13 мкм). Величина вторичного спектра в спектрографе не превышает 0.1 мм.

4.1.4. Механические гнутыя

Важнейшей характеристикой любой системы регистрации в астрономии является величина гнутыя, определяемая по смещению регистрируемого изображения при изменении положения инструмента на телескопе. Измерения показали, что максимальная величина гнутыя, определенная при вращения спектрографа вокруг оптической оси, установленной в горизонтальное положение, не превышает ± 10 мкм.

⁶<http://www.netop.ru/>

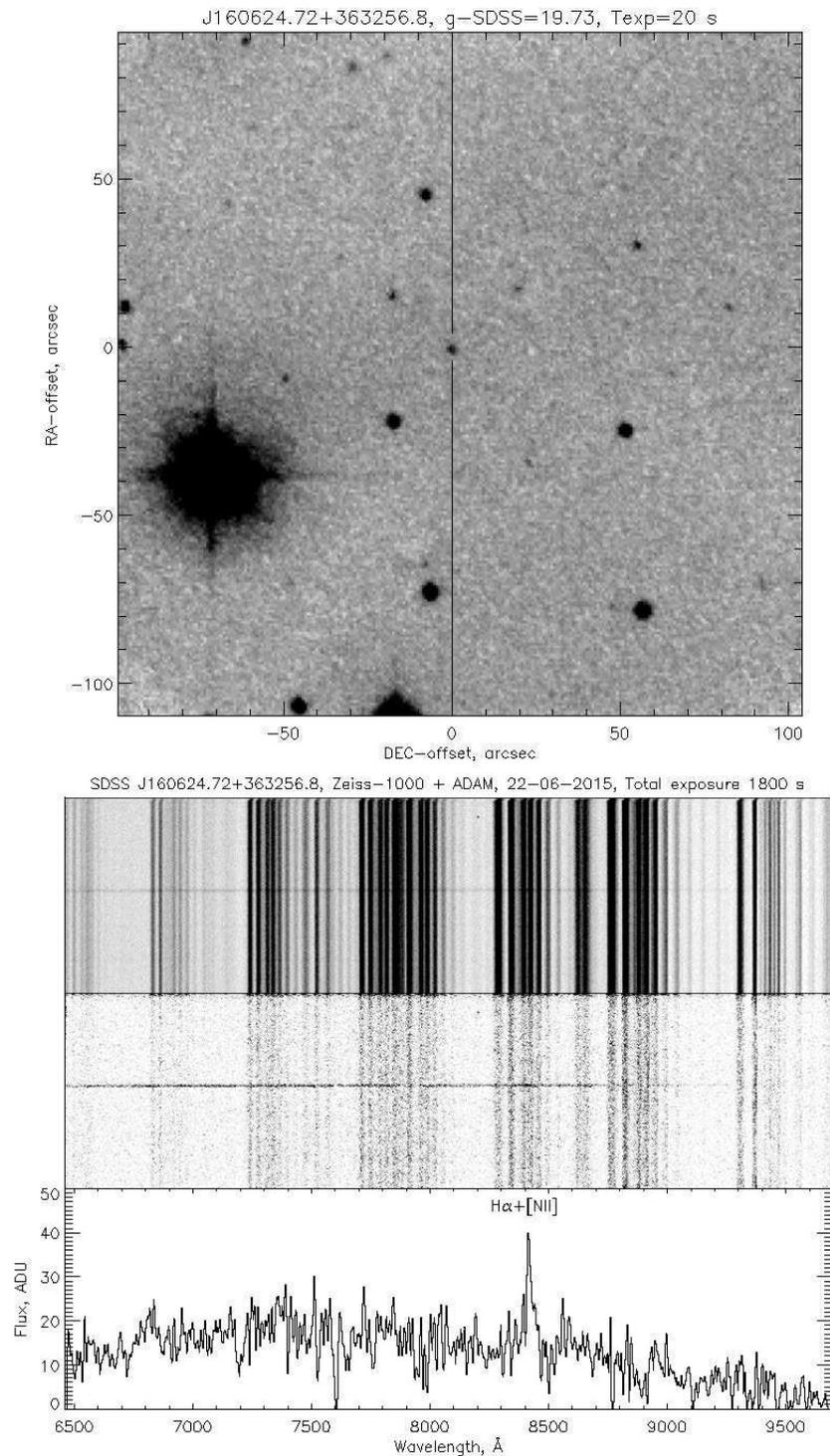


Рис. 6. Наблюдения на телескопе Цейсс-1000. На верхнем рисунке — прямое изображение области J160624.72+363256.8 в фильтре V. Угловой масштаб приведен к масштабу 1.6-м телескопа. Прямая вертикальная линия отмечает положение щели. На нижнем рисунке показаны (сверху вниз): изображение спектра объекта без вычитания спектра ночного неба, суммарный спектр объекта в стробе высотой 5''.

4.1.5. Тепловой режим

Тепловой режим спектрографа обеспечивается работой термостата, смонтированного внутри корпуса спектрографа и работающего независимо от системы управления. Время выхода термостата на рабочую температуру $+4^{\circ}\text{C}$ при внешней температуре -30°C не превышает восьми часов. Отметим, что при влажности внешней атмосферы 75–80% запотевание оптических поверхностей и входного стекла ПЗС не происходит.

4.2. Наблюдения на 1-м телескопе

В период с 17 по 21 июня 2015 г. были проведены тестовые наблюдения на 1-м телескопе Цейсс-1000 САО РАН. Для согласования телескопа со спектрографом был изготовлен двухлинзовый конвертор, меняющий светосилу с $F/13$ до $F/20$. При этом в конверторе выполнено условие телецентризма — ход лучей эквивалентен ходу лучей телескопа Саянской обсерватории и размер выходного зрачка соответствует зрачку, который строится при установке спектрографа АДАМ на 1.6-м телескопе.

Программа тестовых наблюдений предусматривала наблюдения спектрофотометрических стандартов с целью определения квантовой эффективности и получения спектров слабых объектов различных типов. Наблюдения велись в дистанционном режиме с Нижней научной площадки САО РАН. К сожалению, погода во время наших наблюдения была плохой. И только в ночь 18/19 июня удалось получить спектр стандарта BD+33d2642 удовлетворительного качества в красной области спектра, пригодный для оценки квантовой эффективности. Оценка квантовой эффективности системы «телескоп + спектрограф + ПЗС,» приведенная за атмосферу, дала величину около 60%, что соответствует расчетной величине. В последнюю ночь сета 21/22 июня удалось получить спектр слабой сейфертовской галактики J 160624.72+363256.8 (звездная величина $19^{\text{m}}.7$ в фильтре g -SDSS) с красным смещением 0.281, наблюдавшейся в обзоре SDSS. Качество изображения во время наблюдений было около $2''.8$, прозрачность атмосферы была удовлетворительной. Ширина щели спектрографа составила $1''.5$ и $\text{ADU}=2.6 e^-$. Как показывает оценка, поток от объекта, попавший в щель, соответствовал приблизительно 20^{m} в фильтре R . На рис. 6 показаны прямое изображение и обработанный спектр объекта. Как видно из рисунка, при экспозиции 30 минут достигается отношение S/N около 6–7, что демонстрирует высокую эффективность спектрографа.

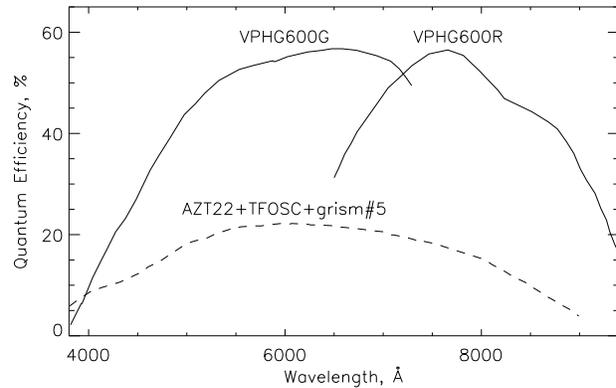


Рис. 7. Кривые полной квантовой эффективности спектрографа АДАМ с телескопом АЗТ-ЗЗИК в ночь с наилучшей прозрачностью с гризмами VPHG600G и VPHG600R (сплошные линии). Штриховой линией показаны аналогичные данные для спектрографа TFOSC 1.5-м телескопа RTT-150.

4.3. Наблюдения на 1.6-м телескопе

Спектрограф был установлен на 1.6-м телескопе Саянской обсерватории в сентябре 2015 г. Проведены наблюдения как спектрофотометрических стандартов, так и звездобразных объектов различных типов и яркости. Прозрачность в различные ночи наблюдений изменялась на 20–30%. На рис. 7 приводятся кривые полной квантовой эффективности спектрографа АДАМ с телескопом АЗТ-ЗЗИК в ночь с наилучшей прозрачностью. Ширина щели при наблюдениях составляла $10''$ при типичном размере звездных изображений $\theta \approx 2''$. Там же показана кривая квантовой эффективности спектрографа TFOSC, любезно предоставленная Р. А. Бурениным. Спектры различных объектов, полученные во время этих наблюдений, представлены в работе [8]. К примеру, при размере звездных изображений $1''.5$ – $2''$ и ширине щели $1''.5$ с гризмой VPHG600G за 30 минут суммарной экспозиции в абсорбционном спектре эллиптической галактики с $m_r = 19.1$ отношение сигнал/шум в континууме достигает $S/N = 10$ – 15 . В тех же условиях и со сходным отношением S/N с решеткой VPHG300 получается спектр квазара с интегральной величиной $m_r = 20.1$. А за один час экспозиции с VPHG600R был получен спектр далекого ($z = 6.3$) квазара с $m_r = 21.0$.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Имеющийся у нас опыт разработки спектральной аппаратуры для 6-м телескопа САО РАН, а также доступные современные технологии (объемно-фазовые голографические решетки,

ПЗС с технологией глубокого обеднения, промышленные компьютеры, многослойные просветляющие покрытия) позволили нам сделать достаточно компактный, простой в управлении и прозрачный спектрограф оптического диапазона. Квантовая эффективность всей системы (включая телескоп) в максимуме превышает 50%. За относительно небольшие (порядка одного часа) суммарные экспозиции на телескопе АЗТ-33ИК удается получать спектры звездобразных объектов с интегральной величиной $m_{AB} \approx 20-21$. Это является хорошим результатом для телескопа полутораметрового класса.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят С. В. Драбека и В. В. Комарова за помощь в организации тестовых наблюдений в САО РАН, Т. А. Фатхуллина за создание программ управления ПЗС, М. В. Еселевича и А. Л. Амвросова за помощь с адаптацией спектрографа на телескопе АЗТ-33ИК и анонимного

рецензента за замечания, позволившие улучшить статью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. P. Mack, S. Y. KanniahPadmanaban, R. Kaitchuck, et al., *Bull. Amer. Astron. Soc.* **4**, 824 (2010).
2. E. H. Geyer, *Jena Review* **20**, 26 (1975).
3. B. Buzzoni, B. Delabre, H. Dekker, et al., *Messenger* **38**, 9 (1984).
4. J. Andersen, M. I. Andersen, J. Klougart, et al., *Messenger* **79**, 12 (1995).
5. V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev, *Astronomy Letters* **31**, 194 (2005).
6. V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev, *Baltic Astronomy* **20**, 363 (2011).
7. S. C. Barden, J. A. Arns, W. S. Colburn, and J. B. Williams, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **112**, 809 (2000).
8. R. A. Burenin, A. L. Amvrosov, M. V. Eselevich, et al., *Astronomy Letters* **42**, 295 (2016).

ADAM Low- and Medium-Resolution Spectrograph for 1.6-M AZT-33IK Telescope

V. L. Afanasiev, S. N. Dodonov, V. R. Amirkhanian, and A. V. Moiseev

We describe the design of a suspended low- and medium-resolution spectrograph ($R \approx 300-1300$) designed and made at the Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences for the 1.6-m AZT-33IK telescope of Sayan Observatory of the Institute of Solar-Terrestrial Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. We report the results of laboratory measurements of the parameters of the instrument and tests performed on the 1-m Zeiss-1000 telescope of the Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences. We measured the total quantum efficiency of the “spectrograph + telescope + detector” system on AZT-33IK telescope, which at its maximum reaches 56%. Such a high transparency of the spectrograph allows it to be used with the 1.6-m telescope to determine the types and redshifts of objects with integrated magnitudes $m_{AB} \approx 20-21$, and this result was confirmed by actual observations.

Keywords: *instrumentation: spectrographs—techniques: spectroscopic*