

УДК 520.353

МОДЕРНИЗАЦИЯ ОПТОВОЛОКОННОГО СПЕКТРОГРАФА КОУРОВСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ УРФУ

© 2014 В. В. Крушинский^{1*}, А. А. Попов¹, А. Ф. Пуанова²

¹Уральский федеральный университет, Екатеринбург, 620002 Россия

²Лидский университет, Лидс, LS2 9JT Великобритания

Поступила в редакцию 26 мая 2014 года; принята в печать 2 сентября 2014 года

В статье описаны результаты исследования и опыт эксплуатации в 2010–2012 гг. оптоволоконного спектрографа высокого разрешения Коуровской астрономической обсерватории Уральского федерального университета. Показана необходимость проведения модернизации прибора. Описаны изменения, внесенные в конструкцию прибора на стадии запуска в штатную эксплуатацию в 2010 г., и реконструкция подвесной части, выполненная в 2013 г., позволившие расширить его возможности.

Ключевые слова: *оборудование: спектрографы*

1. ПЕРВОНАЧАЛЬНАЯ КОНФИГУРАЦИЯ СПЕКТРОГРАФА

Оптоволоконный спектрограф (UFES — Ural Fiber Echelle Spectrograph) был разработан в лаборатории астроспектроскопии САО РАН в 2008 г. по заказу Коуровской астрономической обсерватории Уральского федерального университета в соответствии с техническим заданием, подготовленным в тесном сотрудничестве заказчика и изготовителя. В 2010 г. проведены тестовые наблюдения на телескопе Цейсс-1000 САО РАН, показавшие высокую проникающую способность прибора. В середине 2010 г. спектрограф был доставлен в Коуровскую обсерваторию и смонтирован в помещении для управления 1.2-метровым телескопом. С 2011 г. спектрограф используется в статусе штатного прибора. Краткое описание прибора, основные идеи, положенные в основу конструкции, и результаты тестирования можно найти в работах [1, 2].

Спектрограф состоит из двух основных блоков: массивной стационарной части и относительно легкой подвесной, закрепленной на телескопе в фокусе Несмита. Между собой блоки соединяются оптическим волокном. Стационарная часть прибора построена по широко распространенной схеме белого зрачка и обеспечивает спектральное разрешение $R = 30\,000$ в диапазоне длин волн $3900\text{--}10\,500 \text{ \AA}$.

В стационарной части расположены два зеркальных коллиматора, решетка эшелле, дифракционная решетка скрещенной дисперсии, объектив

камеры спектрографа и ПЗС-камера. Применено оптоволоконно с числовой апертурой 0.12 и диаметром 150 мкм, что соответствует $5''$ в проекции на небесную сферу. Выбор диаметра волокна был основан на среднем значении FWHM (полная ширина на половине максимума) звездных изображений для Коуровской обсерватории, которое составляет $5''$. Для сопряжения с телескопом, имеющим относительное отверстие $1/10$, используется редуктор светосилы, уменьшающий фокусное расстояние в два раза. Для согласования с коллиматором на выходе оптоволоконна была наклеена сферическая линза. Фокусное расстояние коллиматоров 1000 мм, фокусное расстояние камеры спектрографа 200 мм. Диаметр коллимированного пучка 100 мм. Узел решетки скрещенной дисперсии имел привод, позволявший дистанционно управлять ее ориентацией для выбора рабочего диапазона прибора. Компенсация хроматизма камеры спектрографа в длинноволновом диапазоне обеспечивалась поворотом плоскости ПЗС, для чего узел крепления светоприемника также был обеспечен приводом. Все оптические элементы смонтированы на столе, изготовленном из алюминиевого сплава. Для увеличения жесткости стол закреплен на раме из стального швеллера с регулируемыми опорами.

В подвесной части прибора была размещена подвижная каретка с калибровочными лампами линейчатого и непрерывного спектров, затвор спектрографа, система позиционирования оптоволоконна и гидирующая телевизионная камера.

Светоприемник спектрографа изготовлен в лаборатории перспективных разработок САО РАН.

*E-mail: krussh@gmail.com

Использована матрица ПЗС E2V-42-40 2048×2048 элементов, размер одного элемента 13.5×13.5 мкм, шум считывания $4.8 e^-$, темновой ток в рабочем диапазоне температур $3 \times 10^{-3} e^-$ пиксель $^{-1}$ с $^{-1}$. ПЗС-камера имеет систему охлаждения замкнутого цикла.

Описание принципа удержания звезды на входе оптического волокна заимствовано из работы [1]:

В данном случае стабилизация изображения на входе в оптическое волокно осуществляется перемещением самого оптического волокна вслед за смещением звезды в фокусе телескопа. Позиционер, удерживающий волокно, представляет собой плоскопараллельную пластину, в центр которой вклеено оптическое волокно, входной торец волокна оптолирован вместе с передней плоскостью пластины. Телескоп строит изображение на передней плоскости пластины, изображение исследуемой звезды проваливается в оптическое волокно, а остальная часть попадает на камеру подзора поля, объектив которой также сфокусирован на переднюю поверхность плоскопараллельной пластины. Изображение, получаемое от камеры подзора поля, анализируется в интерактивном режиме достаточно быстро для того, чтобы зарегистрировать смещение изображения исследуемой звезды и скомпенсировать его перемещением плоскопараллельной пластины с оптическим волокном. Эта система стабилизации позволяет компенсировать смещения изображения звезды, вызванные как неточностью гидирования, так и колебаниями механической конструкции телескопа, с частотой несколько раз в секунду (до 5 Гц).

Управление прибором предполагалось осуществлять от двух компьютеров по последовательным портам RS-232. Компьютер с операционной системой Windows использовался для контроля параметров гидирующей камеры. Второй, с операционной системой Linux, был необходим для управления механизмами спектрографа и гидирования.

2. ВВОД СПЕКТРОГРАФА В ЭКСПЛУАТАЦИЮ

Первый опыт эксплуатации прибора на 1.2-метровом телескопе КАО показал, что спектрограф позволяет получать спектры очень хорошего качества, но имеет ряд проблем, без устранения которых проведение наблюдений было затруднено.

В соответствии с техническим заданием спектрограф позволял проводить наблюдения в диапазоне $3900\text{--}10\,500 \text{ \AA}$. Столь широкий спектральный

интервал достигался за счет его разделения на две части. Смена диапазона осуществлялась поворотом решетки скрещенной дисперсии. Для компенсации хроматизма объектива камеры спектрографа был предусмотрен поворот плоскости ПЗС. Первый опыт наблюдений заставил нас отказаться от инфракрасной области рабочего диапазона, где наблюдалась значительная интерференция в ПЗС. Решетка скрещенной дисперсии была установлена и закреплена в оптимальном положении, при котором весь полезный диапазон эшелле-порядков, не ограниченный пропусканием оптики и интерференцией в ПЗС, полностью попадал на имеющийся светоприемник.

Использовавшаяся в узле поворота ПЗС-камеры платформа имела недостаточную жесткость, что приводило к наклону плоскости светоприемника под действием силы тяжести в направлении дисперсии эшелле и произвольным поворотам вокруг вертикальной оси. Эта особенность не проявилась при испытаниях спектрографа производителем, так как используемая при этом камера не имела жестких шлангов замкнутой системы охлаждения. Поворотная платформа узла крепления ПЗС-камеры была заменена на жесткую пластину с сохранением высоты установки над основанием прибора. Юстировка положения ПЗС-камеры осуществляется системой из трех пар винтов.

В подвесную часть спектрографа также были внесены небольшие изменения. Затвор, установленный между телескопом и подвесной частью спектрографа, не имел синхронизации с ПЗС-камерой и не позволял установить звезду на входе оптоволокну до начала экспозиции. Вместо него был установлен центральный затвор непосредственно перед входным окном ПЗС-камеры. Использован затвор Uniblitz CS45S1T0. Управление осуществляется сигналом от контроллера ПЗС-камеры, поступающим на драйвер затвора через оптронную развязку.

Нам не удалось выяснить тип установленной калибровочной лампы линейчатого спектра и однозначно идентифицировать линии в ее спектре. Она была заменена на торий-аргоновую лампу P858A производства фирмы Photron. Для питания лампы был изготовлен импульсный преобразователь со стабилизацией тока нагрузки.

Программное обеспечение для управления прибором и гидирования оказалось несовместимым с имеющейся ЭВМ (процессор Intel Core i5-4430, объем ОЗУ 2 Гб, плата видеозахвата AVerTV Studio 307) и операционной системой (Ubuntu Server 10.04). Для управления узлами спектрографа было разработано программное обеспечение, использующее предоставленную производителем систему команд для связи ЭВМ с микроконтроллерами исполнительных узлов. Новая программа

работала в операционной системе Windows и позволяла осуществлять управление калибровочными лампами, движением каретки узла калибровок, фокусировкой камеры спектрографа. Управление положением позиционера оптического волокна не поддерживалось. Контроллеры, освобожденные от функций управления затвором и приводом решетки скрещенной дисперсии, были использованы для управления светодиодами подсветки поля зрения и выхода оптического волокна, что позволило более точно определять положение входа оптоволоконна в поле зрения гидирующей камеры.

Выполненные работы позволили провести исследование свойств прибора и начать его штатную эксплуатацию. Основные результаты, полученные на спектрографе UFES в 2010–2013 гг., опубликованы в работах [3–5].

3. ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОГРАФА И ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В 2010–2011 гг. проведены подробные исследования системы 1.2-метрового телескопа и оптоволоконного спектрографа, о чем было доложено на конференциях [6, 7]. Разработана методика обработки спектров, полученных на спектрографе UFES, с использованием свободно распространяемого пакета IRAF [8]. В ходе работы были получены следующие результаты:

- Построен атлас спектра калибровочной торий-аргоновой лампы полого катода, в настоящее время он доступен на сайте обсерватории по адресу: http://astro.ins.urfu.ru/sites/default/files/ufes_thar_atlas.pdf
- Определена ширина аппаратной функции на половине амплитуды (FWHM), она составила от 4 до 6 пикселей для разных областей эшелле-кадра.
- Определены параметры глобальной дисперсионной функции, построенной по всем порядкам эшелле-кадра. Для аппроксимации использовался полином Чебышева шестого порядка поперек дисперсии эшелле и восьмого порядка

вдоль дисперсии эшелле. Среднеквадратичное отклонение для 1600 линий торий-аргоновой лампы от аппроксимирующего полинома не превышает 0.25 км с^{-1} (рис. 1).

- Проведены измерения уровня рассеянного света в направлении поперек дисперсии эшелле. Максимальная интенсивность рассеянного света между порядками спектра калибровочной лампы плоского поля не превышает 2% от уровня континуума.
- Исследована зависимость сдвига шкалы длин волн от положения телескопа. Для этого мы получили две серии спектров торий-аргоновой лампы. Первая серия кадров получена без смещения телескопа между экспозициями. Среднеквадратичное отклонение (СКО) лучевых скоростей составило 0.38 км с^{-1} . Вторая серия кадров получена при разных азимутах и высотах телескопа между экспозициями. СКО лучевых скоростей, определенных по этой серии, составило 0.5 км с^{-1} . Зависимости шкалы длин волн от положения телескопа не обнаружено.
- Выявлена зависимость сдвига спектра на эшелле-кадре от температуры стационарной части спектрографа. Измеренный сдвиг составил примерно $1.6 \text{ пикселя}/^\circ\text{C}$ (рис. 2). Вероятно, это связано с тем, что основание стационарной части изготовлено из материалов с разными коэффициентами теплового расширения и представляет собой алюминиевую конструкцию, установленную на каркасе из стального швеллера. По формуле (1) [9] была сделана оценка температурных деформаций для сильно упрощенной модели, состоящей из сплошного алюминиевого листа толщиной 25 мм, закрепленного на стальном листе толщиной 100 мм. Изменение кривизны при изменении температуры на один градус Цельсия составило около $4 \times 10^{-5} \text{ м }^\circ\text{C}^{-1}$. Изгиб основания спектрографа с радиусом около 25 000 м приводит к наклону оптических осей коллиматоров на угол около $8''$.

$$k = \frac{6E_a E_s (h + H) h H \Delta \varepsilon}{E_a^2 h^4 + 4E_a E_s h^3 H + 6E_a E_s h^2 H^2 + 4E_a E_s h H^3 + E_s^2 H^4}, \quad (1)$$

где k — кривизна биметаллической пластины, E_a — модуль Юнга материала a (алюминий), E_s — модуль Юнга материала s (сталь), h — толщина материала a в направлении, перпен-

дикулярном плоскости касания металлов, H — толщина материала s , $\Delta \varepsilon = (\alpha_a - \alpha_s) \Delta T$, α_a — коэффициент теплового расширения материала a , α_s — коэффициент теплового расширения

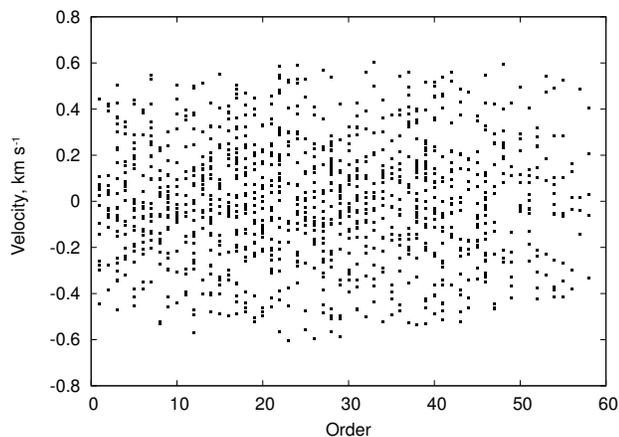


Рис. 1. Невязки дисперсионной функции для 1600 линий торий-аргоновой лампы.

материала s , ΔT — разность температур между начальным состоянием (без изгиба) и конечным состоянием.

- Получены оценки точности измерения лучевых скоростей. Чтобы не вносить дополнительных погрешностей, связанных с температурными деформациями спектрографа, полный цикл, включающий получение калибровок и спектров звезды, занимал не более 30 мин. Измеренные изменения температуры спектрографа за это время не превысили 0.1°C . Для минимизации ошибки позиционирования звезды на входе оптического волокна яркий объект наблюдался с небольшой дефокусировкой. Измерения по 167 линиям в спектре Альдебарана показали, что отличие измеренной лучевой скорости от данных [10] составляет -0.08 км с^{-1} , СКО = 0.34 км с^{-1} .

Потенциал прибора оказался исключительно высок, оптические характеристики стационарной части позволяют получать спектры очень хорошего качества. Тем не менее штатная эксплуатация прибора в течение 2011–2012 гг. выявила некоторые недостатки конструкции как стационарной, так и подвесной частей. Основная проблема стационарной части — сильные температурные деформации. Недостаток подвесной части связан с конструкцией узла ввода изображения звезды в оптическое волокно, не обеспечивающей точную установку и гидирование объекта. Кроме того, выяснилась невозможность ввода–вывода калибровок при негоризонтальном положении каретки с калибровочными лампами. Дальнейшее повышение эффективности спектрографа оказалось возможным только в случае полной замены подвесной части и термостабилизации стационарной.

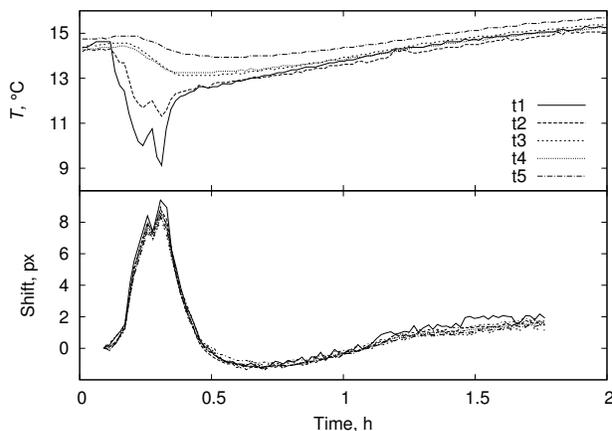


Рис. 2. На верхней панели показано изменение температуры в пяти точках спектрографа. Датчики $t1$ и $t2$ закреплены снаружи, на нижней поверхности оптического стола под коллиматорами. Датчики $t3$ и $t4$ закреплены внутри, у основания коллиматоров. Датчик $t5$ — внутри, рядом с креплением камеры спектрографа. На нижней панели приведен соответствующий сдвиг в пикселях для семи линий торий-аргоновой лампы в 74-м порядке эшелле-спектра.

4. МОДЕРНИЗАЦИЯ ПОДВЕСНОЙ ЧАСТИ UFES

В первоначальной конструкции прибора оптическое волокно было вклеено между сошлифованными прямыми углами четырех стеклянных секторов (рис. 3а). Таким образом, диаметр ядра волокна ($5''$) был существенно меньше размера непрозрачной области в центре стеклянной пластины ($10'' \times 8''$). Рассеяние света на местах склейки стеклянных секторов и на оптическом волокне, идущем в сторону гидирующей камеры, не позволяло надежно центрировать звезду на входе, основываясь на симметричности крыльев ее изображения. Наиболее эффективный способ центрирования, применявшийся при наблюдениях, заключался в настройке параметров гидирующей камеры таким образом, чтобы видимые на экране размеры звезд примерно соответствовали размеру экранирующей области. Наблюдатель, корректируя положение телескопа на протяжении всей экспозиции, пытался удержать звезду скрытой за областью вклейки оптоволокон. Автоматизация этой процедуры сложна и не гарантирует надежного центрирования звезды на входе волокна.

Использование смещений стеклянной пластины в фокальной плоскости для гидирования по боковой звезде тоже затруднительно. Изменение положения прозрачной пластины никак не отражается на видимом положении звезд в поле зрения, и внеосевое гидирование можно было бы осуществлять только без обратной связи, надеясь на безукоризненную работу приводов стеклянной пластины и деротатора поля зрения.

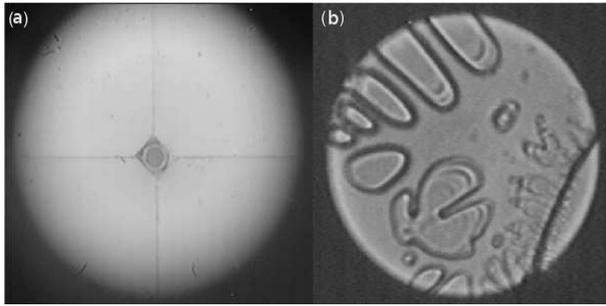


Рис. 3. Микрофотография старого входа оптоволоконна (слева) и выхода (справа).

Кроме решения этих основных проблем были выдвинуты дополнительные требования к новой подвесной части: уменьшение массы и габаритов, повышение надежности системы ввода калибровочного.

Проанализировав описанные в литературе схемы стабилизации изображения на входе оптического волокна [11–14] и наши возможности по их изготовлению, была выбрана конструкция, схематично показанная на рис. 4.

Сходящийся пучок лучей падает на светоделитель (BS): 92% света проходит в направлении входа оптоволоконна (F1), а 8% света отражается в сторону плоского зеркала (M1), отражается от него и попадает на оптическую систему (RL) из ахроматического дублета ($F = 85$ мм) и объектива ($F = 35$ мм), формирующую изображение на ПЗС гидрирующей камеры (GC). До начала экспозиции оптоволоконно освещается из стационарной части спектрографа и определяется центр тяжести изображения его торца. Система гидрирования совмещает центр тяжести изображения звезды с измеренными координатами входа оптоволоконна и удерживает его на протяжении экспозиции. Главным преимуществом такой конструкции является ее устойчивость к разъюстировке. Наклоны зеркала (M1) приводят к виньетированию в проекционной системе, но не к сдвигу изображения. Наклоны светоделителя приводят к одинаковому сдвигу на поверхности ПЗС гидрирующей камеры как изображения звезды, так и светящегося входа оптического волокна. К недостаткам этого способа следует отнести потери света на делителе, однако выигрыш от точного удержания звезды на входе оптического волокна существенно выше. В качестве светоделителя применяется тонкопленочный делитель диаметром 25 мм.

Если FWHM изображений звезд равны диаметру ядра оптического волокна, потери на входе составляют 50% [15]. Для уменьшения потерь в случае изображений, превышающих 5", в конструкцию спектрографа было добавлено второе оптическое

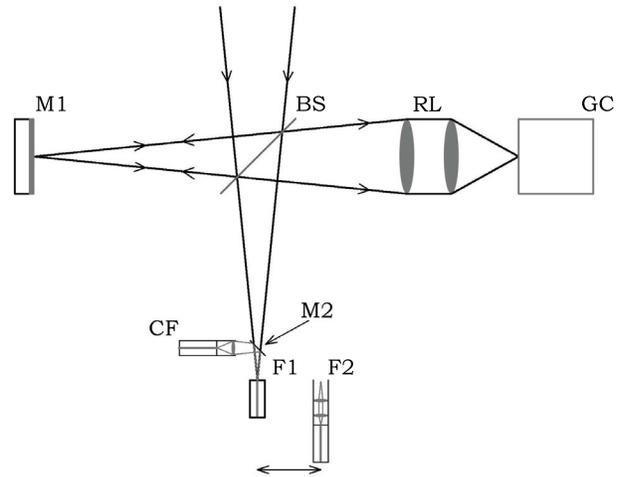


Рис. 4. Схема узла ввода изображения в оптическое волокно. Обозначения: BS — светоделитель, M1 — плоское зеркало, RL — ахроматический дублет ($F = 85$ мм) и объектив ($F = 35$ мм), GC — гидрирующая камера, M2 — подвижное плоское зеркало, F1 — оптическое волокно диаметром 5", F2 — волокно диаметром 10", CF — калибровочное оптоволоконно.

волокно, имеющее диаметр 10" в проекции на небесную сферу (F2). Входы оптических волокон и согласующая оптика установлены в подвижной каретке. Для смены волокон каретка перемещается двигателем постоянного тока. В качестве дополнительного применяется волокно FBP150165195 производства фирмы Polymicro с диаметром ядра 150 мкм и числовой апертурой 0.22. Для согласования с телескопом используется пара ахроматических дублетов с фокусным расстоянием 6 мм и 10 мм.

Калибровочные лампы располагаются в отдельном корпусе, закрепленном неподвижно на монтировке телескопа. Блок калибровок связан с подвесной частью оптическим волокном. Для проекции выхода калибровочного оптоволоконна (CF) на вход спектрографа использованы ахроматический дублет и подвижное плоское зеркало (M2).

Все применяемые линзовые элементы имеют высокоэффективное просветляющее покрытие с потерями не более 0.4% в диапазоне 425–675 нм.

Концы оптических волокон вклеены в стандартные наконечники из нержавеющей стали и отполированы.

Подвижный блок подвесной части спектрографа имеет размеры 200 × 220 × 80 мм и массу около 3 кг. Все элементы, кроме цилиндрических направляющих и крепежных винтов, изготовлены из алюминиевого сплава в мастерских обсерватории. Малая масса подвижных частей позволила применить простые и надежные приводы на двигателях

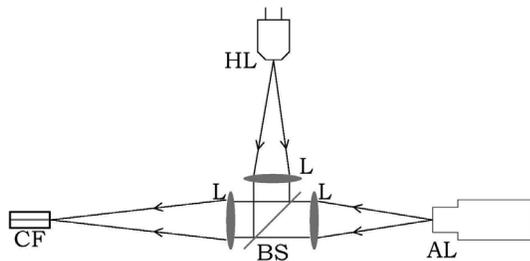


Рис. 5. Схема неподвижного блока подвесной части. Обозначения: HL — лампа непрерывного спектра, AL — лампа линейчатого спектра, CF — калибровочное оптоволокно, BS — стеклянная пластина без покрытия, L — согласующие линзовые элементы.

постоянного тока со встроенным редуктором. Гидрирующая камера VNI-748-N2 производства фирмы ЭВС охлаждается с помощью элемента Пельтье, установленного между держателем камеры и корпусом подвесного блока спектрографа.

Неподвижный блок подвесной части имеет размеры $360 \times 270 \times 80$ мм и массу около 3 кг. На рис. 5 приведена схема неподвижного блока подвесной части. В нем находятся лампа непрерывного спектра (HL), лампа линейчатого спектра (AL), источники питания и оптическая система освещения калибровочного оптоволокна. Для сведения света от ламп на входе оптоволокна (CF) использована стеклянная пластина без покрытия (BS). Перенос калибровочных ламп и источников питания, имеющих наибольшие габариты и вес, в отдельный неподвижный блок позволил существенно снизить массу и размеры подвижной части спектрографа.

В канал лампы непрерывного спектра добавлен корректирующий светофильтр 80А. Это позволило снизить отношение максимальной интенсивности непрерывного спектра к интенсивности на длине волны 4000 \AA со 140 до 20.

5. ИЗМЕНЕНИЯ В СТАЦИОНАРНОЙ ЧАСТИ СПЕКТРОГРАФА

Для согласования числовой апертуры оптических волокон с оптикой стационарной части использованы ахроматические дублеты. Решение отказаться от имеющейся на старом волокне согласующей линзы было принято после ее обследования с помощью микроскопа. Торцы оптоволокна имел скол, а область склейки — большое количество пузырьков (рис. 3б). Выходы оптических волокон и согласующая оптика установлены в подвижной каретке, перемещаемой шаговым мотором. Для смены волокон каретка смещается в вертикальном направлении.

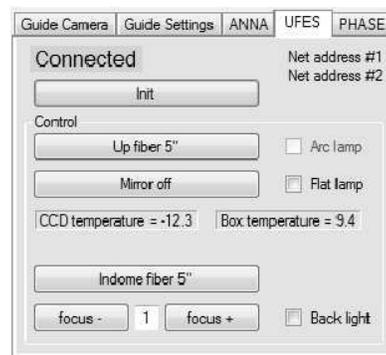


Рис. 6. Пользовательский интерфейс для управления спектрографом UFES. Наблюдателю доступны функции смены оптического волокна как в подвесной, так и в стационарной частях прибора, ввод/вывод диагонального зеркала, включение/выключение калибровочных ламп, фокусировка камеры спектрографа.

Для снижения температурной нестабильности стационарной части спектрографа в помещении была установлена система климат-контроля, позволяющая поддерживать температуру с точностью $\pm 2^\circ\text{C}$. В дальнейшем предполагается изоляция спектрографа в отдельном боксе с системой термостабилизации.

6. НОВАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРИБОРОМ

Существенные изменения в конструкции прибора привели к необходимости разработки и изготовления новой системы управления. Она основана на микроконтроллерах Atmel ATmega168, установленных по одному в стационарной и подвесной частях прибора. Оба контроллера подключены к шине RS-485, по которой осуществляется управление другими приборами и периферийными устройствами комплекса 1.2-метрового телескопа. По этой же шине управляется гидрирующая камера спектрографа. Используемая система команд и адресации позволила интегрировать систему управления спектрографом в имеющуюся структуру и сконцентрировать управление комплексом аппаратуры 1.2-метрового телескопа на одном персональном компьютере. Другим существенным изменением в системе управления стала установка датчиков положения различных узлов спектрографа.

Была разработана новая программа для управления прибором и гидрирования. Пользовательский интерфейс спектрографа входит в состав приложения для комплекса 1.2-метрового телескопа. Наблюдатель имеет возможность выбрать диаметр оптического волокна (5" или 10"), управлять кареткой диагонального зеркала и лампами системы калибровки, производить фокусировку камеры

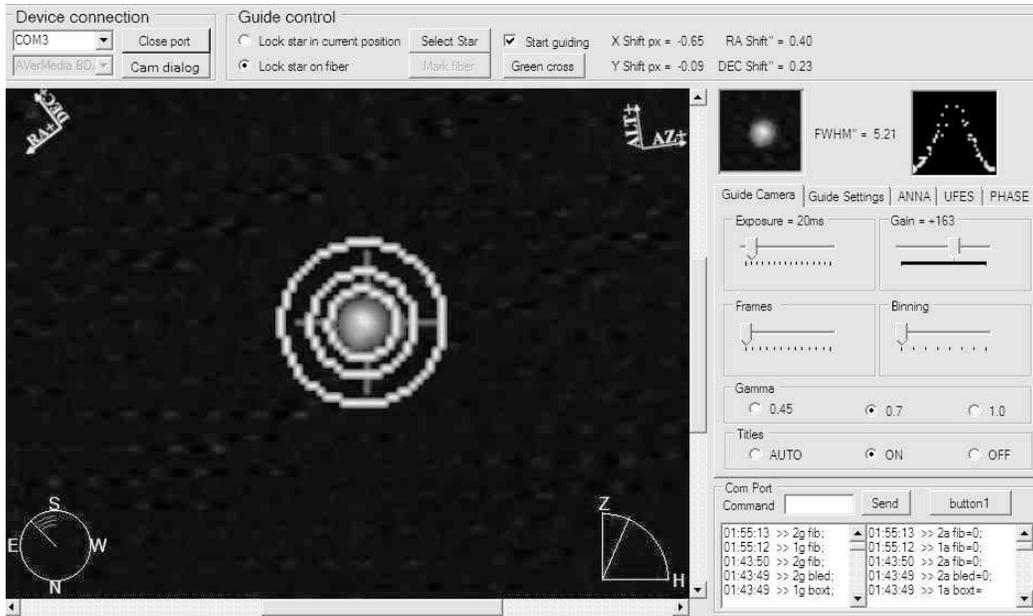


Рис. 7. Интерфейс программы для системы гидирования 1.2-метрового телескопа КАО. На изображении крестом отмечен вход оптического волокна, концентрическими окружностями задается апертура и кольцо для вычисления фона неба. В режиме гидирования центр тяжести изображения звезды совмещается с центром креста, тем самым обеспечивая попадание света от звезды в оптическое волокно.

спектрографа, включать и выключать обратную подсветку оптоволоконна. Доступна информация о положении узлов спектрографа и состоянии ламп, температуре гидирующей ПЗС и корпуса подвесной части. Внешний вид интерфейса управления оптоволоконным спектрографом приведен на рис. 6.

7. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ЗВЕЗДЫ НА ВХОДЕ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА

Ошибки позиционирования и удержания изображения звезды на входе оптического волокна приводят как к существенным потерям света [15], так и к снижению точности измерения лучевых скоростей. Модернизация подвесной части должна была прежде всего решить эту проблему.

Для гидирования используется аналоговая телевизионная камера VNI-748-H2 и карта видеозахвата Avermedia DVD EZMaker Gold. Экспозиция регулируется в диапазоне 20 мс–0.5 мкс, возможно аппаратное суммирование до 4096 отдельных кадров для повышения отношения сигнал/шум.

Масштаб изображения на гидирующей камере равен 0''7 на пиксель. При таком масштабе FWHM изображений звезд составляет не менее 3 пикселей, что позволяет восстановить форму PSF-изображений и осуществлять контроль положения звезды с точностью около 0.1 пикселя. Поле зрения гида составляет 6'.

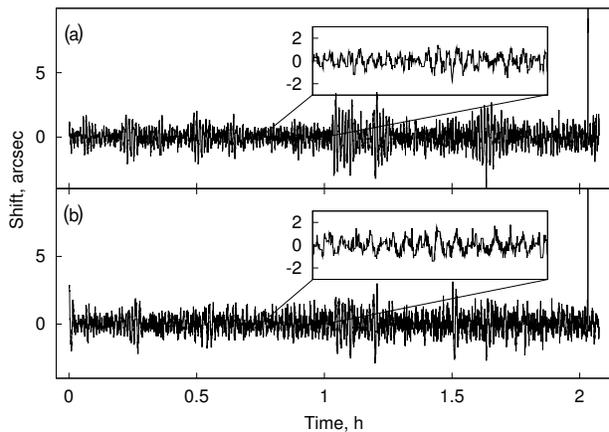


Рис. 8. Сдвиг положения центра масс изображения звезды относительно входа оптоволоконна во время гидирования по осям RA (а) и Dec (б). Среднеквадратичное отклонение движений по RA равно 0''7, по Dec — 0''8. Кратковременные выбросы на графике, вероятно, связаны с порывами ветра. На врезках приведены области с наименьшими сдвигами, не превышающими 2''.

Программное обеспечение для гидирования было написано на языке C# с использованием стандартных библиотек .NET и библиотеки AForge.NET для захвата видеопотока. На видеопередаче, полученном гидирующей камерой, вокруг отмеченной наблюдателем звезды выделяется область интереса. Для нее определяется среднее значение фона неба, которое вычитается

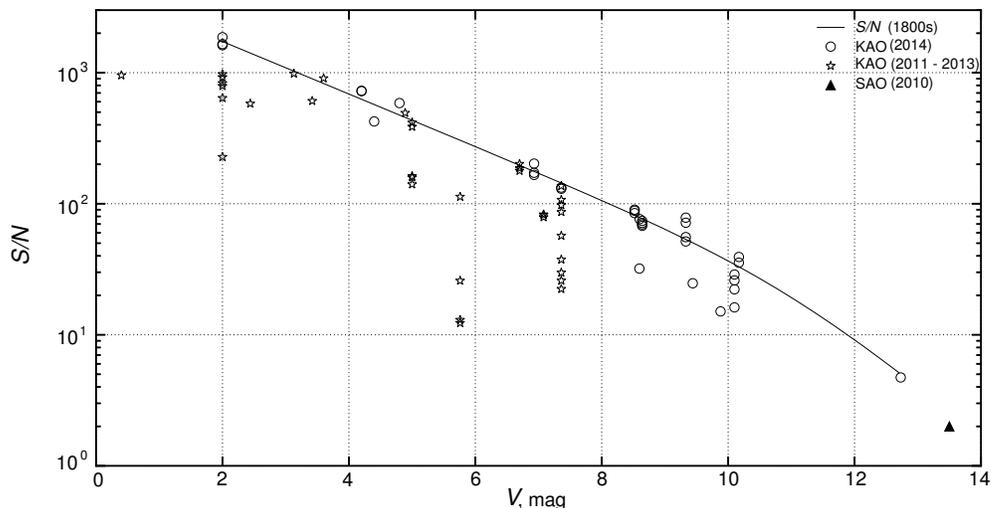


Рис. 9. Зависимость отношения сигнал/шум на пиксель от звездной величины для наблюдений в КАО. Звездами отмечены наблюдения до модернизации, кружками — после модернизации. Треугольник — данные, полученные во время испытаний спектрографа на 1-метровом телескопе САО РАН в 2010 г. Аппроксимирующая линия проведена по данным, полученным после модернизации.

из всех пикселей выделенной области. Далее вычисляется центр масс изображения звезды и рассчитывается отклонение от заданного положения. В соответствии с масштабом изображения и позиционным углом формируются корректирующие команды и передаются системе управления телескопом. 1.2-метровый телескоп Коуровской обсерватории поддерживает метод PulseGuide стандарта ASCOM¹, что позволяет производить одновременную коррекцию по двум осям. Величина коррекции пропорциональна времени корректирующего импульса. Скорость коррекции устанавливается при настройке телескопа, в настоящее время используется значение 10'' в секунду. Дополнительно оцениваются размеры изображений, что позволяет контролировать точность фокусировки (рис. 7).

Для определения положения центра оптического волокна на изображении с гидрирующей камеры необходимо включить обратную подсветку оптического волокна и отметить его (крест на рис. 7). Далее подсветка выключается, и наблюдатель выделяет в поле зрения гида интересующий его объект (концентрические окружности на рис. 7). После активации режима гидрирования система автоматически устанавливает звезду на входе оптоволокну и удерживает ее на протяжении всей экспозиции. Альтернативный режим работы программы предусматривает внеосевое гидрирование по изображению звезды в любом месте кадра.

¹<http://ascom-standards.org/>

8. РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ ПРИБОРА ПОСЛЕ МОДЕРНИЗАЦИИ

Наибольшие опасения вызывало возможное падение эффективности тракта калибровок в связи с переносом калибровочных ламп в отдельный неподвижный блок. Однако тесты показали обратное: время, необходимое для получения калибровочных кадров, сократилось и составляет 10–20 секунд. Введение корректирующего фильтра позволило в семь раз повысить относительную интенсивность лампы непрерывного спектра в УФ-диапазоне.

Спектральное разрешение прибора для оптоволокну диаметром 5'' не изменилось. Для волокна диаметром 10'' FWHM узких спектральных линий составляет 8 пикселей, что соответствует спектральному разрешению $R = 15\,000$. Так как большинство решаемых на телескопе задач не требует высокого спектрального разрешения, а изображения в Коуровской обсерватории редко бывают меньше 5'', большая часть наблюдений проходит с толстым оптическим волокном.

Тестирование системы автоматического гидрирования показало, что возможно гидрирование на частотах до 10 Гц. Это связано с высокой собственной резонансной частотой телескопа (более 10 Гц по спецификации производителя) и применением прямого привода для обеих осей азимутальной монтировки, позволяющего развивать ускорение до $1^\circ/\text{с}^2$.

Для слабых звезд частота гидрирования ограничена чувствительностью гидрирующей камеры и составляет 0.2–0.5 Гц. Среднеквадратичная ошибка позиционирования, вычисленная как разность

положений центров масс изображений входа оптоволоконна и звезды, не превышает $0''8$ и не накапливается на протяжении всей экспозиции (рис. 8).

На рис. 9 приведена величина отношения сигнал/шум на пиксель в области дублета натрия для 36 случайно выбранных спектров, полученных до модернизации (ручное гидирование, волокно диаметром $5''$) и 34 спектров, полученных после модернизации (автоматическое гидирование, волокно диаметром $10''$). Все значения приведены к одинаковой экспозиции 1800 секунд. В расчетах использовался шум считывания $4.8 e^-$, темновой ток $3 \times 10^{-3} e^- \text{ пиксель}^{-1} \text{ с}^{-1}$. Стоит отметить, что до модернизации почти не было наблюдений звезд слабее 8^m . Разброс измеренных значений сигнал/шум для одних и тех же звезд стал меньше после замены подвесной части. Видно, что почти все спектры, полученные до 2014 г., существенно более шумные. Также приведена зависимость сигнал/шум для экспозиции 1800 секунд, аппроксимированная по данным, полученным после модернизации прибора. Крайняя правая точка на рис. 9 соответствует наблюдениям во время испытаний спектрографа на 1-метровом телескопе САО РАН в 2010 г. [1].

9. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изменения, внесенные в конструкцию подвесной части оптоволоконного спектрографа и его систему управления, позволили повысить эффективность наблюдений за счет точного позиционирования и удержания звезды на входе оптоволоконна. Использование дополнительного толстого оптического волокна снижает потери на входе спектрографа при наблюдениях, не требующих максимального спектрального разрешения. Простой новый интерфейс управления прибором и система гидирования существенно снижают нагрузку на наблюдателя. Решение проблемы термостабилизации стационарной части спектрографа планируется в ближайшем будущем.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность рецензенту за ценные замечания и объективную критику. Также авторы благодарят Ронжину Анастасию за помощь в разработке программы управления прибором и Аввакумову Екатерину за помощь в оформлении статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. E. Panchuk, M. V. Yushkin, and M. V. Yakopov, *Astrophysical Bulletin* **66**, 355 (2011).
2. V. E. Panchuk, M. V. Yushkin, E. V. Uhanov, et al., *Bull. Crimean Astrophys. Obs.* **109**, 196 (2013).
3. S. Y. Gorda, *Astrophysical Bulletin* **68**, 101 (2013).
4. O. S. Ugolnikov, A. F. Punanova, and V. V. Krushinsky, *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* **116**, 67 (2013).
5. S. A. Alexeeva, A. M. Sobolev, S. Y. Gorda, et al., *Astrophysical Bulletin* **68**, 169 (2013).
6. A. F. Punanova and V. V. Krushinsky, in *Physics of Space*, Ed. by P. E. Zakharova, E. D. Kuznetsov, A. B. Ostrovskii, et al. (Ural Federal University, Ekaterinburg, 2012), p. 227.
7. A. F. Punanova and V. V. Krushinsky, *Bull. Crimean Astrophys. Obs.* **109**, 51 (2013).
8. D. Tody, *SPIE Conf. Ser.*, № 627, 733 (1986).
9. T. W. Clyne and S. C. Gill, *J. Thermal Spray Technology* **5**, 401 (1996).
10. A. Massarotti, D. W. Latham, R. P. Stefanik, and J. Fogel, *Astron. J.* **135**, 209 (2008).
11. CAOS, <http://spectroscopy.wordpress.com/posts/>
12. A. Tokovinin, D. A. Fischer, M. Bonati, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **125**, 1336 (2013).
13. G. Avila, D. Kohler, E. Araya, et al., *SPIE Conf. Ser.*, № 5492, 669 (2004).
14. G. Raskin and H. Van Winckel, *Astronomische Nachrichten* **335**, 32 (2014).
15. P. R. Newman, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **114**, 918 (2002).

Upgrade of the Fiber-Fed Spectrograph of the Kourovka Astronomical Observatory

V. V. Krushinsky, A. A. Popov, and A. F. Punanova

We report the results of testing the high-resolution fiber-fed spectrograph of Kourovka Astronomical Observatory of the Ural Federal University in 2010–2012 and the corresponding operation experience, and demonstrate the need for an upgrade of the instrument. We also describe the modifications that were made to the design of the spectrograph during the start of its regular operation in 2010 and the refurbishment of its suspended part carried out in 2013, which allowed to expand the capabilities of the instrument.

Keywords: *instrumentation: spectrographs*