

УДК 520.353

ПРОЕКТ СПЕКТРОГРАФА ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ ДЛЯ 1-МЕТРОВОГО ТЕЛЕСКОПА САО

© 2015 В. Е. Панчук^{1,2*}, М. В. Юшкин¹, В. Г. Клочкова¹, Г. В. Якопов¹, Ю. Б. Верич¹

¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

²Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101 Россия

Поступила в редакцию 8 декабря 2014 года; принята в печать 18 марта 2015 года

Сообщается о разработке конструкции спектрографа скрещенной дисперсии, имеющего оптоволоконное сочетание с телескопом умеренного диаметра. Характеристики прибора следующие: одновременно регистрируемый диапазон длин волн 3850–10850 Å, спектральное разрешение $R = 45\,000$, максимальный диаметр изображения звезды, используемого для построения спектра, 3''3. Предусмотрена одновременная регистрация спектра звезды и спектра сравнения. Обеспечена возможность регистрации спектров с использованием анализаторов линейной и круговой поляризации. Прибор ориентирован на мониторинг звезд, с высокой точностью измерения характеристик спектральных линий.

Ключевые слова: *аппаратура: спектрографы*

1. ВВЕДЕНИЕ

Спектрографы высокого разрешения, имеющие оптоволоконную связь с телескопами различных диаметров, являются обязательной принадлежностью большинства современных обсерваторий. Оснащение Специальной астрофизической обсерватории (САО) телескопами умеренных диаметров было начато в 70-х годах и проходило под лозунгом: «нам нужны инструменты поддержки для фотометрии и спектроскопии с умеренным разрешением объектов, исследуемых на БТА». Кроме того, предполагалось проводить испытания некоторых вариантов наблюдений, планируемых для использования в дальнейшем на 6-метровом телескопе. Со временем 1-метровый и (один из оставшихся в распоряжении САО) 0.6-метровый телескопы состоялись как инструменты с научными программами, автономными в своем большинстве. Развитие техники регистрации изображений и совершенствование оптических технологий позволяет сегодня вернуться к вопросу о первоначально предполагаемом статусе малых телескопов как вспомогательных для БТА. Теперь в качестве вспомогательного средства мы рассматриваем вариант наблюдений, не уступающий существенно по спектральному разрешению и проникающей способности прибору, используемому на БТА.

Учитывая опыт выполнения избранных наблюдательных программ на БТА и научную тематику

обсерватории, можно выделить категорию задач, требующих более плотного покрытия спектрами по времени, чем это представляется возможным на 6-метровом телескопе. Во-первых, это задача спектроскопии звезд, находящихся, предположительно, на кратковременных стадиях эволюции (подробнее см. [1–3]). На этих стадиях, продолжающихся 10^2 – 10^4 лет, в атмосферах и оболочках звезд происходят относительно быстрые изменения, обнаружимые только при многомесячном или многолетнем мониторинге с высоким спектральным разрешением [3]. В качестве примеров такого мониторинга, выполненного на БТА, укажем работы [4–8].

Во-вторых, исследования некоторых двойных систем, проводимые на БТА методами спекл-интерферометрии, желательно поддерживать спектроскопическими наблюдениями, выполняемыми с адекватной и постоянной точностью. Например, в работе [9], где спекл-интерферометрические наблюдения получены на БТА, и собраны спектры, полученные на разных инструментах, точность определения орбитальных элементов системы ограничена характеристиками спектрограмм. И, наконец, не исключено, что появление прецизионного инструмента позволит обратиться к новой для САО программе — исследованию избранных экзопланет доплеровскими методами [10]. Все эти программы могут выполняться с высоким спектральным разрешением на 1-метровом телескопе со скважностью во времени много меньшей, чем

*E-mail: panchuk@ya.ru

при наблюдениях на БТА. Наши представления о спектрографах высокого разрешения, имеющих оптоволоконное сочетание с телескопом, представлены в обзоре [11]. В обзоре [12], в частности, оценена доля этих систем в совокупности всех спектрографов высокого разрешения, установленных на телескопах диаметром 0.5–1.5 м. В работах [11, 13] отмечены характеристики оптоволоконных спектрографов, изготовленных в САО для других учреждений. В 2012 г. мы приступили к разработке спектрографа для 1-метрового телескопа САО, уделяя особое внимание технологической выполнимости проекта в реальных условиях. Краткие сообщения о разрабатываемом приборе уже докладывались и опубликованы в [12, 14].

2. ПРОТОТИП И УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ

В качестве прототипа конструкции мы взяли оптоволоконный спектрограф, разработанный и изготовленный в САО для 1.2-метрового телескопа Коуровской обсерватории Уральского федерального университета. Этот прибор предварительно был испытан на 1-метровом телескопе САО в сочетании со штатным светоприемником телескопа — матрицей ПЗС $2K \times 2K$, охлаждаемой жидким азотом. Результаты испытаний показали, что по сравнению с существующими возможностями 1-метрового телескопа САО, характеристики спектроскопии высокого разрешения были резко улучшены (см. рис. 6 в [13]) и соответствуют мировому уровню (см. рис. 2 в обзоре [11]). Анализируя опубликованные результаты использования спектрографа [15, 16], отметим резервы в конструкции прототипа применительно к возможностям САО и отечественной оптической промышленности.

Во-первых, можно увеличить спектральное разрешение. Ориентируясь на весьма посредственное среднее качество изображений в Коуровской обсерватории, в прототипе мы использовали «толстое» оптоволоконно с диаметром ядра 150 мкм. С учетом согласующей оптики это означает, что на 1.2-метровом телескопе полностью захватывается изображение диаметром $5''$. Позже владельцы прибора предпочли уменьшить спектральное разрешение до $R = 15\,000$, установив оптическое волокно для полного использования изображений диаметром $10''$ [17]. Заметим, что для таких значений спектрального разрешения теряется смысл применения эшелле $R3$ и схемы «белого зрачка». Если использовать оптоволоконно с диаметром ядра 100 мкм, то при прежних мерах согласования оптики телескопа и спектрографа с числовой апертурой волокна формально получим $R = 45\,000$. При этом на 1-метровом телескопе

САО будет захватываться изображение диаметром $3''3$. По данным [18], за период наблюдений на БТА 01.01.1994–31.12.2010, медианная оценка качества изображений по 1310 наблюдательным ночам составляет $1''53$, что значимо отличается от средней величины $1''67$. Понятно, что для 1-метрового телескопа статистика должна оказаться лучше, т.е. в пользу изображений меньшего диаметра. С точки зрения повышения точности измерения эквивалентных ширин, полуширин и положений линий, увеличение R является более выгодным шагом, чем увеличение времени экспозиции, подробнее см. в [19]. Так что уменьшение диаметра ядра оптоволоконно в полтора раза (по сравнению с прототипом) делает проектируемый спектрограф более экономичным по свету (как ни парадоксально это звучит для большинства наблюдателей) за счет увеличения точности измерения всех параметров спектральных линий.

Во-вторых, можно изменить параметры элемента скрещенной дисперсии. Объединяя свойства дифракционной решетки и призмы, можно добиться более равномерного распределения спектральных порядков в кадре, т.е. «упаковать» в одном кадре большее число порядков, чем это позволяет применение решетки или призмы в отдельности. Такой прием приведет к снижению ошибок, возникающих при процедуре экстракции векторов спектральных порядков из двумерного эшелле-изображения. Равномерное разведение спектральных порядков позволяет предусмотреть вариант использования двух волокон, т.е. одновременно регистрировать каждый спектральный порядок дважды. Последнее открывает возможность для спектрополяриметрии ярких звезд.

В-третьих, в результате упаковки всего спектрального диапазона в один кадр появляется возможность зафиксировать положение элементов спектра в этом кадре, что серьезно отразится на качестве наблюдательного материала (главным образом, за счет работы практически с одними и теми же элементами светоприемника в течение последовательных экспозиций). Кроме того, такое решение позволяет сэкономить на некоторых функциях управления положением диспергирующих элементов. Как показал пример спектрографа ELODIE [20], фиксированный кадр облегчает создание однородного архива наблюдений и унификацию процедуры первичной обработки материала. Расчеты показали, что при оптимальном выборе параметров решетки эшелле и узла скрещенной дисперсии (призмы с дифракционной репликой на одной из граней) можно обеспечить следующие параметры кадра, регистрируемого матрицей ПЗС 2048×2048 с размером пикселя 13.5×13.5 мкм: диапазон $3850\text{--}10\,850 \text{ \AA}$, спектральные порядки с номерами 136–48 (89 порядков), перекрытие

соседних порядков до $\lambda < 9000 \text{ \AA}$. Так как в указанном диапазоне оптика серийной линзовой камеры имеет остаточный хроматизм, в первых оценках мы пользовались заниженной величиной спектрального разрешения ($R = 40\,000$). В действительности из-за неоднородного радиального распределения интенсивности по сечению пучка, выходящего из оптического волокна, физическая светосила камеры будет ниже геометрической, так что реальное спектральное разрешение окажется ближе к $R = 45\,000$.

В-четвертых, можно увеличить механическую стабильность спектрографа. По причинам не научного характера стационарная часть предыдущей модели спектрографа была собрана не на оптическом столе и установлена в пристройке к павильону 1.2-метрового телескопа. Результат влияния теплового удара ($\Delta T = 6^\circ\text{C}$), нанесенного путем открывания наружной двери пристройки, на сдвиг спектральных линий (с градиентом 1 пиксель на 1°C , см. рис. 2 в [17]), по нашему мнению, свидетельствует только о необычных условиях испытаний прибора (охлаждение конструкции со скоростью 0.5°C в минуту!). Конструкция стационарной части разрабатываемого спектрографа САО смонтирована на оптическом столе, с тепловой защитой первого уровня (стол толщиной 12 см и кожух спектрографа). Кроме того, предусмотрена защита второго уровня в виде параллелепипеда со стенками низкой теплопроводности, смонтированного вокруг стационарной части. Эта оболочка призвана защитить рабочий объем спектрографа и от колебаний влажности воздуха. Защищенный спектрограф планируется разместить на платформе фокуса куде 1-метрового телескопа, которая имеет фундамент, независимый от фундамента колонн телескопа и фундамента башни. Заметим, что потолок помещения фокуса куде является полом подкупольного помещения, т.е. находится в изменяющихся температурных условиях. Температура в объеме помещения фокуса куде должна поддерживаться с точностью $\Delta T = 0.5^\circ\text{C}$, это третий, внешний уровень тепловой защиты. Таким образом, параметром воздушной среды, способным существенно изменить показатель преломления воздуха, остается атмосферное давление. На основании многолетнего мониторинга характеристик приземной атмосферы (примеры приведены в [18]) и сравнения со статистикой наблюдений, приходим к выводу, что при тех резких изменениях давления, следствием которых являются уже критичные (для высокоточной спектроскопии) изменения показателя преломления воздуха, наблюдения практически не выполняются по метеоусловиям (облачность, осадки).

В-пятых, в результате оптимизации параметров узла скрещенной дисперсии можно применить

схему позиционной калибровки, проводимой непосредственно в течение регистрации научного спектра. Для этого следует предварительно подготовить спектр сравнения, уменьшая паразитные засветки от ярких линий ионов инертного газа и согласовывая общую интенсивность спектра сравнения с интенсивностью спектра исследуемой звезды. Такая мера позволяет выполнять одновременную регистрацию спектра звезды и спектра сравнения (вариант высокоточного измерения лучевых скоростей) в течение одного и того же времени в широком интервале экспозиций. Ожидается, что в этом случае остаточные эффекты нестабильности элементов конструкции и параметров воздушной среды будут сказываться одинаково на научном и опорном спектрах.

В-шестых, система автоматического гидирования должна быть оснащена более чувствительным и более «быстрым» светоприемником. Это необходимо для наблюдений звезд вплоть до $B = 14^m$.

И наконец, в проектируемом спектрографе увеличена доля оптических поверхностей, имеющих высокоэффективные отражающие или просветляющие покрытия.

3. КОНСТРУКЦИЯ СПЕКТРОГРАФА

Предусмотрены следующие режимы настройки, исследования и работы спектрографа: юстировка элементов стационарной части, исследование температурной нестабильности стационарной части по эмиссионному спектру сравнения, настройка системы гидирования путем обратной засветки оптического волокна, отладка системы гидирования на лабораторном стенде и на телескопе, настройка ослабителей в блоке спектра сравнения, калибровка анализаторов поляризации, учет попиксельной неоднородности приемника.

Исходя из совокупности этих режимов и общепринятой концепции спектрографов данного типа, были разработаны функциональные блок-схемы подвесной и стационарной частей спектрографа, приведенные на рис. 1 и 2 соответственно. Блок поляриметрических устройств (2, 6) предусмотрен для программ измерения круговой и линейной поляризации. Блок переключения оптических волокон (3–5) служит для перехода от поляриметрического варианта к варианту одновременной регистрации спектра звезды и спектра сравнения. Блок контроля и автоматической коррекции положения звезды (7–10) выполняет функции захвата изображения объекта и его сопровождения (гидирования). В режиме измерения лучевых скоростей на турели 2 используется пустое окно, двулучепреломляющая пластина 6 выведена из пучка, изображение звезды строится на входе волокна 12. Свет источника спектра сравнения, приходящий по

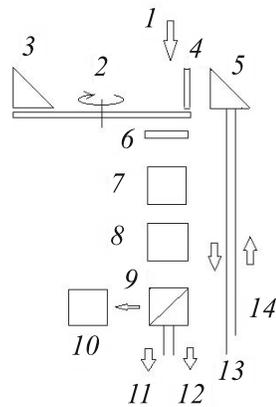


Рис. 1. Блок-схема подвесной части спектрографа. Обозначения: (1) пучок света, приходящий от телескопа; (2) турель, несущая четыре фазосдвигающие пластинки, свободное окно, призму (3) и зеркало (4); (5) призма оптических волокон спектра сравнения; (6) пластина Савара; (7, 8) пластины автогида; (9) светоделитель, отклоняющий 5% света на камеру (10) автогида; (11, 12, 13) оптические волокна, питающие стационарную часть; (14) оптическое волокно, подающее излучение от блока подготовки спектра сравнения. Толстыми стрелками указаны направления передачи света. Оптика, согласующая апертуры волокон, не показана.

оптическому волокну 14 в подвесную часть, отклоняется зеркалом 4 на вход оптического волокна 13 и поступает в стационарную часть. В режиме измерения линейной и круговой поляризации на турели 2 работает одна из фазосдвигающих пластинок и вводится пластина 6. Излучение, поляризованное по кругу в разных направлениях, поступает в стационарную часть по оптическим волокнам 11 и 12. Спектр сравнения в этом режиме не регистрируется. Если на оптическую ось выводится отклоняющая призма 3, то вместо поляризованных компонент спектра звезды регистрируются две полоски спектра сравнения (поступившего по оптическому волокну 14), сформированные пластиной 6. При этом в оптическое волокно 13 спектр сравнения не поступает. Таким образом, в любом из режимов в стационарную часть поступает свет только по двум оптическим волокнам (12 и 13 или 11 и 12).

Блок настройки узла скрещенной дисперсии 17 предусмотрен для перехода от варианта поляриметрических измерений к варианту измерения лучевых скоростей, наличие этого блока несколько конфликтует с концепцией неизменного кадра. Блок градиентного светофильтра 18 служит для подавления потока в нерабочем порядке прозрачной решетки скрещенной дисперсии. Блок фотоэкспонетра 16 предназначен, в основном, для определения центра тяжести экспозиции с целью более точного учета гелиоцентрических поправок в варианте измерения лучевых скоростей. Блок подготовки спектра сравнения 15 представляет со-

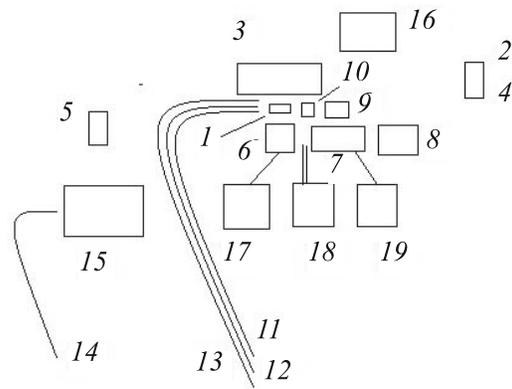


Рис. 2. Блок-схема стационарной части спектрографа. Обозначения: (1) оптоволоконный вход; (2) коллиматор; (3) эшелле; (4) объектив построения промежуточного спектра; (5) оптика построения белого зрачка; (6) узел скрещенной дисперсии; (7) объектив камеры спектрографа; (8) светоприемник; (9) блок затвора; (10) блок обратной засветки оптических волокон; (11, 12) оптические волокна, идущие от светоделителя (поз. 9 на рис. 1); (13) оптическое волокно спектра сравнения; (14) оптическое волокно подачи спектра сравнения на подвесную часть; (15) блок подготовки спектра сравнения; (16) блок фотоэкспонетра; (17) блок управления узлом скрещенной дисперсии; (18) блок градиентного светофильтра; (19) блок фокусировки камеры. Обозначения элементов 11–14 те же, что и на рис. 1.

бой отдельный спектральный прибор, размещенный рядом с оптическим столом стационарной части спектрографа. Излучение спектра сравнения, обработанное в этом блоке, по оптическому волокну 14 подается в подвесную часть, откуда вместе с излучением исследуемой звезды передается в стационарную часть (по паре волокон 11 и 12 или 12 и 13). В варианте измерения лучевых скоростей эта схема обеспечивает одинаковые условия транспортировки калибровочного и основного, измеряемого, потоков (оптические волокна 12 и 13) из подвесной части в стационарную.

Оптическая схема стационарной части приведена на рис. 3, а ее общий вид — на рис. 4. Оптико-механические узлы стационарной части смонтированы на оптическом столе размером 240 × 100 × 12 см. Конструкция подъемного устройства защитного кожуха такова, что доступ к оптико-механическим узлам обеспечивается одним человеком, причем без передачи (изменения) нагрузок на оптический стол. Узлы зеркал коллиматоров и узел эшелле снабжены юстировочными приспособлениями, используемыми только при первоначальной настройке спектрографа.

Подвесная часть спектрографа (см. рис. 5 и 6) состоит из

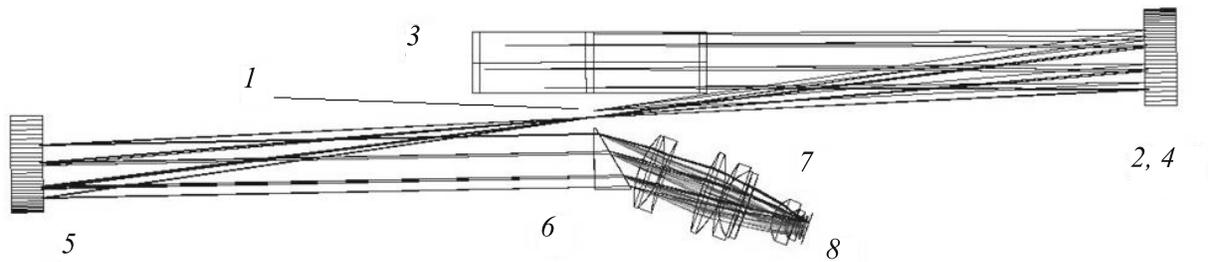


Рис. 3. Оптическая схема стационарной части спектрографа. Обозначения: (1) выходы оптоволокон; (2) зеркало коллиматора; (3) эшелле; (4) зеркало построения промежуточного изображения спектра; (5) зеркало формирования белого зрачка на призме (6); (7) оптика камерного объектива; (8) поверхность светоприемника. Нумерация элементов по ходу лучей та же, что и на рис. 2.

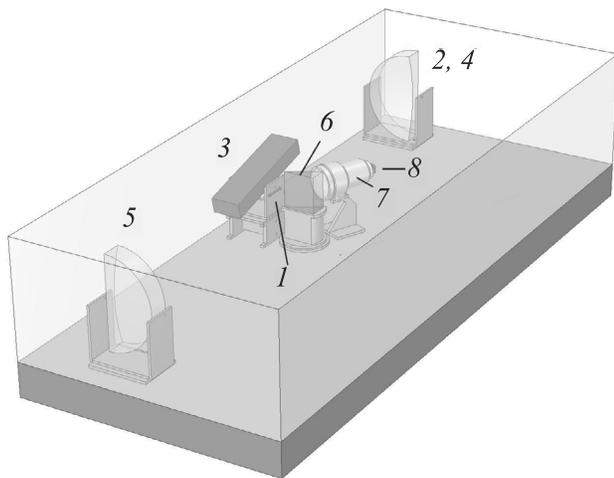


Рис. 4. Общий вид основных элементов стационарной части спектрографа. Обозначения те же, что и на рис. 3. Блок фотоэкспонетра и блок подготовки спектра сравнения не показаны.

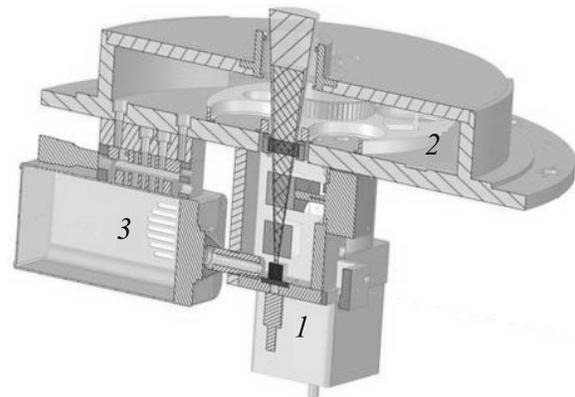


Рис. 5. Схема конструкции подвесной части спектрографа. Обозначения: (1) оптоволоконные входы (поз. 11 и 12 на рис. 1); (2) поляриметрическая головка; (3) ТВ-камера автогидирующей системы.

(1) узла автогида, совмещающего изображение исследуемого объекта с торцом оптоволокон и состоящего из двух ортогонально установленных плоско-параллельных пластин, смонтированных на осях шаговых двигателей; для обратной связи используется сигнал рассогласования, полученный с помощью подсмотровой камеры с внутренним усилением (EMCCD);

(2) поляриметрического блока, представляющего собой вводимую в оптическую ось двулучепреломляющую пластину Савара и анализатор поляризации, состоящий из набора полуволновых и четвертьволновых пластин, сменных под два различных диапазона длин волн, с возможностью поворота каждой фазосдвигающей пластины на заданный угол;

(3) узла калибровки, позволяющего сравнить

спектр исследуемого источника с опорным спектром.

Ввод-вывод всех оптических элементов, их вращение осуществляется с помощью оригинального механизма [21], приводимого в движение всего одним двигателем.

4. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ

В системе управления прототипом нами использованы модули, изготовленные и запрограммированные в САО [22]. Описание и инструкция по системе управления прототипом размещены по веб-адресу <http://www.sao.ru/hq/ssl/maks/UFES/manual/manual.html>. В данной конструкции спектрографа элементная база системы управления существенно обновлена.

Система управления спектрографом высокого разрешения 1-метрового телескопа САО построена на базе технологий National Instruments и состоит из контроллера NI CompactRIO 9073, включающего в себя модуль оцифровки видеосигнала



Рис. 6. Общий вид подвесной части спектрографа. Обозначения: (1) привод одной из пластин автогида; (2) универсальный привод поляриметрического блока; (3) ТВ-камера.

(двухканальный видео-граббер) AF 1502, модули силовых ключей для управления шаговыми двигателями NI 9501 с возможностью деления шага до 128 (3 шт), модуль цифрового ввода-вывода данных NI 9401, предназначенный для обработки концевых датчиков, модуль беспроводного доступа (SEA cRIO WLAN) к контроллеру по Wi-Fi, предназначенный для исключения кабельных линий, модуль блока питания NI PS-16.

Осуществляется управление следующими функциями: ввод/вывод и смена фазосдвигающих пластинок, поворот фазосдвигающих пластинок на определенный угол, ввод-вывод двулучепреломляющего элемента, наклоны пластин системы гидирования, ввод-вывод оптики калибровок, управление камерой телевизионного подзора, обратная засветка оптического волокна. Контроль и управление спектрографом осуществляется через Интернет.

5. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАЗРАБОТКИ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СПЕКТРОГРАФА

Проектирование оптики спектрографа выполнено с использованием пакета Zemax. Проектирование механических деталей, узлов, а также предварительное макетирование выполнено с использованием пакетов программы создания и редактирования твердотельных 3D-моделей SpaceClaim

Engineer. Программные коды системы управления написаны в среде графического программирования LabView. Совершенствуется алгоритм обработки спектрограмм, учитывающий новую конфигурацию эшелле-изображения и новые возможности систем калибровки. Кроме того, разработаны алгоритмы и построена полная математическая модель спектрографа, результаты этой работы будут опубликованы отдельно.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Все оптические элементы спектрографа изготовлены. Кроме приобретенных стандартных модулей, разработано и изготовлено более сотни механических деталей и собраны все оптико-механические узлы. Система управления собрана и проходит отладочные испытания. Защитная оболочка второго уровня находится в стадии изготовления.

БЛАГОДАРНОСТИ

Различные этапы создания спектрографа поддержаны Министерством образования и науки Российской Федерации (соглашение № 14.619.21.0004, идентификатор проекта RFMEFI61914X0004) и частично проектами РФФИ 12-07-00739, 13-02-00029а, 14-02-00291а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. G. Klochkova, Monthly Notices Royal Astron. Soc. **272**, 710 (1995).
2. V. G. Klochkova, Bull. Spec. Astrophys. Obs. **44**, 5 (1997).
3. V. G. Klochkova, Astrophysical Bulletin **69**, 279 (2014).
4. V. G. Klochkova, E. L. Chentsov, and V. E. Panchuk, Monthly Notices Royal Astron. Soc. **292**, 19 (1997).
5. V. G. Klochkova, M. V. Yushkin, E. L. Chentsov, and V. E. Panchuk, Astronomy Reports **46**, 139 (2002).
6. V. G. Klochkova, M. V. Yushkin, A. S. Miroschichenko, et al., Astron. and Astrophys. **392**, 143 (2002).
7. V. G. Klochkova, E. L. Chentsov, V. E. Panchuk, et al., Astrophysical Bulletin **69**, 439 (2014).
8. V. G. Klochkova, V. E. Panchuk, and N. S. Tavalzhanskaya, Astronomy Letters **41**, 14 (2015).
9. Yu. Yu. Balega, E. L. Chentsov, V. V. Leushin, et al., Astrophysical Bulletin **69**, 46 (2014).
10. V. E. Panchuk, V. G. Klochkova, M. V. Yushkin, et al., J. Opt. Technology (in press).
11. V. E. Panchuk, M. V. Yushkin, and M. V. Yakovov, Astrophysical Bulletin **66**, 355 (2011).
12. V. E. Panchuk and V. G. Klochkova, Bull. Crimean Astrophys. Obs. **109**, 124 (2013).
13. V. E. Panchuk, M. V. Yushkin, E. V. Ukhanov, et al., Bull. Crimean Astrophys. Obs. **109**, 196 (2013).

14. V. Panchuk, M. Yushkin, V. Klochkova, et al., ASP Conf. Ser. **494**, 334 (2015).
15. S. Yu. Gorda, *Astrophysical Bulletin* **68**, 101 (2013).
16. S. A. Alexeeva, A. M. Sobolev, S. Yu. Gorda, and V. McSwain, *Astrophysical Bulletin* **68**, 169 (2013).
17. V. V. Krushinsky, A. A. Popov, and A. F. Punanova, *Astrophysical Bulletin* **69**, 497 (2014).
18. V. E. Panchuk and V. L. Afanas'ev, *Astrophysical Bulletin* **66**, 233 (2011).
19. V. E. Panchuk, I. D. Najdenov, V. G. Klochkova, et al., *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **44**, 127 (1997).
20. A. Baranne, D. Queloz, M. Mayor, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **119**, 373 (1996).
21. М. В. Якопов, Г. В. Якопов, Патент РФ № 2510473 (2014).
22. М. В. Якопов, *Candidate's Dissertation in Technical Sciences* (Taganrog State University of Radio Engineering, Taganrog, 2006).

Design of a High Resolution Spectrograph for the SAO 1-m Telescope

V. E. Panchuk, M. V. Yushkin, V. G. Klochkova, G. V. Yakopov, and Yu. B. Verich

We designed a cross-dispersion fiber-fed spectrograph for moderate-diameter telescopes. The instrument can simultaneously record the wavelength interval spanning from 3850 to 10 850 Å at a spectral resolution of $R = 45\,000$ with the maximum diameter of the input star image of $3''3$. The instrument allows the spectrum of the star to be recorded simultaneously with the comparison spectrum. Spectra can also be acquired with the use of linear and circular polarization analyzers. The instrument is oriented toward high-precision monitoring of line properties in stellar spectra.

Keywords: *instrumentation: spectrographs*