

УДК 681.782.46

Звездный спектрофотометр для области 3500–8900 Å. I. Оптико-механическая часть и система управления

В.И. Бурнашев, В.Г. Шитов, А.Ф. Лагутин, Б.А. Бурнашева, С.А. Тарасов

НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, 98409, Украина, Крым, Научный

Поступила в редакцию 27 августа 2007 г.

Аннотация. Описан звездный спектрофотометр, созданный для абсолютной спектрофотометрии звезд в спектральном диапазоне 3500–8900 Å с разрешением 30 Å. Прибор установлен на 80-см телескопе Крымской астрофизической обсерватории.

STELLAR SPECTROPHOTOMETER FOR THE SPECTRAL REGION 3500- 8900 Å. 1. OPTICS AND ELECTRONIC SYSTEMS, *by V.I. Burnashev, V.G. Shitov, A.F. Lagutin, B.A. Burnasheva, S.A. Tarasov.* The stellar spectrophotometer for the spectral region 3500–8900 Å was manufactured. This device was mounted on the telescope RC-800 at the Crimean astrophysical observatory.

Ключевые слова: spectrophotometry

1 Назначение и конструкция прибора

В последние годы, в связи с развитием техники фотоэлектрического сканирования звездных спектров и успехами в деле теоретического расчета строения звездных атмосфер и выходящего излучения с их поверхности, возрос интерес к абсолютным спектрофотометрическим исследованиям.

Изучение распределения энергии в звездных спектрах, выраженных в абсолютных единицах, позволяет получить информацию о температуре, ускорении силы тяжести на поверхности, источниках непрерывного поглощения, химическом составе, межзвездном поглощении и т. д. Обычно абсолютные спектрофотометрические измерения осуществляются с низким спектральным разрешением. Тем не менее, этот метод имеет существенные преимущества перед щелевыми спектрограммами за счет более высокой точности при сравнении абсолютных светимостей в различных спектральных участках и рассмотрении развития некоторых характерных деталей в спектрах переменных звезд, т. е. дает качественно новую информацию. Исследование распределения энергии в спектрах двойных звезд позволяет получить сведения о спектральных классах звездных компонентов и оценить их вклад в общее излучение. Детальные средние кривые распределения энергии для звезд различных температур и светимостей используются, в частности, при выборе оптимальных спектральных районов для многоцветной фотометрии с целью определения спектральных классов, абсолютных величин и параметров металличности, для вычисления различных параметров и сопоставления свойств многоцветных фотометрических систем, для вычисления коэффициентов гетерохромной экстинкции и т. д.

Большинство накопленных к настоящему времени спектрофотометрических данных, содержащихся в спектрофотометрических каталогах, созданных в 60–90-е годы, получены методом механического сканирования спектров, при котором во время наблюдения регистрируется излучение звезды, попадающее на светоприемник от узкой полоски спектра, вырезаемой выходной щелью спектрометра, в то время как все остальное излучение теряется. Последовательное перемещение выходной щели вдоль спектра дает возможность получить информацию о характере излучения звезды в спектральном диапазоне, обеспечиваемом данным спектрометром. Понятно, что такой способ наблюдений сильно ограничивает проникающую силу прибора. До недавнего времени абсолютная спектрофотометрия ограничивалась только яркими звездами. Один из спектрометров такого типа долгое время применялся в Крымской обсерватории, в частности, для наблюдений звезд поздних спектральных классов (Бурнашев и др., 1996; Бурнашев, Гузий, 2001).

Малая проникающая сила примененной аппаратуры и высокая трудоемкость в обработке наблюдательного материала привели к тому, что к настоящему времени сложилась парадоксальная ситуация, когда объем абсолютно калиброванных спектрофотометрических каталогов, полученных с помощью специализированных спутников (TD-1, IUE, IRAS) значительно превышает число опубликованных и доступных широкой научной общественности исследований распределения энергии в спектрах небесных объектов в видимом и близком инфракрасном спектральных диапазонах.

Между тем, развитие микроэлектроники и широкое распространение многоэлементных светоприемников делают весьма возможным получение большого объема наблюдательных спектрофотометрических данных с помощью телескопов умеренного размера, диаметром до 1 метра, работающих на многих обсерваториях. Навесная аппаратура, предназначенная для такого рода задач, уже применяется на многих телескопах. В качестве примеров могут служить спектрополяриметр обсерватории Додариа в Японии для области 400–900 нм (Кавабата и др., 1999) или универсальный фотометр-спектрометр, работающий в ИК-области (0,8–2,4 мкм) на телескопе диаметром 3,5 м на Канарах (Баффа и др., 2001). Впечатляющим проектом является SLOAN, предусматривающий получение значительного массива спектрофотометрических данных в диапазоне от 4000 Å до 9000 Å.

Ниже приводятся техническое описание спектрофотометра, предназначенного для измерения излучения звезд в области спектра 3100–9000 Å с разрешением 30–40 Å для целей изучения распределения энергии в спектрах звезд различных классов, а также определения атмосферной экстинкции в исследуемом спектральном диапазоне. Поставленные задачи предъявляют ряд специфических требований к конструкции спектрофотометра:

1. Прибор должен быть достаточно легким для того, чтобы быть установленным на малый телескоп с диаметром главного зеркала 0,4–1 м. В Крымской обсерватории таким телескопом может быть РК-800. Этот типичный для большинства обсерваторий инструмент диаметром 0,8 м и светосилой $F/16$ может нести навесную аппаратуру весом до 50 кг.
2. Для увеличения проникающей силы прибора в качестве светоприемника применяется ПЗС-матрица.
3. Вместо входной щели, как это принято в обычных спектрографах, используется входная диафрагма достаточно больших размеров, порядка нескольких диаметров турбулентного диска изображения звезды. Таким образом, входным окном прибора является изображение звезды. Хотя при этом чистота спектра несколько меняется в зависимости от условий наблюдений, однако при этом не происходит искажения конечного результата, вызванного потерями света на щечках щели, в частности, из-за атмосферной дисперсии. Зависимость длины спектра, вызванного этим эффектом, от зенитного расстояния показана на рис. 1. (Филлипенко, 1994; Мельников, 1957). При среднем качестве изображения 3'' для экваториальных звезд из-за атмосферной дисперсии изображение растянется до 6'', что в фокальной плоскости телескопа РК-800 составит около 0,3 мм.
4. Предполагается исследование распределения энергии в спектрах достаточно слабых звезд. При этом становится существенным влияние фона неба, особенно в лунные ночи. Учет фона неба может быть выполнен с помощью параллельной записи спектра фона неба через вспомогатель-

ную диафрагму, или, в крайнем случае, необходимы специальные измерения фона неба для его учета, что, вообще говоря, нежелательно. Окончательное решение вопроса и выработка соответствующей методики учета фона могут быть получены только экспериментальным путем.

5. Смещения спектра поперек дисперсии, вызванные ошибками гидирования и другими причинами, должны входить в элемент разрешения (порядка 1–2 пикселей).
6. Система регистрации и управления должна быть достаточно гибкой для того, чтобы осуществлять дальнейшее совершенствование прибора без значительных переделок.

С учетом этих и других требований в Крымской астрофизической обсерватории был разработан спектрофотометр для области 3000–9000 Å. Спектрофотометр построен по классической схеме с плоской дифракционной решеткой, работающей в первом порядке.

Прибор устанавливается позади главного зеркала телескопа. Изображение звезды фокусируется в плоскости входной диафрагмы. Излучение звезды проходит сквозь входную диафрагму, попадает на коллиматорное зеркало, затем на дифракционную решетку, разлагается в спектр и фокусируется объективом камеры на детектор (ПЗС-матрицу). Управление матрицей, съем информации и ее хранение с последующей обработкой осуществляется с помощью персонального компьютера.

Особенностью оптической схемы является то, что входная диафрагма расположена над решеткой на расстоянии примерно 40 мм. При этом в плоскости входной диафрагмы удлинение из-за астигматизма для коллиматора с фокальным расстоянием 516 мм составляет около 0.06 мм. Для камеры с фокусом 85 мм изображение растянется поперек дисперсии до 0.01 мм, что для данного приемника и выбранного разрешения является вполне приемлемой величиной.

Оптическая схема показана на рис. 2 и включает в себя:

- поисковый подсмотр (1) с откидным зеркалом (10),
- входную диафрагму (2),
- центрировочное устройство, включающее в себя микроскоп типа МИР-2 (3) и перебрасывающую призму (4),
- коллиматорное зеркало (5),
- дифракционную решетку (6),
- линзовую камеру (7),
- ПЗС-матрицу (8),
- механизм ввода фильтра разделения порядков (9),
- источник калибровочного излучения (12), освещающийдвигаемую входную щель (2) с помощью откидного зеркала (11).

Поисковый подсмотр состоит из откидного зеркала и широкоугольного окуляра. Окуляр имеет перемещение по полю $\pm 15 \div 20$ мм.

Входная диафрагма предназначена для выделения излучения отдельной звезды. Ее диаметр составляет 1 мм, что для РК-800 составляет в угловой мере около $25''$. Устройство для центрировки звезды в диафрагме включает в себя серийный микроскоп типа МИР-2 и призму, выдвигающуюся на время центрировки звезды в диафрагме.

Сферическое коллиматорное зеркало ($F = 516$ мм, $D = 50$ мм) заключено в оправу, допускающую юстировочные подвижки.

Дифракционная решетка 300 штр/мм с концентрацией примерно около 5000 Å имеет размер заштрихованной части 50x60 мм и заключена в оправу, допускающую поворот, а также юстировочные подвижки.

В качестве камеры на первом этапе применяется серийный фотообъектив “Телиос 40-2” ($F = 85$ мм). Возможно, что в дальнейшем будет проработана конструкция и изготовлена специальная камера с кварцевой оптикой. Ее примерные параметры: диаметр 50–60 мм, фокусное расстояние – 85–100 мм, задний отрезок – 20–25 мм.

Приемником служит ПЗС-матрица типа ST-6 (размер пиксела 23x27 мкм, число пикселей 375x242, размер приемной площадки 8.63x6.53 мм). В настоящее время это единственный подходящий фотоприемник, имевшийся в нашем распоряжении, обеспечивающий достаточное разрешение

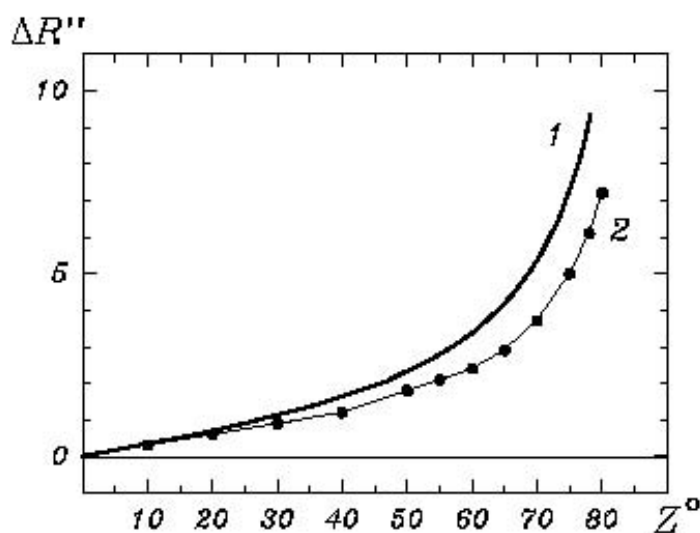


Рис. 1. Удлинение изображения звезды из-за атмосферной дисперсии. 1) 3500–9000 Å. 2) 4100–7500 Å

и динамический диапазон. В дальнейшем возможно применение другого фотоприемника, чувствительного в ультрафиолетовой области спектра, например, типа ST-6V. Матрица устанавливается в оправе, имеющей необходимые юстировочные подвижки для более точной фокусировки.

Применение выбранных оптических элементов обеспечивает линейную дисперсию около 350 Å/мм, что позволяет перекрыть в один прием около 3000 Å. Таким образом, применение указанного светоприемника с необходимостью ставит вопрос о механизме перемещения решетки. Наблюдения ведутся при двух фиксированных положениях решетки, регистрируя последовательно две области: 3000–6000 Å, 6000–9000 Å. Поскольку обычно применяют перекрытие областей, то полный регистрируемый диапазон несколько сузится. В данном конкретном случае, с учетом чувствительности приемника, он составил 3500–8900 Å. Одновременно с изменением выделяемой спектральной области производится ввод соответствующего фильтра, устраняющего паразитную засветку от спектров высших порядков. При дисперсии 350 Å/мм для применяемой матрицы одному пикселу соответствует 8 Å. Для РК-800 в фокальной плоскости расстоянию в 1 мм соответствует 25'', то есть для применяемой оптики на три пиксела (24 Å) попадает около 10''. При среднем качестве изображения 3'' можно надеяться получить спектральное разрешение около 30 Å – обычное для большинства абсолютных спектрофотометрических каталогов.

Калибровка по длинам волн осуществляется с помощью вспомогательного источника, состоящего из ртутно-гелиевой лампы типа ДРГС-12 и подвижного зеркала, расположенного в блоке поискового подсмotra. Излучение от лампы направляется в спектрофотометр с помощью откидного зеркала, при этом одновременно на вход прибора вводится узкая щель, ширина которой примерно соответствует размеру звезды.

2 Система управления прибором

Электромеханическая часть спектрофотометра (СФ) предназначена, во-первых, для управления турелью с фильтрами разделения порядков, во-вторых, для изменения угла установки дифракци-

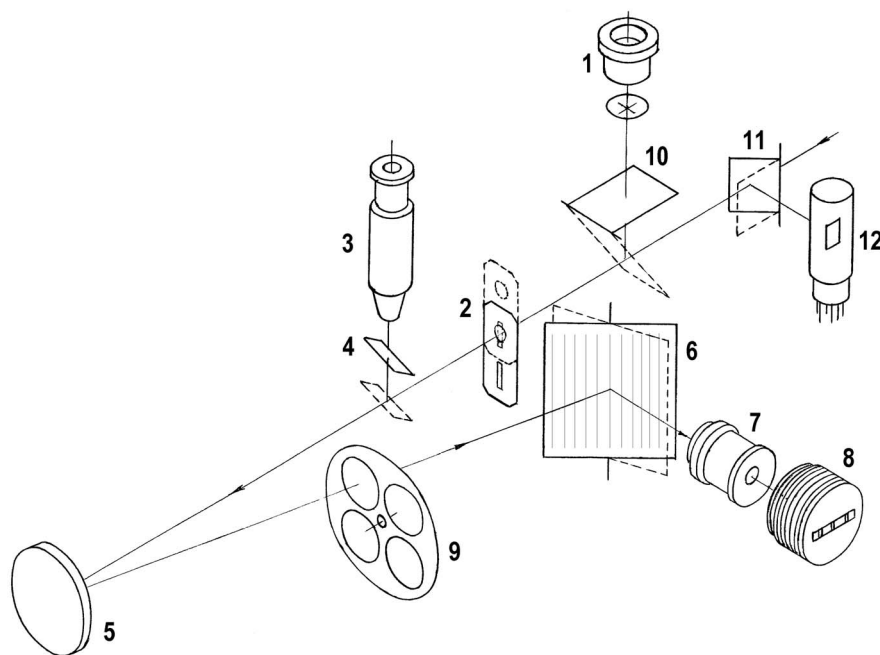


Рис. 2. Оптическая схема спектрофотометра

онной решетки.

Команды управления передаются от персонального компьютера (ПК) через интерфейс Centronics (он же ИРПР-М или LPT-порт). Компьютер установлен в обогреваемом помещении и соединен с прибором достаточно длинным кабелем, около 10 м, что может явиться источником дополнительных помех. Для наладочно-юстировочных работ возможен режим ручного управления от местного пульта, расположенного непосредственно на спектрометре.

В состав электромеханической части (рис. 4) входят блок гальванической развязки (БГР), плата управления с местным пультом управления, а также узел турели с набором фильтров и узел дифракционной решетки.

Персональный компьютер связан с прибором с помощью интерфейсного кабеля через блок гальванической развязки, который предназначен для: 1) гальванической развязки ПК и СФ с целью увеличения помехоустойчивости и электробезопасности; 2) обмена сигналами управления между ПК и СФ по длинной линии; 3) выработки питающих напряжений (220 В, 50 Гц, +5 В, +12 В) для всей электромеханической части СФ.

Гальваническая развязка осуществляется с помощью оптронов 1N139. Питание цепей, связанных непосредственно с компьютером, осуществляется от разрядов регистра данных LPT-порта (биты 1...7). Программист должен учитывать это обстоятельство, устанавливая указанные разряды перед началом работы в "высокое" состояние.

Для приема сигналов с длинной линии используются приемники на базе микросхем К561ТЛ1 с входными цепями согласования. Передача сигналов в линию производится магистральным передатчиком К1533АПЗ.

Трансформаторный блок питания, подключенный к сети переменного тока 220 В, используется для питания остальной части схемы. Стабилизаторы +5 В и +12 В собраны по стандартной схеме с использованием интегральных микросхем серии 78xx.

Узел турели (рис. 5) представляет собой диск с четырьмя отверстиями, в двух из которых уста-

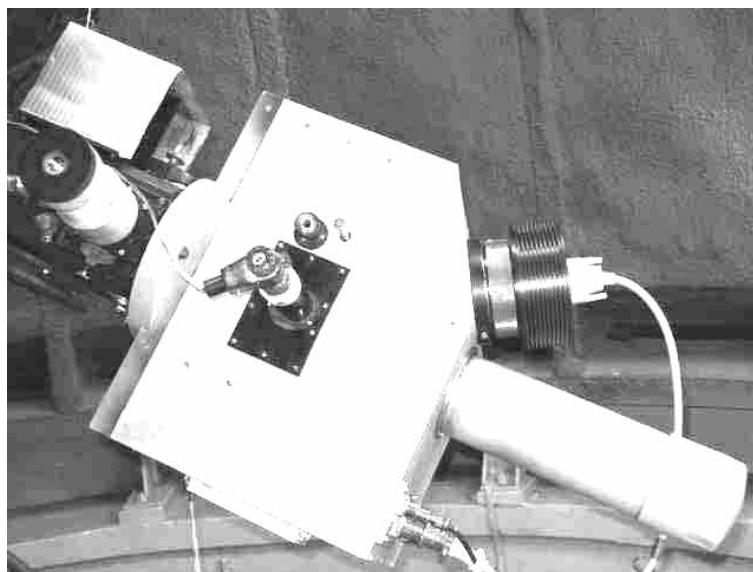


Рис. 3. Общий вид спектрофотометра

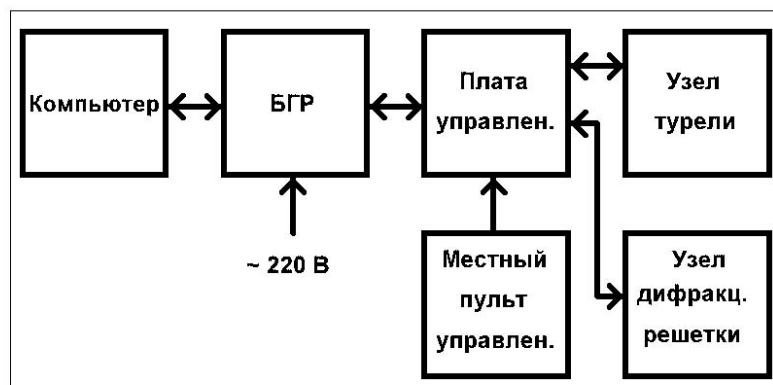


Рис. 4. Структурная схема управления электромеханической частью спектрофотометра

новлены фильтры, разделяющие порядки дифракционной решетки. Одно пустое окно служит для настройки, одно окно – резервное. Диск турели вращается электродвигателем РД-09 через редуктор. Полный оборот турель делает примерно за 10 секунд. Это время может колебаться в небольших пределах и зависит от состояния редуктора (вязкость смазки, температура окружающей среды и т. п.). Положение диска, а значит и установленного фильтра, контролируется двумя фотодатчиками, один из которых определяет начальное положение турели. С помощью второго датчика происходит выбор требуемого фильтра. Для преодоления при остановке выбега диска вследствие значительного момента инерции, обусловленного большим коэффициентом редукции, предусмотрена схема

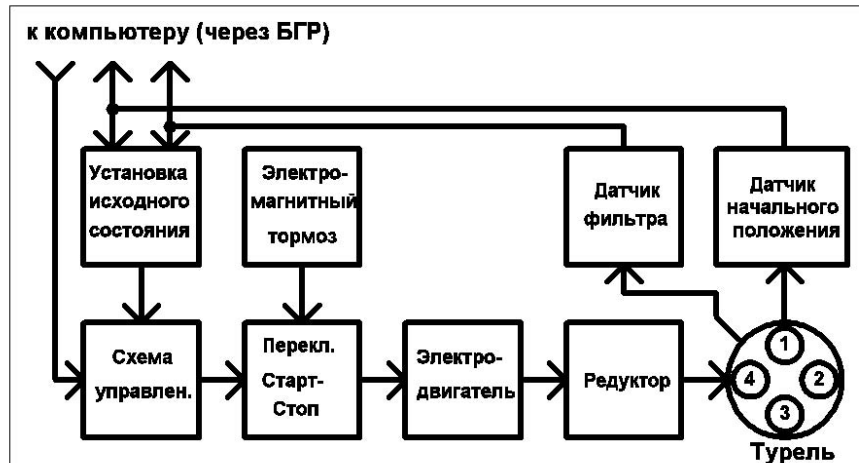


Рис. 5. Схема узла турели фильтров

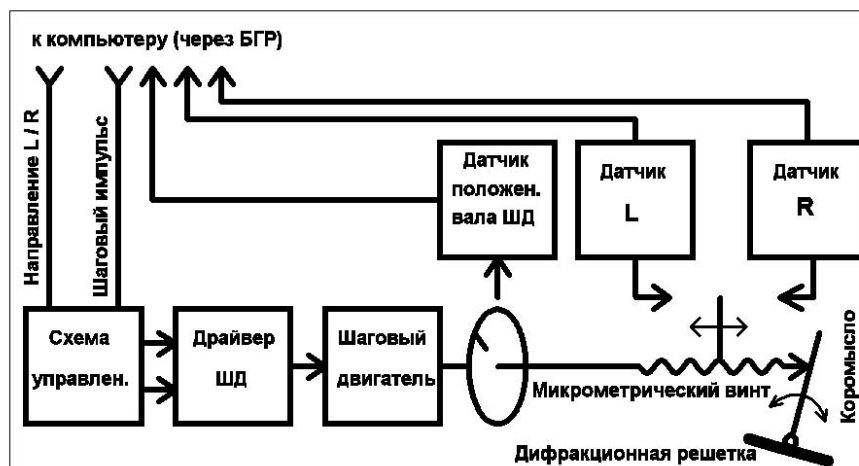


Рис. 6. Схема управления движением дифракционной решетки

электромагнитного тормоза.

Узел дифракционной решетки (рис. 6) состоит из шагового двигателя, который связан через сильфон с микрометрическим винтом. Винт вращает дифракционную решетку через коромысло. Положение решетки контролируется тремя фотодатчиками. Шаговый двигатель (ШД) типа КР39НМ2-025 от широко применявшихся ранее пятидюймовых накопителей на гибких магнитных дисках (Ремонт дисководов, 1995). Драйвер шагового двигателя применен от того же НГМД и включен по стандартной схеме. Использованы сигналы задания направления и шага. Полный оборот ШД делает за 200 шагов. Максимальная частота шаговых импульсов, подаваемых на драйвер при условии холостого хода ШД, порядка 500 Гц. С учетом реального момента инерции механизма

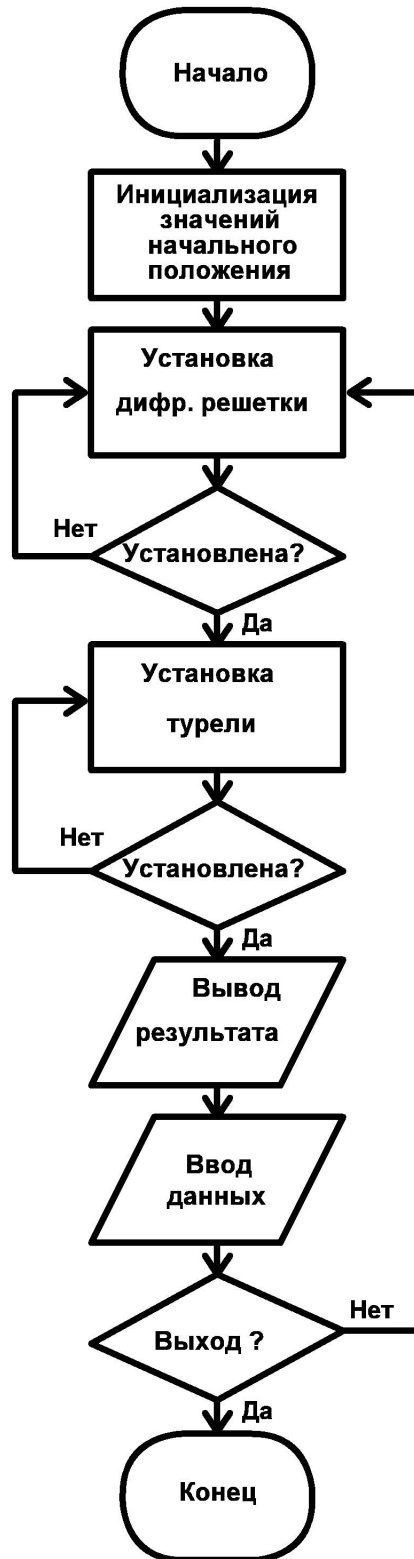


Рис. 7. Алгоритм управления прибором

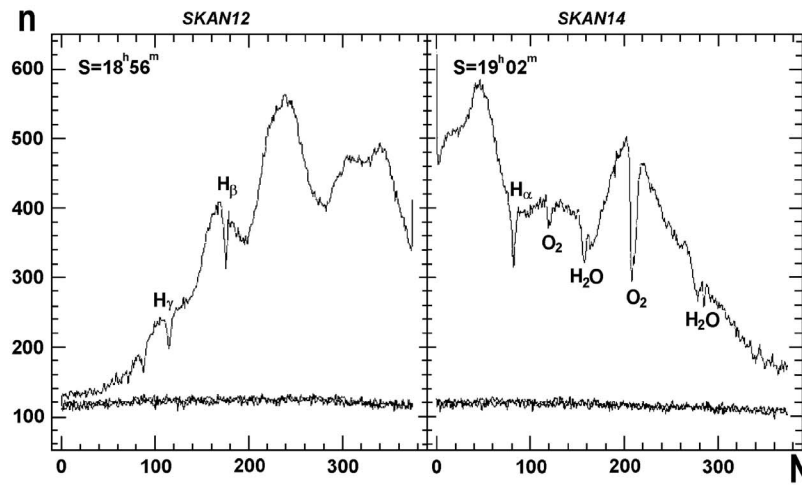


Рис. 8. Наблюдаемые спектры αLyr . (19.08.2007. Звездное время 18 ч 56 м. и 19 ч 02 м соответственно. Экспозиция 0.1 сек.). В нижней части рисунка показаны отсчеты (сдвиг+фон), взятые выше и ниже спектра звезды

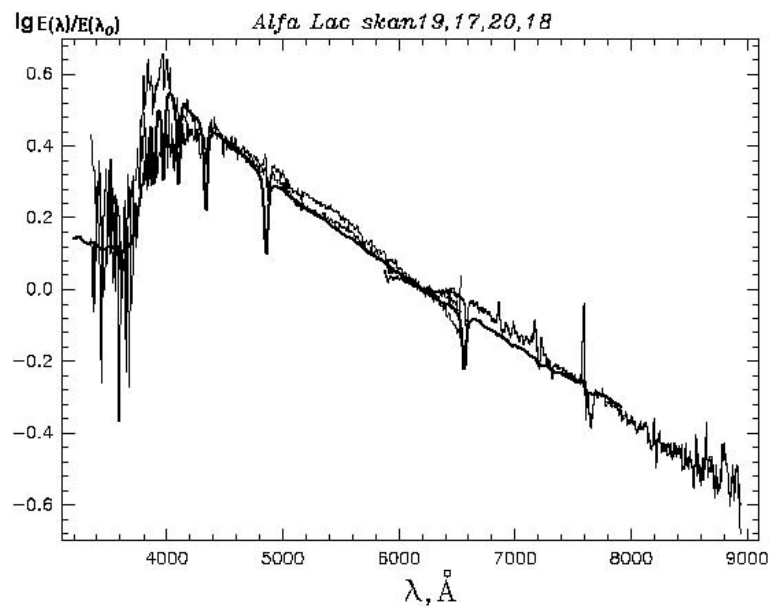


Рис. 9. Относительное распределение энергии в спектре αLac . Тонкие линии – наблюдаемый спектр, толстая – по данным Бурнашева и Гузия (1993)

она снижается до 100 Гц. Через микрометрический винт двигатель с помощью коромысла изменяет угловое положение решетки. Полный ход винта составляет 25 мм. Два фотодатчика (R и L) предназначены для контроля конечных положений решетки (а следовательно, и коромысла, и винта) – правого и левого соответственно. Третий фотодатчик контролирует угловое положение вала ШД внутри оборота с точностью до одного шага. Это необходимо как для устранения неоднозначности конечных положений механизма, так и для повышения точности отсчета шагов от исходного положения.

Плата управления осуществляет обработку сигналов всех фотодатчиков и логическое управление механизмами соответственно командам как от местного пульта управления, так и от ПК.

Местный пульт управления расположен внутри спектрофотометра и предназначен для облегчения и упрощения наладки прибора.

Программа управления спектрофотометром выполнена в среде Borland Delphi для оконного режима Windows. С целью ускорения работы она разделена на две части, выполняемые одновременно – собственно подпрограмма управления прибором и написанный в VCL “дружественный” интерфейс для диалога с пользователем. При запуске программы на экране терминала появляется панель управления прибором. На этой панели находятся: кнопка установки исходного положения прибора, окно задания положения решетки, переключатель установки фильтра, кнопка запуска программы для отработки установленных значений, кнопка остановки выполняемой программы и кнопка выхода из программы. Кроме того, на панели находятся индикаторы состояния прибора (выполнение-завершение программы, состояние датчиков механизма, номер фильтра). Пользователь с помощью этой панели выбирает параметры сеанса наблюдений.

На рисунке 7 показан алгоритм управления прибором.

При включении программа запускает подпрограмму инициализации начальных значений, определяющих исходное положение для турели и решетки. С этими значениями начинает сначала работать процедура установки дифракционной решетки в заданное положение (подача шаговых импульсов на ШД до тех пор, пока не будет достигнуто исходное положение, определяемое по датчикам). По окончании этого действия запускается процедура установки турели фильтров, которая тоже завершается по сигналам соответствующих датчиков. Результаты работы выводятся на экран терминала в окно диалога с пользователем. Далее управление передается подпрограмме ввода данных. Пользователь принимает решение о продолжении или завершении программы в целом и вводит соответствующие значения положений турели и решетки в случае продолжения работы. В противном случае указывается команда выхода и на этом работа программы заканчивается.

3 Результаты испытаний

Спектрофотометр был установлен на телескопе РК-800 летом 2007 года. Для оценки качества получаемого материала 19 августа 2007 г. были проведены пробные наблюдения двух звезд.

Оцифрованный спектр первичного стандарта αLyr , соответствующий двум положениям решетки, показан на рис. 8, где по оси ординат показан средний по столбцу из 10 пикселей отсчет для соответствующего номера столбца. В нижней части рисунка указаны значения темноты вместе со смещением (bias). Оба спектра получены при средних условиях наблюдений с экспозицией 0.1 сек. Для градуировки по длинам волн в начале и в конце каждого наблюдения записывался спектр сравнения лампы ДРГС-12. Отметим, что в рассматриваемом спектральном диапазоне становится существенным поглощение в теллурических полосах молекулярного кислорода и воды. Положение этих полос указано в нижней части рисунка.

Учет влияния атмосферной экстинкции выполнен с помощью средней кривой, полученной в 1977 г. и продленной в исследуемый спектральный диапазон, в том числе и в районы теллурических полос, простым экстраполированием.

На рис. 9 показан окончательный результат – относительное распределение энергии в спектре звезды αLac , полученное путем сравнения с первичным звездным спектрофотометрическим стандартом αLyr .

Как видно, для двух последовательных наблюдений сходимость полученных значений лежит в пределах 10 процентов. Учитывая приближенность применяемой методики, можно считать данный результат вполне удовлетворительным.

Таким образом, натурные испытания подтвердили правильность принятых технических решений и пригодность прибора для решения поставленных задач. При дальнейшей доработке прибора особое внимание должно быть обращено как на замену фотоприемника, так и на более тщательный учет атмосферной экстинкции.

Авторы благодарны Л.М.Наполовой, изготовившей многие рабочие чертежи. Мы признательны коллективу работников механической мастерской, особенно Г.А. Сивцову и А.Т. Муштинкину. Сборка и наладка электронных схем была завершена в кратчайшие сроки благодаря усилиям А.В. Беляева и К.В. Зубко. Мы благодарны также В.М. Лютому, В.И. Багрию и А.А. Шляпникову за полезные дискуссии в процессе наладки прибора.

Литература

- Баффа и др. (Baffa C., Comoretto C., Gennari S., Lisi F., Oliva E., Biliotti V., Checcucci A., Gavrioussev V., Giani E., Chinassi F., Hunt L.K., Maiolino R., Mannucci G., Sozzi M., Stefanini P., Testi L.) // *Astron. Astrophys.* 2001. V. 378. №. 2. P. 722.
- Бурнашев В.И., Гузий С.С. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1993. Т. 87. С. 97.
- Бурнашев В.И., Гузий С.С. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 2001. Т. 97. С. 4.
- Кавабата (Kavabata K.S., Okazaki A., Akitava H., et al.) // *Publ. Astron. Soc. Pacific.* 1999. V. 111. P. 898.
- Мельников О.А. // *Изв. Главной Астрон. Обсерв.* 1957. Т. 20. №. 157. С. 1.
- Новиков Ю.В., Калашников О.А., Гуляев С.Э. // *Разработка устройств сопряжения для персонального компьютера типа IBM PC.* / Ред. Ю. В. Новиков. М.: ЭКОМ. 1997.
- Ремонт дисководов. Серия "РЕМОНТ". М.: СОЛОН. 1995.
- Филипенко (Fillipenko A.N.) // *Publ. Astron. Soc. Pacific.* 1994. V. 94. P. 715.