

УДК 520.24

## Система управления спектрофотометром телескопа БСТ-2 КрАО РАН

*Д.Г. Семёнов, Г.А. Сунница, А.С. Куценко*ФГБУН “Крымская астрофизическая обсерватория РАН”, Научный, Крым, 298409  
*dmitry\_s88@mail.ru*

Поступила в редакцию 25 октября 2021 г.

**Аннотация.** Описана модернизированная система управления спектрофотометром, предназначенным для построения карт Солнца в ближнем инфракрасном диапазоне (вблизи линии He I 10830 Å) на телескопе БСТ-2. В работе приводится описание механических узлов, электронных блоков и программного обеспечения системы. Все электронные и механические узлы системы изготовлены в Лаборатории физики Солнца КрАО РАН.

**Ключевые слова:** система управления, модернизация, сканер Солнца

### 1 Введение

В последнее время фокус в наблюдательной области физики Солнца смещается в сторону увеличения пространственного разрешения и изучения верхних слоев атмосферы Солнца – хромосферы и короны. Все взрывные события зарождаются в основном в этих слоях, где происходит пересоединение магнитных петель. Для анализа хромосферы проводятся наблюдения в соответствующих хромосферных спектральных линиях, количество которых в видимом и инфракрасном (ИК) диапазонах спектра относительно невелико. Многие инструменты используют триплет He I 10830 Å, физика формирования которого довольно хорошо развита. Линия является крайне чувствительной к магнитному полю, что обуславливает частое ее использование для измерения магнитных полей в хромосферных образованиях, таких как протуберанцы, магнитные петли активных областей, факелы и др. В крайне слабых магнитных полях корональных дыр глубина линии падает по сравнению с областями спокойного Солнца и тем более по сравнению с магнитными полями активных областей. Это свойство триплета He I 10830 Å позволяет проводить наблюдения корональных дыр с Земли – другие корональные линии чаще всего находятся в области далекого УФ и не проходят через атмосферу Земли.

Во второй половине 1980-х годов в КрАО на телескопе БСТ-2 был введен в строй солнечный спектрофотометр (Букач и др., 1990), предназначенный для наблюдения Солнца в линии He I 10830 Å. Прибор позволил проводить изучение хромосферных образований и наблюдать корональные дыры. Накопленные на БСТ-2 наблюдательные данные более чем за два солнечных цикла позволяют анализировать эволюцию корональных дыр, изучать их широтное распределение, процессы формирования, связь с другими структурами на Солнце. Наблюдения по данной программе необходимо продолжать для расширения ряда данных на текущий солнечный цикл. В то же время созданные более 30 лет назад узлы установки приходят в негодность вследствие механического износа и неизбежного морального и физического устаревания.

В конце 90-х годов спектрофотометр на телескопе БСТ-2 был модернизирован (Степанян и др., 2000). Спектрофотометр изготовлен на основе щелевого длиннофокусного спектрографа, в качестве детектора используется фотоэлектронный умножитель, чувствительный к видимому и ближнему инфракрасному диапазону. Модернизация касалась изменения способа смещения изображения Солнца на щели спектрографа. В исходной версии сканирование осуществлялось при помощи больших и инертных целостатного и дополнительного зеркал. В результате возникала большая инерционность, люфты, быстро увеличивался износ механических узлов приводов поворота зеркал. Эти проблемы

удалось решить благодаря изготовлению нового сканера, в котором смещение изображения Солнца на щели выполнялось путем наклона легкого главного зеркала. В качестве привода по двум координатам использовались два трехфазных шаговых двигателя ШД-4М-УЗ, что было обусловлено ограниченным выбором на тот момент.

Указанные двигатели имели избыточную мощность для задачи сканирования и низкий КПД, поэтому они выделяли большое количество тепловой энергии и, как следствие, создавали конвективные потоки, которые могли ухудшать качество изображения. Этому способствовало их расположение под главным зеркалом оптической системы. Было решено заменить эти двигатели на другие, менее мощные, но не ухудшающие параметры сканера. Выбор остановился на двухфазном гибридном шаговом двигателе серии Nema-17 типа 42НМ40-0404. Мощность новых двигателей на порядок меньше ШД-4М-УЗ при сохранении такого же углового момента, при этом из-за высокого КПД практически отсутствует нагрев. Кроме того, возникла необходимость изменения схемы управления новыми шаговыми двигателями и разработки нового программного обеспечения.

## 2 Электронные схемы системы

Одним из основных узлов спектрофотометра является система сканирования изображения Солнца. В тексте этот узел далее будет называться сканером. На рис. 1 показана блок-схема системы управления сканером. Рассмотрим взаимодействие ее блоков; далее номера блоков из рис. 1 приведены в скобках.

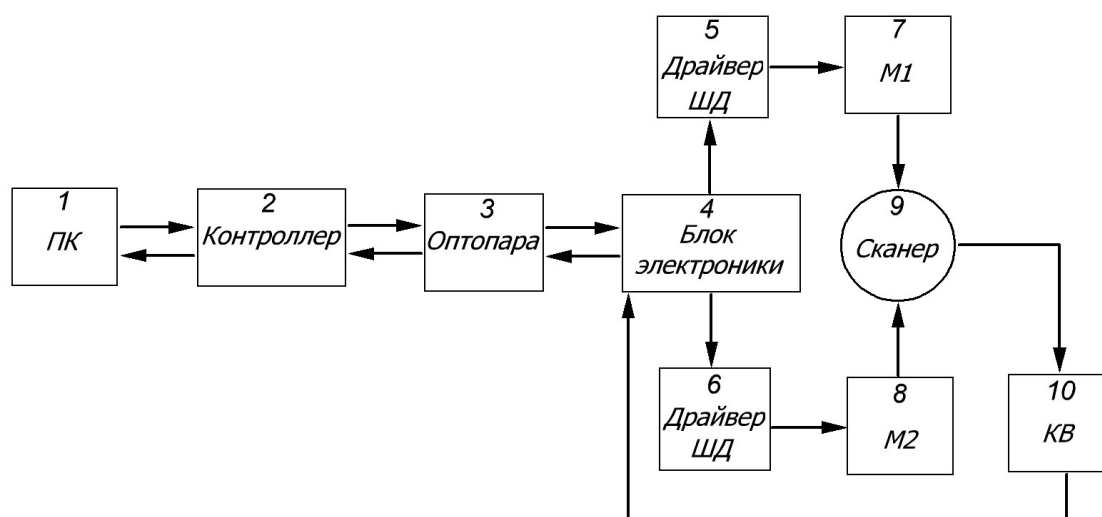


Рис. 1. Блок-схема управления сканером

Компьютер (блок 1) связан с контроллером через универсальный последовательный порт USB. Порт компьютера защищен изолятором последовательной шины USB, собранным на микросхеме ADUM4160; схема представлена на рис. 2. В контроллере сканирующей части фотометра (блок 2) используется 32-битный микроконтроллер STM32F103RBT от ST Microelectronics. Микроконтроллер работает с тактовой частотой 72 МГц, имеет ряд периферийных устройств на борту, в том числе 16-канальный 12-битный АЦП и USB-интерфейс. Он выполняет задачи генерации управляющих сигналов согласно командам компьютера, осуществляет функцию обратной связи от конечных выключателей к компьютеру. К микроконтроллеру также подключен блок измерения сигнала от фотоэлектронного умножителя (не показан на схеме) спектрофотометра. Помимо управления сканером, контроллер также управляет линейным перемещением каретки, на которой установлен фотоэлектронный умножитель, проводя таким образом перестройку спектрофотометра по длине волны.

Физически блок драйверов шагового двигателя отнесен на большое расстояние от контроллера. По этой причине, а также для защиты микроконтроллера, связь между контроллером и драйверами реализована через оптогальваническую развязку (блок 3) (рис. 3), что позволяет достичь снижения

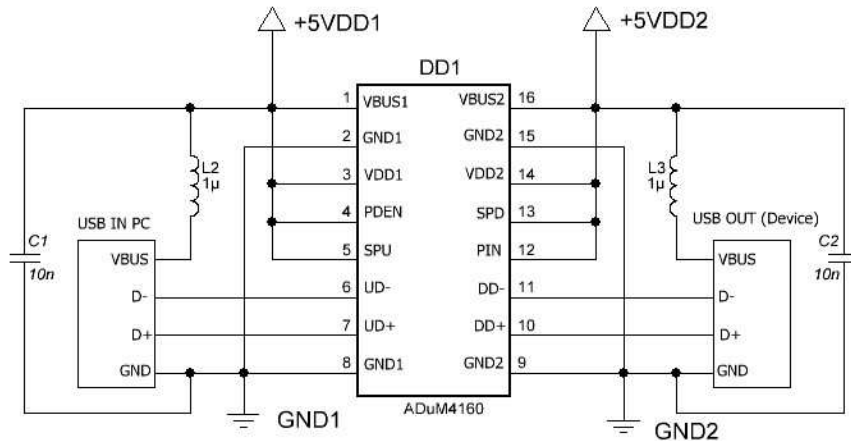


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема изолятора универсальной последовательной шины

помех и защищает оборудование от повреждения. Разъем XS1 соединен с контроллером, с которого подаются управляющие импульсы “шаг  $\alpha$ ”, “шаг  $\delta$ ” и выбор направления вращения шагового двигателя на входы элементов микросхем DD2 и DD6 (блок 4). С выходов этих логических элементов сигнал поступает на входы оптопар DD7, DD8, DD9 соответственно. С выходов оптопар через контакты разъема XS2 сигналы подаются в блок 4. На разъем XS2 из блока 4 поступает информация о состоянии концевых выключателей на входы микросхем DD5. Их выходные сигналы управляют оптопарами DD1, DD2, DD3, DD4. С выходов этих микросхем через разъем XS1 сигналы поступают на вход контроллера.

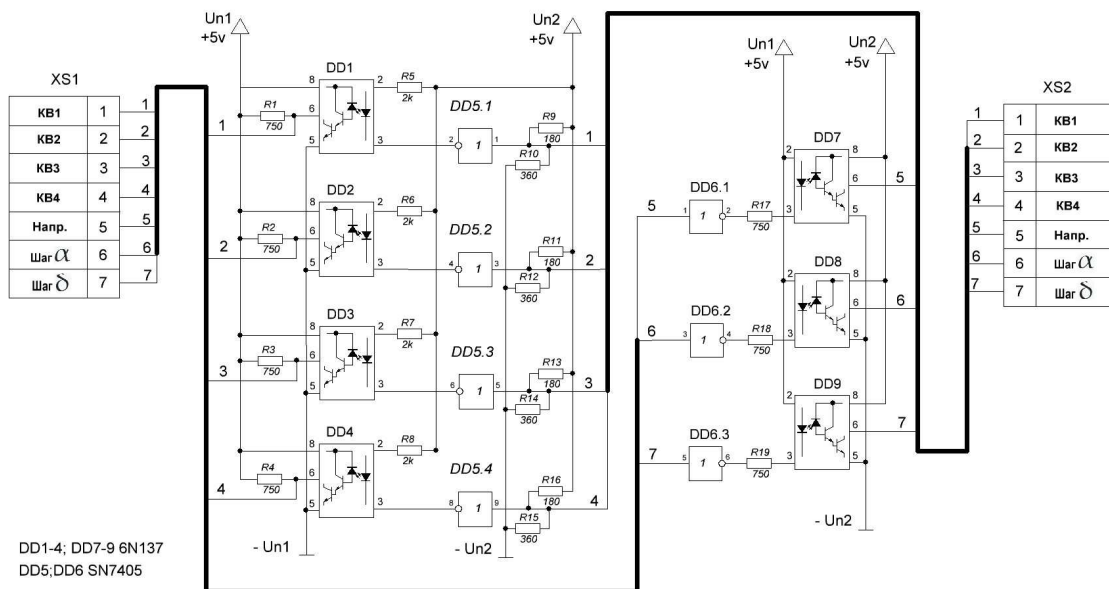


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема блока оптогальванической развязки

Между контроллером и драйверами шагового двигателя установлен блок 4, условно названный блоком электроники. Его задача – исключить ошибочную работу драйверов в случае, если произошел сбой в программном обеспечении. Принципиальная схема блока электроники представлена на рис. 4. В этом блоке происходит выбор канала привода по углу прямого восхождения  $\alpha$  или углу склонения  $\delta$ , а также блокировка прохождения сигнала управления при срабатывании соответствующего

ющего концевого выключателя (блок 10), сигнал блокировки передается через (блок 3) и (блок 2) в компьютер. Схема представляет собой двухканальный триггер с общим каналом выбора направления вращения двигателей, также присутствуют световые индикаторы, показывающие, в каком состоянии находятся концевые выключатели. Рассмотрим один из них – канал по  $\alpha$ . Сигнал с контакта X2.5 (выбор направления вращения) поступает на транзистор VT2, потом на клемму PUL+ драйвера EM556S, а также на инвертор DD1.1 и триггер на DD1.2 и DD1.3. Выходы триггера подключены на входы элементов м/с DD2.1 и DD2.2, а также сигнал “шаг  $\alpha$ ”. На третий вход этих элементов подается сигнал о состоянии концевых выключателей. Через DD3.3 импульсы поступают на вход DIR+ драйвера EM556S, выходы которого подсоединены на обмотки шагового двигателя M1.

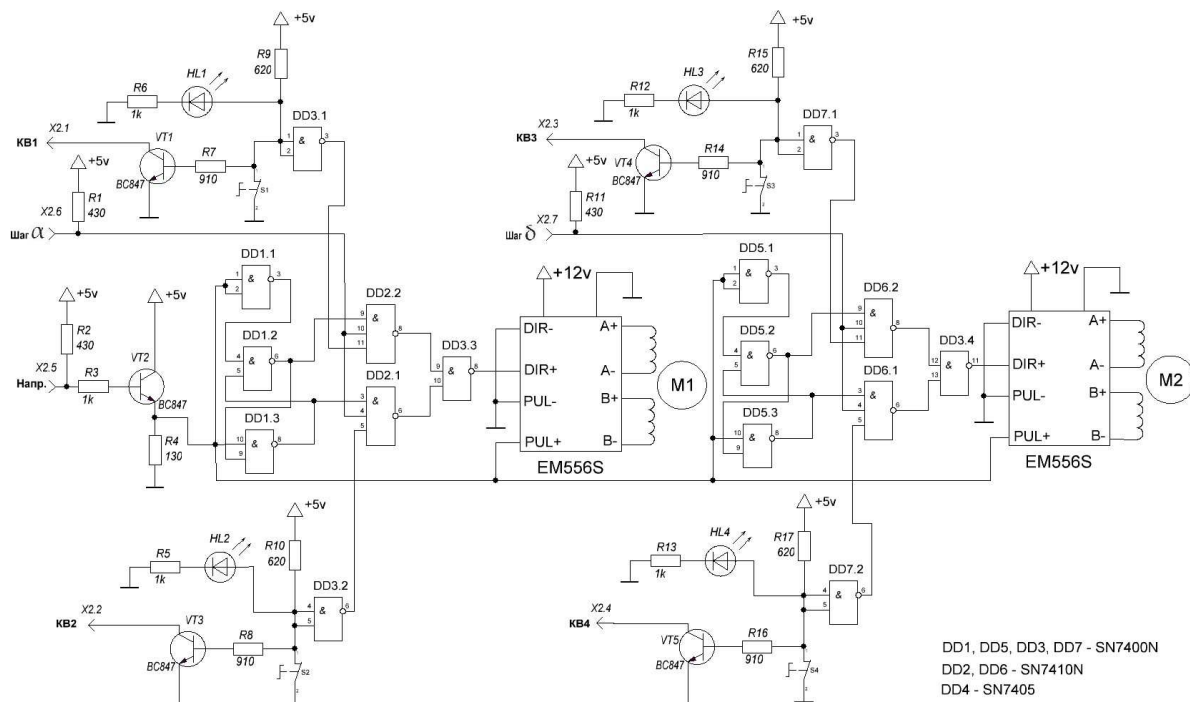


Рис. 4. Принципиальная электрическая схема блока электроники

Далее следуют драйверы шаговых двигателей (блок 5) и (блок 6). Использовались драйверы шаговых двигателей промышленного производителя Leadshine модели EM556S с оптоизолированными входами управления STEP/DIR/ENABLE и разрешением микрошага от 1:1 до 1:256. Преимущество данных драйверов в том, что при простое двигателя свыше 0.4 с произойдет автоматическое снижение тока удержания драйвера на 90 % от заданного рабочего тока, что также положительно влияет на излучаемую тепловую мощность шаговых двигателей. Драйверы сделаны на основе цифровых сигнальных процессоров, что позволяет наиболее оптимально управлять током через обмотки двигателей. По сравнению с более дешевыми драйверами, использованные EM556S показали более высокую стабильность работы, отсутствие пропуска шагов, большую плавность хода двигателей. Нагрузкой драйверов служат два шаговых двигателя, обозначенных на схеме M1 (блок 7) и M2 (блок 8).

Двигатели 42NM40-0404 (блок 7, 8) имеют следующие характеристики: единичный угловой шаг  $0.9^\circ$  и крутящий момент 0.34 Н·м, что сравнимо со старыми двигателями ШД-4М-У3, рассеиваемая мощность которых была на порядок больше. Параметры винтовых пар подобраны так, что одному шагу двигателей ШД-4М-У3 соответствует изменение наклона главного зеркала на  $0.82''$ . В нашем случае замена двигателей позволила уменьшить шаг изменения наклона зеркала в полтора раза – до  $0.49''$ . Следовательно, появилась возможность увеличить пространственное разрешение при ска-

нировании и плавность хода. Валы двигателей механически замкнуты на призму, которая соединена со штангой-рычагом сканера (блок 9). (Блок 10) представляет собой четыре концевых выключателя, по два на каждой оси, которые срабатывают в крайних положениях движения сканера по  $\alpha$  и  $\delta$ .

### 3 Механические узлы системы

В процессе модернизации механической части сканера были спроектированы и изготовлены посадочные узлы под новые шаговые двигатели 42НМ40-0404 и переходные муфты с валов двигателей на сильфоны.

### 4 Программное обеспечение

Для управления спектрофотометром было разработано полностью новое программное обеспечение, работающее под управлением операционной системы Windows 10. Поскольку для обмена с аппаратной частью спектрофотометра используется стандартный последовательный интерфейс USB, управление прибором возможно осуществлять от любого персонального компьютера.

Кроме управления сканирующей системой, программное обеспечение проводит измерение выходного напряжения преобразователя ток-напряжение, к которому подключен фотоэлектронный умножитель, и управляет перемещением детектора в спектрографе, что необходимо для измерения профилей спектральных линий и установки детектора в желаемую часть спектра.

Входная щель спектрографа выделяет на поверхности Солнца, по сути, единственный пиксель. Для создания карты всего солнечного диска необходимо “просканировать” весь диск, учитывая при этом координаты участка Солнца, попадающего на щель. Система не имеет абсолютной привязки угловых координат поворотной платформы к каким-либо координатам на поверхности Солнца, что, конечно же, является недостатком прибора. В качестве нулевой точки используется среднее положение наклонной платформы, на которой смонтировано главное зеркало. Программа наклоняет платформу от одного крайнего положения, что определяется по срабатыванию концевых выключателей, до другого. Измеряется количество шагов двигателя, которое необходимо сделать для такого перемещения, затем двигатель делает половину от этих шагов в обратную сторону, возвращая таким образом платформу в среднее положение. Процедура повторяется для обеих осей, после чего система считает эту позицию нулевой точкой. Ответственность наблюдателя на этом этапе состоит в том, чтобы после центрирования главного зеркала совместить центр изображения Солнца и центр щели изменением наклона целостатной пары зеркал.

После центрирования происходит сканирование всего диска Солнца. Размер получаемой карты определяется наблюдателем. Сканирование происходит по “змейке” – при записи сканер смещает изображение Солнца по углу прямого восхождения  $\alpha$  от лимба до лимба, т. е. перпендикулярно щели спектрографа. Затем сканер изменяет наклон по углу склонения  $\delta$ , снова перемещает по  $\alpha$  от лимба до лимба, но уже в другом направлении. Такое движение позволяет экономить время при наблюдениях. С другой стороны, неизбежно возникает люфт при движениях в разных направлениях, поэтому соседние строки получаемого изображения Солнца оказываются сдвинуты друг относительно друга. Однако этот эффект элементарно убирается при обработке полученных данных: соседние строчки сдвигаются так, чтобы получаемое изображение Солнца наилучшим образом вписывалось в окружность. После построения карты Солнца гелиографические координаты пикселей на карте рассчитываются с привязкой к краям Солнца с учетом наклона оси Солнца к плоскости экватора Земли (зависит от времени и даты наблюдений), а также положения целостатной пары телескопа (измеряется перед началом наблюдений). Эта процедура будет в деталях описана в нашей следующей статье.

Для уменьшения времени сканирования, при смещении изображения Солнца на щели “змейка” описывает окружность, а не квадрат. Подобное решение позволило приблизительно на 40 % сократить время сканирования полного диска Солнца. По окончании сканирования сканер перемещается в исходное положение.

Измерение напряжения на преобразователе ток-напряжение блока детектора происходит синхронно с перемещением главного зеркала. Постоянная времени усилителя фотоэлектронного умножителя выбрана равной 1 мс, что приблизительно в три раза меньше интервала между шагами

двигателей. Следует отметить, что, поскольку операционная система Windows 10 не является системой реального времени, все временные интервалы задаются микроконтроллером. Микроконтроллер также проводит расчет количества шагов и учет текущего положения сканера. При этом программное обеспечение практически в реальном времени отображает текущую карту Солнца, что сразу позволяет оценить качество получаемых данных и, при необходимости, прервать или перезапустить цикл наблюдений. Эта опция была недоступна в предыдущей версии спектрофотометра.

Программа позволяет строить карты полного диска Солнца с размерами от  $211 \times 211$  до  $701 \times 701$  пикселей. Время сканирования составляет от 15 минут для наименьшей карты до 40 минут для наибольшей. Карта Солнца сохраняется в виде FITS-файла, в заголовке которого фиксируются дата и время наблюдений, размер карты и другая служебная информация.

## 5 Заключение

Проведенная модернизация позволила улучшить качество получаемых изображений Солнца в линии He I 10830 Å, сократила время наблюдений и обработки. Это позволило ставить новые задачи по изучению процессов в хромосфере Солнца. Замена двигателей на более маломощные позволила уменьшить тепловые потоки воздуха вблизи главного зеркала, а также уменьшить шаг изменения наклона главного зеркала в полтора раза, что дает возможность при необходимости увеличить пространственное разрешение при наблюдениях Солнца.

## Литература

- Букач А.Б., Дидковский Л.В., Степанян Н.Н., Суница Г.А., Щербакова З.А., 1990. Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. Т. 82. С. 172. [Bukach A.B., Didkovskii L.V., Stepanyan N.N., Sunitsa G.A., Shcherbakova Z.A., 1990. Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ., vol. 82, p. 172. (In Russ.)]
- Степанян Н.Н., Долгополова Е.В., Елизаров А.И., Маланушенко Е.В., Парчевский К.В., Суница Г.А., 2000. Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. Т. 96. С. 194. [Stepanyan N.N., Dolgopolova E.V., Elizarov A.I., Malanushenko E.V., Parchevskii K.V., Sunitsa G.A., 2000. Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ., vol. 96, p. 194. (In Russ.)]

## Control system of the solar spectrophotometer of the Tower Solar Telescope-2 at CrAO

*D.G. Semyonov, G.A. Sunitsa, A.S. Kutsenko*

Crimean Astrophysical Observatory, Nauchny, 298409  
*dmitry\_s88@mail.ru*

**Abstract.** The paper describes the control system of the spectrophotometer scanner at TST-2. The device is intended for observations of the Sun in the near infrared region (in the vicinity of the He I 10830 Å spectral line). We provide a description of the mechanical assemblies, electronic units, and software of the system. All the units were manufactured at the Laboratory of Solar Physics of CrAO.

**Key words:** control system, modernization, solar scanner