

УДК 520.2.02, 62-529, 681.5

Автоматизированная система управления малых телескопов в Крымской астрофизической обсерватории

В.В. Румянцев, В.В. Бирюков

ФГБУН “Крымская астрофизическая обсерватория РАН”, Научный, 298409, Крым
rum@crao.crimea.ru

Поступила в редакцию 9 ноября 2023 г.

Аннотация. Представлен программно-аппаратный комплекс системы управления малых телескопов ($D = 20\text{--}64$ см), используемый преимущественно для проведения наблюдений объектов в околоземном космическом пространстве, а также объектов Солнечной системы (кометы, астероиды). Комплекс позволяет проводить наблюдения как под управлением оператора, так и полностью в автоматическом режиме по заданной программе. Это дает возможность осуществлять различные методы наблюдений: обзоры избранных областей на небе, поиск и сопровождение объектов по целеуказаниям. Максимальные угловые скорости сопровождаемых объектов при этом могут достигать 1 град/сек.

Комплекс обеспечивает управление подачей электропитания на узлы телескопа, управление приводами монтировки телескопа, работой вспомогательного оборудования, управление открытием и закрытием крыши павильона. Работает полное управление камерой телескопа, от подачи питания и охлаждения до осуществления экспозиции и передачи кадров системе обработки изображений.

Безаварийная эксплуатация на протяжении 16 лет продемонстрировала надежность разработанной системы, а получение более 20 миллионов измерений координатной и фотометрической информации – ее эффективность.

Система управления постепенно совершенствуется и в перспективе станет роботизированной.

Ключевые слова: автоматизированная система управления телескопом

1 Введение

В 2003 году в Крымской астрофизической обсерватории (КрАО) на телескопе АТ-64 (Chernykh, Rumyantsev, 2002) начались наблюдения малоразмерных объектов в области геостационарных орбит (ГСО) с целью их каталогизации. Объекты в каталоге имели блеск 15–18 зв. вел., что примерно соответствует размеру 100–25 см. Постоянное возрастание количества каталогизированных объектов требовало проведения дополнительных наблюдений для поддержания точности их орбитальных элементов.

В результате длительных наблюдений и обработки измерений был обнаружен целый класс малоразмерных объектов в геостационарной области, испытывающих эволюцию орбиты, существенно отличную от эволюции классических геостационаров (Agapov et al., 2005a, b). Отличия обусловлены сильным влиянием светового давления из-за большого отношения площади к массе. Для объектов такого класса невозможен долговременный прогноз траектории, они требуют повышенного внимания и проведения более частых наблюдений, чтобы не допустить их потерю.

Проведение подобных наблюдений в ручном режиме весьма утомительно для наблюдателей и требует автоматизации наблюдательного процесса.

В настоящее время в мире работает уже несколько десятков автоматизированных и роботизированных телескопов, специализирующихся на разных задачах. Здесь можно упомянуть некоторые из них: BOOTES (Jelínek et al., 2010), TAROT (Klotz et al., 2008), ROTSE (Akerlof et al., 2003), MASTER (Lipunov et al., 2004).

2 Задачи АСУ

Автоматизированная система управления (АСУ) должна обеспечивать контроль и автоматическое управление монтировкой телескопа, регистрирующей аппаратурой, открытием/закрытием павильона, а также управлением электропитания основных узлов.

Для разных малых телескопов необходима универсальная система управления, которая допускает использование различных двигателей в зависимости от динамических характеристик телескопа.

Это позволит автоматически выполнять без участия человека следующие задачи:

- обход космических объектов по целеуказаниям с компенсацией скорости их движения и получение серий изображений с сохранением их на жесткий диск управляющего компьютера;
- проведение обзора (многократного покрытия) избранных областей неба в течение ночи, получение изображений и их сохранение.

С участием оператора предполагается проводить наблюдения объектов с высокими скоростями движения, порядка 1 град/сек, и проведение поисковых операций.

АСУ должна обеспечивать возможность дистанционного управления и контроля всем процессом наблюдения через интернет из любого места, где есть к нему доступ, с пропускной способностью не хуже 100 Кб/сек.

3 Аппаратное обеспечение АСУ

В качестве основной информационной сети, объединяющей все компоненты АСУ в единую схему, выбрана сеть Ethernet. На ее основе система управления легко наращивается, устойчива к отключению или подключению устройств во время работы, а также к добавлению новых устройств, количество которых практически неограниченно. Такая сеть хорошо подходит для распределенных объектов, объединяя компоненты системы на расстоянии до 100 метров.

Телескоп АТ-64 расположен в павильоне на экваториальной монтировке вилочного типа, имеет массу около 250 кг. В качестве приводов монтировки используются пятифазные шаговые двигатели RK596AW (2.1 Н·м) и RK569BW (1.66 Н·м) с драйверами фирмы Oriental Motor на осях прямого восхождения и склонения соответственно. Микрошаговый драйвер позволяет установить угол шага вала двигателя в диапазоне от 0.00288 до 0.72 град. Управление шаговыми двигателями осуществляется с помощью программируемого логического контроллера Galil DMC-2143. Контроллер этого типа управляется через сеть Ethernet, включает в себя 32-битный микрокомпьютер и может управлять в наиболее мощном варианте восемью двигателями. Контроллер имеет оперативную память для внутренней пользовательской программы и позволяет работать в многозадачном режиме для одновременного запуска до восьми программ. Максимальная выходная частота для шаговых двигателей составляет 3 МГц, что позволяет реализовать как быстрое наведение телескопа, так и тонкое движение одним двигателем. В нашем случае контроллер может управлять четырьмя двигателями. Это позволяет подключить к нему два телескопа, расположенных в одном павильоне. Для контроллера Galil DMC-2143 разработано встраиваемое программное обеспечение, основанное на внутренней системе команд. Оно позволяет автономно выполнять различные функции движения телескопа, от наведения в заданное положение до сопровождения объекта, движущегося с заданной скоростью и ускорением. На контроллере реализована координатная система часовой угол – склонение. Для ограничения движения телескопа в крайних положениях используются датчики Холла. Принципиальная схема автоматической системы управления телескопа показана на рисунке 1.

В качестве приемника на телескопе установлена ПЗС-камера¹ ML-16803 и цифровой фокусировочный узел Atlas фирмы FLI. Управление камерой и фокусировочным узлом осуществляется через интерфейс USB 2.0. В случае удаленного расположения оборудования используется Ethernet-сервер USB-устройств Silex SX-3000GB, обеспечивающий скорость передачи данных 1 Гбит/с.

Управление электропитанием телескопа и приемного оборудования осуществляется через Ethernet-контроллер ввода-вывода MOXA ioLogik E1211. При этом используется промежуточный релейный блок. Контроллер MOXA серии ioLogik E1200 имеет встроенный двухпортовый сетевой коммутатор

¹ ПЗС – прибор с зарядовой связью

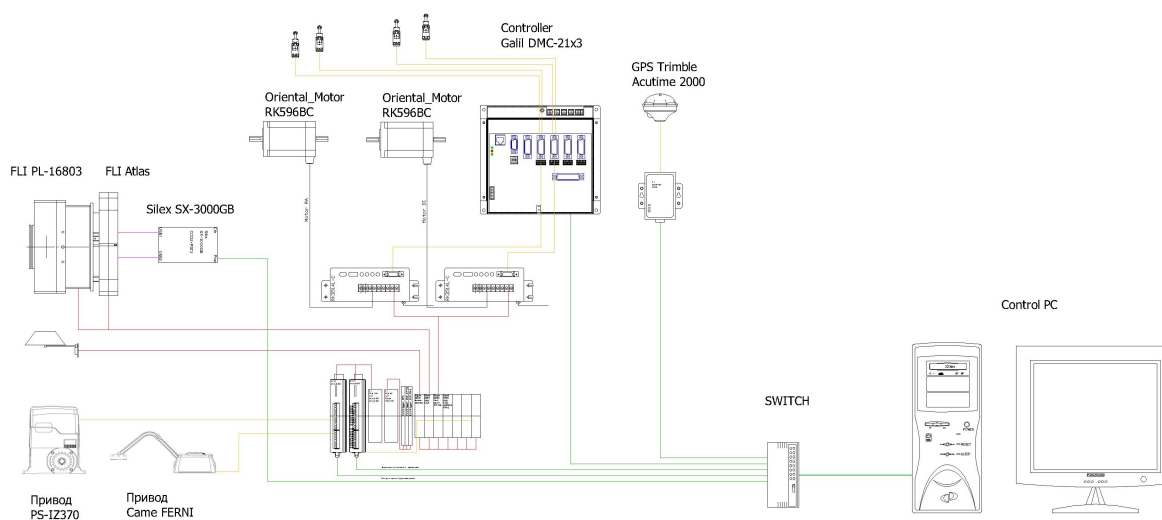


Рис. 1. Принципиальная схема автоматической системы управления телескопа

Ethernet, что позволяет наращивать систему управления без прокладки дополнительных длинных кабелей витой пары.

При выполнении задачи наблюдения быстродвижущихся объектов необходимо знать точное время начала экспозиции. Для регистрации этого времени на павильоне установлен GPS-приемник Acutime 2000 фирмы Trimble. Запрос и получение “меток” времени осуществляется программно через порт RS-232/422. Для подключения GPS к основному каналу связи используется конвертер COM-порта в Ethernet MOXA NPort-5150 (RS-232/422/485).

Телескоп расположен в павильоне с откатной крышей и откидной южной створкой. Полуцилиндрическая крыша откатывается по рельсам в горизонтальной плоскости в северном направлении. Так как телескоп возвышается над уровнем рельс, то с южной стороны предусмотрен завал створки для открытия горизонта в южном направлении. Южная створка крепится к стене на шарнире и имеет противовесы. Для автоматизации процесса открытия/закрытия крыши мы использовали готовый привод для раздвижных ворот PS-IZ 370. Он обеспечивает откат крыши массой до 1000 кг и имеет очень хороший запас по мощности.

Завал южной створки осуществляется также готовым приводом для распашных ворот Came Ferni, имеющим максимальный крутящий момент 320 Н·м. Оба привода имеют цифровую систему управления и концевые выключатели в крайних положениях. Управление этими приводами осуществляется посредством промышленного контроллера коммутации MOXA ioLogik E1214. Приводы крыши и створки работают в релейном режиме (открыто/закрыто). Время, затраченное на открытие крыши, составляет 23 сек, на завал южной створки – 8 сек.

Для полного контроля и управления телескопом, а также для предварительной обработки изображений достаточно одного компьютера. Внутри павильона проведена локальная Ethernet-сеть с пропускной способностью 1 Гбит/с.

Управление электропитанием компьютеров в павильоне проводится с помощью модуля Laurent-112 фирмы KernelChip. Модуль Laurent-112 предназначен для коммутации различных электронных приборов и цепей с помощью двенадцати мощных электромагнитных реле. Управление осуществляется через Ethernet либо с помощью встроенного web-интерфейса, либо командами через TCP-сокеты.

При введении в строй новых телескопов последующая модификация оборудования не потребовала изменения схемы управления и управляющего программного обеспечения. Это касалось GPS Acutime, ПЗС-камер FLI семейства PL, ML и IMG, фокусируемых узлов и фильтровых турелей FLI, контроллера управления Galil семейства DMC и контроллеров MOXA серии ioLogik E1200.

4 Программное обеспечение

Для подготовки к наблюдениям и для управления всем представленным выше оборудованием авторами написано специализированное программное обеспечение (ПО), состоящее из нескольких программ.

Программа PlanSat предназначена для составления плана наблюдения космических объектов (КО) согласно их приоритетам. Планирование проводится с учетом условий видимости КО, его блеска, времени последнего наблюдения. Учитывается также положение и фаза Луны, угловое расстояние до галактического экватора. Программа не является непосредственно частью АСУ, но создаваемый с ее помощью план в дальнейшем выполняется системой управления. В результате своей работы программа создает файл с планом наблюдений, который в дальнейшем используется программой NightWatch.

Программа FLIGrabber (рис. 2) предназначена для управления приемным и вспомогательным оборудованием фирмы FLI (ПЗС-камерами серий IMG, ML и PL, цифровыми фокусирующими узлами и фильтровыми турелями). Помимо этого, FLIGrabber может управлять контроллерами Galil (серий DMC-21 × 3 и 41 × 3), а также GPS-приемником Acutime 2000 и Acutime Gold фирмы Trimble. Управление оборудованием осуществляется посредством библиотеки API (Application Programming Interfaces) FLI Software Development Library и Galil Windows API Tool Kit. Запрос «метки» времени направляется на GPS-приемник через COM-порт по протоколу Trimble Standard Interface Protocol (TSIP).

Программа позволяет осуществить проведение одиночных или серий экспозиций с индивидуальными настройками параметров экспозиции, фильтра и положения телескопа. Эти возможности позволяют организовать выполнение обзора избранной протяженной области неба в нужном режиме обхода.

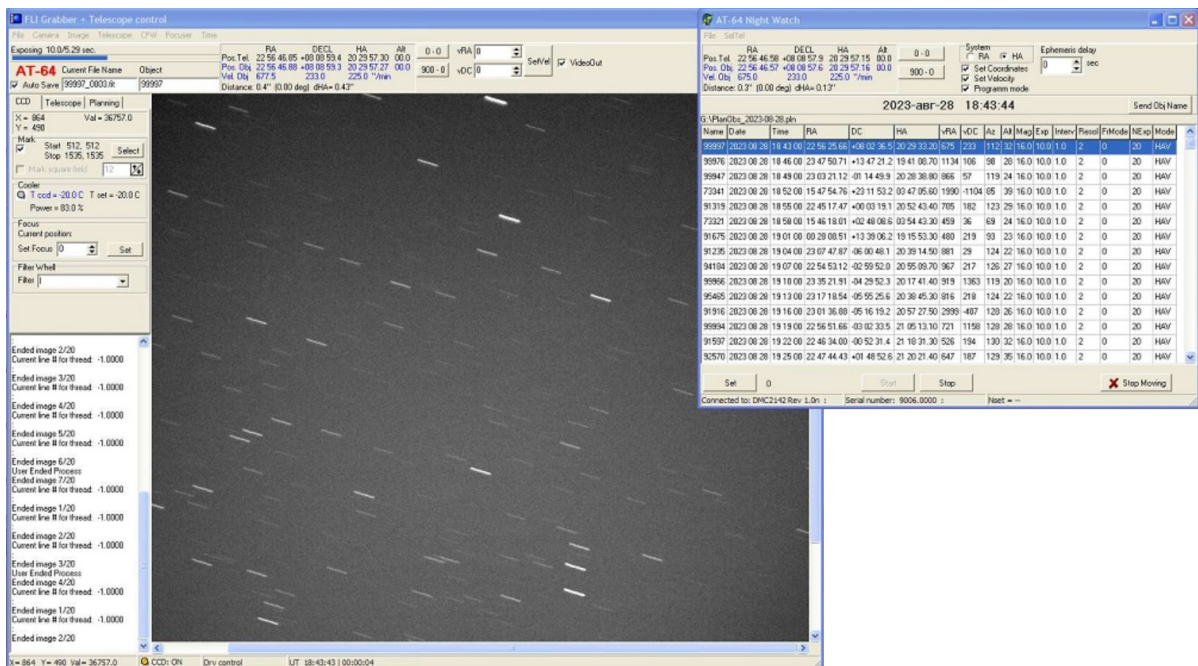


Рис. 2. Внешний вид программ FLIGrabber и NightWatch

В более сложных случаях, когда необходима точная привязка начала плановых наблюдений к заданному времени, используется программа NightWatch. В программу загружается заранее созданный план, содержащий времена планируемых наблюдений, координаты и скорости КО. Программа NightWatch по расписанию осуществляет выдачу команд на контроллер телескопа для наведения и сопровождения объекта и команд программе FLIGrabber для начала серии экспозиций. Взаимодействие между программами NightWatch и FLIGrabber осуществляется через интерфейс Winsock.

Перемещение телескопа в парковочное положение в конце ночи также осуществляется согласно плану.

Сопровождение быстродвижущихся объектов возможно проводить в автоматизированном режиме оператором с использованием программы Accelerator. К таким объектам относятся низкоорбитальные КО, высокоэллиптические КО в районе перигея, КО на этапе выведения и пр. Для них характерны не только большие скорости, но и большие ускорения в экваториальных координатах. Для сопровождения таких объектов программа с заданной частотой меняет скорость движения телескопа согласно загруженной эфемериде, что позволяет удерживать КО в поле зрения с необходимой точностью в течение длительного времени. В нашей практике мы успешно проводили сопровождение низкоорбитальных объектов, движущихся со скоростью около 1 град/сек.

Как отмечалось ранее, для управления движением телескопа мы используем контроллеры компании Galil Motion Control серий DMC-21 × 3 и DMC-41 × 3. Предоставляемое пользователям программное обеспечение содержит как API для различных языков программирования высокого уровня, так и собственный язык макрокоманд. API мы используем для связи контроллера с основной программой наблюдения, синхронизирующей процессы наведения на объект и экспозиции. На языке макрокоманд Galil написан программный модуль управления шаговыми двигателями телескопа. На вход этого модуля через API поступают небесные координаты и скорости объекта наблюдения. Далее, до поступления извне новых команд, контроллер независимо от основной программы обеспечивает сопровождение объекта с заданными кинетическими параметрами. Это сильно разгружает управляющий компьютер, давая ему возможность управлять камерой и процессами обработки данных.

Для управления электропитанием, открытием крыши и южной створки павильона, а также внешним освещением павильона используются контроллеры удаленного ввода-вывода MOXA ioLogik E1211 и E1214. Управление ими осуществляется программными утилитами с использованием библиотеки MXIO.

ПО и графический интерфейс написан на языке программирования Delphi 7.0 фирмы Borland.

Дистанционное управление компьютерами осуществляется посредством Virtual Network Computing (VNC). Это позволяет проводить запуск и контроль работы телескопа из любого места, где есть доступ к интернету.

5 Реализации АСУ

Описанная автоматизированная система управления начала внедряться на телескопе АТ-64 ($D = 640$ мм, $F/1.4$) в 2007 г. с последующим усовершенствованием в 2012 г. Характеристики телескопа приведены на рисунке 3. АТ-64 позволяет за шестичасовую ночь проводить обход 120 плановых объектов с их сопровождением, производя при этом трехминутные серии экспозиций без участия



Оптическая система: Рихтер – Слефогт

$F = 895$ мм

$D = 640$ мм

Камера: FLI PL-16803 4096 × 4096@9 мкм

Поле зрения: 1.5×1.5 град

Масштаб: 2.1 угл. сек/пикс.

Скорость наведения:

$V_{\alpha} = 3$ град/сек

$V_{\delta} = 3$ град/сек

$A_{\alpha, \delta} = 3.0$ град/сек²

Максимальная скорость сопровождения объекта:

1 град/сек.

Рис. 3. Телескоп АТ-64

оператора. На рисунке 4 продемонстрирован пример работы телескопа в течение одной ночи. Каждый квадрат на схеме отмечает трехминутный сет, содержащий от 5 до 13 положений.

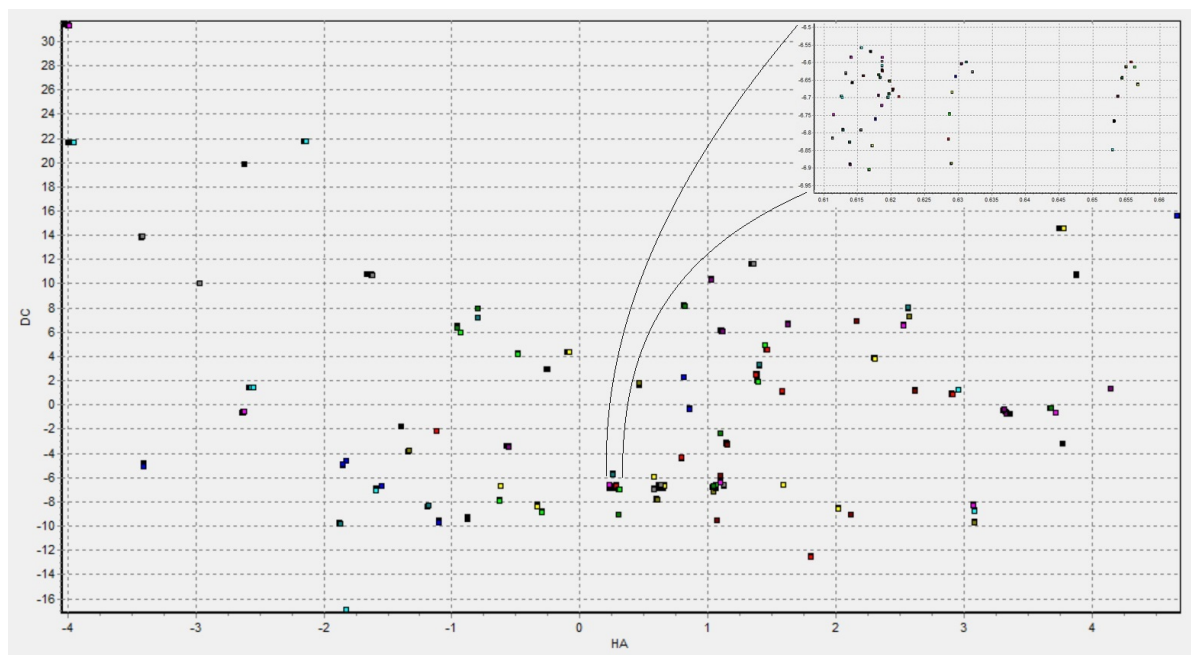


Рис. 4. Пример сопровождения объектов по целеуказаниям, проведенного на АТ-64, 26.01.2020. Зарегистрировано 98 объектов (192 сета), 2337 положений



Оптическая система: Рихтер – Слефогт – Теребиж
 $D = 220$ мм
 $F = 507$ мм
 Камера: FLI ML-9000 $3072 \times 3072 @ 12$ мкм
 Поле зрения: 4.1×4.1 град
 Масштаб: 4.9 угл. сек/пикс.
 Скорость наведения:
 $V\alpha = 3$ град/сек
 $V\delta = 6$ град/сек
 Максимальная скорость сопровождения объекта:
 превышает 1 град/сек

Рис. 5. Телескоп Peephole-1

Для решения задачи массового уточнения орбит всех действующих и выведенных из эксплуатации объектов в геостационарной области в 2005 г. был введен в строй 22-см телескоп Peephole-1 (РН-1; $D = 220$ мм, $F/2.3$) (рис. 5). В то время РН-1 не имел еще собственной монтировки и поэтому был подвешен параллельно телескопу АТ-64. 13 октября 2005 г. на нем был проведен первый *пробный* обзор геостационарной области. Это был первый в странах СНГ обзор, который в течение одной ночи мог уточнить положения всех объектов в области ГСО вплоть до 16 зв. вел. Дальнейшее дооснащение и автоматизация телескопа позволили в 2007 г. начать регулярные обзоры области ГСО. Телескоп находился в одном павильоне с АТ-64, в котором для их управления использовался один четырехосевой контроллер Galil DMC-2143. Телескоп имеет детектор с полем зрения 17 кв. град. Это

позволяет в течение ночи шестикратно покрывать видимую часть геостационарной области шириной 20 град.



Оптическая система: VT-52c

$D = 180$ мм

$F = 295$ мм

Камера: FLI ML-9000 $3072 \times 3072 @ 12$ мкм

Поле зрения: 7.2×7.2 град

Масштаб: 8.4 угл. сек/пикс.

Скорость наведения:

$V\alpha = 5.5$ град/сек

$V\delta = 5.5$ град/сек

$A \alpha, \delta = 3.1$ град/сек²

Максимальная скорость сопровождения объекта: превышает 1 град/сек

Рис. 6. Телескопы Peephole-2a и Peephole-2b

В 2012 и 2013 гг. были введены в строй новые телескопы Peephole-2a и Peephole-2b (РН-2a и РН-2b; $D = 180$ мм, $F/1.6$) (рис. 6). Они имеют диаметр объектива 18 см и поле зрения 51 кв. град, что сильно увеличило скорость обзора и позволило значительно удлинить наблюдаемую дугу регистрируемых объектов. Эти телескопы используются для обзора геостационарной области и апогейной области орбит типа “Молния”. На рисунке 7 показан результат работы телескопа РН-2a за

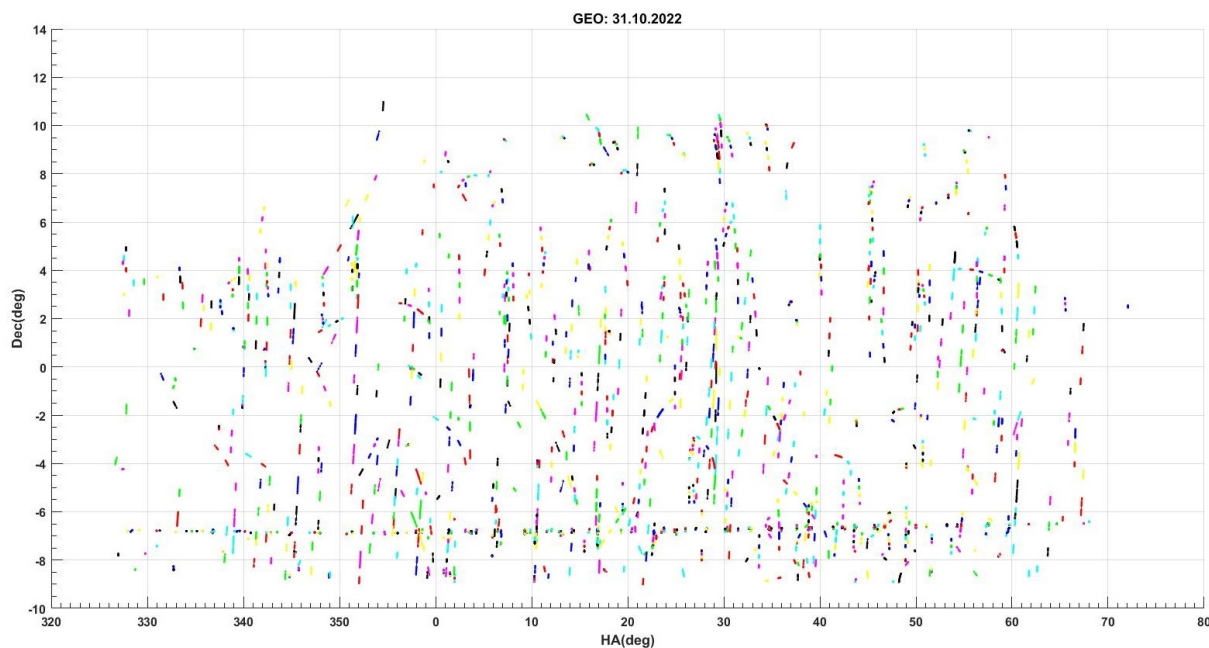


Рис. 7. Результаты обзора области ГСО за 31.10.2022, проведенного на РН-2a. В координатах часовой угол – склонение показаны треки объектов, зарегистрированных за ночь. Площадь покрытия 20×133.5 град. Зарегистрировано 437 объектов, 13 796 положений

31 октября 2022 г. В течение ночи было получено свыше 13 тыс. положений для 437 объектов до 16 зв. вел. Результаты наблюдений в 2022 году показаны на рисунке 8. На телескопе наблюдалось 2083 объекта, по ним получено свыше 1.4 млн положений. Пробелы на графике в окрестности 5–7 ч. по прямому восхождению связаны с плохими погодными условиями в зимний период. В отличие

от геостационарных, есть только один класс высокоэллиптических объектов, которые можно наблюдать в режиме обзора. Это объекты типа “Молния” на апогейных участках их орбит. В районе апогея космические аппараты имеют низкую угловую скорость, таким образом, апогейные области всех орбит образуют кольцо вокруг северного полюса шириной около 14 град, которое можно покрыть наблюдениями в обзорном режиме. В качестве примера на рисунке 9 показан результат обзора, проведенного на телескопе РН-2b 10 февраля 2023 г. В течение года такие обзоры плотно покрывают кольцо вокруг полюса, регистрируя все объекты, находящиеся на этих орбитах (рис. 10). При наличии ясной погоды описанные обзоры проводятся по настоящее время каждую ясную ночь.

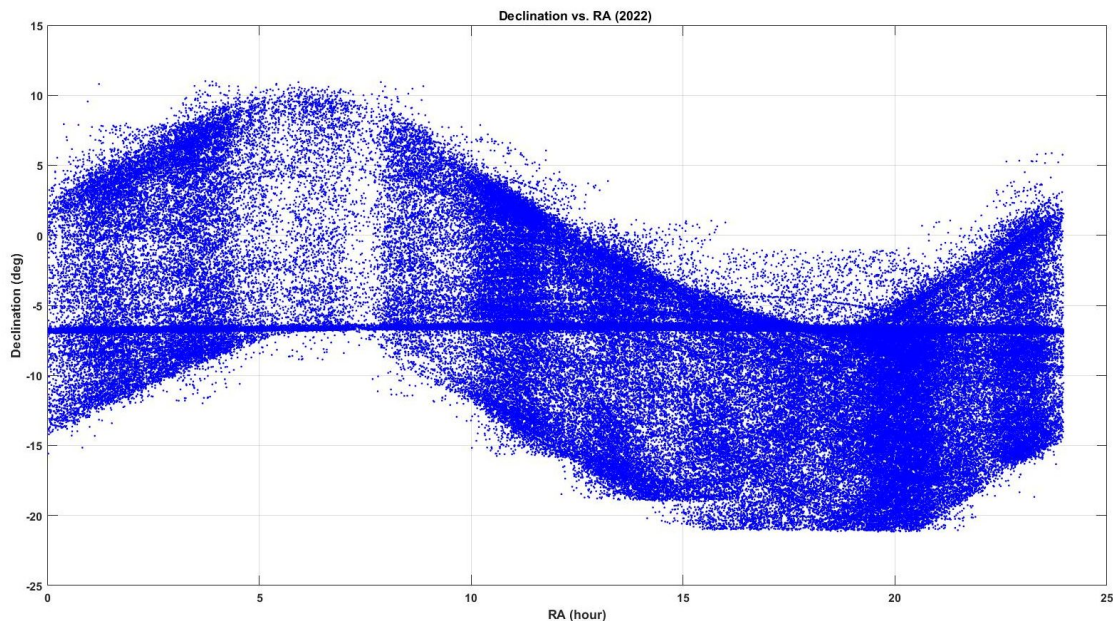


Рис. 8. Карта положений всех зарегистрированных объектов в области ГСО на телескопе РН-2а в течение 2022 г. Зарегистрировано 2083 объектов, 1 404 600 положений

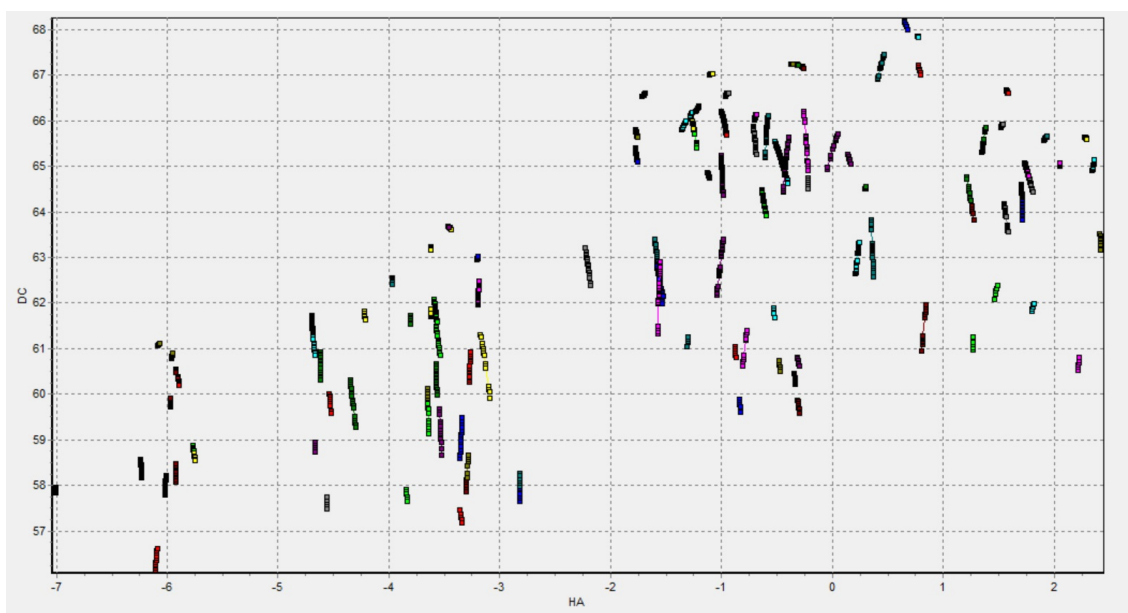


Рис. 9. Результаты обзора апогейной области орбит типа “Молния” в течение одной ночи за 10.02.2023, проведенного на РН-2b. В координатах часовой угол – склонение показаны треки объектов, зарегистрированные за ночь. Площадь покрытия 7 × 71 град. Зарегистрировано 109 объектов, 1459 положений

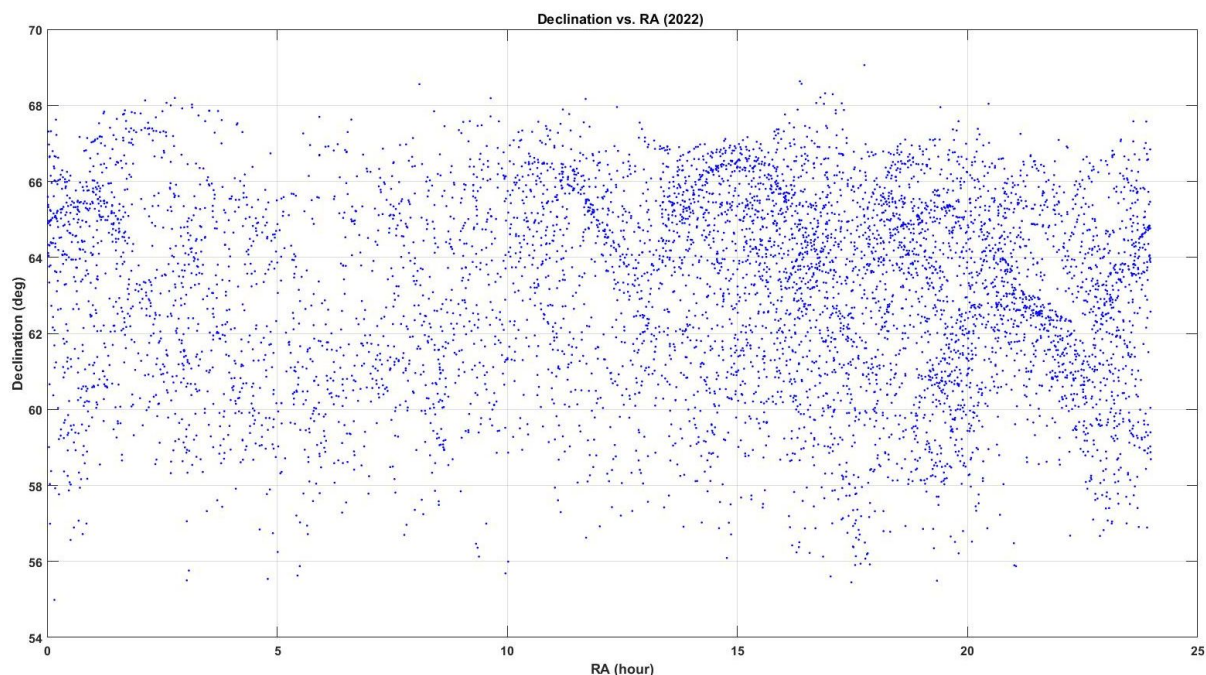


Рис. 10. Карта положений всех зарегистрированных объектов в апогейной области орбит типа “Молния” на телескопе РН-2b в течение 2022 г. Зарегистрировано 179 объектов, 60 178 положений

Частично элементы АСУ, включая управление телескопом, также использовались на телескопе Цейсс-600 (Крымская станция ГАИШ МГУ) в 2005–2012 гг. Ввиду ограниченности хода тонкого движения по склонению на штатной монтировке Цейсс-600, наведение телескопа осуществлялось в ручном режиме, остальные действия проводились автоматически.

Стоит отметить, что программа FLIGrabber для управления комплектом оборудования FLI также используется на ряде телескопов: в прямом фокусе ЗТШ с 2005 г., на АЗТ-11 в 2006–2023 гг., на Цейсс-1000 (Симеиз) в 2007–2008 гг., на ЗТЭ (Крымская станция ГАИШ МГУ) в 2008–2011 гг.

6 Заключение

Созданная и внедренная автоматизированная система управления телескопами обеспечивает выполнение всех представленных выше задач.

В результате введения в эксплуатацию АСУ работа оператора стала включать:

- в начале ночи:
 - дистанционно или локально программное планирование наблюдений;
 - дистанционное открытие павильона, подача электропитания на телескоп и приемник;
 - контроль системы координат телескопа;
 - подача команды на исполнение обзора либо обхода по целеуказаниям;
- в течение ночи:
 - контроль и краткосрочный прогноз погоды;
- в конце ночи:
 - дистанционное отключение электропитания;
 - дистанционное закрытие павильона.

Вопрос обработки полученных изображений выходит за рамки этой статьи, но нужно отметить, что программа обработки изображений запускается и начинает работать сразу после начала наблюдений.

На настоящий момент в работе находятся три телескопа (АТ-64, РН-2а, РН-2b), проводящие наблюдения объектов в околоземном космическом пространстве. Описанная в статье АСУ позволила

более эффективно проводить наблюдения по каталогизации малоразмерных объектов в геостационарной области. Благодаря внедрению АСУ, КраО имеет 16-летний непрерывный ряд мониторинга области ГСО и 10-летний ряд мониторинга объектов типа “Молния”, что является своеобразным рекордом для обсерваторий стран СНГ, участвующих в исследованиях объектов в околоземном космическом пространстве.

Безаварийная эксплуатация на протяжении 16 лет продемонстрировала надежность разработанной системы управления, а получение более 20 миллионов измерений координатной и фотометрической информации – ее эффективность.

Дальнейшее развитие АСУ мы связываем с роботизацией телескопов, которая будет включать в себя динамическое планирование наблюдений, автоматический контроль состояния неба, реагирование на возможные ошибки и сбои оборудования, выполнение текущей работы оператора, описанной выше. В итоге роботизированные телескопы смогут в течение длительного времени (недели, месяцы) проводить наблюдения без участия человека.

Благодарности. Мы выражаем глубокую признательность Ярославу Кирилловичу Голованову (1932–2003). Благодаря оказанной им в 2000 году финансовой поддержке нами были сделаны первые шаги в автоматизации телескопа АТ-64.

Литература

- Agapov V., Dick J., Guseva I., et al., 2005a. In Danesy D. (Ed.), Proceedings of the Fourth European Conference on Space Debris, Darmstadt, Germany. ESA Special Publication, vol. 587, p. 119.
- Agapov V., Biryukov V., Kiladze R., et al., 2005b. In Danesy D. (Ed.), Proceedings of the Fourth European Conference on Space Debris, Darmstadt, Germany. ESA Special Publication, vol. 587, p. 153.
- Akerlof C.W., Kehoe R.L., McKay T.A., et al., 2003. Publ. Astron. Soc. Pacific., vol. 115, p. 132.
- Chernykh N.S., Rumyantsev V.V., 2002. Memorie della Societa Astronomica Italiana, vol. 73, no. 3, pp. 640–645.
- Jelínek M., Castro-Tirado A.J., de Ugarte Postigo A., et al., 2010. Adv. Astron., vol. 2010, id. 432172.
- Klotz A., Vachier F., Boër M., 2008. Astron. Nachr., vol. 329, iss. 3, p. 275.
- Lipunov V.M., Krylov A.V., Kornilov V.G., et al., 2004. Astron. Nachr., vol. 325, iss. 6, pp. 580–582.

Automated control system for small telescopes at the Crimean Astrophysical Observatory

V.V. Rumyantsev, V.V. Biriukov

Crimean Astrophysical Observatory, Nauchny 298409
rum@craocrimea.ru

Abstract. A software and hardware complex of the small telescope control system (TCS) is presented. The TCS is primarily used to observe objects in near-Earth space, as well as objects in the Solar system (comets, asteroids). The complex allows for observation both in the operator mode and fully automatically, according to a given program. This makes it possible to implement various observation methods: surveys of selected areas of the sky, search and tracking of objects according to target designations. The range of angular velocities of tracked objects can reach about a degree per second. The complex provides power management for telescope components, control of the telescope mounting drives, and operation of auxiliary equipment. The roof of the pavilion is also controlled. Full control of the telescope camera is organized, from power supply and cooling to the exposure and transfer of frames to the image processing system. Trouble-free operation for 16 years has demonstrated the reliability of the developed system. The acquisition of more than 20 million measurements of coordinate and photometric information has shown its effectiveness. The control system is gradually being improved and will become robotic in the future.

Key words: automated control system of the telescope