

УДК 520.39

## TeA – Telescope Analyzer

Э.В. Емельянов

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167, Зеленчукский р-н, Карачаево-Черкесская Республика, Россия  
eddy@sao.ru

**Аннотация.** Разработан универсальный прибор для изучения оптики и механики телескопов БТА и Цейсс-1000. Прибор представляет собой КМОП-светоприемник ZWO ASI 1600 MM Pro, установленный на трехкоординатной подвижке. Предварительно прибор испытан на Цейсс-1000 и БТА. По испытаниям на БТА оценен спектр колебаний изображения по обеим осям, а также возможности использования прибора для оценки положения абберационной оси (по направлению комы по краю поля зрения), съемки гартманнограмм и регистрации изображений звездных полей для измерения коэффициентов системы коррекции наведения.

**Ключевые слова:** инструменты, телескопы, контроль оптики

## 1 Введение

Идея создания Telescope Analyzer (TeA) назревала много лет. Так, периодически на телескопах БТА и Zeiss-1000 необходимо проводить “технические” наблюдения для определения коэффициентов системы коррекции наведения (СКН). И если на Zeiss-1000 есть возможность использовать для этих целей штатный прибор Multi-Mode Photometer-Polarimeter (ММПП)<sup>1</sup>, то на БТА использовался ПЗС-светоприемник Aropgee, установленный либо на “собственный” фланец (для работы в белом свете), либо на переходник датчика Шака – Гартманна (для работы в узком фильтре 650 нм). После выхода из строя этого светоприемника, по сути, не осталось никакой аппаратуры, которую можно было бы использовать для контроля СКН БТА. При юстировке главного зеркала (ГЗ) БТА в 2018–2019 гг. возникла проблема определения точного положения оси аббераций зеркала. Имеющиеся штатные приборы первичного фокуса обладают крайне малым полем зрения, что не позволяет точно по ориентации комы произвести такие измерения. Необходим был светоприемник с достаточно большим полем зрения либо имеющий возможность перемещаться для обеспечения построения крупноформатных кадров в виде мозаики.

Разработанный прибор имеет следующие характеристики:

- Диапазон перемещений (относительно “нулевых концевиков”):  $-30.75 \div 120$  мм по ОХ,  $-20.5 \div 115$  мм по ОУ,  $-18.5 \div 162.5$  мм по ОZ. Вблизи фланца:  $-20.5 \div 70$  мм по ОУ.
- Положение центра: (48, 17) мм.
- Полное поле зрения (относительно геометрического центра):  $-91.9 \div 76.5$  мм по ОХ,  $-33.0 \div 70.9$  мм по ОУ (ограниченный диапазон:  $-33.0 \div 100.0$  мм).
- Предельные скорости (мм/с):  $v_x = 7.5$ ,  $v_y = 10$ ,  $v_z = 15$ .
- Точность позиционирования:  $\pm 10$  мкм. Предельное гнупие: 150 мкм (размах).

Светоприемник ZWO ASI 1600 MM Pro:

- $4/3'' (17.7 \times 13.4 \text{ мм}) - 150'' \times 115''$  на БТА;  $4656 \times 3520$  пикселей (3.8 мкм) – 0.033"/пиксель.
- Емкость/шум считывания/QE  $20000 \bar{e}/1.2 \bar{e}/60 \%$ . Dark ( $-20^\circ\text{C}$ )  $0.0062 \bar{e}/\text{с}/\text{пиксель}$ .

<sup>1</sup> <https://www.sao.ru/Doc-k8/Telescopes/small/MMPP/>

## 2 Конструкция

На рис. 1 изображен прибор на стадии первичной аттестации в лабораторных условиях. Помимо трехкоординатной подвижки, перемещающей светоприемник, на фланце размещена стойка, на которой закреплены мини-компьютер в промышленном исполнении (“сердце” системы управления прибором), блоки питания и модуль управления тремя шаговыми двигателями. Универсальный фланец прибора позволяет без промежуточных звеньев закреплять его непосредственно в первичном фокусе БТА или в кассегреневском фокусе Цейсс-1000.

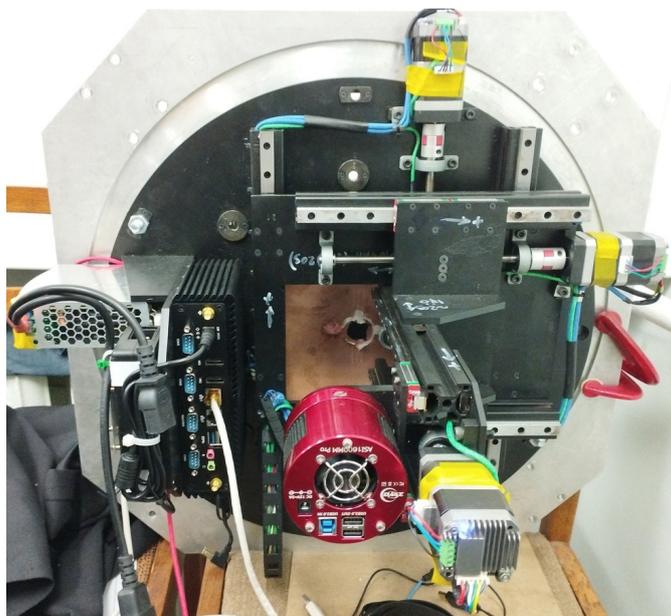


Рис. 1. Внешний вид TeA

При первичной разработке системы управления шаговыми двигателями не предполагалось внедрение обратной связи (при помощи угловых энкодеров, 1024 штрихов на оборот). Однако оказалось, что даже при перемещении на малых скоростях из-за большой массы узлов прибора возникает пропуск шагов двигателями. Это приводит к появлению накапливаемой ошибки позиционирования, которая за всю наблюдательную ночь может составлять миллиметры! С целью обеспечения гарантированного измерения положений необходимо было бы установить на каждую ось линейные энкодеры, обеспечивающие точность не хуже  $10 \div 20$  мкм, что значительно удорожило бы прибор, поэтому было принято решение ограничиться измерением точного положения валов двигателя посредством угловых оптических энкодеров. При шаге резьбы винтовой пары в 1 мм энкодер обеспечивает дискрет измерения примерно в 1 мкм, чего с лихвой хватает для получения требуемой точности измерения позиционирования в 1 шаг двигателя (200 шагов на оборот, т. е. 5 мкм на один шаг).

После завершения позиционирования питание с двигателей снимается, однако, микроконтроллерный модуль управления продолжает отслеживать положение вала и в случае смещения возвращает его в исходную позицию перемещением двигателя. Таким образом, получившаяся система с обратной связью позволяет, по сути, реализовать сервопривод.

## 3 Система управления

### 3.1 Сервоприводы

Система управления двигателями<sup>2</sup> разработана на основе микроконтроллера (МК) STM32F072 (с ядром Cortex-M0), имеющего достаточное количество таймеров, чтобы аппаратно получать данные

<sup>2</sup> <https://github.com/eddyem/stm32samples/tree/master/F0:F030,F042,F072/3steppersLB>

с трех энкодеров (квадратурный выход) и генерировать микрошаговые импульсы для драйверов шаговых двигателей (step/dir драйвер с делением на 32 микрошага, размещается прямо на корпусе двигателя). Энкодеры размещены на корпусе двигателей, оптические диски установлены на заднем валу (используются двигатели с двухсторонним валом). Подключение к управляющему компьютеру может осуществляться как по интерфейсу USB, так и CAN (опция для случая объединения контроллера в сеть с другими приборами). Плавный старт и останов двигателей обеспечивается трапецеидальным рампом. Так как после останова питание с двигателей снимается, промежуточные положения (соответствующие дробным шагам) недоступны. На корпус контроллера выведены кнопки управления подвижками (три кнопки обеспечивают движение соответствующей координаты в условный “плюс”, еще одна реверсирует направление по всем координатам, и дополнительная кнопка позволяет перезагрузить МК в случае необходимости).

При подключении по USB используется текстовый протокол. Контроллер эмулирует популярный конвертер USB-UART PL2303, что позволяет подключать его даже к устройствам под управлением Android. Текстовый протокол позволяет управлять как из специального ПО, так и напрямую – в терминале. При неправильном вводе команды пользователю выводится весь список доступных команд, каждая из которых должна оканчиваться символом перевода строки (`'\n'`). Команда без параметров рассматривается как геттер. Если же после нее следует символ `'='`, команда рассматривается как сеттер. Все настройки хранятся во флеш-памяти МК в режиме эмуляции EEPROM (запись ведется последовательно, последняя запись определяется в момент включения путем бинарного поиска, при окончании выделенного под хранилище конфигурации места производится полное его стирание и запись начинается с начала).

Систему команд можно разделить на четыре условных класса:

- Служебные команды (только USB): установка CAN-идентификатора прибора и скорости сети, выход в режим перепрограммирования МК, стирание сохраненных настроек, активация режима работы переходника CAN–USB и т. п.
- Команды управления двигателями: смещение в абсолютную/относительную позицию, останов движущегося двигателя (как штатный – по рампу – так и экстренный), определение текущей позиции двигателя, текущее состояние концевиков и двигателей.
- Редактирование и сохранение конфигурации: параметры рампа (ускорения и предельные скорости) и энкодеров, количество микрошагов, реакция на концевые выключатели и т. п.
- Прочие команды: текущее состояние кнопок управления, уровни сигналов на входах АЦП, включение/отключение звукового сигнала, управление реле и ШИМ-нагрузками, изменение сигналов на внешних выводах GPIO и прочее.

Формат послышки при работе в составе CAN-шины затрагивает все доступные восемь байт пакета. МК реагирует лишь на команды, отправляющиеся с идентификатором из его конфигурации. Данные передаются в формате little-endian. Первыми двумя байтами идет код команды, третий байт – параметр команды (например, номер двигателя или канала АЦП), четвертый – код ошибки (передается лишь в ответе), последние четыре байта – данные команды в формате 32-битного знакового целого. Ответ МК выдается с тем же идентификатором, что и принятые команды. В упрощенном формате (без параметра и данных) допускается передача двух байт в пакете – только кода команды.

### 3.2 Светоприемник

Имея необходимость работать с разными типами светоприемников, автором ранее была разработана система управления с претензией на универсальность<sup>3</sup>. Она имеет базовое ядро, рассматривающее параметры командной строки и выполняющее необходимые операции (в т. ч. простейший просмотр полученных изображений в окне OpenGL – опция, возникшая из-за необходимости визуального контроля изображений в реальном времени при юстировке аппаратуры), а непосредственная связь с API светоприемников выполняется посредством подключаемых модулей, выполненных в виде динамических библиотек. Для работы со светоприемниками ZWO был написан соответствующий модуль.

Система управления светоприемниками может работать как в standalone-режиме, так и в режиме клиент-сервер. Во втором случае для безопасности используются лишь локальные INET-сокеты (или

<sup>3</sup> [https://github.com/eddyem/CCD\\_Capture](https://github.com/eddyem/CCD_Capture)

более быстрые UNIX-сокеты). В текущей версии системы передача изображения клиенту осуществляется через сокет в несжатом виде, поэтому в будущем для ускорения этой процедуры планируется хранить изображение в разделяемой памяти, чтобы обеспечить непосредственный доступ к нему клиента сразу после завершения считывания. Для просмотра на удаленном компьютере, не поддерживающем трансляцию OpenGL (если компьютер оснащен видеокартой nVidia), сетевую передачу данных можно обеспечить путем проброса INET-сокетов при помощи ssh.

Сохранение FITS-файлов в текущей версии производится серверной частью (т. е. передача изображения клиенту осуществляется лишь для визуального контроля), поэтому важно, чтобы сервер запустился тем же пользователем, который будет в дальнейшем запускать клиент.

### 3.3 Ядро системы

Все утилиты, обеспечивающие работоспособность системы в целом, размещены на мини-ПК в промышленном исполнении под управлением ОС Calculate Linux. При включении компьютера запускаются следующие демоны:

- управление светоприемником;
- осуществление сетевого доступа к эмулятору последовательного порта для возможности диагностики;
- управление шаговыми двигателями и формирование FITS-заголовков с их текущим состоянием;
- получение текущих данных из системы управления телескопом, на котором производятся наблюдения, с формированием соответствующих FITS-заголовков.

Подключившись к компьютеру по ssh или используя проксирование нужных портов средствами ssh, можно дистанционно управлять прибором. Составляя сценарии на bash или ином интерпретируемом языке программирования, возможно автоматизировать рутинные действия (например, сбор снимков для формирования панорамы или последовательные наведения телескопа на  $100 \div 200$  равномерно распределенных по небу площадок и съемку звездных полей для обновления СКН).

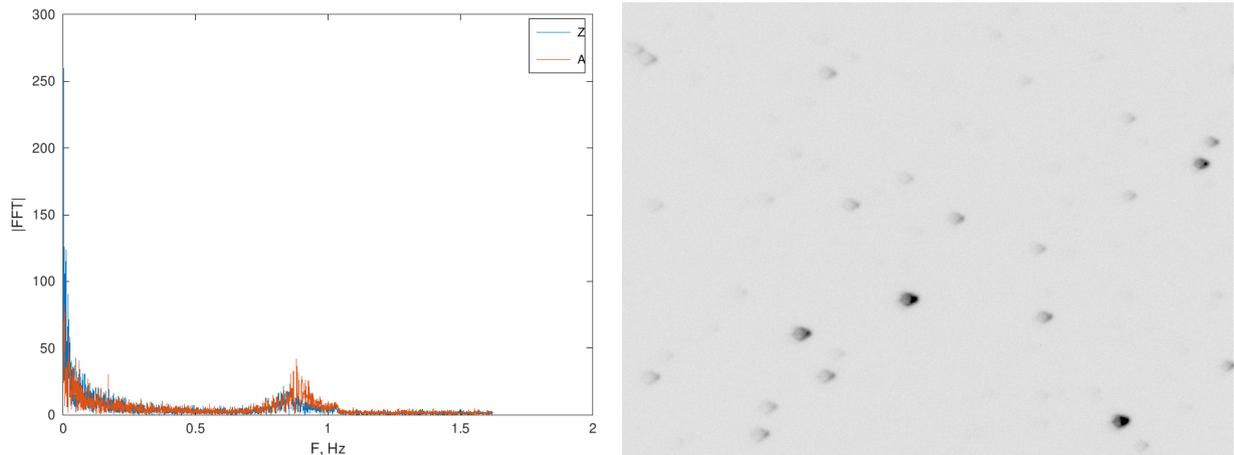
## 4 Первые результаты

На рис. 2 показаны первые результаты, полученные при работе на БТА. Несмотря на плохое качество изображений (полуширина около  $2 \div 2.5''$ ) и, по сути, разбиение изображения на спеклы при малых экспозициях, точность измерения центроидов составила не хуже  $0.1''$ , что позволило за 40 минут накопления кадров с экспозициями в 0.1 с построить графики колебаний трубы телескопа. Явно виден пик в районе  $0.7 \div 0.8$  Гц, наблюдавшийся и ранее. Данные колебания являются именно свойством системы управления телескопом (петли обратной связи в совокупности с механикой), т. к. при наведении на Полярную звезду и полном отключении систем управления (в т. ч. и маслопитания подшипников) наблюдались лишь аperiодические колебания, вызванные ветром и волнами плотности атмосферного воздуха.

Справа на рис. 2 приведен пример комы на краю изображения (направление комы соответствует движению по оси Z телескопа). Еще более ярко выражена кома в самом дальнем от центра углу. Даже простейший анализ полученных таким образом файлов при помощи утилиты `sExtractor`<sup>4</sup> (рассмотрение комы как эллипса, большая полуось которого направлена в центр аббераций) позволит с точностью не хуже 0.1 мм (одна угловая секунда в первичном фокусе БТА) совместить ось аббераций ГЗ с центром вращения поворотного стола первичного фокуса. Методика определения положения абберационного центра заключается в вычислении координат точки пересечения осей комы изображений звезд на краю поля зрения.

Тестирование прибора на телескопе Цейсс-1000 полностью не удалось по метеорологическим причинам: качество изображения было хуже  $3''$ . Кроме того, из-за внесенных недавно изменений в оптическую схему телескопа его поле зрения значительно уменьшилось. В результате по всему доступному для исследования полю аббераций изображения не было зафиксировано. Необходимо

<sup>4</sup> <https://sextractor.readthedocs.io/en/latest/Introduction.html>



**Рис. 2.** Спектр колебаний БТА в режиме сопровождения объекта (слева); пример комы изображения на краю поля зрения (справа)

повторить исследование при субсекундных изображениях (возможно, в этом случае по анализу аберраций появится возможность определить наиболее оптимальное значение выноса фокуса телескопа от его фланца). Построение фокусируемых кривых позволило вывести следующую связь между аппаратной координатой  $z$  (мм) и отсчетами энкодера вторичного зеркала ( $F$ , мм):

$$F = 15.72 + 8.926 \cdot 10^{-2} z \pm 0.01 \quad \text{или} \quad F = 15.76 + 8.56 \cdot 10^{-2} z + 2.514 \cdot 10^{-5} z^2 \pm 0.005,$$

что позволяет определить достижимый диапазон выносов фокуса – чуть больше двухсот миллиметров.

## 5 Перспективы

Первая же тестовая эксплуатация прибора показала необходимость дополнения его еще одним узлом: вдвигающимся в световой пучок объективом с регулируемым ножом Фуко. Из анализа литературы сделан вывод, что некогда исключительно качественный теневой метод может использоваться и как количественный. Это позволит изучать формы рабочей поверхности зеркал телескопов со значительно лучшим разрешением, чем дает метод Шака–Гартманна с микролинзовым растром  $40 \times 40$  или тем более классический метод Гартманна. К сожалению, особенности конструкции прибора не позволяют сделать такой узел постоянным, для получения фокограмм необходимо будет монтировать его вручную, т. е. удаленные наблюдения в таком случае окажутся невозможными.

Недостаток светоприемника ТеА – крайне малый разъем пикселя – можно обратить и во благо при работе с классическим методом Гартманна (на БТА используется предфокальная маска, размещенная на створках кабины первичного фокуса; на Цейсс-1000 используется маска, монтируемая непосредственно на входе в трубу телескопа). Большая скорость перемещения по оси  $z$  прибора, а также небольшой диапазон перемещения, необходимый для получения пред- и зафокального снимков, позволяют улучшить точность исследования поверхности зеркала посредством этого метода (при использовании перемещений светоприемника фокусирующим механизмом БТА за время перемещения звезда успевала сместиться на несколько десятых долей угловой секунды, что вносило значительные погрешности в метод).

## TeA – Telescope Analyzer

*E. V. Emelianov*

Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences, Nizhnij Arkhyz 369167, Zelenchukskiy region, Karachai-Cherkessian Republic, Russia  
*eddy@sao.ru*

**Abstract.** We have developed a multipurpose device for studying the optics and mechanics of the BTA and Zeiss-1000 telescopes. The heart of device is a ZWO ASI 1600 MM Pro CMOS light detector mounted on a three-axis stage. The device was tested on the Zeiss-1000 and BTA telescopes. Based on the BTA tests, the spectrum of image position fluctuations was estimated for both axes, as well as the possibility of using the device for estimating the aberration axis position (by direction of coma at the field of view), taking hartmannogramms, and recording images of stellar fields for measurement coefficients of the pointing correction system.

**Key words:** instrumentation, telescopes, optics control