

УДК 520

## Использование отдельного цифрового фотогида для точной коррекции положения объекта в прямом фокусе 2.6-метрового телескопа ЗТШ

А.А. Сосновский✉

ФГБУН “Крымская астрофизическая обсерватория РАН”, Научный, 298409, Крым

Поступила в редакцию 26 апреля 2026 г.

**Аннотация.** В статье рассматриваются факторы, влияющие на точность ведения (сопровождения) объектов на 2.6-метровом телескопе ЗТШ. Показана возможность осуществления тонкой коррекции наблюдаемого объекта цифровыми методами на примере отдельного фотогида, установленного А.А. Сосновским, А.С. Кривенко, Н.Ф. Панковым и И.В. Дроздовым в 2024 году.

Описаны принципы работы устройства, технические и программные аспекты установки, настройки и согласования со штатными аналоговыми системами ЗТШ. Показаны результаты использования прибора для гидирования в прямом фокусе.

Указаны недостатки конструкции и варианты развития прибора для осуществления полной коррекции. Опыт, полученный в ходе реализации проекта, может быть полезен для применения на других, в том числе крупных телескопах, еще не оборудованных цифровыми фотогидами.

**Ключевые слова:** фотогид, коррекция, фотометрия, ЗТШ

### 1 Введение

На точность ведения объекта на ЗТШ в его современном состоянии влияет совокупность факторов, связанных, с одной стороны, с электромеханическим устройством монтировки телескопа и ее массой – механическими эффектами движения (трение и микролюфты), деформационными гнутями трубы и смещениями главного зеркала (ГЗ), а с другой – с работой аналоговой электрической схемы управления.

Наиболее значительный вклад в ошибки ведения, вносимые монтировкой, дает прежде всего часовое ведение ЗТШ. Сейчас оно реализовано на асинхронном двигателе переменного тока, скорость вращения которого задается частотным преобразователем с предустановленной частотой (50.35 Гц), что совершенно не учитывает неравномерные механические моменты массивной монтировки и приводит к значительным смещениям по часовой оси. Попытки устранения этой проблемы были предприняты Е.М. Нехаем при помощи программы Corrector 2.0, которая позволяла вручную подстраивать частоту с компьютера. Такой подход увеличил возможности контроля для наблюдателя, однако требовал ручного подбора частоты и из-за отсутствия обратной связи не мог глобально исправить ситуацию.

Также стоит отметить, что для грубого и тонкого движения телескопа на сегодняшний день все еще используются ламповые балансировочные усилители, крайне чувствительные к напряжению в сети и имеющие накопленные со временем дефекты. Это создает возможность случайного появления токового дисбаланса и самопроизвольного движения трубы с малой скоростью по любой из осей, что вносит дополнительные ошибки в точность ведения со стороны монтировки. Эти эффекты наиболее заметны по оси склонения, на которой координаты (вне процесса наведения) должны оставаться четко зафиксированными. Как показали тестовые наблюдения, даже при использовании фотогида требуется следить за балансировкой усилителей, расположенных под центральным пультом управления (ЦПУ), поскольку их сильный дисбаланс может превысить возможности коррекции.

Все эти факторы известны и присутствовали (возможно, в меньшей степени) с самого начала эксплуатации телескопа в 1962 г., однако его работа без автоматической или полуавтоматической коррекции вообще не предполагалась (Иоаннисиани, 1976).

✉ Адрес для корреспонденции: [richardonair@vk.com](mailto:richardonair@vk.com)

Для устранения отклонений, связанных с деформацией трубы в прямом фокусе, на телескопе планировалась установка системы выверителей гнутя и фокусировки (Иоаннисиани, 1976), предназначенная для согласования визирных осей гида и телескопа. Эта система должна была совмещать и корректировать при гидировании как монтировку, так и оптическую систему. Однако, по словам Р.Е. Гершберга и работавших в 70–80-е годы операторов, эта система так и не была введена в эксплуатацию и в наблюдениях не использовалась. На 6-метровом телескопе БТА похожая проблема компенсации гнутя была решена посредством установки внеосевого гида, входящего в комплекс прибора SCORPIO (Афанасьев и др., 2005).

Как будет показано ниже, в прямом фокусе смещение объекта относительно первоначально выбранного положения может достигать 1–2' в час (как по часовой, так и по оси склонения, в зависимости от положения трубы телескопа), а в течение всей ночи может достигать катастрофических 5–6', что превышает поле зрения (в прямом фокусе – 7', в куде – 1.4'; Иоаннисиани, 1976). В других фокальных системах из-за наличия большего количества зеркал это смещение может достигать еще больших величин.

Поскольку такие эффекты в различные моменты времени могут вносить различный вклад, величину требуемых коррекций невозможно точно смоделировать или скорректировать механически, и для компенсации этих эффектов необходим современный цифровой прибор с обратной связью, способный отслеживать положение звезды и автоматически посылать корректирующие импульсы, – фотогид. Основной принцип работы фотогида практически не изменился с 1960-х годов (Сабинин и др., 1960), однако применение цифровой обработки изображения камеры и программных алгоритмов<sup>1</sup> на порядок увеличило простоту использования и точности следования. Но есть ли возможность установки такого современного цифрового прибора в связке с аналоговыми системами ЗТШ?

В 2024 году А.А. Сосновским, А.С. Кривенко, Н.Ф. Панковым и И.В. Дроздовым был реализован проект отдельного цифрового фотогида для 2.6-м телескопа ЗТШ, смонтированного на оправе ГЗ. На момент старта проекта не было четкого понимания, возможно ли вообще управлять аналоговой монтировкой ЗТШ цифровыми методами с достаточной точностью. Также мы понимали, что такое расположение трубы фотогида сможет компенсировать только ошибки монтировки, но не гнутя трубы. Поэтому была поставлена задача – не меняя штатную систему ЗТШ, показать техническую возможность управления монтировкой цифровыми методами с точностью, достаточной для коррекции положения наблюдаемого объекта не хуже 1/3 FWHM в час.

## 2 Основные характеристики прибора

В качестве объектива фотогида на оправе ГЗ установлен рефрактор с фокусным расстоянием 750 мм, светосилой 1:4.5, световым диаметром 250 мм, съюстированный параллельно основной оптической оси ЗТШ (рис. 1). Для трубы фотогида было изготовлено юстировочное крепление с тремя осями свободы, позволяющее подстраивать соосность инструментов, переходное крепление для установки матрицы и фокусирующее устройство.

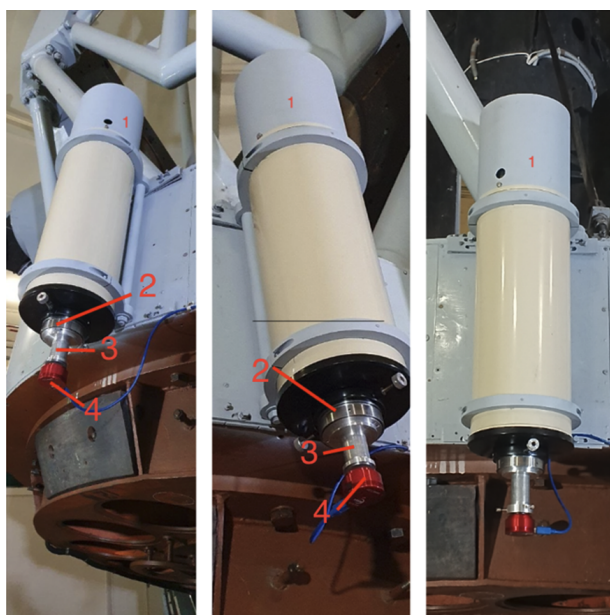
В качестве регистрирующего приемника использована монохромная камера ZWO ASI 178MM со следующими параметрами: КМОП Sony IMX178 3096 × 2080 14 bit, размер пикселя 2.4 микрон, размер матрицы 7.37 × 4.92 мм, рабочий отрезок 12.5 мм, для питания камеры и передачи данных использован интерфейс USB 3.0. Подключение камеры к управляющему ПК выполнено через Ethernet-экстендер, общая длина кабеля составляет порядка 30 метров.

В качестве связующего звена между камерой и механикой телескопа по рекомендации А.С. Кривенко была выбрана управляющая программа PHD Guiding<sup>2</sup> – программное обеспечение с открытым кодом, имеющее широкий функционал. В список возможностей этой программы входит управление гидирющей камерой (подключение и управление экспозицией), получение изображения и автоматическое отслеживание точной величины смещения звезды или сразу нескольких контрольных звезд в пикселях или угловых секундах по обеим осям относительно первоначально заданного положения. Далее формируется гидирующий импульс, который приводит к микрокоррекции (обратному смещению) звезды в первоначальную точку. Типичная величина экспозиции, оптимальной для точного гидирования, обычно не превышает 1.5–2 с, коррекция производится при каждой экспозиции.

Инструмент, отвечающий за измерения параметров звезды в PHD Guiding, – Guide Star Profile Tool. Он оперирует следующими параметрами: HFD (Half Flux Diameter) – диаметр, внутри которого содержится

<sup>1</sup> [https://openphdguiding.org/man/Guide\\_algorithms.htm](https://openphdguiding.org/man/Guide_algorithms.htm)

<sup>2</sup> <https://openphdguiding.org/documentation/>



**Рис. 1.** Фотогид, установленный на опрае главного зеркала ЗТШ. На рисунке: 1 – оптическая труба с блендой, 2 – механизм фокусировки, 3 – переходной флянец крепления камеры, 4 – матрица

половина светового потока звезды; FWHM (Full Width at Half Maximum) – ширина на половине максимума; RMS – среднеквадратичное отклонение положения центроида (вычисленного средневзвешенного центра изображения звезды с точностью до долей пикселя) за некоторый промежуток времени. Единицы измерения смещения – угловые секунды или пиксели.

Задача фотогида – удерживать положение центроида звезды так, чтобы дрожание (RMS) было значительно меньше ее измеренного HFD и положение центроида оставалось как можно ближе к первоначально заданной точке.

Драйвер системы связи и управления монтировкой ЗТШ разработан Н.Ф. Панковым специально для этой задачи. Его цель – следуя управляющим сигналам от PHD Guiding, формировать соответствующие корректирующие импульсы для механического движения телескопа. Система управления точной коррекции телескопа (Шитов и др., 2012) подключена по интерфейсу RS-485 (последовательный интерфейс) к программируемым частотным преобразователям (инверторам) тонкого движения по часовому углу и склонению.

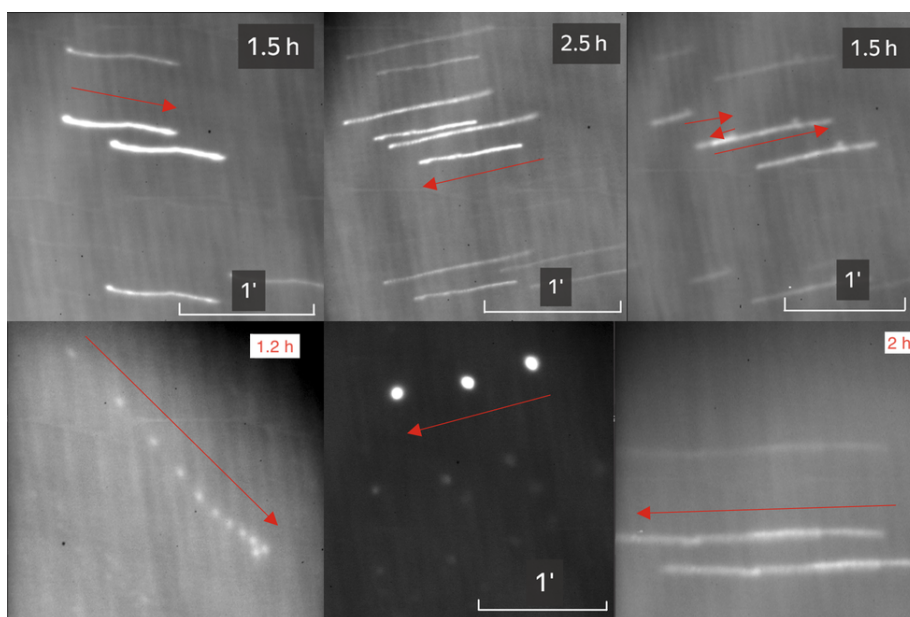
Управляющая частота для коррекции задается драйвером в виде короткого, отличного от стандартного (50.35 Гц) сигнала увеличенной или уменьшенной частоты. Коррекция по часовому углу независимая, поскольку производится двигателем часового привода, а включение работы корректора по склонению определяется положением тумблера на ЦПУ (необходимо перевести тумблер “Выбор пульта” в положение ПК и пульт ПК в состояние “тонкое”). Таким образом создается обратная связь между положением заданного объекта в определенном месте матрицы фотогида и движением трубы телескопа, управляемой моторами. Подробное техническое устройство будет изложено в отдельной статье (готовится к публикации).

По результатам десятков ночей тестовых наблюдений такая схема устройства показала внутреннее среднеквадратичное отклонение центроида звезды на камере гида не хуже  $1/2$  FWHM в час (до  $1/3$  FWHM при качестве изображения лучше  $2-2.5''$ ), среднеквадратичная ошибка по обеим осям – не хуже  $0.3''$ .

### 3 Текущее состояние и коррекция

На рис. 2 показаны примеры смещений наблюдаемого объекта за 1.2–2.5 часа в прямом фокусе при различных положениях трубы. Оси координат спроектированы верно – север вверху, восток слева. Видно, что смещение имеет различный характер движения, скорости и направления, а также часто происходит одновременно по обеим осям. На левом верхнем рисунке заметно более скачкообразное и нелинейное смещение с “дрейфом” по оси склонения. На среднем рисунке оно направлено в противоположную сторону. На правом верхнем – имеет неравномерный характер и типичное “ерзанье”: часовое ведение в данном случае по большей части “обгоняет”

объект, но есть и моменты запаздывания. На нижнем левом и правом рисунках смещение превысило  $1.5'$  за 1.2 и 2 часа соответственно.



**Рис. 2.** Примеры смещения звезды за 1.2–2.5 часа в фокальной плоскости основной камеры, установленной в прямом фокусе ЗТШ. Север вверху, масштаб одинаков на всех изображениях. Треки получены методом сложения кадров

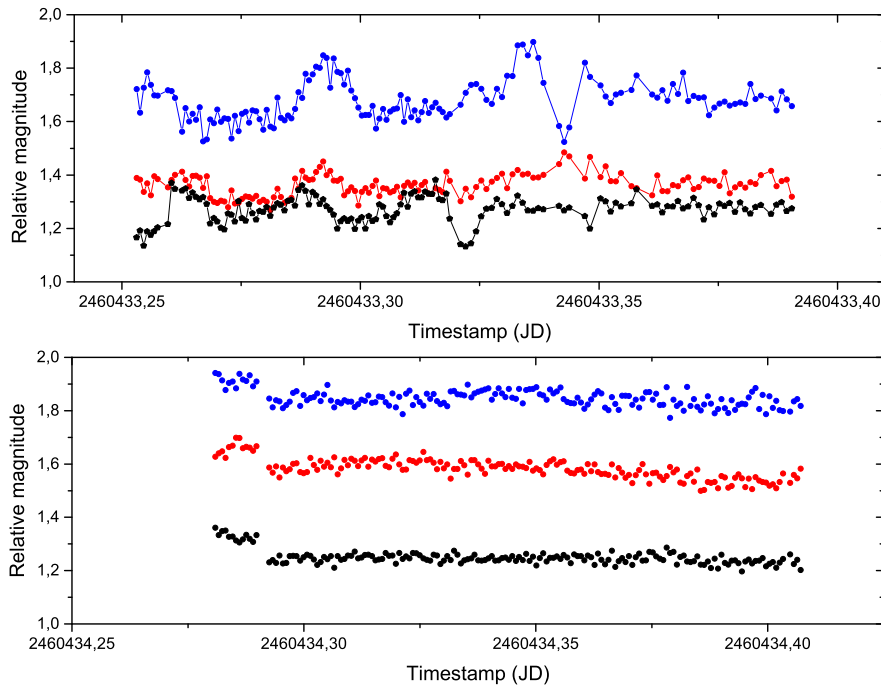
В некоторых случаях, смещение происходит преимущественно по часовой оси, что обусловлено совокупностью описанных выше факторов, в других – преимущественно по оси склонения (рис. 2, слева). По часовой оси эти эффекты выражены значительно сильнее из-за необходимости постоянного часового движения. Особенностью таких отклонений является то, что они могут нарастать только при равномерном движении телескопа, зависеть от температурных условий и не повторяться при умышленном воссоздании.

Во время процесса наведения и грубого движения эти эффекты незаметны и суммарно понижают лишь точность попадания в заданные координаты в пределах указанной выше погрешности. Однако непосредственно в процессе наблюдений их вклад сильно усложняет процесс контроля в связи с необходимостью постоянного ручного гидирования, а также значительно ухудшает результирующую точность наблюдений, особенно слабых объектов (20–21 зв. вел.), из-за инструментальных отклонений, связанных с движением звезд по полю детектора с неравномерной чувствительностью, которую сложно в достаточной мере исправить средствами калибровки.

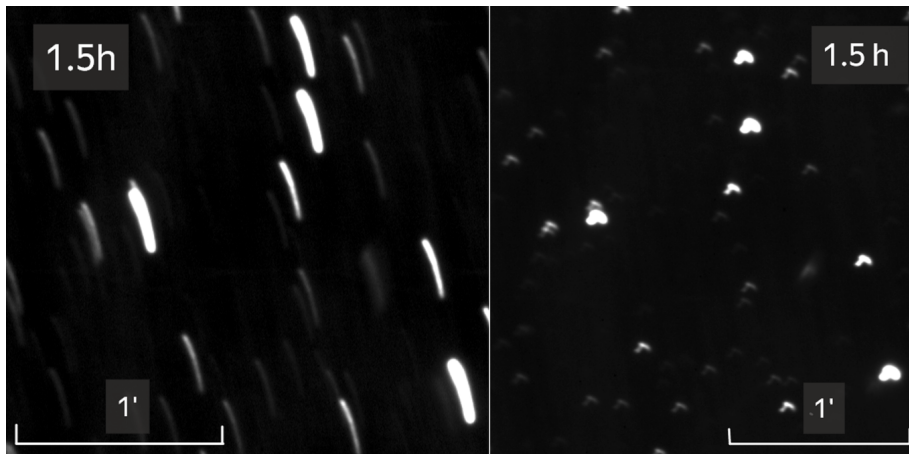
На рис. 3 (верхний график) показан пример кривых блеска контрольных звезд (19–20 зв. вел.), полученных без использования фотогида, а на рис. 3 (нижний график) – пример поведения тех же звезд, но уже с использованием фотогида, кадры намеренно обработаны без коррекции плоским полем. При отсутствии гидирования фотометрические ряды демонстрируют присутствие ложных, синхронных, медленных трендов на всех звездах, достигающих 0.2 зв. вел. и значительно превышающих типичный уровень шума. Использование фотогида обеспечивает стабилизацию положения объекта на детекторе, вследствие чего существенно уменьшается вклад инструментальных отклонений, при этом типичное значение среднеквадратичных отклонений сохраняется на том же уровне.

Под действием факторов, показанных и описанных выше, результирующие смещения по часовой оси могут достигать  $1'$  в час только из-за неравномерностей часового ведения и суммарно доходить до  $1.5$ – $2'$  в час. По склонению они превышают  $1'$  в час, что является неприемлемым для телескопа такого класса.

На рис. 4 показаны примеры смещений объекта в поле камеры прямого фокуса при прохождении околозенитной области без фотогида (левый рисунок) и с работающим фотогидом с коррекцией по обеим осям (правый рисунок) за 1.5 часа. На рис. 5 представлены зафиксированные во втором случае кривые коррекции фотогида, которые показывают полную компенсацию эффектов, вносимых механикой монтировки (внутренняя точность коррекции фотогида составляет порядка  $0.5''$ , среднеквадратичная ошибка по прямому восхождению –  $0.4$ , оси склонения –  $0.3''$ ).



**Рис. 3.** Графики поведения контрольных звезд во время наблюдений объекта NY Нег в прямом фокусе без использования фотогида (02.05.2025, верхний график) и с использованием фотогида (03.05.2025, нижний график). Время наблюдения, высота над горизонтом и качество изображения одинаковы. Коррекция изображения плоским полем намеренно не выполнена



**Рис. 4.** Пример наблюдаемого смещения объекта в прямом фокусе без коррекции положения фотогидом (слева) и с коррекцией (справа) за 90 минут. Север вверху. Качество изображений порядка  $2''$

Таким образом, в результате коррекции точность позиционирования выросла более чем в 6 раз (с 25 до  $3-4''$  в час) за тот же период времени. Для других случаев, показанных на рис. 2, точность позиционирования выросла в 8–10 раз. Однако, как видно из рис. 4 (справа), даже с коррекцией суммированное изображение имеет форму “птички”, что наглядно показывает наличие некомпенсированных эффектов гнущия и смещений ГЗ, которые не учитываются в расчете при текущем расположении гидирующей камеры.

На рис. 6 показаны примеры смещения наблюдаемого объекта при работающем фотогиде на длительном временном интервале при движении телескопа из азимутальной области на запад к горизонту. Видно, что вблизи зенитной области смещения минимальны, но с увеличением часового угла (и, соответственно, угла наклона ГЗ) они нарастают с ускорением, суммарно превышая  $1'$  за 6 часов. При этом кривые коррекции фотогида

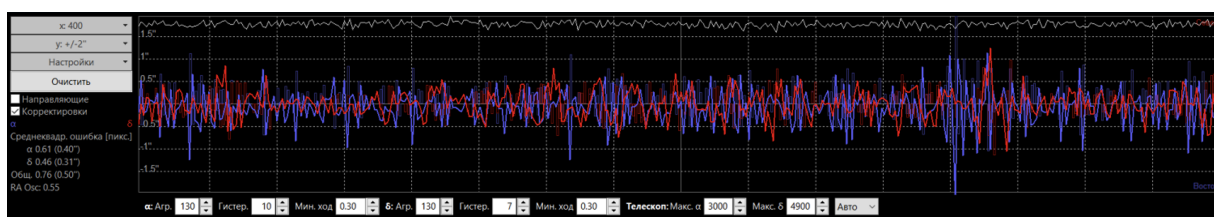


Рис. 5. Пример кривых коррекции фотогида для случая на рис. 3 (справа)

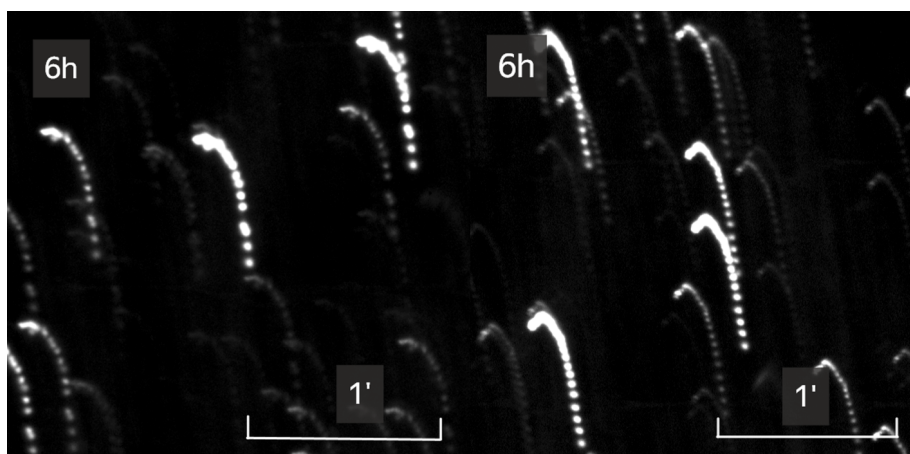


Рис. 6. Пример наблюдаемого смещения объекта в прямом фокусе, вызванного гнутями и смещениями ГЗ при движении телескопа от зенита на запад к горизонту, за 6 часов при работающем фотогиде. Север вверх

полностью ровные и аналогичны рис. 5, что подтверждает природу смещений объекта из-за факторов, находящихся вне фиксации фотогида.

Стоит отметить, что автору не удалось найти информацию о том, какая норма технологического допуска смещений была изначально заложена для разгрузок ГЗ, а также какую величину смещения зеркала эти разгрузки должны обрабатывать при юстировке в обычном режиме работы (Гершберг и др., 1973). Вполне возможно, что для получения желаемых точностей ведения, помимо внешней коррекции, требуется механическая наладка и восстановление штатной работы этого и других элементов монтировки. Однако, как показано выше, такая величина вполне может быть компенсирована фотогидом при реализации коррекции полного цикла (с учетом гнутей).

#### 4 Заключение

При разработке проекта отдельного цифрового фотогида были реализованы и протестированы аппаратные и программные методы, позволяющие осуществлять управление аналоговой монтировкой 2.6-м телескопа ЗТШ цифровыми методами с возможностью достижения требуемой точности, со среднеквадратичным отклонением звезды в гиде не хуже  $1/2$  FWHM в час (до  $1/3$  FWHM при хорошем качестве изображения) или среднеквадратичной ошибкой по обеим осям не хуже  $0.3''$ .

Опыт применения фотогида такой конструкции в наблюдениях показал удобство, простоту использования и надежность прибора.

Тестирование в текущей конфигурации показало возможность полностью компенсировать ошибки монтировки по часовому ведению и склонению, что уже привело к улучшению точности ведения в 6–10 раз. Исследование кривых коррекций позволило четко разделить влияние различных факторов на смещение изображения в первичном фокусе, что невозможно было сделать по прямому изображению. Отмечено, что наибольший вклад в точность следования вносят именно эффекты монтировки, однако без коррекции гнутей точность гидирования остается недостаточной.

По полученным данным можно сделать вывод, что разработанная система гидирования технически способна обеспечить требуемую точность управления монтировкой, однако проблемой остается выбор оптимального места установки приемной камеры для каждой фокальной системы ЗТШ и вопрос компенсации гнутый трубы в прямом фокусе.

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН “КрАО РАН”.

**Конфликт интересов.** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

## Литература

- Афанасьев В.Л., Гажур Э.В., Желенков С.Р., Моисеев А.В., 2005. Бюлл. Спец. астрофиз. обсерв. Т. 58. С. 90–117. [Afanas'ev V.L., Gazhur E.V., Zhelenkov S.R., Moiseev A.V., 2005. Byull. Spets. astrofiz. observ., vol. 58, pp. 90–117. (In Russ.)]
- Гершберг Р.Е., Лиморенко К.Я., Проник В.И., 1973. Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. Т. 47. С. 153–158. [Gershberg R.E., Limorenko K.Ya., Pronik V.I., 1973. Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ., vol. 47, pp. 153–158. (In Russ.)]
- Иоаннисиани Б.К., Тамбовский Г.А., Коншин В.М., 1976. Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. Т. 55. С. 208–223. [Ioannisian B.K., Tambovskii G.A., Konshin V.M., 1976. Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ., vol. 55, pp. 208–223. (In Russ.)]
- Сабинин Ю.А., Беляев Е.Н., Мясников В.А., 1960. Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. Т. 23. С. 174–183. [Sabinin Yu.A., Belyaev E.N., Myasnikov V.A., 1960. Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ., vol. 23, pp. 174–183. (In Russ.)]
- Шитов В., Панков Н., Беляев А., 2012. Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. Т. 108. № 1. С. 238–253. [Shitov V., Pankov N., Belyaev A., 2012. Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ., vol. 108. no. 1, pp. 238–253. (In Russ.)]

## Applying a digital photoguider for precise object position correction at the primary focus of the 2.6-meter ZTSH telescope

*A.A. Sosnovskij*

Crimean Astrophysical Observatory, Nauchny 298409

**Abstract.** The paper presents factors affecting the object tracking accuracy at the 2.6-m ZTSH telescope. The capability for implementing fine digital correction of the observed object is shown through a photoguider mounted by A.A. Sosnovsky, A.S. Krivenko, N.F. Pankov, and I.V. Drozdov in 2024.

We outline the operating principles of the device, as well as the technical and software aspects of its mounting, adjustment, and integration with the standard analog systems of ZTSH. The results of using the device for guiding at the primary focus are presented.

We discuss the current limitations of the device and possible directions for its further upgrade to implement full correction. The experience gained within this project may be useful for applying to other telescopes, including large instruments that are not yet equipped with digital photoguiders.

**Key words:** photoguider, correction, photometry, ZTSH