

УДК 520.16+520.353

ЭШЕЛЛЕ-СПЕКТРОПОЛЯРИМЕТР ПЕРВИЧНОГО ФОКУСА БТА ESPriF. КОРРЕКЦИЯ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ВАРИАЦИЙ ИЗОБРАЖЕНИЯ ЗВЕЗДЫ

© 2023 М. В. Юшкин^{1*}, Э. В. Емельянов^{1**}, Ю. Б. Верич¹, В. Е. Панчук¹

¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 7 августа 2023; после доработки 29 сентября 2023; принята к публикации 2 октября 2023

Сообщается о разработке корректора низкочастотных вариаций изображения звезды на входе ESPriF — эшелле-спектрополяриметра первичного фокуса БТА. Новые технические решения позволили продлить диапазон рабочих частот до 10 Гц для звезд ярче 13^m.

Ключевые слова: атмосферные явления — приборы: адаптивная оптика — приборы: спектрографы

1. ВВЕДЕНИЕ

При разработке нового спектрального прибора БТА — ESPriF (Panchuk et al., 2020) — основным требованием являлось повышение эффективности по потоку как по сравнению с предыдущими конструкциями, так и для компенсации процесса понижения характеристик оптики БТА, эксплуатируемой с конца 1970-х. Кроме снижения френелевских потерь на линзовой оптике ESPriF, особое внимание было уделено компенсации низкочастотных вариаций наклонов волнового фронта. Перечислим предшествовавшие этому разработки.

Первые работы посвящены компенсации наклонов волнового фронта с целью увеличения проникающей способности спектральной аппаратуры. С 2000 года в фокусе Нэсмита 6-м телескопа БТА работает локальный корректор наклонов волнового фронта — ЛКН (Ivanov et al., 2001), облегчающий работу астронома-наблюдателя и обеспечивающий на спектрографах НЭС (Panchuk et al., 2017) и ОЗСП (Panchuk et al., 2014) выигрыш в светосиле по потоку на одну звездную величину. В 2020 году начата разработка нового локального корректора фокуса Нэсмита БТА, получившего название компенсатора наклонов волнового фронта. При этом учитывается богатая многолетняя статистика работы ЛКН, что позволило, в частности, обнаружить анизотропию колебаний изображения, вызываемых ветровой нагрузкой на конструкцию телескопа (Tamarov et al., 2022).

При реконструкции эшелле-спектрографа первичного фокуса БТА PFES (Panchuk et al., 1997) в 2005 году был испытан локальный корректор первичного фокуса — ЛКПФ (Якоров, 2006), показавший меньшую инерционность по сравнению с ЛКН (за счет уменьшенной массы плоскопараллельной пластины и массы соответствующей механики). В настоящее время конструкция ЛКПФ полностью переработана с учетом изменений оптической схемы и габаритов эшелле-спектрополяриметра первичного фокуса, а также нового подхода к задаче компенсации наклонов волнового фронта.

В 2017 году был разработан локальный корректор (ЛКМТ) для оптоволоконного входа эшелле-спектрографа телескопа метрового класса (Panchuk et al., 2015). Это позволило стабилизировать засветку оптического волокна без построения сопряженного зрачка на входном торце. Результаты разработки спектральной аппаратуры высокого разрешения с оптоволоконным входом для телескопов умеренного диаметра позволили встроить малогабаритный корректор кривизны волнового фронта в систему согласования апертур телескопа и оптического волокна.

Перечисленные системы работают при относительных отверстиях $A = 1 : 30$, $1 : 4$ и $1 : 13$ соответственно. Причем концепция ЛКМТ, разработанная для касегреновского фокуса ($A = 1 : 13$) метрового телескопа, послужила основой для разработки нового корректора первичного фокуса БТА ($A = 1 : 4$) для эшелле-спектрополяриметра высокого разрешения ESPriF.

*E-mail: yumaks@gmail.com

**E-mail: eddy@sao.ru

Следующий этап по созданию корректоров волнового фронта включает в себя не только повышение проникающей способности спектральной аппаратуры, но и повышение спектрального разрешения с одновременным увеличением светосилы по потоку, что противоречит каноническим принципам спектроскопии высокого разрешения, когда произведение светосилы по потоку (L) и спектральному разрешению (R) является инвариантом. Такой подход требует не только более точной компенсации наклонов волнового фронта, но и улучшения самого качества изображения, т.е. компенсации более высоких порядков волновых aberrаций. В качестве первого шага в этом направлении в 2020 году схема ЛКМТ была дополнена корректором кривизны волнового фронта, который позволяет в режиме реального времени компенсировать дефокусировку оптической системы телескопа, вызываемую как атмосферной турбулентностью в приземном слое, так и движениями воздушных масс в подкупольном пространстве. В настоящее время подобная система компенсации кривизны волнового фронта разработана для первичного фокуса БТА ($A = 1 : 4$), где и проходит испытания. В данной работе также рассмотрены перспективы создания системы коррекции кривизны волнового фронта для фокусов с другим относительным отверстием.

2. ХАРАКТЕРИСТИКИ НИЗКОЧАСТОТНЫХ КОЛЕБАНИЙ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В работе Klochkova et al. (2020) отмечены выявленные за годы эксплуатации БТА преобладающие частоты колебаний изображения: в диапазоне 0.7–0.9 Гц по обеим осям, в диапазоне 0.8–1 Гц для оси азимута и 0.4 Гц для оси зенитного расстояния. При коррекции положения объекта через воздействие на приводы телескопа возникают колебания, затухающие за время около 25 с. В мае 2023 г. после установки новых частотных преобразователей двигателей осей БТА были снова проведены исследования точности сопровождения объекта. Для этого получено несколько рядов изображений ярких звезд с малыми экспозициями (50–200 мс), точность вычисления барицентра изображения звезды на единичном кадре составила 0.05".

Частотный анализ показал наличие нескольких гармоник колебаний (рис. 1). Максимум приходится на колебания с частотой около 0.66 Гц (период примерно 1.5 с) для обеих осей, хотя по азимутальной оси (A) колебания с таким периодом более выражены, чем по оси зенитных расстояний (Z). Второй пик приходится на частоту 0.33 Гц (период 3 с) и наблюдается только на спектре мощности колебаний по оси A . В области колебаний с периодами более 5 с на спектре мощности наблюдается «частокол» пиков, связанный, по

всей видимости, с отсутствием явных гармонических колебаний, хотя амплитуда таких отклонений может быть значительной. По оси A относительно долгопериодический (10–50 с) уход изображения звезды от среднего положения достигал 4", что, скорее всего, вызвано ветровой нагрузкой. Уход изображения звезды от среднего положения по оси Z имеет более стохастический характер.

Кроме объективной статистики сотрудники лаборатории астроспектроскопии¹⁾ за десятилетия наблюдений на БТА накопили и субъективный опыт. В частности, известно, что характеристики колебаний положения изображений не обязательно связаны с колебаниями их формы: иногда диаметр стабильно расположенного изображения заметно изменяется, вплоть до разделения целого на фрагменты. Другими словами, и при хороших изображениях низкочастотная коррекция наклонов и кривизны волнового фронта необходима.

3. СХЕМА КОРРЕКТОРА НИЗКОЧАСТОТНЫХ КОЛЕБАНИЙ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ESPRIF

Эшелле-спектрополяриметр ESPriF разрабатывался в течение нескольких лет, с вынужденными перерывами. Например, при осуществляемых в 2018–2019 гг. попытках завершить процесс замены рабочего главного зеркала БТА (ГЗ №2) на обновленное зеркало (ГЗ №1), выяснилось, что, из-за снятия значительного слоя стекла с поверхности ГЗ №1, предельный вынос поверхности первичного фокуса (ПФ) за монтажный фланец поворотного стола в кабине ПФ значительно уменьшился. В связи с этим для прибора SCORPIO (Afanasiev and Moiseev, 2005), уже используемого в плановых наблюдениях, в некоторых режимах положение фокусирующего устройства БТА находилось вблизи концевого выключателя, а часть режимов (поляриметрических) вообще оказались недоступны, что при дальнейшей эксплуатации ГЗ №1 на телескопе потребовало бы реконструкцию так называемого адаптера ПФ БТА, выполняющего функции калибровки и гидирования. В нашем проекте мы ограничились изготовлением временного узла предшелевой части ESPriF с набором функций, позволяющим выполнить оценку проникающей способности спектрографа. При этом функцию подмотра большого поля пришлось перенести на небольшой ($D = 20$ см) катадиоптрический телескоп, реконструируемый для замены общего гида (ОГ) БТА.

После возвращения на телескоп ГЗ №2 часть объема, предназначенного для размещения узлов

¹⁾<https://www.sao.ru/hq/ss1/>

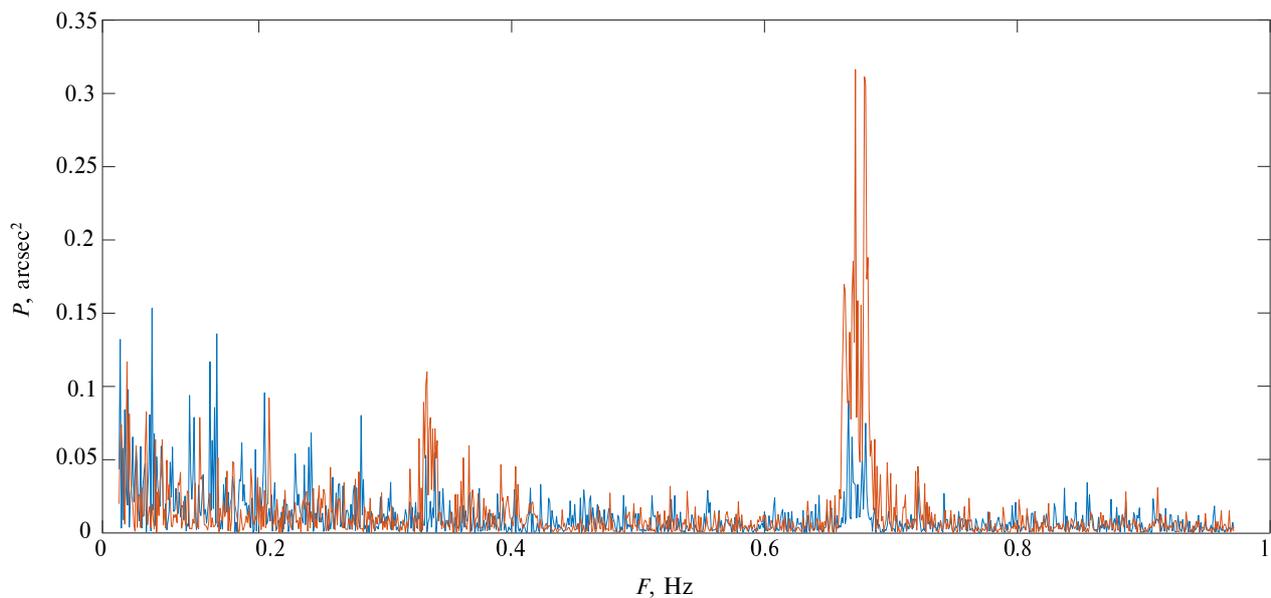


Рис. 1. Спектр колебания изображения по осям A (красный) и Z (синий).

предщелевой части и сократившегося из-за изменения выноса фокуса, высвободилась и была разработана новая конструкция входа в спектрограф.

Был выполнен оптический расчет новой предщелевой части ESPriF, включающей в себя следующие элементы (рис. 2):

- 1) афокальный редуктор — линзовая система (элементы 1 и 2), преобразующая сходящийся пучок лучей от главного зеркала БТА в сходящийся с той же апертурой, но с возможностью быстрой компенсации дефокусировки смещением одного оптического элемента 2; этот же подвижный элемент обеспечивает и компенсацию наклона волнового фронта, смещаясь по двум ортогональным осям в плоскости, перпендикулярной оптической оси телескопа;
- 2) подсмотр входной щели с детектором дефокусировки — проекционный объектив со светоделительными кубиками в сходящемся пучке (элементы 5 и 6 соответственно), камера $C1$, фиксирующая положение барицентра изображения звезды, и камера $C2$, регистрирующая зафокальное и предфокальное монохроматические изображения для контроля положения фокуса;
- 3) поляриметрический модуль, включающий две суперхроматические фазосдвигающие пластинки — четвертьволновую и полуволновую, расположенные на турели T , а также пластину Савара (на рисунке не показана) с возможностью ввода последней за входной щелью спектрографа с одновременной установкой компенсатора дефокусировки;

- 4) канал калибровок для засветки входной щели спектрографа источниками линейчатого и непрерывного спектров, на рис. 2 показана призма полного внутреннего отражения на турели T для ввода в пучок калибровочного света.

Идея афокального редуктора восходит к схеме линзового коллиматора, перемещаемого по ортогональным осям для компенсации колебаний изображения звезды. Эта схема была впервые предложена в конструкции бесщелевого звездного спектрографа с гидированием и интерферометрическими реперами спектра (Linnik, 1963), включенного в состав первого поколения аппаратуры БТА (Panchuk and Klochkova, 2006).

Функции новой предщелевой части включают: контроль наведения на объект, выбор используемого деккера, захват изображения системой гидирования, калибровки непрерывным и линейчатым спектрами, смена пластин анализатора поляризации, изменение углов поворота пластин, компенсация наклонов и кривизны волнового фронта. Узлы, выполняющие все эти функции, были объединены в так называемый входной модуль (ВМ), включающий узлы предщелевой части и узел щелей (деккеров). На рис. 2 приведена схема входного модуля ESPriF.

Покажем, что разработка корректора, состоящего из малоинерционных узлов и деталей, переводит задачу продвижения в область относительно высоких частот из класса оптомеханических в класс оптикоэлектронных задач. Для этого были выполнены некоторые энергетические оценки.

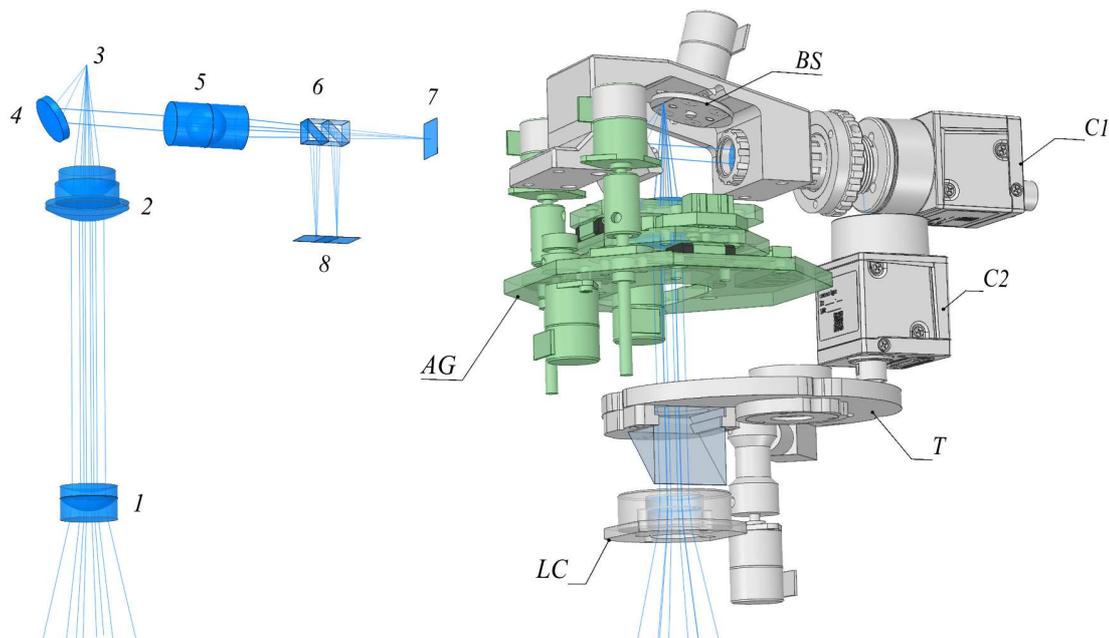


Рис. 2. Схема входного модуля (ВМ) ESPriF. Обозначения: слева — ход лучей, справа — основные элементы и узлы; 1 и 2 — элементы афокального редуктора, 3 — положение щели (деккера), 4 и 5 — оптика подзора деккера, 6 — светоделительные элементы детектора дефокусировки, 7 и 8 — приемники подзора деккера. LC — линзовый предфокальный коллиматор, T — турель с фазосдвигающими пластинками и призмой переброса калибровочного света, AG — модуль автогидирующего устройства с подвижным объективом, BS — блок сменных щелей (0''5, 0''75 и 1''0), C1 — камера подзора входной щели, C2 — канал автофокусировки. Элементы несущей конструкции ВМ не показаны.

4. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ДЛЯ ГЛАВНОГО ФОКУСА БТА

Оценка эффективности ESPriF, выполненная по реальным наблюдениям, показала, что на этапе опытной эксплуатации спектрографа будут доступны для наблюдения звездообразные объекты с блеском до 15^m в полосе V с разрешением $R = 15\,000$. Следовательно, для удовлетворительной работы корректора изображения приемник излучения канала подзора должен регистрировать подобные объекты с экспозицией, не превышающей 0.1 с. Выполним энергетический расчет для канала подзора с учетом конструктивных особенностей входного модуля ESPriF.

Эффективная площадь главного зеркала БТА (S_{eff}), с учетом экранирования кабиной первичного фокуса и коэффициента отражения от рабочей поверхности, составляет

$$S_{\text{eff}} = 0.8 \pi (600^2 - 180^2)/4 \approx 2 \times 10^5 \text{ см}^2.$$

Для оценки количества фотонов, собранных телескопом в первичном фокусе, примем в качестве стандарта нулевой звездной величины Vega (α Луг). Выполним расчет отдельно для каждой из четырех фотометрических полос $UBVR_c$. Спектральную плотность потока излучения Веги за атмосферой $f_{\lambda}^{\text{Vega}}$, значение эффективной длины волны $\lambda_{\text{eff}}^{\text{Vega}}$ и

ширину $\Delta\lambda$ каждой фотометрической полосы возьмем из работы Fukugita et al. (1995) (таблица 1). Поток фотонов $F_{\text{ph}}^{15^m}$ в фокусе телескопа от звезды 15^m интегрально в каждом фильтре оценим исходя из следующего соотношения:

$$F_{\text{ph}}^{15^m} = \tau_{\lambda} \frac{f_{\lambda}^{\text{Vega}} \Delta\lambda}{e_{\lambda}^{\text{ph}}} S_{\text{eff}} \times 10^{-6}, \quad (1)$$

где e_{λ}^{ph} — энергия единичного фотона, τ_{λ} — коэффициент атмосферного поглощения в данной фотометрической полосе, а множитель 10^{-6} — отношение потоков 15^m и 0^m . Коэффициенты τ_{λ} вычислим по формуле:

$$\tau_{\lambda} = 10^{-0.4K_{\lambda} X}, \quad (2)$$

где K_{λ} — коэффициент атмосферной экстинкции, а $X = \sec Z$ — воздушная масса. Будем считать, что свет от звезды проходит воздушную массу $X = 2$ (зенитное расстояние $Z = 60^\circ$), на больших зенитных расстояниях наблюдения проводятся редко. Коэффициенты атмосферной экстинкции для места установки БТА ($K_U = 0^m615$, $K_B = 0^m319$, $K_V = 0^m184$, $K_R = 0^m114$) взяты из работы Neizvestny (1983). В таблице 1 приведены результаты расчета потока излучения $F_{\text{ph}}^{15^m}$ в

Таблица 1. Оценка потока излучения в канале подсмотра ESPriF в разных фотометрических полосах

Band	$\lambda_{\text{eff}}^{\text{Vega}}$, Å	$\Delta\lambda$, Å	$f_{\lambda}^{\text{Vega}}$, $\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{Å}^{-1}$	e_{λ}^{ph} , erg	τ_{λ}	$F_{\text{ph}}^{15^{\text{m}}}$, ph s^{-1}	$F_{\text{ph}}^{\text{Moon}}$, ph s^{-1}	$\langle QE \rangle$	S^* , $e^{-} \text{s}^{-1}$	S^{Moon} , $e^{-} \text{s}^{-1}$
<i>U</i>	3709	526	4.28×10^{-9}	5.36×10^{-12}	0.32	26 881	9 258	0.25	1 142	6 221
<i>B</i>	4393	1008	6.19×10^{-9}	4.52×10^{-12}	0.56	154 608	28 224	0.64	16 821	48 554
<i>V</i>	5439	827	3.60×10^{-9}	3.65×10^{-12}	0.71	115 825	16 540	0.66	12 996	29 343
<i>R_c</i>	6410	1568	2.15×10^{-9}	3.10×10^{-12}	0.81	176 172	25 402	0.22	6 589	15 022
Full						473 486	79 424		37 548	99 140

первичном фокусе БТА от звезды 15^{m} в каждой фотометрической полосе. Видно, что суммарный поток во всем оптическом диапазоне (нижняя строчка таблицы 1) будет составлять примерно 4.7×10^5 фотонов в секунду.

В канал подсмотра попадает часть изображения звезды, не прошедшая внутрь спектрографа и отраженная от щечек входной щели. Входные щели ESPriF вырезаны лазером в полированной пластине из нержавеющей стали. Коэффициент отражения от полированной стальной пластины примем равный 0.6. Для получения спектрального разрешения 15 000, 22 500 и 30 000 на входе в спектрограф могут быть установлены щели шириной 120 мкм ($1''$), 90 мкм ($0''.75$) и 60 мкм ($0''.5$) соответственно. Высота всех трех щелей 240 мкм, что эквивалентно двум угловым секундам в проекции на небесную сферу. Выполним оценку эффективности канала подсмотра с самой широкой щелью ($R = 15 000$). В случае работы спектрографа в режиме с большим спектральным разрешением количество света в канале подсмотра будет больше как из-за уменьшения доли света, проходящей внутрь спектрографа, так и за счет увеличения блеска наблюдаемого объекта, поскольку с повышением спектрального разрешения проникающая способность ESPriF будет снижаться.

Многолетний опыт мониторинга астроклиматических условий в месте установки БТА показывает, что среднее значение диаметра турбулентного диска звезды на половине интенсивности составляет $1''.5$ (Panchuk and Afanas'ev, 2011). Определение положения изображения звезды на входной щели ESPriF выполняется путем вычисления координат центра тяжести в части кадра, в два раза превышающей диаметр турбулентного диска. Следовательно, при среднем качестве изображения мы будем считывать площадку размером $3'' \times 3''$. Diego (1985) выполнил расчет концентрации энергии при различном качестве изображения. Используя эти расчеты, мы получаем, что при средних погодных условиях в щель ESPriF размером $1'' \times 2''$

будет проходить 40% потока излучения звезды, собранного телескопом, а в площадке $3'' \times 3''$ будет сконцентрировано 84% всей энергии. Таким образом, в канал подсмотра для определения координат центроида будет отправляться 44% от полной энергии звезды, приходящей в первичный фокус БТА. С учетом коэффициента отражения от щечек щели 0.6 (позиция 3 на рис. 2), коэффициента отражения ломающего зеркала 0.8 (позиция 4) и коэффициента пропускания оптики объектива подсмотра и блока светоделиителей 0.8 (позиции 5 и 6 соответственно) общая эффективность канала подсмотра составляет примерно 0.17. Камера канала подсмотра (*C1*), используемая для контроля положения изображения звезды, снабжена КМОП-детектором SONY IMX249 (позиция 7). Средняя квантовая эффективность IMX249 ($\langle QE \rangle$) в соответствующей фотометрической полосе приведена в отдельной колонке таблицы 1. С учетом этой квантовой эффективности рассчитан сигнал от звезды S^* в каждой полосе, считываемый с приемника излучения канала подсмотра в площадке $3'' \times 3''$. Видно, что интегральный сигнал (нижняя строка таблицы 1) составляет 3.7×10^4 фотоэлектронов в секунду. Следовательно, на единичном кадре с экспозицией 0.1 с на изображение звезды 15^{m} будет приходиться примерно 3700 фотоэлектронов. Без учета собственных шумов приемника излучения отношение сигнал/шум на единичном кадре в приближении пуассоновской статистики, определяемое как $S/N = \sqrt{S^*}$, примерно равно 60, что в первом приближении достаточно для определения координат центроида изображения с точностью $0''.1$. Однако в реальных условиях мы должны учитывать и фон, и собственные шумы детектора.

Источником фоновой засветки является земная атмосфера, имеющая как собственное свечение, так и рассеивающая лунный свет (антропогенные факторы мы не учитываем, хотя их вклад с

каждым годом возрастает). Выполнение спектроскопических наблюдательных программ на БТА по звездной тематике, как правило, происходит в светлые ночи, поэтому основной вклад в фоновую засветку будет вносить рассеянный свет Луны. Детальные исследования фона неба в месте установки БТА при фазах Луны, близких к полнолуннию, не проводились, поскольку все фотометрические программы выполняются в темное время. Поэтому для оценки уровня рассеянного света воспользуемся моделью атмосферы, разработанной для Европейской южной обсерватории (Jones et al., 2013). Расчет свечения неба на разных длинах волн для различных наблюдательных площадок ESO доступен через web-сервис SKYCALC²⁾. Для онлайн калькулятора мы использовали следующие входные параметры: обсерватория — «La Silla» (2400 м над уровнем моря), воздушная масса — $X = \sec Z = 2$, фаза Луны — 1.0 (полная), высота Луны над горизонтом — 45° , расстояние от объекта до Луны — 45° . В таблице 1 приведены отдельно в каждой фотометрической полосе расчетные потоки излучения рассеянного света Луны F_{ph}^{Moon} в фокусе телескопа, приходящие с площадки неба в одну квадратную секунду. В среднем в лунную ночь с одной квадратной секунды неба в фокус телескопа будет приходиться каждую секунду 7.9×10^4 фотонов рассеянного света. Понятно, что эта величина будет сильно варьироваться как от высоты Луны над горизонтом, удаления объекта от Луны, так и от состояния атмосферы в целом (количество водяного пара, количество аэрозолей, наличие облачности и т.д.). Общая эффективность канала подсмотра при наблюдении протяженных источников складывается из коэффициентов отражения и пропускания оптических элементов (3, 4, 5, 6 на рис. 2) и составляет 0.38. Как отмечено выше, для определения координат центра мы, при среднем качестве изображения, считываем площадку $3'' \times 3''$. Таким образом, площадь, с которой будет собираться рассеянный свет (за вычетом площади входной щели спектрографа), составляет семь квадратных секунд. С учетом средней квантовой эффективности детектора канала подсмотра $\langle QE \rangle$ в каждой фотометрической полосе мы можем оценить интегральный сигнал от фоновой засветки S^{Moon} . В итоге мы получаем, что на площадь детектора, занимаемую изображением звезды, приходится суммарно 9.9×10^4 фотоэлектронов в секунду, что почти в три раза превышает сигнал от звезды. В этом случае S/N можно оценить по

формуле:

$$S/N = \frac{S^*}{\sqrt{S^* + S^{Moon}}} \quad (3)$$

В нашем случае отношение сигнал/шум на единичном кадре с экспозицией 0.1 с в канале подсмотра при наблюдении звезды 15^m будет составлять $S/N \approx 30$. Что заметно хуже, но по-прежнему достаточно для уверенного выделения объекта на фоне неба.

В действительности изображение звезды занимает большое количество элементов приемника, а S/N , рассчитанное для интегрального потока, говорит лишь о точности измерения интенсивности излучения. Поскольку нас интересует точность позиционных измерений, мы должны использовать другой критерий: будем считать, что для определения положения центра с точностью $0''.1$ нам необходимо иметь пространственный элемент разрешения не более $0''.5$ и $S/N \geq 5$ в расчете на элемент пространственного разрешения. Размер единичного элемента (пикселя) детектора SONY IMX249 составляет 5.86 мкм, что в проекции на небесную сферу соответствует масштабу $0''.05$ пиксель⁻¹. Таким образом, на площадку неба в одну квадратную секунду приходится 400 пикселей, а изображение звезды с вырезанной центральной частью будет занимать площадь 2800 пикселей. Из этого следует, что на единичный элемент детектора канала подсмотра за время экспозиции 0.1 с будет приходиться чуть более одного фотоэлектрона.

Отношение сигнал/шум с учетом собственных шумов светоприемника можно рассчитать по следующей формуле:

$$S/N = \frac{S^*}{\sqrt{S^* + S^{Moon} + n_r^2 P + DP}} \quad (4)$$

где n_r — шум считывания, P — количество пикселей, занимаемое изображением звезды, D — темновой ток. Темновой ток у детектора IMX249 равен $0.03 e^-$ на пиксель за секунду, и им можно пренебречь. Шум считывания варьируется от режима работы детектора и в среднем составляет $7 e^-$. Получается, что на единичном кадре мы будем иметь $S/N < 0.2$ из расчета на пиксель. Самый простой способ увеличить отношение сигнал/шум — бинирование (binning) или объединение нескольких элементов приемника. У КМОП-детекторов в отличие от матриц ПЗС объединение пикселей возможно только программным способом после считывания изображения, что увеличивает S/N всего лишь на фактор, равный квадратному корню

²⁾<https://www.eso.org/observing/etc/skycalc>

из числа объединенных пикселей. Для удовлетворения вышеупомянутому критерию пространственного разрешения мы можем усреднять (или суммировать) сигнал в площадке размером 10×10 пикселей, тем самым увеличивая S/N в 10 раз. Однако в итоге для звезды 15^m при экспозиции 0.1 с мы получим $S/N < 2$ на элемент пространственного разрешения, что недостаточно для требуемой точности работы корректора изображения.

Исходя из представленных расчетов мы получаем, что с КМОП-детектором компенсация собственных частот колебания БТА возможна только при наблюдении звезд на ESPriF до 13^m . Следовательно, компенсация наклонов волнового фронта, вызванных атмосферными явлениями и турбулентными движениями воздуха в подкупольном пространстве, возможна только для еще более ярких объектов.

Оценим теперь максимально возможное S/N для звезды 15^m , которое мы могли бы получить, изменив масштаб изображения в 10 раз (согласовав размер пространственного элемента разрешения с размером элемента приемника) либо используя другой тип детектора, позволяющий объединять пиксели непосредственно на чипе, как это происходит у ПЗС-матриц, так что каждый элемент пространственного разрешения считывается с ошибкой $n_r = 7 e^-$. Согласно таблице 1 на площадку размером $0''.5 \times 0''.5$ на светоприемнике канала подсмотра за время экспозиции 0.1 с в среднем приходится от звезды $S^* = 134 e^-$, от фоновой засветки $S^{Moon} = 354 e^-$. В итоге мы получаем, что при согласовании масштаба изображения с элементом разрешения детектора максимально возможное отношение сигнал/шум для звезды 15^m в канале подсмотра $S/N \approx 6$.

Приходим к выводу, что компенсация наклонов волнового фронта, вызванных колебаниями телескопа на собственных частотах, возможна только при наблюдении звезд до 15^m в случае замены типа светоприемника или уменьшения масштаба изображения в канале подсмотра. При наблюдении более слабых объектов корректор изображения будет работать в режиме автогида. Изменение оптической схемы предщелевой части ESPriF путем установки светоделиителя перед входной щелью спектрографа принципиально не увеличит проникающую способность канала подсмотра. Светоделиитель позволяет отправлять в канал подсмотра 10% потока излучения от полного изображения звезды, таким образом, мы можем определять координаты центра не по остаткам изображения с вырезанной центральной частью, а по более яркой центральной части. Как показали приведенный выше расчеты, эффективность канала подсмотра

в нынешней схеме предщелевой части ESPriF составляет 0.17 для звездообразного объекта при средних погодных условиях и 0.38 для протяженных источников, а в случае использования светоделиителя эффективность канала подсмотра не будет превосходить 0.10, но при этом она будет одинаковой как для точечных, так и для протяженных источников. Данное обстоятельство позволит увеличить контрастность изображения и, в случае идеальных погодных условий, продвинуться до 16^m при условии согласования пространственного элемента разрешения с элементом светоприемника. Но, учитывая, что на ESPriF планируются наблюдения еще более слабых объектов (вплоть до 19^m) после замены камеры спектрографа, необходима разработка принципиально новой системы гидирования, возможно, по офсетным звездам.

В нашем проекте частота коррекции наклонов и кривизны волнового фронта определяется:

- 1) звездной величиной наблюдаемого объекта,
- 2) инерционностью подвижного элемента в афокальном редукторе,
- 3) временем анализа изображений и выработки исполнительных команд.

Оставляя низкую частоту коррекции в качестве свободного параметра, при спектроскопии очень слабых объектов планируем использовать метод комбинированного гидирования, реализованный на спектрографах фокуса Нэсмита-2 еще в работе Ivanov et al. (2001). В этом методе рассогласования, изменяющиеся монотонно, устраняются посредством воздействия на приводы системы управления телескопом, а квазипериодические рассогласования — посредством воздействия на приводы корректора.

5. АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОРРЕКТОРА

Разработанный низкочастотный корректор волнового фронта является неотъемлемой частью спектрографа ESPriF, поэтому система управления корректором является одной из подсистем управления спектрографом.

Основой системы управления является мини-компьютер под управлением ОС Gentoo Linux, расположенный непосредственно в подвесной части спектрографа. Единый интерфейс управления прибором представляет собой графическую оболочку для нескольких системных демонов: получение научных изображений, получение изображений с камеры подсмотра щели/деккеров, управление узлами спектрографа и управление низкочастотным корректором волнового фронта.

Все демоны управления отдельными узлами спектрографа обмениваются информацией либо

через локальные TCP/IP сокет, либо через UNIX-сокеты. Взаимодействие удаленного пользователя с ними обеспечивается сетевым демоном, который открывает уже сетевые TCP/IP сокет, защищенные TLS, а также защищенные веб-сокеты для веб-интерфейса.

Получение изображений с камеры подсмотра является независимой операцией. Последнее полученное изображение содержится в буфере, который по сетевому запросу может быть передан любому клиенту: для визуального отображения или для вычисления координат центра звезды. В режиме автоматической коррекции отдельное приложение — демон корректора — управляет уровнем усиления и экспозицией CMOS-светоприемника подсмотра, а также задает область интереса (для повышения скорости считывания и передачи данных). Обычно область интереса совпадает с предельной зоной, в которой доступна автокоррекция механическими перемещениями линзового блока. После вычисления координат центра производится определение необходимой величины смещения линзы для компенсации соответствующего наклона волнового фронта. Эта величина вычисляется программным ПИД-регулятором.

Модуль управления шаговыми двигателями и прочими устройствами спектрографа также выполнен в виде отдельного сетевого демона. Принимая необходимые величины смещения, демон пытается выполнить задание, а в случае достижения предела перемещения линзы корректора, сообщает о невозможности дальнейшего движения. В таком случае демон корректора выполняет смещение приводами телескопа (в режиме коррекции) так, чтобы текущее положение изображения оказалось в центре допустимой области перемещения линзы. Установившиеся вследствие коррекции положения объекта приводами телескопа затухающие колебания компенсируются смещениями линзового блока (элемент 2 на рис. 2).

Алгоритм обработки изображений следующий. После считывания очередного изображения строится гистограмма, по которой (в точке перегиба после первого максимума) определяется уровень фона. По уровню вычисленного таким образом фона строится бинарное изображение-маска (единице соответствует сигнал выше уровня фона). Далее выполняются морфологические операции для очистки шума, находятся и нумеруются четырехсвязные области. Каждая область проверяется на соотношение сторон описывающего прямоугольника и занимаемую площадь (они должны лежать в заданных рамках). Если после этого все еще обнаружено больше одного объекта, объекты сортируются по яркости либо близости к координатам цели (выбор алгоритма лежит на пользователе). Далее найденные смещения координат центра

проходят через программный ПИД-регулятор и определяется смещение корректирующей линзы, которое посредством сетевого сокета передается демону управления механическими узлами прибора или на приводы телескопа (если достигнут предел локальной коррекции).

После первой установки прибора на телескоп, а также после любых манипуляций, могущих вызвать изменение положения узла корректора, производится его калибровка. Калибровка определяет положение осей смещения корректирующей линзы относительно осей изображения, а также ориентацию векторов смещений, осуществляемых приводами телескопа. И если первая часть — калибровка локального корректора — может производиться в лабораторных условиях по искусственной звезде, то калибровка осей коррекции телескопом выполняется лишь по реальному небесному объекту. В общем случае оси перемещения линзы могут быть неортогональными, а величина смещения — представлять собой нелинейную зависимость от угла поворота ротора шагового двигателя (например, при управлении положением линзы кулачковыми механизмами). Выполняются следующие процедуры:

- 1) телескоп наводится на заданный объект;
- 2) обе координаты выставляются в среднее положение;
- 3) пользователь коррекцией телескопа выставляет звезду как можно ближе к центру области коррекций и выполняет точную фокусировку изображения звезды;
- 4) с шагом в 1/10 всего диапазона перемещения выполняются смещения сначала по оси U , а затем по оси V корректора, далее определяются коэффициенты полинома преобразования положения вала двигателей корректора в смещение изображения, а также вектора направлений осей корректора на изображении;
- 5) аналогично производится смещение изображения приводами телескопа (но на каждую координату уже выполняется лишь по два кадра) для определения ориентации его осей на кадре, далее это положение определяется с учетом текущего позиционного угла.

Таким образом, настройка и функционирование низкочастотного корректора спектрографа ESPriF оказались более сложными, чем работа с локальным корректором фокуса Нэсмита (ЛКН).

6. АППАРАТНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОРРЕКТОРА

Предцелевая часть спектрографа содержит значительное количество подвижных узлов: узел автокорректора, различные механизмы смены

щелей (деккеров), ввода фильтров, поляриза-
ционных элементов и т.п. Поэтому кратко опишем
аппаратное обеспечение системы управления.
Для работы с шаговыми двигателями, обес-
печивающими движение перечисленных узлов,
на основе микроконтроллера STM32F303VBT6
разработан модуль управления, который может
как подключаться к управляющему компьютеру
через USB, так и работать в составе CAN-шины.
Для фокусировки объектива камеры спектрографа
на основе микроконтроллера STM32F103C6T6
разработан (методом обратного инжиниринга) узел
управления, подключающийся к компьютеру через
USB либо в составе CAN-шины. Линейчатый
и непрерывный спектры (торий-аргоновая и га-
логенная лампы соответственно) формируются
отдельным устройством, разработанным на основе
микроконтроллера STM32F072C8T6, также под-
ключающегося к компьютеру по USB или в составе
CAN-шины. Выходом на режим свечения лампы с
полым катодом (Th+Ag) управляет регулируемый
источник постоянного тока. Высокое напряжение
(до 200 В) генерируется повышающим DC-DC
преобразователем. Так как подвесной спектрограф
будет нуждаться в частой калибровке линейчатым
спектром, уделено внимание максимальному со-
кращению времени экспозиции спектра калибров-
ки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Опыт разработки и эксплуатации низкочастот-
ных корректоров изображения звезды на относи-
тельных отверстиях 1 : 30 (фокус Нэсмита БТА)
и 1 : 13 (1-м телескоп) позволил построить коррек-
тор наклона и кривизны волнового фронта для пер-
вичного фокуса БТА (1 : 4). Испытания корректора
на телескопе подтвердили правильность основных
технических решений. Инерционность механиче-
ских приводов, определяющая предел частот кор-
рекции в фокусе Нэсмита-2, в новом приборе кон-
структивно преодолена. Численные оценки пока-
зали, что для большинства объектов, спектроско-
пия которых нуждается в коррекции изображений,
верхняя граница частот определяется не механи-
ческими свойствами корректора, а чувствительно-
стью системы регистрации объекта и особенностя-
ми алгоритма выработки исполнительных команд.
Найденные технические решения мы планируем
использовать и на других спектральных приборах.

БЛАГОДАРНОСТИ

Наблюдения на 6-м телескопе САО РАН под-
держаны Министерством науки и высшего образо-
вания РФ.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного
задания САО РАН, утвержденного Министерством

науки и высшего образования Российской Федера-
ции.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет
конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev, *Astronomy Letters* **31** (3), 194 (2005).
2. M. Fukugita, K. Shimasaku, and T. Ichikawa, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **107**, 945 (1995).
3. F. Diego, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **97**, 1209 (1985).
4. A. A. Ivanov, V. E. Panchuk, and V. S. Shergin, Preprint No. 155, SAO RAN (Spec. Astrophys. Obs. Russian Academy of Science, Nizhnij Arkhyz, 2001).
5. A. Jones, S. Noll, W. Kausch, et al., *Astron. and Astrophys.* **560**, A91 (2013).
6. V. G. Klochkova, Y. V. Sheldakova, V. V. Vlasyuk, and A. V. Kudryashov, *Astrophysical Bulletin* **75** (4), 468 (2020).
7. V. P. Linnik, in *Novaya tekhnika v astronomii (New Instruments in Astronomy)*, Ed. by O. A. Mel'nikov (Academy of Sciences of the USSR, Moscow, Leningrad, 1963), No. 1, pp. 176–179 [in Russian].
8. E. E. Mamajek, G. Torres, A. Prsa, et al., arXiv e-prints [astro-ph/1510.06262](https://arxiv.org/abs/1510.06262) (2015).
9. S. I. Neizvestny, *Astrofiz. Issled.: Izvestiya Spets. Astrofiz. Obs.* **17**, 26 (1983).
10. V. E. Panchuk and V. L. Afanas'ev, *Astrophysical Bulletin* **66** (2), 233 (2011).
11. V. E. Panchuk, G. A. Chuntunov, and I. D. Naidenov, *Astrophysical Bulletin* **69** (3), 339 (2014).
12. V. E. Panchuk, V. G. Klochkova, and M. V. Yushkin, *Astronomy Reports* **61** (9), 820 (2017).
13. V. E. Panchuk, V. G. Klochkova, M. V. Yushkin, et al., *INASAN Science Reports* **5** (6), 361 (2020).
14. V. E. Panchuk, I. D. Naidenov, V. G. Klochkova, et al., *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **44**, 127 (1997).
15. V. E. Panchuk, M. V. Yushkin, V. G. Klochkova, et al., *Astrophysical Bulletin* **70** (2), 226 (2015).
16. V. P. Panchuk and V. G. Klochkova, in *A Special Astrophysical Observatory. 40 Years Old.*, Ed. by Yu. Yu. Balega, I. I. Romanyuk, I. V. Gosachinskii, V. P. Romanenko, I. P. Kostyuk (Russian Academy of Sciences Special Astrophysical Observatory, Nizhnij Arkhyz, 2006), pp. 32–67 [in Russian].
17. V. A. Tamarov, N. S. Tavolgenskaya, and V. E. Panchuk, in *Proc. 11th All-Russian Conf. on System Synthesis and Applied Synergetics-2022, Nizhnij Arkhyz, Spec. Astrophys. Obs. RAS, Russia, 2022* (Rostov-na-Dony, Izdatel'stvo SFedU, 2022), pp. 279–281.
18. M. V. Yakopov, PhD Thesis (TSURE, Taganrog, 2006) [in Russian].

ESPriF: the Echelle-Spectropolarimeter of the BTA Primary Focus. Correction of Low-Frequency Variations in the Star Image

M. V. Yushkin¹, E. V. Emelianov¹, Yu. B. Verich¹, and V. E. Panchuk¹

¹Special Astrophysical Observatory, RAS, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia

The development of a corrector for low-frequency variations in the star image at the input of ESPriF—the echelle spectropolarimeter of the BTA primary focus—is reported. New technical solutions have made it possible to extend the operating frequency range to 10 Hz for stars brighter than 13^m.

Keywords: *atmospheric effects—instrumentation: adaptive optics—instrumentation: spectrographs*