

УДК 681.5, 520.353

Компенсация низкочастотных и квазистатических аберраций изображений в спектроскопии звезд

Э.В. Емельянов, М.В. Юшкин, Ю.Б. Верич, В.Е. Панчук

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

Аннотация. Сообщается о применяемых в последние два десятилетия на БТА методах коррекции низкочастотных вариаций положения изображения звезды на входе спектральной аппаратуры несмитовского и первичного фокусов телескопа. Новые технические решения позволили продлить диапазон рабочих частот до 6 Гц для звезд ярче 10^m .

Ключевые слова: спектральная аппаратура, коррекция аберраций

1 Введение

С 2000 года в фокусе Нэсмита 6-метрового телескопа БТА работает локальный корректор наклонов волнового фронта (ЛКН, [Иванов и др., 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. С учетом многолетнего опыта эксплуатации БТА системы в 2020 году начата разработка нового локального корректора фокуса Нэсмита БТА. При этом учитывается богатая статистика работы ЛКН, что позволило, в частности, обнаружить анизотропию колебаний изображения, вызываемых ветровой нагрузкой на конструкцию телескопа ([Тамаров и др., 2022](#)).

Источниками низкочастотных колебаний изображения являются:

- ветровая нагрузка на трубу телескопа,
- неидеальность системы управления,
- воздушные потоки вблизи забрала купола,
- волны плотности в атмосфере,
- колебания главного зеркала БТА в оправе,
- изменение температуры узлов телескопа и главного зеркала.

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 волнового фронта необходима.

2 Характеристики низкочастотных колебаний изображений

В работе [Klochkova et al. \(2020\)](#) отмечены выявленные за годы эксплуатации БТА превалирующие частоты колебаний изображения: в диапазоне $0.7 \div 0.9$ Гц по обеим осям, а также в диапазоне $0.8 \div$

¹ <https://www.sao.ru/hq/ssl/>

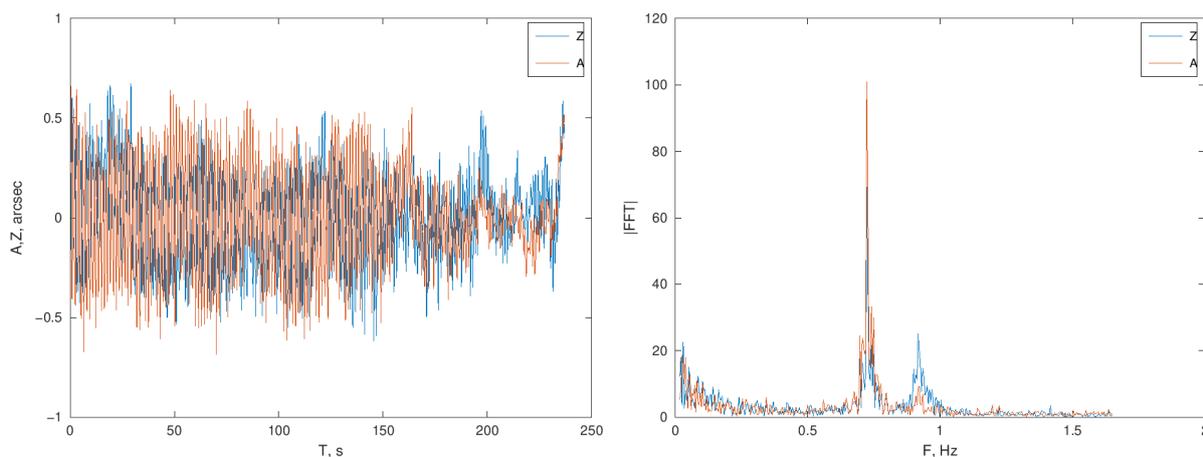


Рис. 1. Колебания изображения звезды в главном фокусе БТА (слева) и спектр колебаний (справа)

1 Гц для оси азимута и 0.4 Гц для оси зенитного расстояния. При коррекции положения объекта через воздействия 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 ($50 \div 200$ мс с точностью вычисления центроида $0''05$). Частотный анализ показал наличие нескольких гармоник колебаний.

На рис. 1 представлен график колебаний изображения Полярной звезды в главном фокусе БТА. На спектре колебаний в низкочастотной области проявляются два пика: в районе $0.7 \div 0.8$ Гц (для обеих осей) и в районе 0.9 Гц (больше проявляется для зенитной оси). Более низкочастотные колебания тонут в шумах, что говорит об их аperiodической структуре. Эти два пика свойственны именно механике телескопа, т. к. при полном отключении системы управления (в т. ч. и маслопитания гидростатических подшипников) спектр колебаний изображения относительно линии естественного тренда никаких периодических структур не имеет, демонстрируя аperiodический характер.

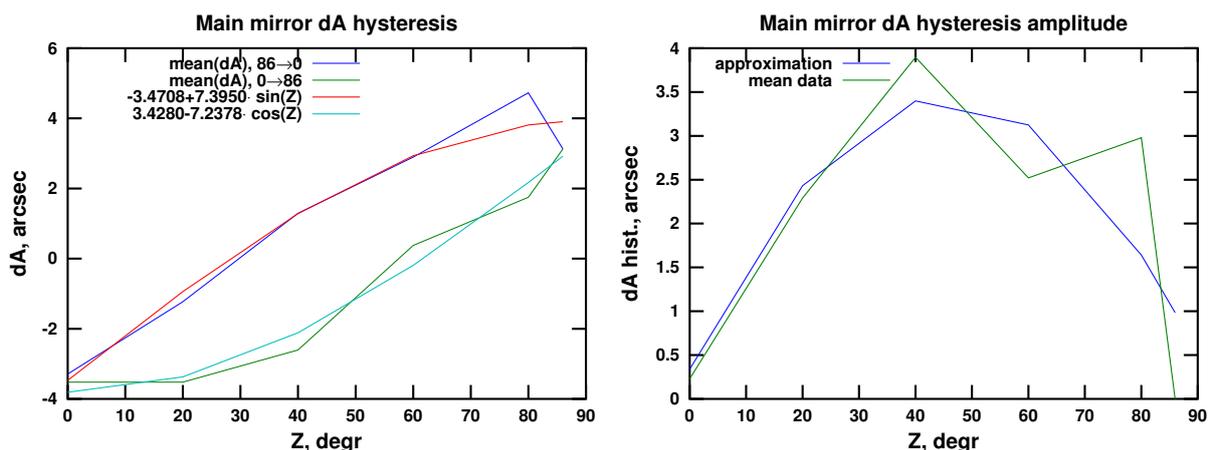


Рис. 2. Гистерезис колебаний главного зеркала

Еще более медленными являются колебания изображений вследствие перемещения главного зеркала (ГЗ) в оправе. На рис. 2 слева изображен график обнаруженных колебаний главного зеркала в оправе. Наибольшей амплитуды достигают колебания, приводящие к смещению изображений по азимутальной оси (около $8''$ во всем рабочем диапазоне зенитных расстояний, что соответствует $16''$

смещения изображения). Из графика видно наличие гистерезиса этих колебаний. Справа на этом же рисунке приведен график гистерезиса (разность между верхней и нижней кривыми), достигающий в максимуме около $3''5$, т. е. при наведении телескопа на объект с использованием усредненных коэффициентов системы коррекции наведения (СКН) отклонение положения объекта от вычисленного вследствие гистерезиса будет составлять до $3''5$. Эти колебания возникают вследствие изменения наклона трубы телескопа по оси Z , соответственно, имеют период в десятки минут или даже часы.

Еще более медленными являются аберрации, вызванные неоднородностью температуры главного зеркала. В 2018 г. на ГЗ БТА было установлено 80 температурных датчиков (60 в углублениях под разгрузки зеркала и 20 на тыльной поверхности). Установлено, что из-за температурного градиента может проявляться как дефокус, так и астигматизм (а также некоторые другие аберрации). Из-за большой температурной инертности ГЗ (Emelianov, 2015) период этих колебаний составляет сутки. Однако известно, что дефокус также возникает из-за изменения температуры штанг трубы телескопа, и эти изменения приводят к заметным результатам в течение десятков минут или единиц часов.

3 Аппаратные решения

В упомянутом ЛКН основным элементом является плоскопараллельная кварцевая пластина, наклоны которой обеспечивают требуемый наклон волнового фронта. Координаты определяются по крыльям изображения звезды на щечках щели при помощи телевизионного подсмотра. Относительное отверстие $1 : 30.7$ позволяет работать плоскопараллельной пластине практически без внесения аберраций.

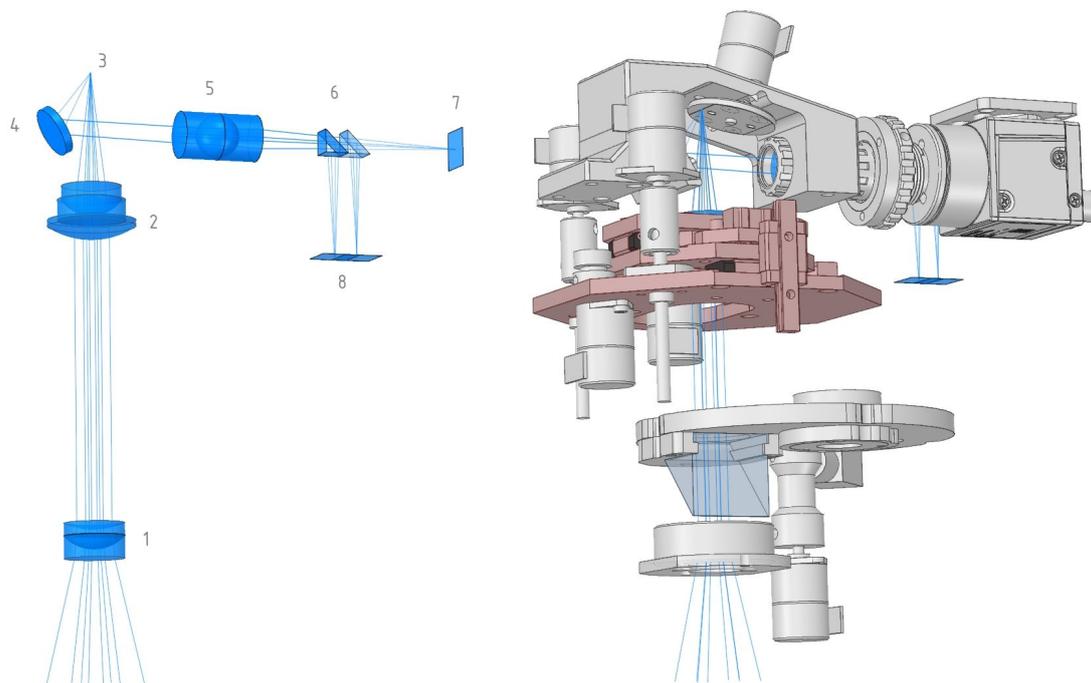


Рис. 3. Предщелевая часть ESPriF. Обозначения: слева – ход лучей, справа – основные элементы и узлы. 1 и 2 – элементы афокального редуктора, 3 – положение щели (деккера), 4 и 5 – оптика подсмотра деккера, 6 – светоделительные элементы детектора дефокусировки, 7 и 8 – приемники подсмотра деккера

При разработке спектрографа первичного фокуса ESPriF относительное отверстие $1 : 4$ и массогабаритные ограничения на аппаратуру первичного фокуса потребовали заменить плоскопараллельную пластину на подвижную линзу. Данный узел получился универсальным: он может работать как со щелевым, так и с оптоволоконным входом. Кроме того, при замене коллиматорного узла на

входе прибора появляется возможность применять такой прибор и на малых телескопах, например на телескопе Zeiss-1000 с относительным отверстием 1 : 13.

Был выполнен оптический расчет новой предцелевой части ESPriF (см. рис. 3), включающей в себя следующие элементы:

1. Афокальный редуктор – линзовая система, преобразующая сходящийся пучок лучей от главного зеркала БТА в сходящийся с тем же относительным отверстием, но с возможностью быстрой компенсации дефокусировки путем смещения одного оптического элемента. Этот же подвижный элемент обеспечивает и компенсацию наклона волнового фронта, смещаясь по двум ортогональным осям в плоскости, перпендикулярной главной оси редуктора.
2. Подсмотр входной щели с детектором дефокусировки – проекционный объектив со светоделительными кубиками в сходящемся пучке.
3. Поляриметрический модуль, включающий две суперхроматические фазосдвигающие пластинки: четвертьволновую и полуволновую, а также пластину Савара с возможностью ввода последней за входной щелью спектрографа с одновременной компенсацией дефокусировки посредством сдвига коллиматора.
4. Канал калибровок.

На рис. 3 слева обозначены основные оптические элементы входного модуля подвешенного спектрографа. В случае целевого ввода элементы 6 и 8 отсутствуют. При оптоволоконном вводе вместо зеркала 4 вставляется светоделительный куб, отбирающий до 10 % света в канал подсмotra, и светоприемник 7 перемещается в положение 8, обеспечивая одновременно контроль дефокусировки и смещения изображения.

Помимо трехкоординатной подвижки и турели щелей, во входном узле присутствуют узлы ввода-вывода калибровок и поляризационной оптики. Все эти элементы приводятся в движение миниатюрными шаговыми двигателями. Для управления подвижными элементами входного узла разработан универсальный контроллер восьми независимых шаговых двигателей², подключающийся к компьютеру посредством интерфейсов USB или CAN.

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

Получение изображений с камеры подсмotra является независимой операцией. Последнее полученное изображение содержится в буфере, который по сетевому запросу может быть передан любому клиенту для визуального отображения или для вычислений координат центроида звезды. В режиме автоматической коррекции отдельное приложение – демон корректора – управляет уровнем усиления и экспозицией CMOS-светоприемника подсмotra, 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 центроида производится определение необходимой величины смещения линзы для компенсации соответствующего наклона волнового фронта. Эта величина вычисляется программным ПИД-регулятором. В случае достижения предела перемещения линзы корректора выполняется смещение приводами телескопа (в режиме коррекции) так, чтобы текущее положение изображения оказалось в центре допустимой области перемещения линзы. Установившиеся при этом вследствие движения телескопа затухающие колебания изображения компенсируются перемещениями линзового корректора.

4 Заключение

Опыт разработки и эксплуатации низкочастотных корректоров изображения звезды на относительных отверстиях 1 : 30 (фокус Нэсмита БТА) и 1 : 13 (1-метровый телескоп) позволил построить

² <https://github.com/eddyem/stm32samples/tree/master/F3:F303/Multistepper>

корректор наклона и кривизны волнового фронта для первичного фокуса БТА (1 : 4). Испытания корректора на телескопе подтвердили правильность основных технических решений. Инерционность механических приводов, определяющая предел частот коррекции в фокусе Нэсмит-2, в новом приборе конструктивно преодолена. Численные оценки показали, что для большинства объектов, спектроскопия которых нуждается в коррекции изображений, верхняя граница частот определяется не механическими свойствами корректора, а чувствительностью системы регистрации объекта и особенностями алгоритма выработки исполнительных команд. Найденные технические решения мы планируем использовать и на других спектральных приборах.

Благодарности. Наблюдения на 6-метровом телескопе САО РАН поддержаны Министерством науки и высшего образования РФ. Финансовая поддержка осуществлялась по гранту № 075-15-2022-262 “Многоволновое исследование нестационарных процессов во Вселенной” (13.МНПМУ.21.0003).

Литература

- Иванов А.А., Панчук В.Е., Шергин В.С., 2001. Препринт САО РАН № 155. С. 1–19. [Ivanov A.A., Panchuk V.E., Shergin V.S., 2001. SAO RAS preprint No 155, pp. 1–19. (In Russ.)]
- Тамаров В.А., Таволжанская А.С., Панчук В.Е., 2022. XI Всероссийская научная конференция “Системный синтез и прикладная синергетика”. Ростов-на-Дону – Таганрог: Издательство Южного федерального университета. С. 279–281. [Tamarov V.A., Tavolzhanskaya A.S., Panchuk V.E., 2022. XI All-Russian conference “System synthesis and applied synergetics”. Rostov-on-Don – Taganrog: South Federal University Publishing House, pp. 279–281. (In Russ.)]
- Emelianov E.V., 2015. *Astrophys. Bull.*, vol. 70, iss. 3, pp. 362–370.
- Klochkova V.G., Sheldakova Yu.V., Vlasyuk V.V., Kudryashov A.V., 2020. *Astrophys. Bull.*, vol. 75, iss. 4, pp. 468–481.
- Panchuk V.E., Chuntunov G.A., Naidenov I.D., 2014. *Astrophys. Bull.*, vol. 6, iss. 3, pp. 339–355.
- Panchuk V.E., Klochkova V.G., Yushkin M.V., 2017. *Astron. Rep.*, vol. 61, iss. 9, pp. 820–831.

Compensation of low-frequency and quasi-static aberrations in stellar spectroscopy

E.V. Emelianov, M.V. Yushkin, Yu.B. Verich, V.E. Panchuk

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

Abstract. We report methods for correcting low-frequency variations in the position of the star image at the input of the spectral equipment of the Nasmyth and primary focuses of BTA, used for the past two decades at the telescope. New technical solutions have made it possible to extend the operating frequency range to 6 Hz for stars brighter than 10^m .

Key words: spectral instrumentation, aberration correction