

УДК 621.3.092.5

СТАБИЛИЗАЦИЯ АСТРОНОМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ УПРАВЛЯЕМОГО ПЛОСКОГО ЗЕРКАЛА

С. Ю. Бокало, И. М. Бокашов, Д. М. Ляхов,
С. В. Пикулев, А. В. Черных

*Научно-исследовательский институт научно-производственного объединения «ЛУЧ»,
142100, г. Подольск Московской обл., ул. Железнодорожная, 24
E-mail: svpikulev@luch.podolsk.ru*

Разработан опытный образец ключевого элемента адаптивно-оптической системы — корректора наклонов световых пучков, представляющего собой плоское управляемое зеркало. Реализован алгоритм коррекции атмосферных искажений световых волн низкой интенсивности, создано программное обеспечение, функционирующее в режиме реального времени. В лабораторных экспериментах достигнуто значение ширины полосы замкнутой системы 100 Гц. Перспективность применения созданного программного обеспечения подтверждена в ходе дневных наблюдений за звёздами.

Ключевые слова: адаптивно-оптическая система, атмосферная турбулентность, волновой фронт, метод наименьших квадратов, пропорционально-дифференциальный регулятор.

DOI: 10.15372/AUT20180108

Введение. Мерцание небесных светил, вызванное искажениями распространяющегося в атмосфере излучения, отрицательно сказывается на формировании изображения. В современных наземных телескопах коррекция влияния турбулентности осуществляется с помощью цифровых адаптивно-оптических систем (АОС) на основе данных, полученных устройствами, в состав которых обычно входят приборы с зарядовой связью (ПЗС). Для подавления угловых колебаний световых пучков применяются корректоры наклонов (КН) — управляемые лёгкие зеркала, обладающие значительной механической жёсткостью. Большинство удовлетворяющих этим условиям КН имеют либо небольшие размеры, либо низкую резонансную частоту, либо малодоступны по цене [1–3].

Наземные астрономические наблюдения осложнены наличием атмосферной турбулентности, поскольку флуктуации показателя преломления воздушной среды приводят к размыванию изображений тусклых космических объектов. Эта проблема решается, в частности, методами адаптивной оптики (АО) путём устранения нерегулярных искажений света с помощью управляемых оптических элементов. Поскольку значительный вклад в аберрации вносят наклоны волнового фронта, распространяющегося в атмосфере светового пучка, цель предлагаемой работы — создание устройства и реализация способа, позволяющих компенсировать эти наклоны.

Конструкция и технические характеристики корректоров наклонов. С учётом атмосферных аберраций, подлежащих исправлению, нами разработан широкополосный КН, показанный на рис. 1. Его конструкция включает в себя зеркальную пластину из кремния диаметром 60 мм, закреплённую в металлической оправе. Наклонами и перемещением оправы управляют три многослойных пьезоэлектрических привода, установленных между оправой и массивным металлическим корпусом. Поджатие и обратный ход всех приводов обеспечивается одной прорезной пружиной. Корпус, прорезная пружина и оправа выполнены как единое целое. Усилие поджатия приводов регулируется установочными винтами корпуса.

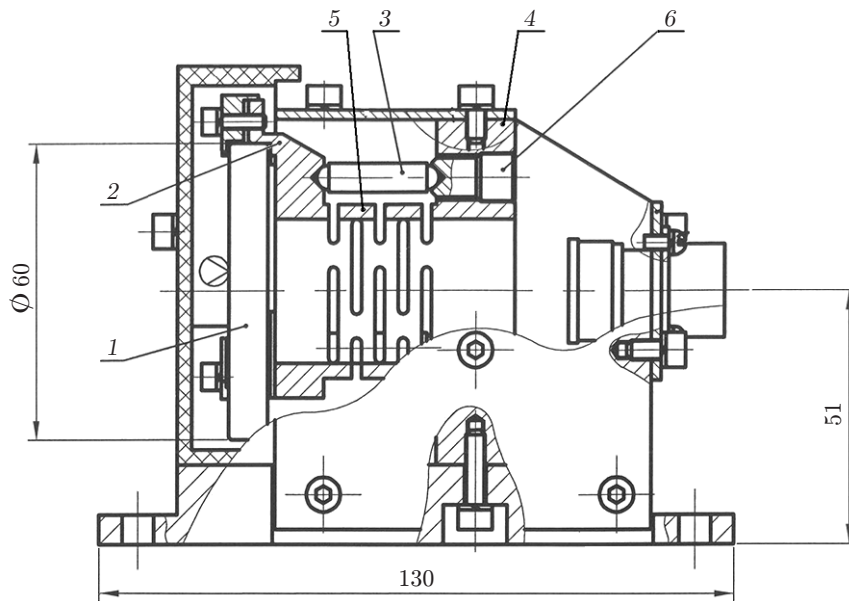


Рис. 1. Общий вид КН: 1 — зеркальная пластина, 2 — оправка, 3 — пьезоэлектрический привод, 4 — корпус, 5 — прорезная пружина, 6 — установочный винт

На экспериментальной установке, представленной далее, измерены технические характеристики КН: диапазон углов наклона зеркальной пластины $\pm(4 \cdot 10^{-4})$ рад, первая собственная частота механических колебаний 1150 Гц.

Алгоритм управления корректорами наклонов. В условиях расширяющейся городской застройки наблюдениям за небесными светилами мешают шумовая засветка и вибрации промышленно-транспортного оборудования. Для решения проблем космического мусора и возможной астероидной атаки необходим круглосуточный мониторинг космического пространства, в частности в видимом диапазоне. Возможность проведения таких исследований днём, при высоком уровне фона, появилась в результате стремительного развития фотоники, вычислительной техники и методов обработки изображений [4, 5].

Предлагаемый метод управления КН включает в себя, прежде всего, регистрацию изображений небесных светил и оценку их параметров. В качестве модели распределения сигнальных фотоэлектронов в плоскости изображения используется двумерная гауссоида, при этом в каждой точке (x, y) ортогональной системы координат освещённость имеет вид [6]

$$I(x, y) = b(x, y) + \frac{I_0}{2\pi\sigma^2} \exp \left[-\frac{(x - x_{\text{ц}})^2 + (y - y_{\text{ц}})^2}{2\sigma^2} \right], \quad (1)$$

где $b(x, y)$ — шумовая составляющая яркости; σ , I_0 — параметры гауссова распределения; $x_{\text{ц}}$, $y_{\text{ц}}$ — искомые координаты центра.

Будем считать размеры области интересов, внутри которой находится изображение звезды, достаточно малыми, чтобы в качестве модели пространственного распределения шума выбрать плоскость

$$b(x, y) = b_0 + b_1x + b_2y. \quad (2)$$

Постоянные коэффициенты в формулах (1), (2) и координаты центра $(x_{\text{ц}}, y_{\text{ц}})$ находим с помощью метода наименьших квадратов (МНК) [7]. Разницы мгновенных значений искомых и заранее заданных (x_3, y_3) координат центра образуют вектор-строку

$\tilde{X} = (x_{ц} - x_3; y_{ц} - y_3)$, умножение которой на матрицу коэффициентов регрессии B даёт матрицу управляющих напряжений $\tilde{U} = \tilde{X}B$ [8]. Матрица B находится в результате процедуры калибровки, выполняемой перед коррекцией.

Калибровка адаптивно-оптической системы. Условие МНК задаётся следующим образом:

$$Sp((XB - U)^T(XB - U)) \rightarrow \min, \quad (3)$$

где Sp — след матрицы. Сделаем ряд преобразований с выражением (3):

$$\begin{aligned} Sp((XB - U)^T(XB - U)) &= Sp((B^T X^T - U^T)(XB - U)) = \\ &= Sp(B^T X^T XB + U^T U - B^T X^T U - U^T XB) = \\ &= Sp(B^T X^T XB) + Sp(U^T U) - 2Sp(B^T X^T U). \end{aligned} \quad (4)$$

Возьмём частную производную выражения (4) по матрице B^T , приравняем её к нулю (условие минимума) и получим $2X^T XB = 2X^T U$. Отсюда формула для вычисления матрицы B будет иметь вид

$$B = (X^T X)^{-1} X^T U. \quad (5)$$

Чтобы найти матрицу коэффициентов регрессии по формуле (5), проведём калибровку АОС, подавая на электроды трёх приводов КН постоянные напряжения

$$U = \begin{pmatrix} u_{11} & u_{21} & u_{31} \\ u_{21} & u_{22} & u_{32} \\ \dots & \dots & \dots \\ u_{m1} & u_{m2} & u_{m3} \end{pmatrix}$$

и фиксируя изменения координат

$$X = \begin{pmatrix} x_1 & y_1 \\ x_2 & y_2 \\ \dots & \dots \\ x_m & y_m \end{pmatrix},$$

измеренные с помощью ПЗС-камеры. Количество строк в матрицах X и U равняется числу измерений m . Каждый столбец полученных матриц центрируется, иными словами, из элемента каждого столбца вычитается его среднее значение.

Частотный метод анализа качества адаптивно-оптической системы. Законом управления АОС выбран пропорционально-дифференциальный регулятор. В этом случае выходной сигнал в момент времени t имеет вид

$$\tilde{Y}(t) = k\tilde{X}(t)B + k_d(\dot{\tilde{X}}(t) - \tilde{X}(t - \Delta t))B,$$

где k, k_d — коэффициенты усиления пропорциональной и дифференциальной частей регулятора соответственно, Δt — шаг дискретизации по времени.

В качестве модели АОС выбран интегратор с временной задержкой τ , необходимой для вычисления координат, выработки и передачи сигналов управления. При этом передаточная функция ошибки замкнутой цифровой системы в области временных частот f задаётся выражением [9]

$$\Phi(f) = 1 / \left(1 + \frac{f_{bw} \exp(-2\pi i \tau f)}{i f} \right), \quad (6)$$

где $f_{bw} = k f_S / 2\pi$ — ширина полосы замкнутой системы при $\tau = 0$ ($f_S = 1/\Delta t$ — частота обратной связи).

Легко найти модуль передаточной функции (6), представляющий собой амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) замкнутой системы [10]:

$$|\Phi(f)| = 1 / \left| 1 - \frac{f_{bw}}{f} \sin(2\pi \tau f) - i \frac{f_{bw}}{f} \cos(2\pi \tau f) \right|,$$

а также квадрат модуля передаточной функции ошибки замкнутой системы:

$$|\Phi(f)|^2 = \left[1 + (f_{bw}/f)^2 - 2(f_{bw}/f) \sin(2\pi \tau f) \right]^{-1}. \quad (7)$$

Выражение (7) тождественно функции подавления ошибки, используемой для вычисления дисперсии остаточной ошибки волнового фронта [11]

$$\varepsilon_{\text{res}}^2 = \int_0^{\infty} |\Phi(f)|^2 S_d(f) df, \quad (8)$$

где $S_d(f)$ — спектральная плотность мощности возмущения, подлежащего коррекции.

Из формулы (8) следует, что для знания функции $|\Phi(f)|^2$ достаточно измерить АЧХ разомкнутой и замкнутой систем. С учётом того что фаза волны пропорциональна угловому смещению светового пучка, имеем $|\Phi(f)|^2 = \varepsilon_{\text{res}}^2(f) / \sigma^2(f)$, где $\sigma^2(f)$, $\varepsilon_{\text{res}}^2(f)$ — частотные характеристики дисперсии углового смещения изображения до и после коррекции соответственно.

Программное обеспечение для управления корректорами наклонов позволяет распознавать пятно на фоне помех, вычислять его координаты, рассчитывать управляющие напряжения. Обработка изображения в лабораторных экспериментах осуществляется в режиме реального времени с помощью процессора Intel Core i7 с эффективной тактовой частотой 3 ГГц под управлением операционной системы Astra Linux v.1.11. Алгоритм распознавания пятна включает автоматический вычет фона, предварительную фильтрацию помех и в целях повышения быстродействия реализован на языке Assembler с поддержкой распараллеливания вычислений.

Идентификация адаптивно-оптической системы. Для проверки возможностей метода управления нами создан экспериментальный макет АОС, где вместо звёздного света используется ослабленное нейтральными светофильтрами излучение лазера (рис. 2). Лазерный пучок, расширенный коллиматором, последовательно отражается от зеркал двух корректоров наклонов и попадает на светоделитель. Часть пучка проходит сквозь светоделитель и попадает в датчик наклонов (ДН). В качестве ДН использована 12-битная цифровая камера Prosilica GE680 с интерфейсом Gigabit Ethernet [12]. Накопленная за время одного цикла измерений в ДН информация о величине и направлении углового смещения лазерного пучка перерабатывается процессором в сигналы управления, которые усиливаются и в виде управляющих напряжений поступают на электроды пьезоактюаторов корректора наклонов (КН-1) для стабилизации углового смещения лазерного пучка. Усиление

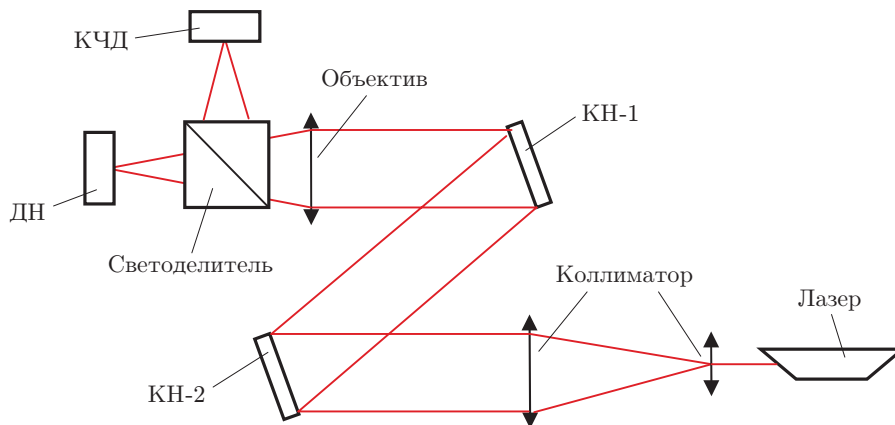


Рис. 2. Упрощённая оптическая схема установки (КЧД — координатно-чувствительный датчик)

сигналов управления в диапазоне 0–120 В со скоростью нарастания до 70 кВ/с происходит в многоканальном усилительном блоке. Регистрация углового смещения и угловой стабильности пучка осуществляется согласно [13] с помощью координатно-чувствительного датчика, расположенного в фокальной плоскости объектива. Возмущающее воздействие задаётся в виде напряжения, подаваемого на электроды пьезоактюаторов корректора наклонов (КН-2) для углового смещения лазерного пучка.

Путём измерений времени реакции системы на воздействие в виде прямоугольного импульса была найдена величина временной задержки $\tau \approx 0,63$ мс. Также на макете (см. рис. 2) получена экспериментальная АЧХ КН (рис. 3). В замкнутой системе применялся цифровой фильтр низких частот для подавления резонансных колебаний. Частота среза f_c выбиралась с учётом положения резонансного пика, показанного на графике рис. 3.

Пример графика функции подавления ошибки представлен на рис. 4. Ширина полосы замкнутой системы по уровню $|\Phi(f_{bw})|^2 = 0,5$ составляет 100 Гц. Отличие измеренной характеристики от расчётной вызвано погрешностью определения координат пятна.

Натурные испытания программного обеспечения. Главной трудностью дневных наблюдений за звёздами является высокий и зачастую непостоянный уровень шума, вызванный рассеянным солнечным светом (рис. 5). Для увеличения отношения сигнал/шум (С/Ш) в программу управления КН нами введена опция автоматической регулировки выдержки. При этом время экспозиции увеличивается согласно мгновенному уровню шума в каждом кадре. Операции поиска случайно меняющихся во времени параметров

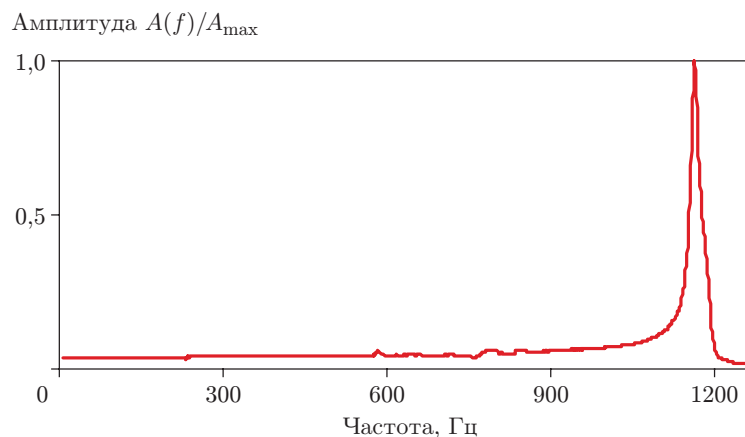


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика корректора наклонов

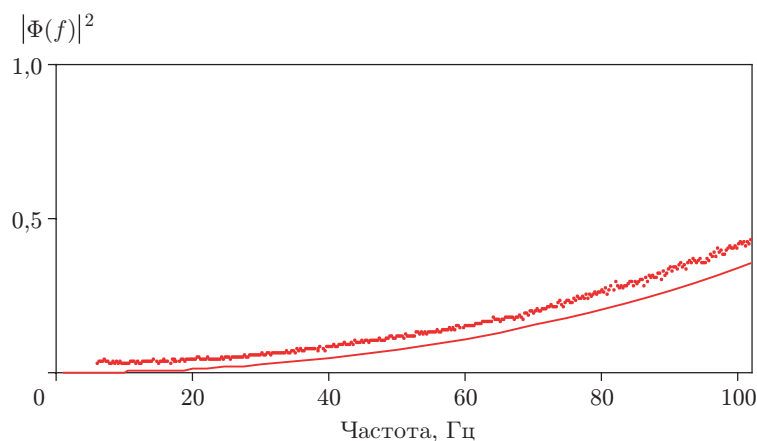


Рис. 4. Функция подавления ошибки для значений параметров $f_c = 1050$ Гц, $k = 1,1$ (точки — эксперимент, сплошная кривая — расчёт)

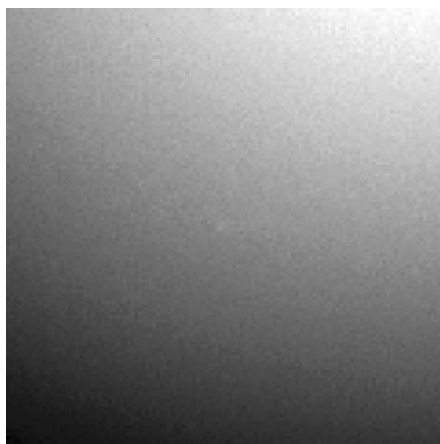


Рис. 5. Дневное изображение звезды величиной $3,3^m$. Отношение С/Ш $\approx 0,07$ измерено с помощью плагина программы AstroImageJ v.3.2.0

пространственного распределения сигнала и шума полностью автоматизированы. В результате применения ПО, созданного для реализации регрессионного алгоритма управления, нам удалось уменьшить среднеквадратическое отклонение координат изображений звёзд в 1,3–2,5 раза.

Заключение. Разработан пьезоэлектрический корректор наклонов с первой собственной частотой механических колебаний 1150 Гц и диапазоном углов наклона зеркальной пластины $\pm(4 \cdot 10^{-4})$ рад. Применение регрессионного алгоритма поиска центраида позволяет определить координаты изображений точечных источников при отношении $C/Ш \geq 0,1$. Созданная с помощью языка Assembler программа обеспечивает выполнение ресурсоёмких расчётов в режиме реального времени. Проведена идентификация АОС, подтвердившая способность коррекции наклонов световых пучков низкой интенсивности в полосе частот до 100 Гц. Использование созданного ПО в обработке данных дневных астрономических наблюдений дало возможность снизить дрожание изображения примерно в 1,3–2,5 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шанин О. И. Адаптивные оптические системы коррекции наклонов. Резонансная адаптивная оптика. М.: Техносфера, 2013. 296 с.

2. **Watson J.** Tip-tilt correction for astronomical telescopes using adaptive control // Proc. of the Wescon Integrated Circuit Expo 1997. Santa Clara, USA, 1997. URL: <http://www.osti.gov/scitech/biblio/647009> (дата обращения: 5.07.2017).
3. **Optics in Motion LLC.** URL: <http://www.opticsinmotion.net/index.html> (дата обращения: 5.07.2017).
4. **Hart M., Hope S. J. D., Nagy J. et al.** Quantitative measurements of daytime near infrared sky brightness at the AEOS 3.6 m telescope // Proc. of the AMOS Surveillance Technologies Conf. Maui, USA, 2014. URL: <http://amostech.com/TechnicalPapers/2014/Poster/HART.pdf> (дата обращения: 5.07.2017).
5. **Jefferies S., Hart M., Hope D., Murphy N.** Daylight operation of a sodium laser guide star for wave front sensing // Proc. of the AMOS Surveillance Technologies Conf. Maui, USA, 2016. URL: http://amostech.com/TechnicalPapers/2016/Adaptive-Optics_Imaging/Jefferies.pdf (дата обращения: 5.07.2017).
6. **Vereš P., Jedicke R., Denneau L. et al.** Improved asteroid astrometry and photometry with trail fitting // Publ. of the Astronom. Soc. of the Pacific. 2012. **124**, N 921. P. 1197–1207.
7. **Ляхов Д. М.** Оптимальное размещение приводов для квадратных зеркал со свободными краями // Автометрия. 2016. **52**, № 1. С. 70–78.
8. **Федоров В. В.** Теория оптимального эксперимента. М.: Наука, 1971. 312 с.
9. **Токовинин А. А.** Лекции по адаптивной оптике: Пер. с англ. URL: <http://www.ctio.noao.edu/~atokovin/tutorial/> (дата обращения: 5.07.2017).
10. **Бесекерский В. А., Попов Е. П.** Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1975. 768 с.
11. **Whiteley M. R., Gibson J. S.** Adaptive laser compensation for aero-optics and atmospheric disturbances // Proc. of the 38th Plasmadynamics and Lasers Conf. Florida, USA, 2007. DOI: 10.2514/6.2007-4012. URL: <https://arc.aiaa.org/doi/pdf/10.2514/6.2007-4012> (дата обращения: 5.07.2017).
12. **G4 Technology Co., Ltd.** URL: http://g4.com.tw/web/file/product/demo/740-Prosilica_GE_DataSheet_680_en.pdf (дата обращения: 5.07.2017).
13. **ГОСТ Р ИСО 11670-2010.** Лазеры и лазерные установки (системы). Методы измерений параметров лазерных пучков. Стабильность положения пучка. М.: Стандартинформ, 2011. 14 с.

Поступила в редакцию 5 июля 2017 г.
